

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

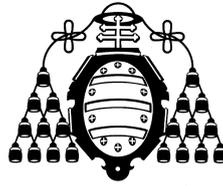
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica,
de Computadores y Sistemas

TESIS DOCTORAL

**TÉCNICAS AVANZADAS DE PERFILOMETRÍA
ÓPTICA IN-SITU BASADA EN
INTERFEROMETRÍA DE DESPLAZAMIENTO
LATERAL PARA MEDIDAS
SUBMICROMÉTRICAS**

Dña. María Frade Rodríguez

Septiembre 2012



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica,
de Computadores y Sistemas

TESIS DOCTORAL

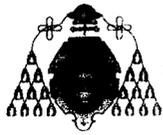
**TÉCNICAS AVANZADAS DE PERFILOMETRÍA
ÓPTICA IN-SITU BASADA EN
INTERFEROMETRÍA DE DESPLAZAMIENTO
LATERAL PARA MEDIDAS
SUBMICROMÉTRICAS**

Memoria presentada para la obtención del
grado de Doctor
por la Universidad de Oviedo

Autor: Dña. María Frade Rodríguez

Director: D. José María Enguita González
Co-Director: D. Ignacio Álvarez García

Gijón, Septiembre 2012



RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

1.- Título de la Tesis	
Español/Otro Idioma: Técnicas avanzadas de perfilometría óptica in-situ basada en interferometría de desplazamiento lateral para medidas submicrométricas	Inglés: Advanced techniques of in-situ optical profilometry based on Lateral Shearing Interferometry for submicrometric measurements.
2.- Autor	
Nombre: MARIA FRADE RODRIGUEZ	I
Programa de Doctorado: Control de Procesos, Electrónica Industrial e Ingeniería Eléctrica (R.D. 77811998)	
Órgano responsable: Universidad de Oviedo	

RESUMEN (en español)

La tecnología que va a ser objeto de estudio y sobre la que se realizarán las contribuciones de la presente Tesis es Interferometría de Desplazamiento Lateral (Lateral Shearing Interferometry) empleada para mediciones de rango. Esta aplicación, aunque no es la clásica utilidad de **esta tecnología**, ha sido tratada por numerosos autores, ya que permite construir interferómetros de camino común que **proporcionan** gran estabilidad, e **inmunidad** ante vibraciones y condiciones ambientales desfavorables. Un claro ejemplo de **este tipo de aplicaciones** es la llamada Holografía Conoscópica, que ha sido satisfactoriamente utilizada para **este propósito en numerosas ocasiones**.

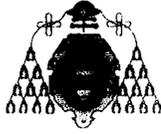
Las medidas obtenidas con este tipo de dispositivos tienen gran interés en **perfilometría** óptica para el control dimensional de muchos procesos, ya que presentan ciertas ventajas **con respecto** a otro tipo de dispositivos: permiten trabajar **desde** un amplio rango de distancias y no requieren luz coherente ni gran estabilidad en el montaje.

Nuestro **sistema es** un perfilómetro interferométrico de **camino** común basado en un **Savart** plate. Se han realizado ciertas adaptaciones en la configuración, que permiten proyectar una línea **láser** en vez de un punto, con lo que la información de distancia de un **perfil** completo se obtiene en una única adquisición, permitiendo alcanzar altas velocidades en los escaneos superficiales y **aplicabilidad in-situ**.

A pesar de todas estas ventajas competitivas, existe una resolución máxima por **encima** de la cual este tipo de dispositivos aplicables in-situ no se ha utilizado. Cuando **se** requieren altas resoluciones -medidas **submicrométricas**-, se tiende a utilizar otro tipo de tecnologías, generalmente basadas en microscopía. En estos casos, los interferómetros se construyen en el **cabezal** de un microscopio, lo que proporciona **precisiones** muy altas, pero demanda unas condiciones de trabajo altamente controladas, y son métodos lentos, que **en** ningún caso pueden ser aplicados in-situ, ni permiten inspeccionar el 100% de la producción.

La presente **Tesis** está dedicada específicamente al estudio de técnicas, métodos, configuraciones, algoritmos de procesamiento y cualquier otra **faceta** de la **perfilometría** óptica que permitan la **aplicabilidad** in-situ de un sistema destinado a mediciones **submicrométricas**. Para ello se ha estudiado en profundidad el comportamiento de un dispositivo basado en Interferometría de Desplazamiento Lateral diseñado para tal fin.

Se han realizado contribuciones **originales** destinadas a las dos posibles **configuraciones** del prototipo: **triangulada** y **colineal**. En cuanto a la triangulada, se ha extendido el rango de medida sin ambigüedad **mediante** la utilización de técnicas de múltiple longitud de onda. Varias alternativas han sido presentadas para **este fin**. Respecto al montaje **colineal**, se ha propuesto



un método que aprovecha el conocimiento extraído de un profundo análisis de los parámetros que determinan el camino óptico. Este método es capaz de aumentar la precisión final de la medida en casi dos órdenes de magnitud. Adicionalmente, se han propuesto algoritmos para minimizar los tiempos de procesamiento aplicables a cada configuración específica. Para la demostración de todas las aportaciones realizadas se han proporcionado numerosos ejemplos experimentales de inspección superficial, control de acabados y análisis de parámetros de rugosidad.

RESUMEN(en Inglés)

This Thesis studies Lateral Shearing Interferometry applied to range sensing. Although it is not the classical use of the technology, this application has already been reported by many authors, as it allows building common-path interferometers which provide very stable measurements, with immunity against vibrations and harsh environmental conditions. A clear example of this kind of devices is the so-called Conoscopic Holography, technology which has been successfully proven for this purpose in many occasions.

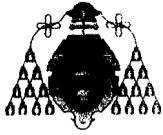
Range sensing by Lateral Shearing Interferometry is highly interesting for optical profilometry and dimensional control in many industrial processes, as it presents several advantages with respect to other technologies: it is possible to measure from a wide range of working distances depending on the aimed resolution, and it does require neither coherent light nor high stability in the setup.

The system developed for this Thesis is a common-path interferometric profilometer based on a Savart plate. The configuration has been adapted to project a laser line instead of a point, so a whole distance profile is obtained in each single acquisition. This brings high scanning speed and allows in-situ applicability.

In spite of these competitive advantages, this type of devices applicable in-situ had never been used beyond a certain resolution. When high resolutions are demanded -sub-micrometric range-, the tendency is to use other types of technologies, usually based on microscopy. In these cases the interferometers are built into a microscope head, which can provide very high precision, but demand highly controlled environments and are slow in nature, so it is not possible to inspect the 100% of the production.

This Thesis is dedicated specifically to the study of techniques, methods, configurations, processing algorithms, or any other aspect of the optical profilometry which facilitates the in-situ applicability of the system when used for sub-micrometric measurements. A deep study of a device based on Lateral Shearing Interferometry designed for this purpose has been carried out.

Original contributions for both of the possible configurations of the prototype (triangulated and collinear) have been addressed. With respect to the triangulated setup, the maximum measurable range without ambiguity has been extended by using multiple wavelength



UNIVERSIDAD DE OVIEDO
Vicerrectorado de Internacionalización
y Postgrado



CENTRO INTERNACIONAL
DE POSTGRADO
CAMPUS DE EXCELENCIA
INTERNACIONAL

techniques. Several approaches have been presented for this goal. Concerning the collinear configuration, a method that takes advantage of the extracted knowledge from a deep study of the optical path parameters has been proposed. This method is able to increase the precision of the distance measurement up to two orders of magnitude. Moreover, algorithms to decrease the processing time for each specific configuration have been proposed and analyzed. Many experimental examples have been provided to test the applicability of the sensor in real problems such as surface inspection, finishing control, or roughness parameters evaluation.

SR. DIRECTOR DE DEPARTAMENTO DE ING. ELÉCTRICA, ELECTRONICA C. I. S. I.
SR. PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE DOCTORADO EN _____

Agradecimientos

Quisiera mostrar mi agradecimiento a todas las personas e instituciones que de una u otra forma han hecho posible mis andanzas por la Universidad, y por supuesto, el desarrollo de esta Tesis.

El primero de todos, y con un cariño y reconocimiento especial a Chema, mi tutor y sobre todo mi aliado diario desde el primer momento en el que le mostré mi interés por hacer el doctorado. Desde ese día hasta hoy ha estado apoyándome, además de explicar muy pacientemente y animarme a probar todas esas cosas que se puede hacer con la luz y que yo me resistía a creer.

Por supuesto, la otra pieza clave de esta Tesis es Nacho, con quién descubrí mi pasión por la óptica, y quién siempre está más que preparado a echar un cable cuando hace falta. Miles de gracias a los dos.

Tampoco puedo olvidar en estas líneas a todos los demás compañeros con los que he coincidido en el grupo de investigación y en el Departamento.

En cuanto a instituciones, esta Tesis ha sido posible gracias a la financiación otorgada por el Ministerio de Educación a través del programa nacional para Formación de Profesorado Universitario (FPU), referencia del proyecto AP2008-00528, y a los fondos obtenidos del Ministerio de Ciencia e Innovación y la Unión Europea dentro del programa FEDER con referencia DPI2007-64243. Ha sido desarrollada en el amparo de la Universidad de Oviedo, y de la Universidad Politécnica de Varsovia, dónde me gustaría resaltar la inestimable ayuda y acogida de la profesora Malgorzata Kujawinska

vi

durante mi estancia.

Pero para institución de verdad mis padres. Sin su ayuda, su ejemplo y su cariño, toda esta aventura de hacer una Tesis no hubiera sido posible. Os la dedico a vosotros junto con Dani, que tampoco ha parado ni un sólo segundo de cuidar de mi, y de mi Tesis, claro está. Dani ha estado presente en cada paso que he dado, vigilándome en silencio desde la puerta del laboratorio, y solucionando cada pequeño problema ya antes de que me diera tiempo a contárselo. Con este equipo nada puede salir mal. Gracias.

*A mi familia
y amigos.*

Resumen

La tecnología que va a ser objeto de estudio y sobre la que se realizarán las contribuciones de la presente Tesis es Interferometría de Desplazamiento Lateral (*Lateral Shearing Interferometry*) empleada para mediciones de rango. Esta aplicación, aunque no es la clásica utilidad de esta tecnología, ha sido tratada por numerosos autores, ya que permite construir interferómetros de camino común que proporcionan gran estabilidad, e inmunidad ante vibraciones y condiciones ambientales desfavorables. Un claro ejemplo de este tipo de aplicaciones es la llamada Holografía Conoscópica, que ha sido satisfactoriamente utilizada para este propósito en numerosas ocasiones.

Las medidas obtenidas con este tipo de dispositivos tienen gran interés en perfilometría óptica para el control dimensional de muchos procesos, ya que presentan ciertas ventajas con respecto a otro tipo de dispositivos: permiten trabajar desde un amplio rango de distancias y no requieren luz coherente ni gran estabilidad en el montaje.

Nuestro sistema es un perfilómetro interferométrico de camino común basado en un *Savart plate*. Se han realizado ciertas adaptaciones en la configuración, que permiten proyectar una línea láser en vez de un punto, con lo que la información de distancia de un perfil completo se obtiene en una única adquisición, permitiendo alcanzar altas velocidades en los escaneos superficiales y aplicabilidad in-situ.

A pesar de todas estas ventajas competitivas, existe una resolución máxima por encima de la cual este tipo de dispositivos aplicables in-situ no

x

se ha utilizado. Cuando se requieren altas resoluciones -medidas submicrométricas-, se tiende a utilizar otro tipo de tecnologías, generalmente basadas en microscopía. En estos casos, los interferómetros se construyen en el cabezal de un microscopio, lo que proporciona precisiones muy altas, pero demanda unas condiciones de trabajo altamente controladas, y son métodos lentos, que en ningún caso pueden ser aplicados in-situ, ni permiten inspeccionar el 100 % de la producción.

La presente Tesis está dedicada específicamente al estudio de técnicas, métodos, configuraciones, algoritmos de procesamiento y cualquier otra faceta de la perfilometría óptica que permitan la aplicabilidad in-situ de un sistema destinado a mediciones submicrométricas. Para ello se ha estudiado en profundidad el comportamiento de un dispositivo basado en Interferometría de Desplazamiento Lateral diseñado para tal fin.

Se han realizado contribuciones originales destinadas a las dos posibles configuraciones del prototipo: triangulada y colineal. En cuanto a la triangulada, se ha extendido el rango de medida sin ambigüedad mediante la utilización de técnicas de múltiple longitud de onda. Varias alternativas han sido presentadas para este fin. Respecto al montaje colineal, se ha propuesto un método que aprovecha el conocimiento extraído de un profundo análisis de los parámetros que determinan el camino óptico. Este método es capaz de aumentar la precisión final de la medida en casi dos órdenes de magnitud. Adicionalmente, se han propuesto algoritmos para minimizar los tiempos de procesamiento aplicables a cada configuración específica. Para la demostración de todas las aportaciones realizadas se han proporcionado numerosos ejemplos experimentales de inspección superficial, control de acabados y análisis de parámetros de rugosidad.

Summary

This Thesis studies Lateral Shearing Interferometry applied to range sensing. Although it is not the classical use of the technology, this application has already been reported by many authors, as it allows building common-path interferometers which provide very stable measurements, with immunity against vibrations and harsh environmental conditions. A clear example of this kind of devices is the so-called Conoscopic Holography, technology which has been successfully proven for this purpose in many occasions.

Range sensing by Lateral Shearing Interferometry is highly interesting for optical profilometry and dimensional control in many industrial processes, as it presents several advantages with respect to other technologies: it is possible to measure from a wide range of working distances depending on the aimed resolution, and it does not require neither coherent light nor high stability in the setup.

The system developed for this Thesis is a common-path interferometric profilometer based on a Savart plate. The configuration has been adapted to project a laser line instead of a point, so a whole distance profile is obtained in each single acquisition. This brings high scanning speed and allows in-situ applicability.

In spite of these competitive advantages, this type of devices applicable in-situ had never been used beyond a certain resolution. When high resolutions are demanded -sub-micrometric range-, the tendency is to use other types of technologies, usually based on microscopy. In these cases the

interferometers are built into a microscope head, which can provide very high precision, but demand highly controlled environments and are slow in nature, so it is not possible to inspect the 100% of the production.

This Thesis is dedicated specifically to the study of techniques, methods, configurations, processing algorithms, or any other aspect of the optical profilometry which facilitates the in-situ applicability of the system when used for sub-micrometric measurements. A deep study of a device based on Lateral Shearing Interferometry designed for this purpose has been carried out.

Original contributions for both of the possible configurations of the prototype (triangulated and collinear) have been addressed. With respect to the triangulated setup, the maximum measurable range without ambiguity has been extended by using multiple wavelength techniques. Several approaches have been presented for this goal. Concerning the collinear configuration, a method that takes advantage of the extracted knowledge from a deep study of the optical path parameters has been proposed. This method is able to increase the precision of the distance measurement up to two orders of magnitude. Moreover, algorithms to decrease the processing time for each specific configuration have been proposed and analyzed. Many experimental examples have been provided to test the applicability of the sensor in real problems such as surface inspection, finishing control, or evaluation of roughness parameters.

Índice general

I	INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE	3
1	Introducción	5
1.1	Introducción	5
1.2	Objetivos de la Tesis	7
1.3	Estructura de la memoria	9
2	Metrología óptica	13
2.1	Introducción a los sistemas de medida sin contacto	13
2.2	Técnicas basadas en Visión Artificial	14
2.2.1	Análisis de la textura	15
2.2.2	Forma a partir de sombras (<i>Shape from Shading</i>)	15
2.2.3	Focalización Dinámica (<i>Dynamic Focusing</i>)	16
2.2.4	Iluminación Estructurada	16
2.2.5	Triangulación	17
2.2.6	Visión Estéreo	18
2.3	Técnicas Interferométricas	18
2.3.1	Holografía convencional	21
2.3.2	Holografía conoscópica	23
2.3.3	Franjas de Moiré	24

2.3.4	Interferometría láser	24
2.3.5	Interferometría por efecto <i>speckle</i> (ESPI)	26
2.3.6	Interferometría en radar por satélite (INSAR)	27
2.4	Técnicas de Tiempo de Vuelo	27
2.5	Especificaciones generales para la Tesis	28
2.6	Selección de la tecnología	29
2.6.1	Comparación con otras técnicas interferométricas	31
2.6.2	Comparación con técnicas basadas en triangulación láser	32
2.6.3	Comparación con focalización dinámica	33
2.6.4	Comparación con estereoscopia y telemetría	33
2.7	Conclusiones	35
3	Revisión de la tecnología	37
3.1	Origen	37
3.2	Principios teóricos e interferogramas	38
3.2.1	Frentes de onda planos	39
3.2.2	Frentes de onda esféricos	43
3.3	Holografía Conoscópica	48
3.3.1	Principio físico	48
3.3.2	Principio teórico	50
3.3.3	Holografía de un punto	56
3.3.4	Holografía de un objeto plano	56
3.3.5	Holografía de un objeto 3D	56
3.4	Otros dispositivos	57
3.5	Estudios anteriores	61
3.6	Conclusiones	65

ÍNDICE GENERAL

xv

II PROTOTIPO Y CONTRIBUCIONES ORIGINALES 69

4 Principio de funcionamiento	71
4.1 Antecedentes	72
4.2 Formación del patrón de interferencia	74
4.3 Fuentes de error	81
4.3.1 Ruido <i>speckle</i>	82
4.4 Prototipo de validación	88
4.4.1 Hardware	88
4.4.2 Software	92
4.5 Montaje colineal	95
4.6 Montaje triangulado	99
4.7 Frecuencia y fase de la interferencia	102
4.7.1 Recuperación de la frecuencia	103
4.7.2 Recuperación de la fase de triangulación	106
4.7.3 Despliegue de fase	111
4.7.4 Preacondicionamiento de interferogramas	114
4.8 Conclusiones	120
5 Extensión del rango de medida	123
5.1 Motivación	124
5.2 Técnicas de múltiple longitud de onda	126
5.3 Aplicación	132
5.3.1 <i>Savart-plate</i> de distinto grosor	134
5.4 Dual-Laser Setup	137
5.4.1 Fenómeno del <i>beat</i> en la interferencia	137
5.4.2 Montaje	139

5.4.3	Procesamiento para múltiple longitud de onda	143
5.5	Primer ensayo de viabilidad	146
5.6	Reducción del tiempo de procesamiento	156
5.7	Resultados	164
5.8	Conclusiones	169
6	Incremento de la precisión	173
6.1	Análisis del <i>Savart plate</i>	174
6.1.1	Repercusión en el prototipo	177
6.2	Identificación parámetros superficiales	181
6.2.1	Parámetros influyentes sobre la medida de periodo en especímenes senoidales	184
6.2.2	Parámetros influyentes sobre la medida de amplitud en especímenes de referencia	185
6.2.3	Vinculación del ángulo de incidencia con la derivada superficial	187
6.3	Método de precisión optimizada	189
6.3.1	Algoritmo de reconstrucción	189
6.3.2	Resultados	191
6.3.3	Limitaciones	196
6.4	Reducción del tiempo de procesamiento	198
6.5	Resultados	204
6.5.1	Acabados superficiales	204
6.5.2	Medidas de rugosidad y ondulación	206
6.5.3	Líneas de investigación abiertas	214
6.6	Conclusiones	218

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	xvii
III CONCLUSIONES	221
7 Conclusiones y trabajo futuro	223
7.1 Conclusiones de la Tesis	223
7.2 Aportaciones originales	229
7.3 Publicaciones	230
7.4 Líneas de investigación abiertas	231
8 Conclusions and future work	235
8.1 Conclusiones de la tesis	235
8.2 Original contributions	241
8.3 Publications	242
8.4 Future research lines	243

Índice de figuras

2.1	Principio del enfoque dinámico	16
2.2	Principio de la triangulación láser	18
2.3	Principio básico de la holografía	22
2.4	Ejemplo de interferometría holográfica para el análisis de de- formaciones.	23
2.5	Ejemplo de curvas de contorno de Moiré.	24
2.6	Interferómetro de Michelson.	25
2.7	Patron moteado (speckle), producido por un punto láser. . .	26
3.1	Interferogramas de desplazamiento lateral para un frente de ondas sin aberraciones	40
3.2	Interferogramas de desplazamiento lateral para un frente de ondas sin aberraciones	41
3.3	Interferogramas de desplazamiento lateral típicos de aberra- ción esférica primaria	42
3.4	Interferencia de ondas esféricas desplazadas en el eje-z	44
3.5	Interferencia de ondas esféricas desplazadas en el eje-z y eje-x simultáneamente	46
3.6	Interferencia de ondas esféricas desplazadas en el eje-x	47
3.7	Principio de la Holografía Conoscópica	49
3.8	Figura de Fresnel.	50

3.9	Hogramas positivo, negativo y de contraste	55
3.10	Interferómetro basado en Savart plate para medida de rango	58
3.11	Interferogramas de franjas paralelas afectados por <i>speckle</i> . .	59
3.12	Dispositivo comercial denominado ConoProbe, basada en Ho- lografía Conoscópica Lineal.	60
3.13	Disposición de elementos en un sensor comercial basado en Holografía Conoscópica.	63
3.14	Sistema de medida y clasificación automática de rodamientos síncronos	64
3.15	Sistema de medida simultánea de las caras interna y externa de un sólido de revolución	65
3.16	Elementos ópticos del dispositivo de desarrollo del sensor Long Standoff Line.	66
3.17	Sistema de medida para la medición de desbastes de acero .	67
3.18	Grieta superficial típica de un desbaste de acero	67
4.1	Esquema de configuración para obtener perfil completo por adquisición.	73
4.2	Fotografías rama de detección y <i>Savart plate</i>	75
4.3	Esquema óptico del <i>Savart plate</i>	76
4.4	Esquema de formación de imagen en el plano zy	77
4.5	Camino óptico desde el punto fuente al CCD	80
4.6	Reflexión especular y difusa	83
4.7	Patrones de <i>speckle</i>	84
4.8	Hogramas con y sin reducción de <i>speckle</i>	85
4.9	Montajes de reducción de <i>speckle</i>	86
4.10	Esquema general del prototipo de validación	89
4.11	<i>Setup</i> . Vista general y detalles.	90
4.12	<i>Software</i> para el manejo del prototipo	93

ÍNDICE DE FIGURAS	xxi
4.13 Patrones de interferencia para una superficie plana.	95
4.14 Montaje colineal del perfilómetro óptico	96
4.15 Fotografía del montaje en colineal	97
4.16 Incertidumbre del montaje colineal.	98
4.17 Montaje triangulado del perfilómetro óptico	100
4.18 Desplazamiento del punto de luz en un montaje triangulado	101
4.19 Esquema procesa	103
4.20 Patrón de interferencia de ejemplo	104
4.21 Pasos para el cálculo de índices precisos de frecuencia.	105
4.22 Eficacia en el cálculo de los índices precisos de frecuencia . .	106
4.23 Señal de frecuencia del ejemplo, con y sin precisión	107
4.24 Señal de fase del ejemplo, con y sin precisión	109
4.25 Procedimiento para el despliegue de fase	112
4.26 Señal de fase del ejemplo, desplegada	113
4.27 Mapa de fase plegado y desplegado línea a línea.	114
4.28 Despliegue de fase bidireccional.	115
4.29 Efecto de laventana de <i>Hanning</i>	119
4.30 Despliegue de fase bidireccional de una superficie ruidosa. . .	120
5.1 Aplicación de tres longitudes de onda	129
5.2 Frente de fase para un perfil de distancias	133
5.3 Interferogramas de <i>Savart-plate</i> de distintos grosores	135
5.4 Frentes de fases de <i>Savart-plate</i> de distintos grosores	136
5.5 Configuración para combinar dos longitudes de onda en la iluminación.	138
5.6 Esquema teórico de formación del <i>beat</i>	139
5.7 Interferencia con iluminación de doble longitud de onda . . .	140

5.8	Interferencia en una columna del CCD	141
5.9	FFT de una columna de CCD	141
5.10	Señales de fase de diferentes λ en iluminación	142
5.11	Esquema de los pasos de procesamiento para la obtención de las señales individuales	145
5.12	Detalle FFT en la frecuencia de <i>beat</i>	146
5.13	Experimento de viabilidad	148
5.14	Ángulos de giro del cristal	149
5.15	Incrementos de posición	149
5.16	Líneas láser del experimento	151
5.17	Interferogramas del experimento	153
5.18	Fases obtenidas del Interferograma 1	153
5.19	Fases obtenidas del Interferograma 2	154
5.20	Fases obtenidas del Interferograma 3	154
5.21	Fases obtenidas del Interferograma 4	154
5.22	Fases obtenidas del Interferograma 5	155
5.23	Fases obtenidas del Interferograma 6	155
5.24	Fases combinadas de todos los interferpgramas analizados . .	155
5.25	Procedimiento para el cálculo de la posición del <i>beat</i> de interferencia.	158
5.26	Esquema para la obtención directa de la fase combinada . .	159
5.27	Interferogramas simulados para un perfil con un escalón de $50 \mu m$	160
5.28	Localización del máximo de modulación del <i>beat</i> para un perfil con un escalón de $50 \mu m$	161
5.29	Procedimiento para el cálculo de la posición del <i>beat</i> de interferencia.	163
5.30	Detalle del escaneo 3D del espécimen con escalones de $1 \mu m$. .	166

ÍNDICE DE FIGURAS

xxiii

5.31	Detalle 3D del espécimen <i>Rubert Co. 511</i>	167
5.32	Detalle 3D del espécimen <i>Rubert Co. 531</i>	168
5.33	Mapas de fase para espécimen con escalones de $1 \mu m$	170
5.34	Detalle 3D del espécimen <i>Rubert Co. 513</i>	171
5.35	Defectos sobre un espejo.	172
5.36	Inclusión sobre una oblea de silicio.	172
6.1	Geometría y sistema de coordenadas del <i>Savart plate</i>	175
6.2	Respuesta del <i>Savart plate</i> cuando la incidencia no es perpendicular.	176
6.3	Capturas de la línea láser proyectada tras haber eliminado la lente cilíndrica para poder observar las dos líneas virtuales emergentes del <i>Savart plate</i>	178
6.4	Patrones de franjas simulados y reales para diferentes valores del ángulo w	179
6.5	Influencia del comportamiento real del <i>Savart plate</i> en frecuencia.	180
6.6	Variaciones en la frecuencia de franjas ante cambios en el ángulo de incidencia, y ante cambios en la profundidad del perfil.	181
6.7	Mapas de características SOM de ejemplo.	184
6.8	Mapas topográficos auto-organizados SOM para la identificación de parámetros que pudieran modificar las medidas de resolución lateral.	185
6.9	Mapas topográficos auto-organizados SOM donde se visualiza la falta de correlación entre las amplitudes medidas y las teóricas cuando se trabaja con altas precisiones.	186
6.10	Mapas topográficos auto-organizados SOM para la identificación de las causas que pudieran modificar las medidas de resolución en profundidad.	187

6.11	Escaneo de una muestra con una hendidura de 1 micra de profundidad	188
6.12	Configuración esquemática para medir el ángulo de incidencia, plano zx	190
6.13	Ejemplo de reconstrucción de un perfil de distancias.	192
6.14	Detalle de una talla senoidal de amplitud una micra y periodo 100 micras	193
6.15	Histograma representativo para calcular la precisión del sistema.	194
6.16	Efecto del error de integración en el perfil de distancias reconstruido correspondiente a una lámina metálica.	195
6.17	Detalle de un patrón de referencia con un surco de profundidad una micra	196
6.18	Perfil de la muestra de <i>Rubert Co. N8 Horizontal Milling</i>	197
6.19	Superficie con letras estampadas	199
6.20	Esquema del método de estimación de la frecuencia a partir de la fase	200
6.21	Error del método de estimación de la frecuencia	201
6.22	Comparación de resultados para el método de reducción del tiempo de procesamiento y el basado en Transformadas de Fourier.	202
6.23	Mapas de distancia de tres especímenes mecanizados mediante <i>Horizontal Milling</i>	205
6.24	Perfiles de distancia de tres especímenes mecanizados mediante <i>Horizontal Milling</i>	206
6.25	Detalle de una cuña mecanizada mediante <i>Horizontal Milling</i>	207
6.26	Mapas de distancia de especímenes mecanizados mediante <i>Vertical Milling</i> del set <i>Rubert Co. 130</i>	208
6.27	Mapas de distancia de especímenes mecanizados mediante <i>Vertical Milling</i> mecanizados en laboratorio	209
6.28	Detalle de acabados superficiales generados por electro-erosión	210

ÍNDICE DE FIGURAS

xxv

6.29	Detalle de ondulación de la superficie de un espejo	210
6.30	Esquema para el cálculo de parámetros de rugosidad	211
6.31	Resultado de los parámetros de ondulación calculados sobre 15 tipos de muestras.	212
6.32	Ángulo de apertura del prototipo, medido experimentalmente a partir de la señal de frecuencia	217
6.33	Detalle de una huella dactilar sobre un espejo	218
6.34	Detalle reconstrucción de diferentes fluidos pulverizados sobre un espejo	219

Índice de tablas

2.1	Clasificación de las tecnologías de medida	35
3.1	Características principales del sensor comercial ConoProbe .	61
3.2	Características principales del sensor comercial ConoLine . .	62
5.1	Tecnologías en las que se aplica múltiple λ . Literatura	130
5.2	Aplicación de múltiple λ en Interferometría de Desplazamiento Lateral. Literatura	131
5.3	Cuantificación del efecto del giro sobre cada λ	150
5.4	Cuantificación del efecto del giro sobre cada λ . Detalle . . .	152
5.5	Valores de las fases individuales ($\varphi_1(x)$, $\varphi_2(x)$) y combinada ($\phi(x)$) para un perfil con un escalón de $50 \mu m$ obtenidos del procesamiento basado en Transformadas de Fourier.	162
5.6	Error en la extracción de la fase equivalente para el método basado en Transformadas de Fourier.	162
5.7	Error en la extracción de la fase equivalente para el método basado en la posición del máximo de la función de modulación del <i>beat</i>	164
5.8	Comparación entre factores R_a y R_z para <i>Rubert Co. 531</i> . .	169
6.1	Características de las superficies de referencia de <i>Rubert Co.</i> sobre las que se realizaron los ensayos numerados del 1 al 12.	183

Parte I

INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

Lo último que uno sabe, es
por dónde empezar.

Blaise Pascal (1623-1661)

Capítulo 1

Introducción al documento

En este capítulo introductorio se presentan los objetivos básicos marcados en el inicio de las investigaciones llevadas a cabo durante la elaboración de la Tesis y se detalla la estructura de la misma describiendo el contenido de los distintos capítulos que la conforman.

1.1 Introducción

El control dimensional en línea del 100% de la producción, incluyendo detección de defectos superficiales, se está convirtiendo en uno de los factores determinantes para la competitividad de las industrias modernas. Los requerimientos de bajo coste, fácil montaje, aplicabilidad en entornos hostiles (generalmente a lo largo de las líneas de producción), versatilidad y fiabilidad plantean un gran reto para la ciencia de la metrología.

La presente Tesis se encuadra dentro de la Interferometría de Desplazamiento Lateral; tecnología óptica que ha demostrado ser suficientemente flexible y robusta para satisfacer los estrictos requisitos demandados por los actuales sistemas de control dimensional. Un claro ejemplo de esto es la Ho-

lografía Conoscópica, técnica muy potente y revolucionaria en su creación cuya patente está explotada por la empresa OPTIMET, en la cuál el Área de Ingeniería de Sistemas y Automática (ISA) de la Universidad de Oviedo ha realizado desarrollos en múltiples facetas con importantes aplicaciones industriales. Por estos motivos, el dispositivo seleccionado para realizar la Tesis presenta un principio de funcionamiento que puede considerarse análogo al de la Holografía Conoscópica, pero utiliza un *Savart plate* como elemento birrefringente.

Las medidas obtenidas con este tipo de dispositivos tienen gran interés en perfilometría óptica para el control dimensional de muchos procesos, ya que presentan ciertas ventajas con respecto a otro tipo de dispositivos: permiten trabajar desde un amplio rango de distancias y no requieren luz coherente ni gran estabilidad en el montaje. Además admiten configuración colineal o triangulada: la primera no genera zonas ocultas, la segunda permite aumentar la resolución desde una distancia dada. Otro de sus puntos fuertes es la aplicabilidad in-situ, ya que pueden instalarse sobre una determinada línea de producción sin influir sobre ella, siendo esta una característica clave de los sistemas modernos. Para que esto sea posible, obtener la información de un perfil completo en una única adquisición del sensor, en combinación con una alta velocidad de procesamiento para mantener la eficacia de la realimentación son condiciones *sine qua non*.

A pesar de todas estas ventajas competitivas, existe una resolución máxima por encima de la cual este tipo de dispositivos aplicables in-situ no se ha utilizado. Cuando se requieren altas resoluciones - medidas submicrométricas-, se tiende a utilizar otro tipo de tecnologías, generalmente basadas en microscopía. En estos casos, los interferómetros se construyen en el cabezal de un microscopio, lo que proporciona precisiones muy altas, pero demanda unas condiciones de trabajo altamente controladas, y son métodos lentos, que en ningún caso pueden ser aplicados in-situ, ni permiten inspeccionar el 100 % de la producción.

La presente Tesis está dedicada específicamente al estudio de técnicas, métodos, configuraciones, algoritmos de procesamiento y cualquier otra faceta de la perfilometría óptica que permitan la aplicabilidad in-situ de un sistema destinado a mediciones submicrométricas. Para ello se ha estudiado

1.2. OBJETIVOS DE LA TESIS

7

en profundidad el comportamiento de un dispositivo basado en Interferometría de Desplazamiento Lateral diseñado para tal fin.

El objetivo original de la Tesis parte de la configuración triangulada del prototipo, capaz de conseguir hasta 10 veces más resolución utilizando la señal de fase del interferograma en lugar de la de frecuencia. Con este dispositivo ya se tiene experiencia en grandes escalas, y a priori, debido a su alta precisión, parece la forma más adecuada de acercarse al mundo microscópico. Pero el uso de la señal fase tiene como contrapartida la ambigüedad de la variable medida. El rango de trabajo de este dispositivo está limitado al intervalo en el que fase varía de 0 a 2π . Con el fin de paliar esta limitación se optó por la investigación de técnicas de múltiple longitud de onda aplicadas a dispositivos basados en Holografía Conoscópica -interferómetros de desplazamiento lateral-. Se incluyen tanto el estudio como implementación física y validación.

Durante el desarrollo de esta investigación se han detectado fenómenos que no se producen en otras escalas y que han merecido un estudio adicional. Se ha decidido por tanto ampliar los objetivos de la Tesis, y realizar una evaluación mucho más profunda del dispositivo, incluyendo una caracterización exhaustiva de la formación de la interferencia, y el estudio de técnicas avanzadas que permitieran mejorar cualquier aspecto, -no sólo el rango de medida-, de la Interferometría de Desplazamiento Lateral aplicada a medidas submicrométricas.

1.2 Objetivos de la Tesis

Los objetivos de esta Tesis se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. Análisis detallado del marco de trabajo en el que se localiza la investigación abierta. Elaboración del estado del arte de los métodos y aplicaciones de Interferometría de Desplazamiento Lateral, centrandose especial atención en los sistemas destinados a medida de distancias.

2. Estudio del principio de funcionamiento, configuración, fuentes de error, estrategias de procesamiento y herramientas empleadas para el dispositivo seleccionado.
3. Diseño y construcción de un prototipo básico de laboratorio que permita ajustes de manera sencilla. Desarrollo de un software que incluya el control de dicho prototipo, así como la evaluación de diferentes algoritmos de procesamiento de señal y la visualización de resultados.
4. Desarrollo de un software de simulación que emule los fenómenos físicos de generación de interferogramas, con el fin de prever y comprobar las características de las señales obtenidas ante cambios en la configuración. Los interferogramas sintéticos también permitirán comprobar algoritmos de procesamiento y hacer un análisis de errores de medida con respecto a las señales reales.
5. Análisis, dimensionamiento y caracterización, tanto teórica como experimental, del dispositivo seleccionado en las dos configuraciones posibles: colineal y triangulado, con el fin de comparar sus resultados y adecuación según las características de la muestra a medir.
6. Estudio de técnicas de múltiple longitud de onda que permitan incrementar el rango de medida sin ambigüedad. Análisis de las posibilidades para implementar estas técnicas en el dispositivo seleccionado. Ejecución y comprobación de resultados.
7. Caracterización exhaustiva de todos los parámetros que influyen sobre la medida, mediante un análisis de las variables que determinan el camino óptico de los rayos en el dispositivo.
8. Estudio y validación de técnicas ópticas y de procesamiento para aumentar la resolución de medida.
9. Diseño y verificación de métodos que permitan aumentar las capacidades y aplicabilidad del dispositivo, especialmente orientados a disminuir los tiempos de procesamiento.

1.3 Estructura de la memoria

La memoria ha sido dividida en partes que agrupan las distintas facetas de la investigación. A continuación se indican los capítulos y contenidos que constituyen cada parte:

- Parte I. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE.
 - **Capítulo 1: Introducción al documento.** El capítulo actual recoge una introducción general al contenido de la Tesis y una breve descripción de los distintos capítulos que la conforman. Además en él se detallan los objetivos formulados como directrices de la investigación llevada a cabo para la realización de esta Tesis.
 - **Capítulo 2: Metrología óptica.** Se presentan los sistemas ópticos de medida sin contacto, clasificándolos en técnicas de visión artificial, interferométricas o radar. A continuación se indican los requisitos que debe cumplir la tecnología seleccionada para la investigación. Por último, se analiza la adecuación de la Interferometría de Desplazamiento Lateral conforme a tales requisitos, comparándola con otras tecnologías utilizadas en perfilometría.
 - **Capítulo 3: Revisión de la Interferometría de Desplazamiento Lateral.** Se revisan los orígenes y principios teóricos de la tecnología. También se presentan los dispositivos predecesores del utilizado para el desarrollo de la presente Tesis, como pueden ser los sistemas de Holografía Conoscópica, y otros interferómetros de desplazamiento lateral ya utilizados para medidas de rango en otras escalas.
- Parte II. PROTOTIPO Y CONTRIBUCIONES ORIGINALES.
 - **Capítulo 4: Principio de funcionamiento.** En esta capítulo se analizan el dispositivo en torno al que se desarrolla la investigación desde distintas vertientes. Se describen sus antecedentes, las leyes físicas que rigen su funcionamiento, y el prototipo de validación que se utilizará para las pruebas experimentales. Además, se

presentan las dos variantes sobre las que se han realizado aportaciones -colineal y triangulada-, detallando las similitudes y puntos de divergencia de ambas disposiciones. Se analizan las posibles fuentes de error, y los métodos de procesamiento y extracción de la información de medida utilizados para cada configuración.

- **Capítulo 5: Extensión del rango de medida.** En este capítulo se presentan todas las características de la configuración del prototipo en triangulación: antecedentes a esta disposición, principio de funcionamiento y restricción fundamental -la limitación en el rango de medida-. Se estudian las técnicas existentes de múltiple longitud de onda destinadas a extender el rango de medida sin ambigüedad, y se prueban experimentalmente. La configuración más adecuada para tal propósito, el *Dual-Laser Setup*, es analizada en profundidad, y se indican técnicas específicas para aumentar la velocidad de procesamiento de este montaje. Se incluyen ensayos de viabilidad y ejemplos de aplicación.
- **Capítulo 6: Incremento de la precisión.** Este capítulo analiza el montaje colineal. Se incluye una derivación exhaustiva del comportamiento real del *Savart plate*, y se utilizan técnicas avanzadas de visualización para identificar relaciones entre las variables referentes a características ópticas y superficiales. Se propone y evalúa un método para mejorar la precisión de medida, y se indican alternativas para disminuir el tiempo de procesamiento.
- Parte III. CONCLUSIONES.
 - **Capítulo 7: Conclusiones y trabajo futuro.** El capítulo final incluye las conclusiones obtenidas a partir del trabajo desarrollado a lo largo de la presente Tesis, así como sendos compendios de las que se consideran sus principales aportaciones y de las publicaciones a las que ha dado lugar. Además, se propone una serie de futuras líneas de trabajo basadas en las investigaciones llevadas a cabo y orientadas a la mejora o ampliación de las mismas.
 - **Chapter 8: Conclusions and future work.** This last chapter gathers the conclusions extracted from the research performed during the preparation of this Thesis. In order to complement the

1.3. *ESTRUCTURA DE LA MEMORIA*

11

fulfilled work, some future trends are suggested. In addition, the main original contributions derived from this study are detailed, as long as the scientific publications and congress papers.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

No hay nada nuevo bajo el sol, pero cuántas cosas viejas hay que no conocemos.

Ambrose Bierce

Capítulo 2

Metrología óptica

En este capítulo se presentan las principales tecnologías ópticas utilizadas para metrología, y se comentan los requisitos que debe cumplir la tecnología seleccionada para que su estudio sea de interés tanto desde el punto de vista industrial como de investigación. A continuación se procede a la selección de la tecnología, siendo la Interferometría de Desplazamiento Lateral la que resulta más adecuada como eje central de la Tesis.

2.1 Introducción a los sistemas de medida sin contacto

En numerosas aplicaciones, tanto industriales como civiles, se necesita realizar mediciones rápidas, precisas y fiables, de uno o varios objetos en un entorno determinado. En numerosos casos es necesario utilizar sistemas de medida *sin contacto* entre el dispositivo medidor y el objeto a medir, bien sea por que no lo permitan las características del objeto o las del entorno en el que se encuentra.

Entre los campos en los que se aplican estas técnicas se encuentran desde

la topografía o la medicina, para la localización y medida de tumores, hasta la robótica, pasando naturalmente por el control de calidad industrial, ya sea para la medida de objetos o para la detección de defectos [4, 63].

Existen una gran variedad de técnicas en este campo, la mayoría de ellas *híbridas*, ya que utilizan a su vez varias técnicas base comunes. Sin embargo se puede intentar hacer una clasificación de las mismas en:

Técnicas basadas en visión artificial, que utilizan un a cámara digital como captador de la escena. Las imágenes son posteriormente tratadas por un computador, que extrae sus características.

Técnicas interferométricas, que aunque utilizan como captadores cámaras digitales como en el caso anterior, utilizan imágenes formadas mediante interferencia de la luz proveniente de los objetos con otras fuentes. De este modo se obtiene un patrón de interferencia en el detector, que es procesado posteriormente mediante un computador.

Técnicas de tiempo de vuelo, ya sea ultrasonidos, láser o radar. En estas técnicas se emite de forma controlada dicha energía y se mide el tiempo de regreso de la onda reflejada por el objeto a medir.

2.2 Técnicas basadas en Visión Artificial

En estas técnicas se obtienen imágenes de una escena mediante cámaras digitales y, a partir éstas, se extraen características como las distancias o formas de los objetos presentes en dicha escena.

Según R. A. Jarvis [76] estas técnicas se pueden clasificar en tres tipos básicos:

Monoculares, que utilizan sólo un detector y extraen la información en función de algunas características de los objetos o de la focalización.

2.2. TÉCNICAS BASADAS EN VISIÓN ARTIFICIAL

15

Entre estas técnicas se encuentran el análisis de texturas, forma a partir de sombras (*shape from shading*), métodos fotométricos y métodos de focalización.

Iluminación Estructurada, en la que se genera un patrón de iluminación (una raya, una rejilla, etc.) que es visualizado desde una cámara; la forma en el que el patrón es deformado, da una idea de la forma y tamaño de los objetos de la escena.

Estereoscópicas, en las que se reconstruye un escena mediante varias imágenes tomadas desde distintos puntos de vista. Entre estas técnicas destacan la visión estereo y las técnicas basadas en triangulación.

En los siguientes apartados, se analizarán brevemente las técnicas más usuales basadas en visión artificial.

2.2.1 Análisis de la textura

Estas técnicas estiman las distancias teniendo en cuenta que a medida que el objeto se aleja de la cámara la textura del mismo se hace más fina. Para ello los objetos de la escena deben tener texturas uniformes y estos *gradientes de texturas* se pueden analizar utilizando descriptores de Fourier que varían de forma consistente con la geometría de las superficies en tres dimensiones [11].

2.2.2 Forma a partir de sombras (*Shape from Shading*)

Pretende emular el comportamiento del sistema visual humano, que emplea las sombras de los objetos y las variaciones de luminosidad de su superficie para estimar la forma tridimensional de los mismos [114].

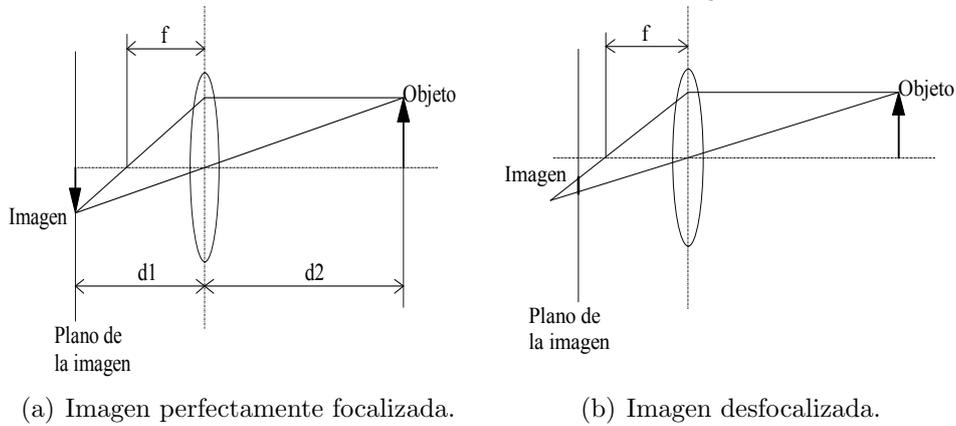


Figura 2.1: Principio del enfoque dinámico.

2.2.3 Focalización Dinámica (*Dynamic Focusing*)

Esta técnica se basa en la variación de la distancia focal de la cámara que observa la escena, hasta conseguir que el objeto se encuentre perfectamente focalizado [75]. En la figura 2.1 se puede apreciar un esquema del principio de esta técnica. La distancia al objeto se puede calcular como:

$$1/f = 1/d_1 + 1/d_2. \quad (2.1)$$

El mayor inconveniente reside en la necesidad de tener un objeto móvil y una perfecta calibración de la distancia focal del mismo. Además es necesaria la captura y el análisis de varias imágenes hasta alcanzar la focalización óptima.

2.2.4 Iluminación Estructurada

En esta técnica se genera un patrón de luz conocido (línea, rejilla u otros más complejos) y se observa cómo es deformado al incidir sobre los objetos

de la escena.

La versión más sencilla (*striped lightning*) emplea la iluminación con una plano de luz que genera una línea de intersección con los objetos presentes [126].

Otras versiones emplean patrones más complejos, intentando reconstruir la escena 3D completa con una sola imagen. Por ejemplo P. Will y K. S. Pennington [140] utilizan un patrón de luz que forma una rejilla en su intersección con los objetos de la escena.

2.2.5 Triangulación

no de los métodos más comunes en metrología óptica, detección de defectos, control dimensional, y en general, para la obtención de forma de objetos en el espacio tridimensional, es la triangulación láser. Sus características de versatilidad, fiabilidad, bajo coste, y fácil puesta en marcha y mantenimiento la hacen una tecnología idónea tanto para la instalación *on-line* en modernas líneas de producción, como para trabajos de laboratorio.

La triangulación generalmente proyecta un haz láser enfocado en un pequeño punto o en una línea fina [96], y su reflexión es capturada por un sensor, como se muestra en la Fig. 2.2. En ángulo entre las ramas de iluminación y detección convierte cambios de profundidad del objeto a inspeccionar en desplazamientos laterales del punto o línea láser proyectada en la imagen capturada por el sensor. El desplazamiento δl visualizado en la imagen sigue la Ec. 2.2

$$\delta l = \delta z \frac{\sin(i + o)}{\cos(i)}, \quad (2.2)$$

en la que i y o son los ángulos de incidencia y observación respecto a la normal a la superficie, y δl es el desplazamiento lateral correspondiente a un cambio de profundidad δz . Si se hace $o = 0^\circ$ o $i = 0^\circ$ se tienen una configuración con observación normal o incidencia normal. La disposición de las ramas con observación normal proporciona mayor resolución, ya que según la Ec. 2.2, permite obtener los mayores cambios en el desplazamiento

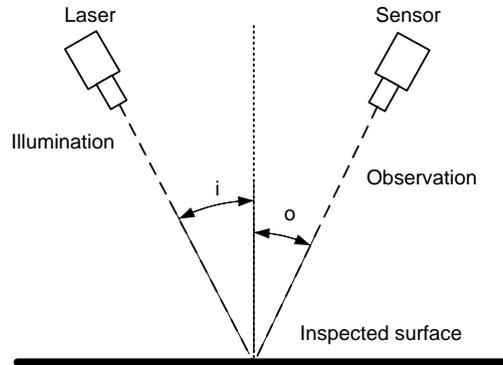


Figura 2.2: Principio de la triangulación láser.

δl capturado en la imagen para un mismo cambio de profundidad δz . Si se pretende inspeccionar espejos o superficies pulidas, conviene utilizar una configuración en reflexión especular, siendo el ángulo de incidencia igual al de observación. En cuanto a la incidencia normal, es la configuración que menos deforma el punto proyectado sobre el objeto.

2.2.6 Visión Estéreo

Se basa también en la triangulación, pero se trata de una técnica pasiva, es decir, no existe iluminación adicional a la ambiente. Este requisito hace que deban emplearse algoritmos que busquen correspondencias entre los puntos de ambas imágenes (*matching*) [143], que resultan, en la mayoría de los casos, relativamente complejos e incluso dependientes de la escena.

2.3 Técnicas Interferométricas

Este tipo de técnicas hacen interferir la luz emitida o reflejada por los objetos a medir con otras fuentes de luz (que pueden estar en los propios objetos o

2.3. TÉCNICAS INTERFEROMÉTRICAS

19

ser externas a ellos), obteniendo en el detector un patrón de interferencia.

La amplitud de campo de una onda de luz se puede describir según la ecuación compleja [71]:

$$\Psi(x, y, z) = U e^{i\phi} e^{-i2\pi\nu t}, \quad (2.3)$$

donde U es la amplitud, ϕ es la fase espacial, ν la frecuencia, x, y, z las coordenadas espaciales y t el tiempo.

Como la dependencia temporal es conocida para cada frecuencia, podemos omitirla y considerar exclusivamente la amplitud espacial compleja [62]:

$$u = U e^{i\phi}, \quad (2.4)$$

donde U y ϕ dependen de x, y y z .

La magnitud en este caso es la irradiación o intensidad I , que es proporcional al valor absoluto del cuadrado de la amplitud. Además, debido a que las ondas están sujetas al principio de superposición, si dos ondas u_1 y u_2 se superponen, la resultante u es la suma de ambas, y su intensidad es:

$$I = |u|^2 = |u_1 + u_2|^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos \Delta\phi, \quad (2.5)$$

donde I_1 e I_2 son las intensidades de u_1 y u_2 y $\delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ es el desfase de las dos ondas. Como se puede apreciar en la Ec. 2.5, la intensidad resultante no es simplemente la suma de ambas, sino que aparece un *factor de interferencia*:

$$2\sqrt{I_1I_2} \cos \Delta\phi. \quad (2.6)$$

La diferencia de fase se puede expresar como:

$$\Delta\phi = KnL, \quad (2.7)$$

donde k es una constante dependiente de la longitud de onda, n es el índice de refracción del medio y L es la diferencia de la longitud del camino geométrico recorrido por u_1 y u_2 . Es de este último término del que se puede deducir la distancia al objeto a medir.

Para poder observar el patrón de interferencia de la Ec. 2.5, el desfase debe permanecer constante durante el período que dura el tiempo de respuesta del detector, por lo que u_1 y u_2 deben ser coherentes [61], es decir tener la misma longitud de onda y la misma fase de partida. En términos prácticos: ambos deben proceder de la misma fuente de luz.

Según el método empleado para dividir la fuente de luz y hacerla recorrer caminos ópticos distintos, podemos agrupar los interferómetros en dos clases [62]:

Divisores por frente de ondas que hacen pasar la luz por dos orificios en una pantalla, generando así dos frentes esféricos emergentes uno de cada orificio y que son los que originan la interferencia.

Divisores por amplitud como el interferómetro Michelson, que utilizan elementos parcialmente reflectantes para dividir la fuente de luz.

También existen otras configuraciones que no pueden clasificarse en ninguno de los dos grupos.

Las técnicas interferométricas más usuales son [4] y [63]:

- Holografía convencional
- Holografía conoscópica

2.3. TÉCNICAS INTERFEROMÉTRICAS

21

- Interferometría Láser
- Interferometría *Speckle* (ESPI)
- Interferometría INSAR (*Synthetic Aperture Radar*)

2.3.1 Holografía convencional

La holografía es una aplicación importante de los principios descritos anteriormente. Descubierta en 1948 por el húngaro Dennis Gabor [59] como un procedimiento para mejorar el poder resolutivo del microscopio electrónico, no fue posible su aplicación hasta 1960, cuando se obtuvo una fuente de iluminación que generó luz suficientemente coherente como para obtener hologramas aprovechables: el láser.

Mientras que en una cámara de visión convencional, cada punto del detector contiene la información de la intensidad de la luz que le llega, la holografía (o reconstrucción del frente de ondas) busca, además de dicha intensidad, la fase del frente de ondas [66]. Los rayos procedentes de un punto de la escena no son focalizados a un punto del plano de imagen, sino que llegan a todo el plano, interfiriendo con los rayos de un haz de referencia, lo que genera un patrón de interferencia denominado holograma.

En la Fig. 2.3 se muestra el principio básico de la holografía [116]. Las ondas luminosas procedentes del objeto a medir interfieren en el plano de imagen con las ondas planas de luz de referencia, dando lugar a una figura de referencia conocida como zona de Gabor (*Gabor Zone Plate* o *Gabor Zone Lens*). En aquellas zonas donde lleguen las ondas en fase se producirán los máximos de intensidad y donde lleguen desfasadas 180° se producirán los mínimos.

Aunque con apariencia desordenada, el holograma contiene información más completa de la escena que una fotografía ordinaria y permite, con un sistema óptico adecuado, reconstruir la imagen 3D del objeto holografiado.

La holografía convencional puede aplicarse al campo de la medida sin

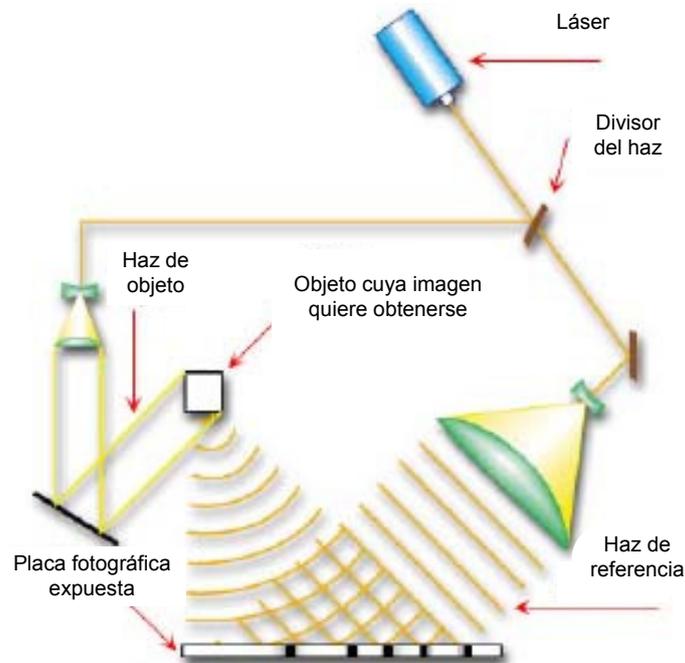


Figura 2.3: Principio básico de la holografía. Un rayo de luz monocromática proveniente de una fuente coherente, es dividido en dos: uno que incide directamente sobre la placa holográfica y otro que se refleja en el objeto, produciendo la interferencia.

contacto de dos modos [4]:

- Holograma puntual: dependiendo de la distancia a la que se encuentre un punto del plano detector, aparecerán más o menos franjas por unidad de superficie en el holograma.
- Holograma de un objeto: si un objeto no ha variado de tamaño ni forma, el holograma se superpondrá perfectamente al mismo. Sin embargo si existe alguna variación de tamaño o posición la imagen virtual procedente del holograma interferirá con la imagen real, dando lugar a franjas de interferencia. Estas pueden analizarse para obtener la variación ocurrida. En la Fig. 2.4 se muestra un ejemplo de dicha interferencia en una viga que ha sufrido una deformación.

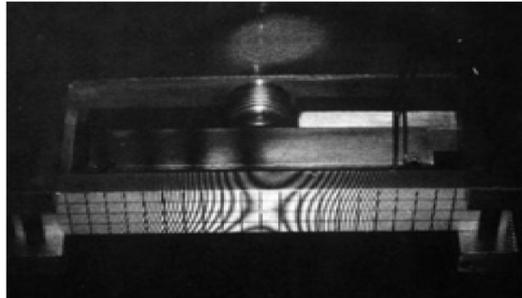


Figura 2.4: Ejemplo de interferometría holográfica para el análisis de deformaciones. El holograma del objeto interfiere con la imagen real del mismo, debido a la deformación que éste ha sufrido.

La holografía clásica presenta una serie de desventajas tales como la necesidad de utilizar luz muy coherente (láser), así como un sistema muy estable, debido a que variaciones pequeñas de forma tamaño o posición generan patrones de interferencia distintos.

2.3.2 Holografía conoscópica

Las primeras publicaciones acerca de la holografía conoscópica [127] se remontan al año 1985 y se deben a los profesores G.Y. Sirat y D. Psaltis como consecuencia de sus trabajos en el Instituto de Tecnología de California. A su vuelta a Francia, G.Y. Sirat prosiguió sus trabajos y creó en 1988 la sociedad *Le Conoscope SA* para industrializar los resultados de su investigación bajo la protección de patentes internacionales.

Se puede definir la conoscopía como un método interferométrico holográfico que utiliza una luz incoherente. Su principio básico se fundamenta en las propiedades de birrefringencia de ciertos cristales uniáxicos, que permiten la separación de la onda que proviene de cada punto del objeto en dos ondas desfasadas proporcionalmente a la geometría del montaje.

De este modo se pueden generar hologramas utilizando luz incoherente y, además, el período de las franjas es compatible con la resolución de los



Figura 2.5: Ejemplo de curvas de contorno de Moiré.

dispositivos electrónicos de detección habituales (cámaras CCD).

2.3.3 Franjas de Moiré

Esta técnica emplea una iluminación de la escena mediante un patrón de luz formado por franjas equidistantes (por ejemplo colocando una rejilla óptica frente a la fuente de iluminación). La escena se observa mediante una cámara desplazada lateralmente respecto al foco de iluminación a la que se le ha colocado la misma rejilla. La imagen así obtenida muestra unas líneas de contorno que indican los puntos del objeto que se encuentran a igual distancia. En la Fig. 2.5 se aprecia este efecto.

Es posible incluir pequeñas variaciones al método que permitan extraer también el signo de la variación de distancia, como se estudia en [131].

2.3.4 Interferometría láser

Estas técnicas se basan en el uso de una fuente de luz coherente (láser). La disposición más conocida es la del interferómetro de Michelson, que ya había sido mencionado como un ejemplo de interferómetro por división de amplitud.

2.3. TÉCNICAS INTERFEROMÉTRICAS

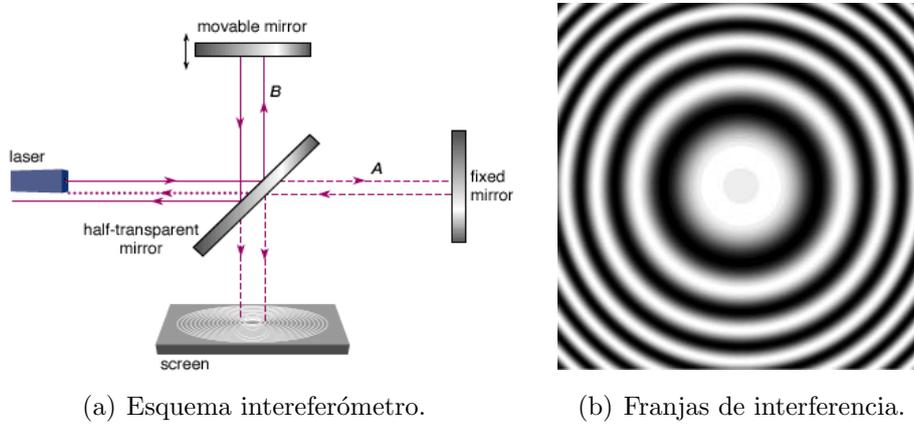


Figura 2.6: Interferómetro de Michelson. (a): Esquema interferómetro ,y (b): Franjas de interferencia obtenidas.

El interferómetro Michelson, cuyo esquema puede verse en la Fig. 2.6(a), hace incidir un layo de luz coherente r_e sobre una lámina separadora, parcialmente reflectante, que lo divide en dos rayos r_1 y r_2 que siguen caminos ópticos distintos hacia dos espejos situados a 90° entre sí. Los rayos son reflejados de nuevo hacia la lámina separadora donde son recombinados ($r_s = r_1 + r_2$) y dirigidos hacia el detector.

La intensidad detectada dependerá de la diferencia de fase de ambos rayos de luz, que a su vez depende de la distancia de los caminos ópticos.

Si se deja un espejo fijo y desplazamos el otro una distancia x la longitud del camino óptico habrá variado $l = 2x$ y la diferencia de fase será $\Delta\phi = (2\pi/\lambda)2x$, lo que originará una distribución de intensidad:

$$I(x) = 2I[1 + \cos(4\pi x/\lambda)]. \tag{2.8}$$

De la Ec. 2.8, se deduce que se observará un patrón de interferencia como el mostrado en la Fig. 2.6(b).

Según se mueve el espejo, su desplazamiento puede ser medido contando

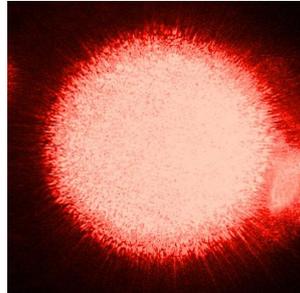


Figura 2.7: Patrón moteado (speckle), producido por un punto láser.

el número máximos o mínimos de intensidad (o bien el número de franjas) registrados en el detector. Si además contamos el número de máximos por unidad de tiempo, es posible calcular la velocidad del objeto.

Estas técnicas son capaces de medir desviaciones del rango de la longitud de onda de la fuente de luz, por lo que se utilizan en medidas de alta precisión.

2.3.5 Interferometría por efecto *speckle* (ESPI)

El fenómeno del *speckle* se utiliza en numerosos sistemas de medida ópticos [29, 48], por ejemplo en la holografía-TV o en el interferómetro ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometer*). Cuando iluminamos con láser una superficie rugosa cuyas variaciones son mayores a la longitud de onda λ de la luz, ésta es dispersada en todas direcciones. Las ondas procedentes de esta dispersión originan un patrón de interferencia granulado (Fig. 2.7).

Para una misma superficie, el efecto *speckle* varía notablemente si cambia su posición, lo que puede ser utilizado para obtener un interferograma de la misma superficie antes y después de una posible deformación. La diferencia entre las dos imágenes dará lugar a una serie de franjas, de cuyo análisis se puede obtener una medida de la variación [77].

2.3.6 Interferometría en radar por satélite (INSAR)

Esta técnica se emplea en la medición de superficies topográficas a partir de imágenes de radar. Las imágenes de radar son similares a las de otras longitudes de onda de la radiación electromagnética, aunque generadas y detectadas por dispositivos muy diferentes (antenas de radar).

La ventaja del radar es que utiliza una longitud de onda mucho mayor que la de la luz visible, por lo que las nubes y otros fenómenos atmosféricos las afectan menos. Además se puede adoptar una simplificación que las considera coherentes para las distancias que se manejan.

Las imágenes SAR (*Synthetic Aperture Radar*) explotan esta coherencia para obtener imágenes complejas (con componentes tanto de amplitud como de fase). Tomando la imagen de una misma zona desde dos puntos distintos se obtiene un interferograma que, con los algoritmos convenientes, da una información bastante precisa de la topografía del terreno [145].

2.4 Técnicas de Tiempo de Vuelo

Otros métodos de medición de distancias utilizan la emisión de diversos tipos de ondas de energía. Dicha onda será reflejada, al menos parcialmente, por el objeto a medir y será recibida por un detector situado habitualmente cercano al transmisor. La distancia del objeto se puede obtener midiendo el tiempo entre la transmisión y la recepción.

Los tipos de energía más comúnmente utilizados son:

- Ultrasonidos para rangos de hasta 40 metros [28]. Este tipo de energía se ve fácilmente afectado por el ruido ambiente. Además la energía reflejada suele ser pequeña, con lo que se producen efectos de eco.
- Luz láser, para obtener mayores precisiones. No se ve afectada por el ruido ambiente, hay menos efectos de eco y una mejor relación

señal/ruido. El retardo se puede medir por diferencia de tiempos de un pulso láser [97], o bien mediante la modulación en amplitud de la señal transmitida y el cálculo de la diferencia de fase entre la misma y la señal recibida [38].

- Ondas electromagnéticas de longitud de onda grandes (desde microondas a ondas de radio), para radar de larga distancia.

2.5 Especificaciones generales para la Tesis

La perfilometría (medición de perfiles de distancia), es una disciplina clave en los sistemas de producción modernos. Se empleada tanto durante el propio proceso de fabricación, como para el control del producto final. Existen infinidad de instrumentos y sensores para este fin, con distintas capacidades y limitaciones.

En ingeniería de procesos, lo ideal es que la etapa de metrología sea rápida, precisa, robusta y automatizada para que se pueda integrar en la línea de producción sin interferir en ella. Por tanto, uno de los requisitos de la tecnología seleccionada debe ser la posibilidad de aplicación in-situ. La tecnología empleada debe ser capaz de proporcionar medidas de forma, además de detectar defectos o caracterizar propiedades superficiales. Así puede ser utilizada en diversos tipos de aplicaciones, como ensayos no destructivos, ingeniería inversa o mantenimiento predictivo, lo que tiene el potencial de aumentar la productividad de una empresa o mejorar la calidad del producto final. En particular, las mediciones de distancia de objetos rugosos están altamente demandadas para aplicaciones industriales y la investigación en este ámbito está en continua evolución.

El principio básico de los medidores activos de rango sin contacto consiste en proyectar una señal (ya sea de radio, de ultrasonidos, u óptica) sobre el objeto, y procesar la señal reflejada o dispersada para determinar la distancia.

Si se demandan altas resoluciones de medida, se debe utilizar una señal

óptica, ya que las ondas de radio o los ultrasonidos no se pueden enfocar de forma adecuada. En este contexto, el uso de luz láser también es imprescindible, ya que permite construir dispositivos compactos con facilidad, capaces de generar haces muy focalizados y de baja divergencia, lo que además ayuda a que la intensidad de la señal se mantenga a mayores distancias [8]. El procesamiento de la señal también se ve simplificado al tratarse de ondas monocromáticas.

En este caso, las aportaciones realizadas en el campo de la perfilometría óptica se han orientado a medidas submicrométricas. La combinación en un mismo dispositivo de aplicabilidad in-situ, robustez, distancias de trabajo seguras y precisiones por debajo de la micra es una demanda que prácticamente ninguna tecnología es capaz de cumplir.

En la próxima sección se realiza la selección de la tecnología que mejor se adecúa a las especificaciones aquí descritas.

2.6 Selección de la tecnología

Las técnicas interferométricas son un instrumento muy versátil para examinar la topografía superficial con gran precisión, ya que los cambios que son capaces de medir son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda empleada. Típicamente, las técnicas de *phase-shifting* e interferometría de múltiple longitud de onda presentan una excelente resolución, pero rangos dinámicos de medida limitados. Sin embargo, la interferometría de escaneo vertical, como las técnicas de *white-light*, tiene mayor rango dinámico pero menor resolución y tiempos de medida elevados. Estos métodos, junto con la holografía clásica, la holografía digital, y la interferometría *speckle*, son las tecnologías más populares en cuanto a metrología de microsistemas [108, 119, 88, 111]. Generalmente se utiliza un cabezal de microscopio para inspeccionar la superficie de áreas pequeñas (1 o 2 mm²) con resolución de varios nanómetros.

Las restricciones de aplicabilidad in-situ e inspección automática frecuen-

temente suponen problemas a las técnicas descritas anteriormente, así que existen otras alternativas para estos casos. Por ejemplo, se utiliza *light-scattering* para estimar los parámetros de acabado superficial de objetos rugosos (por ejemplo en [80, 100]). La contrapartida de este tipo de métodos es que no devuelven la topología tridimensional de la superficie, sólo sirven para calcular parámetros de rugosidad. Otra posibilidad es utilizar triangulación láser [1], que suele proporcionar resultados muy satisfactorios, pero necesita trabajar desde distancias muy pequeñas para poder alcanzar precisiones altas, lo que conlleva una disminución del campo de visión y de la profundidad de campo. De nuevo se pueden emplear cabezales de microscopio para alcanzar resoluciones por debajo de la micra, siendo la longitud de los perfiles obtenidos de 1 o 2 mm. Pero trabajar con distancias de trabajo cortas, profundidades de campo pequeñas, y grandes ángulos de triangulación se convierte rápidamente en una fuente de problemas para aplicaciones in-situ. Además, si el campo de visión es pequeño, se requieren varias adquisiciones para obtener un perfil suficientemente grande (generalmente sobre 10 mm).

La Interferometría de Desplazamiento Lateral puede ser utilizada para construir sensores muy robustos de medida de forma. La configuración del dispositivo para esta aplicación no tiene prácticamente nada en común con los primeros interferómetros de desplazamiento lateral que se utilizaban para chequeo de lentes [101]. El desplazamiento lateral del frente de ondas se puede conseguir con gran variedad de configuraciones, y permite construir interferómetros muy robustos para medir formas con altas precisiones, ya que permite utilizar disposiciones de camino común, que son muy estables e inmunes frente a vibraciones y condiciones ambientales desfavorables. Varios autores han contribuido al campo de la Interferometría de Desplazamiento Lateral para medidas de forma, como Liu et. al [99], Mehta et. al [106, 105], o Vidal et. al [137]. La combinación en un mismo dispositivo de las capacidades de la interferometría y de los medidores de rango proporciona sensores de medida de distancia con gran precisión y rango dinámico. Por estos motivos, es la tecnología seleccionada para desarrollar la presente Tesis.

Un buen ejemplo de este tipo de sistemas es la llamada Holografía Co-noscópica [128, 129]. Su principio de medida, que será expuesto más adelante, debe separarse completamente de la Holografía clásica. La Holografía Co-

2.6. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

31

noscópica se utilizado en numerosas ocasiones para medidas de forma [55, 123, 51, 150, 135]. Haüsler et al. [70] también han propuesto un sistema similar utilizando un *Savart plate* para general el desplazamiento. En ambos casos el interferómetro de desplazamiento hace la función de medidor de rango, y la configuración puntual es la más sencilla. Consiste en proyectar un punto sobre la superficie a analizar, y la luz reflejada se duplica mediante un elemento birrefringente desplazándola lateralmente. La interferencia entre estos dos frentes de onda idénticos contiene la información del radio de curvatura de la onda original, que es la distancia al punto del objeto iluminado. Estos dispositivos pueden considerarse predecesores del seleccionado para el estudio, y por tanto, serán analizados en profundidad más adelante.

El dispositivo empleado para el desarrollo de la Tesis es un perfilómetro interferométrico que utiliza un *Savart plate* como elemento birrefringente, válido para análisis superficial automático, detección de microdefectos y aplicación en la propia línea de trabajo. Se ha diseñado para reconstruir un perfil por adquisición, por lo que se proyecta una fina línea láser en vez de un punto, lo que permite altas velocidades de trabajo (velocidad de adquisición de la cámara), que puede aplicarse sobre objetos en movimiento, y así ir formando el mapa tridimensional completo. Una descripción exhaustiva de este dispositivo se realizará en el capítulo siguiente.

A continuación de comentarán las ventajas específicas de la Interferometría de Desplazamiento Lateral aplicada a medidas de rango frente a las tecnologías con las que presenta más similitudes, o que pueden considerarse las competidoras o alternativas más directas. En la tabla 2.1 se realiza una clasificación de estas tecnologías en función de sus requerimientos o aplicabilidad.

2.6.1 Comparación con otras técnicas interferométricas

Típicamente, las técnicas interferométricas solamente pueden medir superficies ópticamente planas cuya reflexión sea especular. En las disposiciones clásicas de interferómetros en los que existe una rama de referencia y otra de

análisis, se comparan dos frentes de luz que siguen un camino óptico diferente, por lo que turbulencias o distorsiones que afecten de independientemente a ambos frentes introducirán errores de medida. En contraposición, la Interferometría de Desplazamiento Lateral permite configuraciones de camino común, lo que la hace mucho más estable y robusta ante perturbaciones.

La interferometría clásica requiere luz coherente -láser-, y un entorno óptico fuertemente estable. Esto hace que los interferómetros sean voluminosos, caros, y sensibles a la temperatura. Además, por la escala de sus patrones de franjas, son difíciles de escalar.

En contraste, la Interferometría de Desplazamiento Lateral para medidas de rango es capaz de medir superficies difusas y reflexivas. No requiere rigidez óptica, y es fácilmente escalable (en un rango desde el orden de la micra hasta los 6 m en estudios previos a esta Tesis), seleccionando los elementos ópticos adecuadamente. Estas características hacen que sea más barata y más flexible que la interferometría clásica.

2.6.2 Comparación con técnicas basadas en triangulación láser

Los métodos de triangulación miden distancia a partir del ángulo formado por un punto de luz sobre la superficie con dos detectores separados espacialmente. Estos sistemas son útiles para medir en el rango de 1 a 300 mm.

La Interferometría de Desplazamiento Lateral es más fiable, y en términos generales, 10 veces más precisa. Además su profundidad de campo es mejor para una distancia de trabajo dada. Un buen ejemplo de sus aportaciones frente a la triangulación se da en [5], donde se indica como es capaz de resolver la medida superando el *límite de Rayleigh*, criterio que determina la diferencia más pequeña capaz de detectar un sistema de triangulación. Este límite viene dado por la Eq. 2.9, que indica la mínima separación a la que se deben encontrar dos puntos de luz para poder resolver sus posición δl sin

2.6. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

33

cometer errores por causa de la difracción,

$$\delta l = 1,22 \frac{f\lambda}{D}, \quad (2.9)$$

donde λ es la longitud de onda de la iluminación, f es la distancia focal de la lente del sistema de detección, y D su diámetro de apertura.

2.6.3 Comparación con focalización dinámica

Los métodos de focalización dinámica miden distancia determinando el mejor punto de enfoque de la cámara, y así, la distancia al objeto. Esta configuración requiere partes móviles y realimentación. Es por tanto un método caro y lento. Sólo funciona con superficies prácticamente planas.

El dispositivo basado en Interferometría de Desplazamiento Lateral, en contraposición, tiene ópticas fijas, y es más barato, fiable. Es además capaz de obtener mapas de superficies más complejas ya que presenta mayor rango dinámico.

2.6.4 Comparación con estereoscopia y telemetría

Los métodos estereoscópicos se emplean para medir distancias en sistemas en los que la distancia de trabajo al objeto es superior a 0.5 m, como en aplicaciones de robótica. La telemetría no es útil para distancias inferiores a los 5 m, por lo que tampoco es apta para muchas aplicaciones robóticas. La estereoscopia, al ser no colineal, tiene inconvenientes similares a la triangulación. Uno de sus principales inconvenientes es que requiere *data-matching*. Esto implica alargar los tiempos de procesamiento al tener que ejecutar rutinas de correlación para identificar las zonas que se corresponden dentro de distintas capturas.

Nuestro dispositivo, seleccionando las ópticas adecuadas para cada aplicación, puede medir con distancias de trabajo desde pocos mm hasta varios

metros, lo que la hacen la tecnología idónea para control, robótica, y sistemas de inspección *on-line*.

Cualidad	Requisito	Tecnología
Tipo de iluminación requerida	Pasiva	Visión estereo
		<i>Dynamic Focusing</i>
	Activa	Metodos interferométricos: luz coherente
		Resto de métodos: iluminación controlada
Colinealidad iluminación-detector		<i>Dynamic Focusing</i>
		Holografía Conoscópica / Desplazamiento Lateral
		Técnicas radar
Dimensiones	Puntual	<i>Dynamic Focusing</i>
		Triangulación
		Técnicas interferométricas
	Bidimensional	Iluminación estructurada
		Técnicas interferométricas
	Tridimensional	Iluminación estructurada
		Visión estereo
		Radar (por barrido)
	Técnicas interferométricas	

		<i>Dynamic Focusing</i>
Rapidez de medida	Lento	Visión estereo
	Rápido	Técnicas interferométricas
		Holografía Conoscópica / Desplazamiento Lateral
Precisión		Métodos interferométricos: Orden de la longitud de onda empleada
Problemas de robustez	Ante perturbaciones en el camino aéreo	Métodos no-colineales
	Ante vibraciones	Métodos interferométricos
	Ante interferencias	Técnicas radar
	Ante perturbaciones por cambios de luz	Métodos de iluminación pasiva
Coste	Baratos	Visión artificial
	Caros	Métodos interferométricos

Tabla 2.1: Clasificación de las tecnologías de medida en función de sus cualidades y requisitos del sistema de destino.

2.7 Conclusiones

En este capítulo se ha presentado el marco de trabajo en el que se localiza la investigación abierta.

Se ha realizado un repaso de las técnicas existentes de metrología óptica, analizando brevemente su principio de funcionamiento y aplicabilidad. Esto ha llevado a una comparación de tecnologías en función de los requisitos demandados por un sistema, que en este caso que se pueden resumir en robustez, aplicabilidad in-situ y posibilidad de alcanzar altas precisiones.

Las ventajas competitivas de la Interferometría de Desplazamiento Lateral frente a otras tecnologías son expuestas y analizadas. Se destacan a su vez las aportaciones de esta tecnología referentes a su alta aplicabilidad en entornos industriales adversos, y gran flexibilidad a bajo coste. Todas estas características, unidas a la experiencia del grupo de investigación, la presentan como una tecnología en auge, idónea para profundizar en su investigación.

Una vez justificada la adecuación de la Interferometría de Desplazamiento Lateral como eje central de la Tesis, se procederá a profundizar sobre ella en el siguiente capítulo.

Un viajero marino tiene incluso una impresión más vívida de que el océano esta hecho de ondas en lugar de materia.

Arthur S. Eddington
(1882-1944)

Capítulo 3

Revisión de la Interferometría de Desplazamiento Lateral

Una vez analizados los motivos de selección de la tecnología, en este capítulo se presentan los orígenes, principios teóricos y los dispositivos predecesores basados en Interferometría de Desplazamiento Lateral para el desarrollo de la presente Tesis.

3.1 Origen

El *Lateral Shearing* (o Desplazamiento Lateral) es un campo importante de la interferometría y ha sido ampliamente utilizado en diversas aplicaciones tales como chequeo de componentes ópticos, estudio de fluidos, fenómenos de difusión en gases y líquidos, y para medición de rango.

Básicamente, tal y como se describe en [101], el método de desplazamiento lateral consiste en duplicar el frente de ondas a analizar, desplazándolo ligeramente en una dirección, y obtener el patrón de interferencia entre el frente de ondas original y el desplazado. Cuando el frente de ondas es quasi-

plano, el desplazamiento lateral o *shear* se efectúa en su propio plano. Si es quasi-esférico, el desplazamiento lateral se obtiene deslizando el frente de ondas sobre sí mismo mediante rotación sobre el eje que pasa por el centro de curvatura del frente esférico.

Existen varias disposiciones físicas para general desplazamiento lateral. El famoso científico italiano Ronchi fue el primero en utilizar frentes de ondas desplazados lateralmente para la inspección de componentes ópticos en la primera mitad del siglo XX. Utilizó la difracción generada por un conjunto de líneas separadas adecuadamente para crear haces de luz de cero y primer orden. Anteriormente al descubrimiento del láser en la década de 1960, esta técnica se convirtió muy popular para chequeo óptico, y aún conserva el nombre del inventor, test de Ronchi.

A continuación se detallarán los principios físicos que modelan las formas más tradicionales de los interferogramas generados mediante *lateral shearing*.

3.2 Principios teóricos e interferogramas

El frente de ondas es el lugar geométrico de todos los puntos con la misma fase en el espacio tridimensional, y la distribución espacial del campo óptico OF se puede describir mediante la expresión compleja [24]:

$$OF = Ue^{i\phi}, \quad (3.1)$$

siendo U la amplitud, y ϕ la fase espacial. Se debe tener en cuenta que en esta expresión se ha suprimido la dependencia temporal del campo óptico, ya que no es necesario considerarlo para metrología porque es un valor conocido para cada componente en frecuencia. Para conocer la expresión del campo óptico de un frente de ondas al llegar al panel de detección, es posible calcular la fase como $k \cdot d$, siendo d la matriz de distancias desde el origen de la onda a cada punto del panel detección, y k el número de onda, que vale $\frac{2\pi}{\lambda}$. Por tanto, para un frente de ondas plano, la matriz d será un valor constante correspondiente a la distancia del panel de detección, y para una onda esférica, cada elemento deberá calcularse aplicando el teorema de Pitágoras en tres dimensiones.

3.2. PRINCIPIOS TEÓRICOS E INTERFEROGRAMAS

39

Al interferir dos frentes de onda coherentes y monocromáticos, sus campos ópticos se suman, y la intensidad que se observa en el panel de detección I es el módulo del campo suma, que se puede modelar con la Eq. 3.2, siendo $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ la diferencia entre las fases de cada onda en ese punto.

$$I = |OF_1 + OF_2| = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi). \quad (3.2)$$

Por tanto, es obvio que los patrones de franjas visualizados contienen información de la distancia original de los frentes de onda que interfieren. Vamos a analizar algunos ejemplos según el tipo y posición de los frentes de onda.

3.2.1 Frentes de onda planos

La interferencia entre dos frentes de onda perfectamente planos, no genera franjas de interferencia, sino un patrón de intensidad constante, ya que independientemente del punto del panel de detección en el que nos encontremos, la diferencia de fase $\Delta\phi$ entre ambos frentes será constante, y su valor determinará el valor de gris visualizado en el panel de detección.

Este hecho es empleado por los primeros interferómetros de desplazamiento lateral para chequear sistemas ópticos y lentes. A continuación se analizan algunos ejemplos.

Un sistema óptico diseñado para producir una onda perfectamente plana, de radio infinito, si sufre un ligero desenfoque, generará una onda que es ligeramente cóncava o convexa con un radio de curvatura muy grande. Si se realiza el desplazamiento lateral de dicha onda, la interferencia que se visualizará en zona de solapamiento de ambos frentes de onda estará formada por franjas rectilíneas equiespaciadas y perpendiculares a la dirección del *shear*. Si no hay desenfoque, no hay franjas. Esta situación se ilustra en la Fig. 3.1.

De forma análoga, se puede detectar cuándo el sistema óptico genera

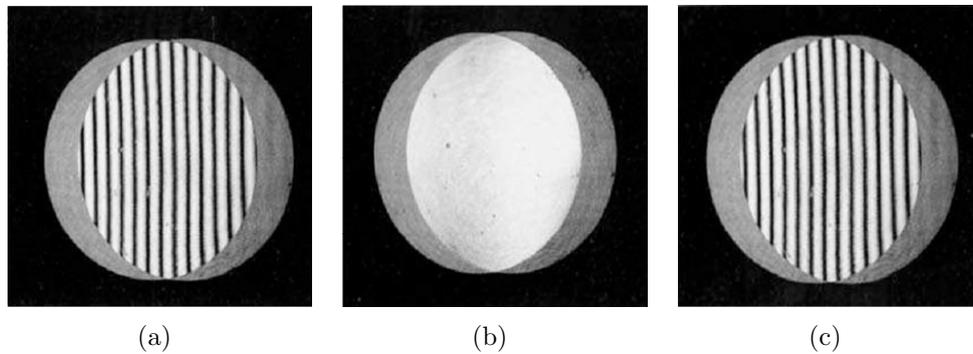


Figura 3.1: Interferogramas de desplazamiento lateral para un frente de ondas sin aberraciones: (a), antes del foco, (b), en el foco, donde no se visualizan franjas, y (c), fuera de foco. Las posiciones (a) y (c) se obtienen por ligeros desenfoques en la misma cantidad en las direcciones positiva y negativamente respectivamente, por lo que la densidad de franjas es igual. (*Extraído de [101]*).

una inclinación entre ambos frentes de onda. Es común que si aparece esta inclinación, sea en la dirección perpendicular al desplazamiento lateral. De nuevo, aparecerán franjas paralelas equidistantes entre sí. La introducción de inclinación adicionalmente al desplazamiento lateral puede ser un valor añadido en ciertas situaciones. Por ejemplo, si utilizamos un interferómetro de desplazamiento lateral que también proporcione inclinación, la secuencia correspondiente de interferogramas durante el proceso de enfoque sería la mostrada en la Fig. 3.2. En este caso, es más sencillo detectar pequeños desenfoques, ya que apreciar un cambio en la dirección de las franjas es más fácil que identificar el plano en el que hay ausencia total de las mismas.

Mediante el mismo procedimiento, se han caracterizado los interferogramas generados por aberraciones primarias, secundarias, u otros defectos en lentes. Una descripción detallada de estos interferogramas se puede consultar en [101]. A modo de curiosidad, en la Fig. 3.3 se muestran los interferogramas típicos de la aberración esférica primaria.

Es posible modelar analíticamente de manera sencilla la forma de los patrones de interferencia procedentes de este tipo de aberraciones. Por ejemplo, para la situación de desenfoque, la diferencia entre las fases de cada frente

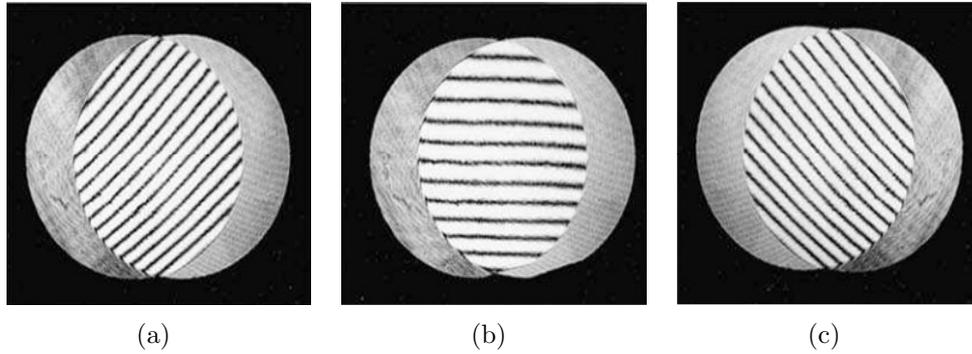


Figura 3.2: Interferogramas de desplazamiento lateral para un frente de ondas sin aberraciones: (a), antes del foco, (b), en el foco, y (c), fuera de foco. En este caso existe una cierta inclinación en la dirección ortogonal al *shear*. En el foco, (b), las franjas son paralelas a la dirección de *shear*. Antes y después de la distancia focal están inclinadas respecto la dirección de *shear*. (*Extraído de [101]*).

de ondas en un punto $P(x,y)$ de panel de detección es:

$$\Delta\phi(x,y) = 2Dxs = n\lambda, \quad (3.3)$$

siendo el coeficiente D la magnitud de la aberración, generalmente dada como número de longitudes de onda λ , y s el *shear* o desplazamiento aplicado. Se considera x la dirección del *shear*. Cuando no hay desenfoque $D = 0$ y no hay franjas.

Aplicando el mismo razonamiento, las franjas de un sistema óptico con inclinación, son igualmente equidistantes pero en la dirección perpendicular al *shear*, y quedan definidas por:

$$\Delta\phi(x,y) = Ey = n\lambda, \quad (3.4)$$

siendo E el ángulo de inclinación entre el frente de ondas original y el desplazado. La línea de intersección de los frentes de onda es paralela a la dirección del *shear*, eje x . Si existe simultáneamente desenfoque e inclinación, la diferencia de caminos ópticos viene dada por:

$$\Delta\phi(x,y) = 2Dxs + Ey = n\lambda. \quad (3.5)$$

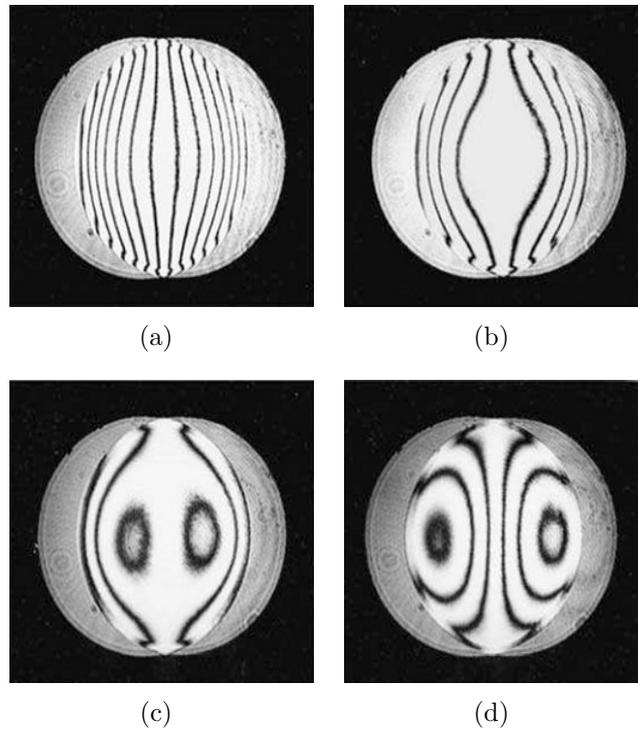


Figura 3.3: Interferogramas de desplazamiento lateral típicos de aberración esférica primaria debida a diferentes cantidades de desenfoque: (a), antes del foco, (b), en el foco, y (c) y (d), fuera de foco. El patrón de franjas de (b) se visualiza si el sistema está enfocado. (*Extraído de [101]*).

Esta ecuación representa un sistema de franjas rectilíneas y paralelas entre sí, pero que no son paralelas a ninguno de los dos ejes. Solamente si los coeficientes D o E son nulos, las franjas serán paralelas al eje x o y respectivamente.

Respecto a los sistemas ópticos que tienen aberración esférica primaria, el frente de ondas de error sigue la expresión $A(x^2 + y^2)^2$, siendo la A la magnitud de la aberración. El interferograma de desplazamiento se puede describir a partir de la expresión:

$$\Delta\phi(x, y) = 4A(x^2 + y^2)xs = n\lambda, \quad (3.6)$$

siempre que el sistema esté enfocado. Si adicionalmente a la aberración hay

desenfoque, las franjas quedan definidas por:

$$\Delta\phi(x, y) = [4A(x^2 + y^2)x + 2Dx]s = n\lambda. \quad (3.7)$$

Este tipo de procedimientos para análisis de componentes ópticos, aunque se llevan empleando desde antes de que se generalizara el cálculo computacional, siguen estando en vigor. En la actualidad se sigue investigando sobre estos métodos, incorporando en el mismo dispositivo otros avances en el mundo de la metrología óptica. Por ejemplo, Mehta et. al [104] aplican doble longitud de onda para extender el rango de medida en un interferómetro de desplazamiento lateral utilizado para verificar la colimación de un sistema óptico y reconstruir mapas de fase de objetos transparentes. Vidal et. al [137] utilizan un interferómetro de Fizeau en combinación con desplazamiento lateral para mejorar la exactitud del sistema de medida. Kumar et. al [89] miden el grosor de un cristal analizando mediante Interferometría de Desplazamiento Lateral el desenfoque que ha causado.

Todas las aplicaciones vistas hasta el momento se han aplicado a análisis de sistemas ópticos, pero los avances en metrología superficial utilizando esta tecnología han conseguido que sea utilizada en perfilometría óptica obtenido resultados muy satisfactorios. Ejemplos de estas aplicaciones han sido desarrollados por Lin et. al [98], combinando *phase shifting* e Interferometría de Desplazamiento Lateral, o por Mehta et. al [106, 105], utilizando análisis de Fourier. Liu et. al [99] y Kumar et. al [88] aplicaron la Interferometría de Desplazamiento Lateral para perfilometría en medidas de precisión y micro sistemas respectivamente.

Para presentar el principio físico del interferómetro en el que se fundamenta la presente Tesis, a continuación de analizan los patrones procedentes de la interferencia de frentes de onda esféricos.

3.2.2 Frentes de onda esféricos

De forma análoga a los casos anteriores, la interferencia generada por dos frentes de onda esféricos monocromáticos se puede expresar fácilmente a

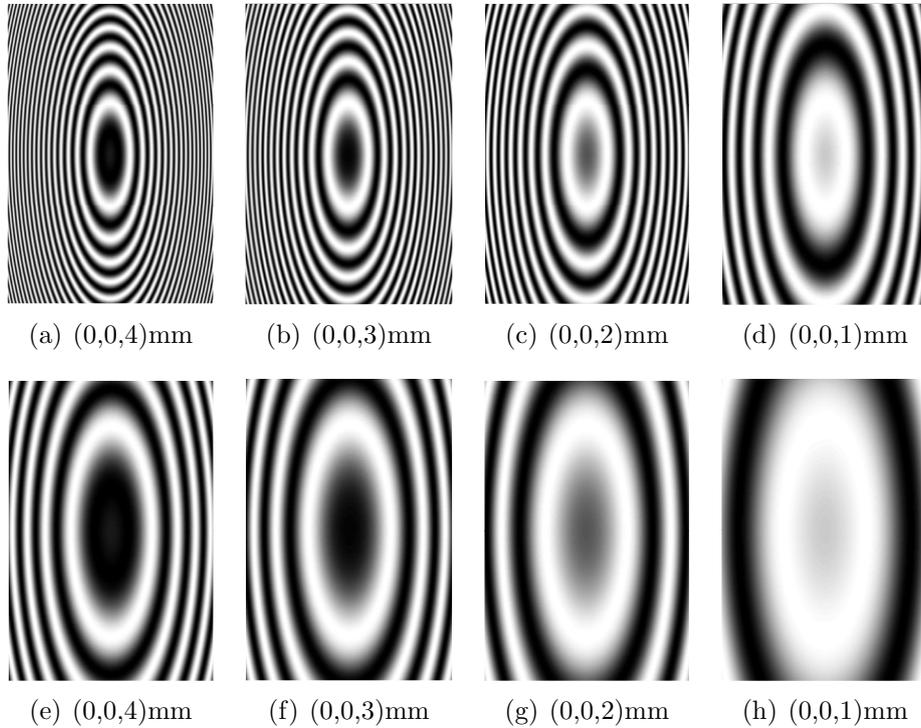


Figura 3.4: Patrón de interferencia de una onda esférica y su copia desplazada en el eje-z: *shear* expresado en coordenadas (x,y,z) . La fuente de ondas del frente esférico original se localiza a 100 mm del panel de detección para los interferogramas de la parte superior de la figura, y a 200 mm para los de abajo.

través de la ecuación que define la diferencia de fases entre las ondas que interfieren, como

$$\Delta\phi(x,y) = k(d_1 - d_2), \quad (3.8)$$

siendo k el número de onda, que se calcula como $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, y \mathbf{d}_1 y \mathbf{d}_2 las respectivas matrices de distancias del origen de cada frente de cada punto $P(x,y)$ del panel de detección.

Según esta ecuación, si un frente de ondas esférico es desplazado en la dirección del eje-z, el patrón de franjas obtenido de la interferencia del frente original con el desplazado está formado por ondas concéntricas cuya frecuencia depende de la distancia al panel de detección y del *shear* aplicado. El

3.2. PRINCIPIOS TEÓRICOS E INTERFEROGRAMAS

45

modelo de este interferograma se puede expresar como una particularización de la Ec. 3.8 para el caso en el que el desplazamiento se produce solamente en el eje-z. Las ondas concéntricas visualizadas en el panel de detección tienen mayor frecuencia según se alejan del centro. Para el punto P(x,y) del panel de detección, la diferencia de fase vale:

$$\Delta\phi(x, y) = k \left(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + (z - s)^2} \right). \quad (3.9)$$

Tal y como se muestra en las Figs. 3.4, mayor *shear* genera ondas de mayor frecuencia. En esta figura, se han representado los interferogramas sintéticos generados a partir de la intensidad de la suma de los campos ópticos de ondas esféricas desplazadas en el eje-z 4, 3, 2 y 1 mm respectivamente de acuerdo con la Eq. 3.9. Un mismo *shear* genera ondas de mayor frecuencia según disminuye la distancia al panel de detección. En los interferogramas de la parte superior de la figura el centro de curvatura del frente de ondas original se encuentra a 100 mm del panel de detección, y en los de la parte de abajo a 200 mm, por lo que estos tienen menor frecuencia.

Es posible que el desplazamiento se aplique en dos direcciones simultáneamente, siendo esta configuración denominada fuera de eje (*off-axis*), que provoca una desviación del punto en el que se forman las interferencias circulares concéntricas. Conforme nos alejamos del centro, menor radio de curvatura tienen las franjas de interferencia. En el caso de que el *shear* se haya aplicado con un determinado ángulo, el desplazamiento se produce en los ejes z y x respectivamente, y la interferencia se puede modelar mediante:

$$\Delta\phi(x, y) = k \left(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - \sqrt{(x - s_x)^2 + y^2 + (z - s_z)^2} \right), \quad (3.10)$$

siendo s_x y s_z la cantidad de *shear* aplicado en cada dirección. Un ejemplo de estos interferogramas se muestra en la Fig. 3.5. A mayor ángulo (medido sobre el eje-z), el centro del interferograma se encuentra más lejos del eje óptico, y la frecuencia de franjas es más uniforme para todo el interferograma. Así los interferogramas en los que el desplazamiento predominante es el en el eje-x, que corresponde en ambos casos con la subfigura (d) y (h), las franjas senoidales tienden a aplanarse. De nuevo, a mayor distancia al panel de detección, menor frecuencia de franjas. Así, para un mismo *shear*,

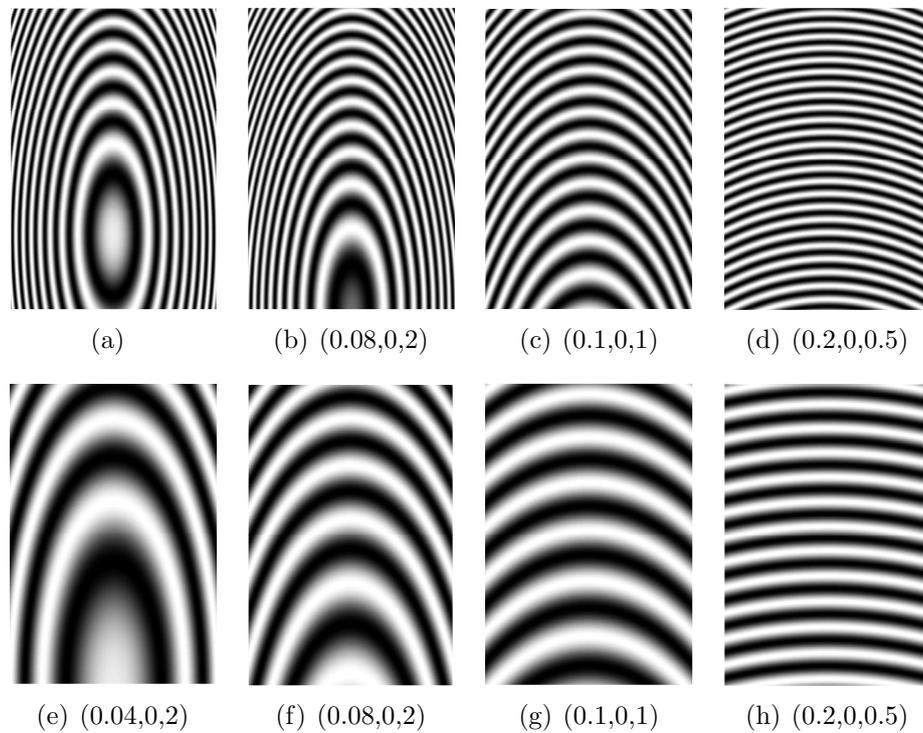


Figura 3.5: Patrón de interferencia de una onda esférica y su copia desplazada en el eje-z y eje-x simultáneamente: *shear* expresado en coordenadas (x,y,z) mm. El eje de curvatura del frente esférico original en se localiza a 100 mm del panel de detección para los interferogramas de la parte superior de la figura, y a 200 mm para los de abajo.

los interferogramas de la parte superior de la figura, cuya distancia del origen del frente de ondas al panel de detección es de 100 mm, tienen mayor densidad de franjas que los de la parte inferior, localizados a 200 mm. Este tipo de interferogramas son los que utiliza la Holografía Conoscópica [128]. Como expresa la Ec. 3.10, la información de la distancia original del frente de ondas esférico está codificada en el patrón de interferencia. Si el frente de ondas se ha originado de la reflexión de un haz láser sobre la superficie del un objeto, será posible por tanto obtener la distancia a la que se encuentra dicho punto del objeto. Más adelante se dedicará una sección al análisis más detallado de la Holografía Conoscópica, por ser la base del dispositivo sobre

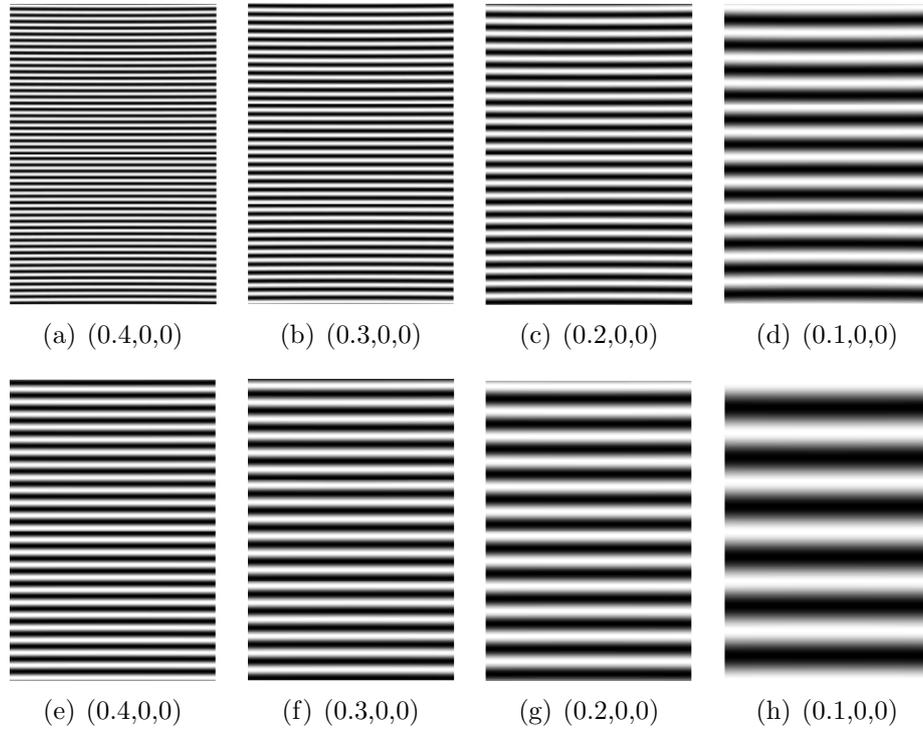


Figura 3.6: Patrón de interferencia de una onda esférica y su copia desplazada en el eje-x: *shear* expresado en coordenadas (x,y,z) mm. La fuente de ondas del frente esférico original se localiza a 100 mm del panel de detección para los interferogramas de la parte superior de la figura, y a 200 mm para los de abajo.

la que se ha desarrollado la investigación. Las ecuaciones que proporcionan el perfil de distancias de medida dependen de términos en z^2 , lo que dificulta el análisis, por lo que la tendencia actual en Holografía Conoscópica en la denominada Holografía Conoscópica Lineal [129], que trata de llevar el centro de la interferencia a una zona alejada del eje óptico con el fin de obtener relaciones lineales entre la señal de frecuencia y la distancia equivalente.

En el caso de que el desplazamiento sea únicamente en el eje-x se consigue evitar la variación de la frecuencia en cada columna del panel de detección, siendo la expresión de la diferencia de fases:

$$\Delta\phi(x, y) = k \left(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - \sqrt{(x - s)^2 + y^2 + z^2} \right). \quad (3.11)$$

Se obtienen por tanto franjas paralelas de frecuencia uniforme. La frecuencia aumenta linealmente con el *shear* y disminuye con la distancia z al panel de detección, como se muestra en la Fig. 3.6. El primer interferómetro que utiliza este tipo de patrón para medir distancias ha sido creado por Häusler et al. [70], y también merece una mención especial.

3.3 Holografía Conoscópica

La Holografía Conoscópica es una técnica interferométrica holográfica que utiliza luz incoherente[128, 130]. Se basa en las propiedades de birrefringencia de ciertos cristales uniáxicos, que permiten la separación de la onda que proviene de cada punto del objeto en dos ondas desfasadas proporcionalmente a la geometría del montaje, que se describirá a continuación.

3.3.1 Principio físico

La ausencia de rayo de referencia global, como ocurría con la holografía tradicional, permite trabajar con luz incoherente. Pero para que los rayos generados puedan interferir se requiere coherencia de polarización. Esto se consigue emplazando un conoscopio, que en un cristal uniáxico con dos polarizadores circulares, uno a cada lado del cristal. Este montaje se representa esquemáticamente en la Fig. 3.7, en la que aparece ampliada la región de contacto aire-cristal para mostrar el fenómeno de separación angular entre los dos modos de propagación.

En el conoscopio, cada punto P del objeto refleja la luz quasi-monocromática y espacialmente incoherente, en un cono de luz hacia el sistema. Como cada longitud de onda de la fuente de iluminación provocará la interferencia de una determinada frecuencia, es importante que el espectro de la fuente empleada sea estrecho, para poder visualizar el holograma con suficiente contraste. Por esta condición, es común la utilización de luz láser en Holografía Conoscópica, aunque ésta sea coherente. La incoherencia de la iluminación

3.3. HOLOGRAFÍA CONOSCÓPICA

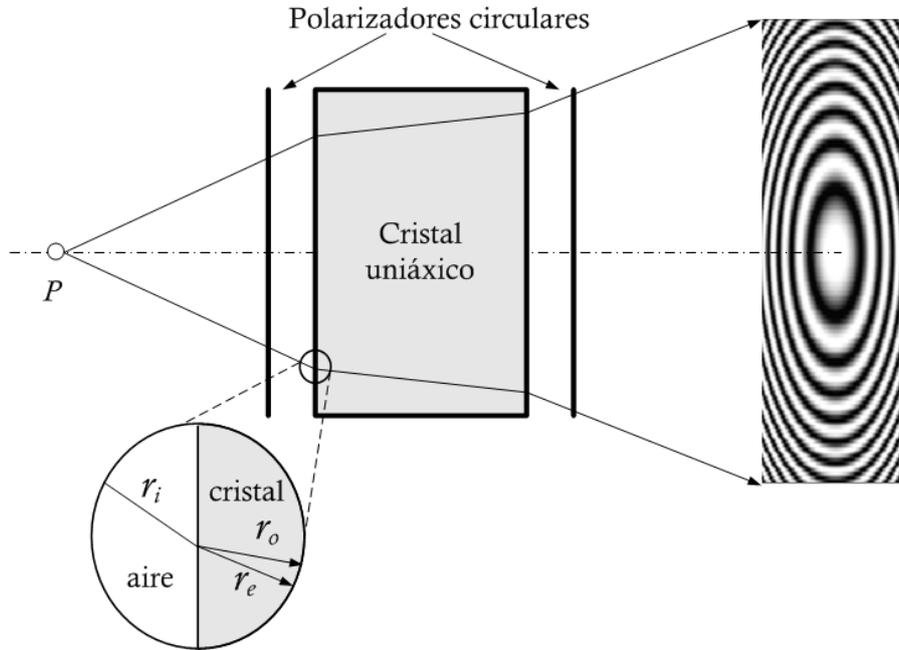


Figura 3.7: Principio de la Holografía Conoscópica

para esta tecnología es condición admisible, pero no necesaria.

Cada rayo de este cono atraviesa el primer polarizador circular, que deja pasar una onda plana, y llega al cristal uniaxial, que la divide en dos polarizaciones ortogonales con un desfase relativo de $\frac{1}{4}$ de onda.

En el interior del cristal los dos rayos -el ordinario y el extraordinario- se propagan con velocidades diferentes, debido a que el índice de refracción del cristal es distinto para cada uno de ellos. El índice de refracción para el rayo ordinario es constante, mientras que el correspondiente al rayo extraordinario es función del ángulo que forma este rayo con el eje óptico.

A la salida del cristal, los dos rayos se desfazan según la diferencia de sus velocidades. Después del segundo polarizador, los dos rayos se reencuentran en un mismo estado de polarización, pudiendo entonces interferir de manera constructiva o destructiva según la diferencia de fase. El interferograma observado sobre un medio es un interferograma de Fresnel como la que se

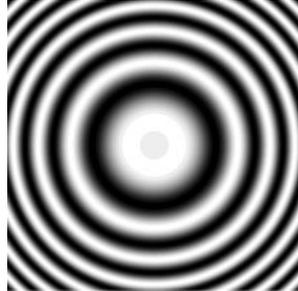


Figura 3.8: Figura de Fresnel.

aprecia en la Fig. 3.8.

3.3.2 Principio teórico

El desarrollo que efectuaremos a continuación pondrá de manifiesto la forma de reconstruir la distancia teórica a partir del análisis del interferograma para el montaje conoscópico elemental(un cristal birrefringente emplazado entre dos polarizadores circulares). Consideremos un sistema ortonormal de coordenadas $X'Y'Z'$ centrado en un punto del plano de registro coincidente con la intersección de dicho plano con el eje óptico, siendo la dirección de este último la del eje Z' . Sea P un punto del plano objeto y Q otro punto correspondiente al plano de observación. Este plano de observación, llamado también plano de registro, se localiza en la superficie sensible del detector utilizado.

El cristal cuya longitud es L , se sitúa con su eje óptico paralelo al del sistema. El índice de refracción para el rayo ordinario será n_o y para el rayo extraordinario n_e . Las intersecciones del eje óptico con los rayos que salen de Q definen las distancias ordinaria Z_o y extraordinaria Z_e del punto P visto en el plano de observación. Estas proyecciones pueden considerarse como el resultado de la supresión del efecto geométrico introducido por el cristal. Su media geométrica es la distancia conoscópica corregida $Z_c = \sqrt{Z_o Z_e}$.

Para designar a los ángulos que forman los rayos que salen de P y Q con

3.3. HOLOGRAFÍA CONOSCÓPICA

51

la dirección del eje óptico se utilizarán los símbolos β (en el aire) y θ (en el interior del cristal). Estos símbolos irán acompañados de los subíndices e , o o c , según se refieran al rayo ordinario, al extraordinario o al rayo medio relativo a la distancia conoscópica corregida.

Las coordenadas del punto P son (x, y, z) . Como el origen del sistema de referencia se encuentra en el plano de registro, las coordenadas del punto Q son $(x', y', z' = 0)$. En el plano del detector la distancia radial r del punto Q es igual a

$$r = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}. \quad (3.12)$$

Finalmente θ_e representa el ángulo que forma el eje óptico con el vector de Poynting asociado a la onda extraordinaria.

La intensidad luminosa en Q se expresa por

$$I = I_o(1 + \cos(\Delta\phi)), \quad (3.13)$$

siendo I_o la intensidad procedente de P , mientras que $\Delta\phi = \Delta\Pi + \Delta\varphi$ representa la suma del desfase introducido por los polarizadores ($\Delta\Pi$) y el debido al cristal ($\Delta\varphi$).

A continuación procedemos a calcular el valor $\Delta\phi$, teniendo en cuenta la influencia de los polarizadores y del cristal.

- *Cálculo del desfase introducido por el cristal*

Las leyes de Snell-Descartes relativas a la refracción suministran las siguientes ecuaciones:

$$\sin(\beta_o) = n_o \sin(\theta_o) \quad \text{para el rayo ordinario,} \quad (3.14)$$

$$\sin(\beta_e) = n_e(\theta_e) \sin(\theta_e) \quad \text{para el rayo extraordinario,} \quad (3.15)$$

donde $n_e(\theta_e)$ representa la variación del índice de refracción del rayo extraordinario en función del ángulo que forma el rayo con el eje óptico.

Esta variación viene dada por la expresión:

$$\frac{1}{n_e^2(\theta_e)} = \frac{\sin^2 \theta_e}{n_e^2} + \frac{\cos^2 \theta_e}{n_o^2}. \quad (3.16)$$

En lo que respecta al vector de Poynting, su dirección viene definida por:

$$\tan \theta_E = \frac{n_o^2}{n_e^2} \tan \theta_e. \quad (3.17)$$

Por otra parte, la geometría del dispositivo proporciona las siguientes relaciones:

$$r = (Z - L) \tan \beta_o + L \tan \theta_o, \quad (3.18)$$

$$r = (Z - L) \tan \beta_e + L \tan \theta_E. \quad (3.19)$$

El conjunto de la Ec. 3.14 a la 3.19 representan las expresiones que constituyen la conoscopía. Las geometrías de los rayos ordinario y extraordinario proporcionan los caminos ópticos de los rayos l_o y l_e . El camino óptico del rayo ordinario será la suma del camino en el aire y el camino en el cristal:

$$l_o = \frac{Z - L}{\cos \beta_o} + \frac{n_o L}{\cos \theta_o}. \quad (3.20)$$

El camino óptico del rayo extraordinario, l_e , será también la suma del camino en el aire y el camino en el cristal, pero en este caso hay que tener en cuenta que:

- El índice de refracción del rayo extraordinario depende del ángulo de incidencia.
- Se debe aplicar el principio de Huygens para medios anisótropos uniáxicos, puesto que no hay simetría en la dirección del rayo.

$$l_e = \frac{Z - L}{\cos \beta_e} + \frac{n_e(\theta_e)}{\cos \theta_E} \cos(\theta_E - \theta_e). \quad (3.21)$$

3.3. HOLOGRAFÍA CONOSCÓPICA

53

La expresión del desfase $\Delta\varphi$ entre los dos rayos es la diferencia de camino óptico ($l_e - l_o$) multiplicada por el número de onda $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, donde λ es la longitud de onda de la fuente utilizada,

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(l_e - l_o). \quad (3.22)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.22 las expresiones de l_e y l_o dadas por la Ec. 3.20 y 3.21 se obtiene el desfase introducido por el cristal en un punto Q del detector,

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{Z-L}{\cos\beta_e} - \frac{Z-L}{\cos\beta_o} + \frac{Ln_e(\theta_e)\cos(\theta_E - \theta_e)}{\cos\theta_E} - \frac{Ln_o}{\cos\theta_o} \right). \quad (3.23)$$

Combinando las Ecs. 3.14 a 3.19 con la Ec. 3.23, la diferencia de fase se puede escribir en función de los parámetros del sistema. De todas maneras, no es posible expresar explícitamente la diferencia de fase $\Delta\varphi$ en función de la coordenada radial en el plano del detector. Sin embargo, la necesidad de establecer esta dependencia, que vendrá dada en la forma,

$$\Delta\varphi = \sum_{k=0,2,4,\dots}^{+\infty} a_k r^k, \quad (3.24)$$

obliga a realizar una serie de cálculos en los que, debido a la simetría cilíndrica respecto al eje óptico, se desprecian en la suma anterior los términos de orden impar. De esta forma se obtendría asumiendo un desarrollo hasta orden 2 en r

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{Z_o} - \frac{1}{Z_e} \right) r^2. \quad (3.25)$$

Con la aproximación de cuasi-parallelismo, que los ángulos β_o y β_e son pequeños y sus senos pueden aproximarse al valor de los ángulos, la ecuación 3.23 queda,

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta n L}{n_e^2 Z_c^2} r^2. \quad (3.26)$$

- *Cálculo del desfase introducido por los polarizadores*

Para determinar la respuesta impulsional $H(r, z)$ del sistema conoscópico en un punto P de un objeto, hay que tener en cuenta no sólo el desfase introducido por el cristal $\Delta\varphi$, sino también el desfase debido a los polarizadores circulares, $\Delta\Pi$. Para facilitar el estudio de este sistema se adopta el formalismo de Jones, que consiste en representar cada componente por una matriz.

Un polarizador circular está compuesto por un polarizador lineal y una lámina de $\frac{\lambda}{4}$. Sin embargo, dentro del primer polarizador circular, entre el polarizador lineal y la lámina $\frac{\lambda}{4}$ se inserta una lámina de cristal líquido (LCD), que tiene la particularidad de que, si está bajo tensión, hace que la polarización gire 90° . Se comporta entonces como una lámina de media onda orientada a 45° respecto al eje de polarización lineal. Es decir, el polarizador lineal y la lámina de $\frac{\lambda}{4}$ forman el polarizador circular, mientras que los dos estados de la válvula LCD permiten obtener dos polarizaciones con diferencia de media onda.

El desfase $\Delta\Pi$ introducido por los polarizadores será positivo o negativo, dependiendo de la tensión del LCD. Así, si la lámina LCD está bajo tensión, la respuesta impulsional conoscópica positiva atendiendo a las Ecs. 3.13 y 3.26 se expresa por:

$$I_+ = I_o(1 + \cos(\Delta\phi)) = I_o \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta n L}{n_c^2 Z_c^2} r^2 \right) \right). \quad (3.27)$$

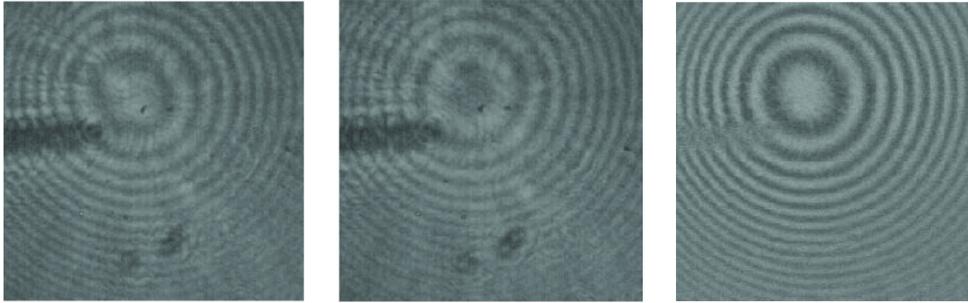
Si la lámina LCD está sin tensión, la respuesta impulsional negativa viene dada por:

$$I_- = I_o(1 - \cos(\Delta\phi)) = I_o \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta n L}{n_c^2 Z_c^2} r^2 \right) \right). \quad (3.28)$$

La Fig. 3.9 muestra los hologramas positivo y negativo obtenidos por un dispositivo conoscópico. Se observa que los ruidos ópticos se localizan en los

3.3. HOLOGRAFÍA CONOSCÓPICA

55



(a) Holograma positivo. (b) Holograma negativo. (c) Holograma de contraste.

Figura 3.9: Hologramas obtenidos por un dispositivo basado en Holografía Conoscópica.

mismos lugares dentro de la captura, y son eliminados en el holograma de contraste.

El contraste óptico está definido por:

$$C = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-} = \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta n L}{n_c^2 Z_c^2} r^2\right) = \cos\left(K \frac{r^2}{Z_c^2}\right). \quad (3.29)$$

La ventaja principal de emplear el holograma de contraste es que incrementa notablemente la relación señal/ruido de la medida, ya que desaparecen los términos debidos a la intensidad del punto luminoso I_o .

Como se puede apreciar, para la configuración elemental de Holografía Conoscópica, el holograma es una función cosenoidal de frecuencia variable con el cuadrado de r y que varía de forma inversa al cuadrado de la distancia del punto P al Q , de lo que se deduce que los puntos más alejados del cristal birrefringente darán lugar a menor número de franjas por unidad de superficie.

En el apartado 3.4 se describe una mejora añadida a esta tecnología, ya que se consigue que frecuencia evolucione de forma prácticamente lineal.

3.3.3 Holografía de un punto

Conforme se ha visto en los apartados anteriores, el patrón de interferencia observado consiste en un conjunto de franjas concéntricas, donde la intensidad en el punto Q , $I(Q)$, resultante de la interferencia de los rayos ordinario y extraordinario en el punto $Q(x', y')$, se relaciona con la intensidad de su punto P correspondiente, $P(x, y, z)$ por medio de la expresión:

$$I(Q) = I(P)(1 + \cos \Delta\varphi), \quad (3.30)$$

donde $\Delta\varphi$ está definida en la Ec. 3.26.

3.3.4 Holografía de un objeto plano

Si se considera un objeto plano localizado a una distancia Z del plano de registro Σ , su distribución de intensidad se representa por $I(x, y)$. A cada punto $P(x, y)$ le corresponde en el plano Σ una zona de Fresnel. En el punto $Q(x', y')$ de Σ , la intensidad resultante es la suma de todas las zonas de Fresnel generadas por cada punto $P(x, y)$ activo como emisor incoherente. El holograma de un objeto plano de intensidad $I(x, y)$ viene dado por:

$$H(x', y') = \int \int_{\text{objeto}} I(x, y, z)(1 + \cos \Delta\varphi) dx dy. \quad (3.31)$$

Suponiendo que fuera del objeto $I(x, y)$ es nula, esta expresión pasa a ser una ecuación de convolución.

3.3.5 Holografía de un objeto 3D

Un objeto tridimensional se caracteriza por la ecuación $z = f(x, y)$. Cada punto de la superficial contribuye aditivamente al holograma del objeto, que

3.4. OTROS DISPOSITIVOS

57

no es más que una simple convolución. El holograma de un objeto tridimensional viene dado por:

$$H(x', y') = \int \int \int_{\text{objeto}} I(x, y, z(x, y))(1 + \cos \Delta\varphi(x, y)) dx dy dz(x, y). \quad (3.32)$$

Esta ecuación puede interpretarse como una suma de convoluciones correspondientes al troceado fino del objeto tridimensional. Quedando la ecuación como una convolución:

$$H(x', y') = I(x, y, z(x, y)) * (1 + \cos \Delta\varphi(x, y)), \quad (3.33)$$

donde $*$ es el operador convolución. La ecuación anterior corresponde a un sistema lineal cuya respuesta impulsional fuese:

$$R(x', y') = 1 + \cos \Delta\varphi(x, y) = 1 + \cos(\alpha(x^2 + y^2)) = 1 + \cos(\alpha r^2). \quad (3.34)$$

3.4 Otros dispositivos

Haüsler et al. [70] propusieron un sensor de rango que utiliza un *Savart plate* para general el desplazamiento lateral, cuyo esquema se muestra en la Fig. 3.10. Consiste en proyectar un punto láser sobre el objeto a inspeccionar, que refleja un frente de ondas esférico. El radio de este frente de ondas al llegar al panel de detección resulta ser la distancia z del punto iluminado del objeto al panel de detección. La medición del radio se realiza mediante Interferometría de Desplazamiento Lateral: se duplica virtualmente el punto iluminado por ejemplo con un *Savart plate*, y se evalúa el patrón de interferencia resultante.

Las principales ventajas de este sistema son que la resolución en profundidad es fácilmente escalable desde resoluciones por debajo de la micra a varios milímetros dependiendo de la distancia de trabajo, y que no existen problemas de ambigüedad como en la interferometría convencional. El sistema funciona tanto para objetos especulares como difusos. Para esta configuración se alcanzaron resoluciones en profundidad de $10 \mu m$ (rms) para

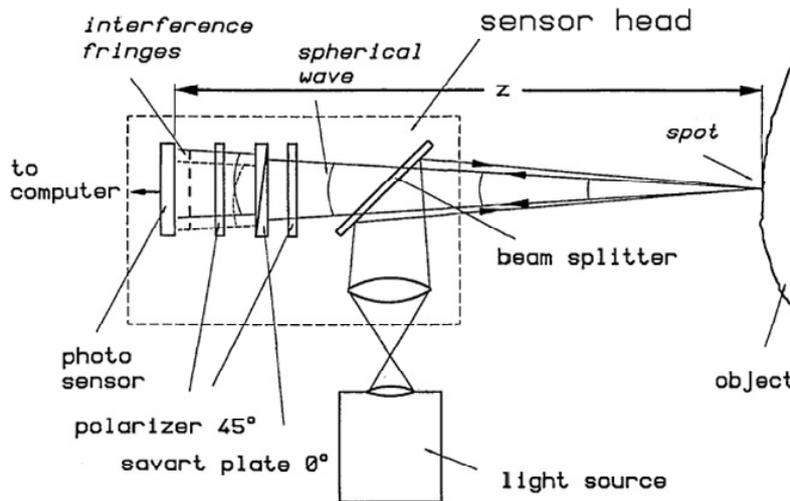


Figura 3.10: Diagrama esquemático de un interferómetro de desplazamiento lateral basado en Savart plate para medidas de rango. (Extraído de [70]).

distancias de trabajo de 300 mm en objetos especulares, y resoluciones de $1\mu\text{m}$ para distancias de trabajo de 5 mm para objetos rugosos. Para obtener resoluciones relativamente altas es necesario reducir el *speckle* que aparece en los interferogramas procedentes de superficies rugosas, como los mostrados en la Fig. 3.11. Los límites de medida de este dispositivo son principalmente debidos a este efecto y se analizan en [69]. Un análisis más profundo sobre el ruido *speckle* se verá en el capítulo siguiente.

El patrón de interferencia generado por dos copias virtuales del mismo frente de ondas está compuesto por franjas paralelas, cuyo periodo p es

$$p = \frac{\lambda z}{s}, \quad (3.35)$$

siendo λ la longitud de onda de la fuente de luz, s el shear introducido por el *Savart plate*, y z la distancia del panel de detección al objeto. Este resultado está basado en la aproximación cuadrática de un frente de ondas esférico que es válida porque la apertura del sistema es pequeña.

La combinación de Interferometría de Desplazamiento Lateral y medición de rango permite construir sensores de medida muy precisos y aplicables en

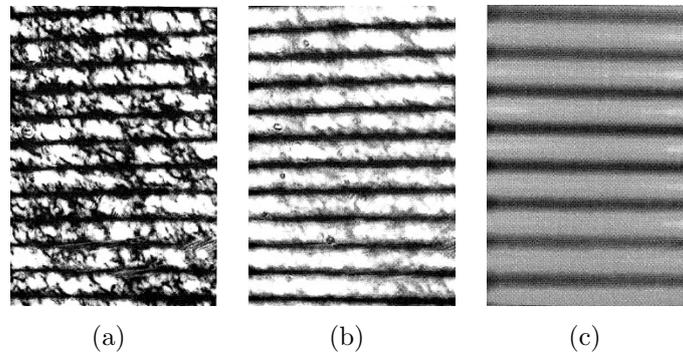


Figura 3.11: Interferogramas de franjas paralelas afectados por *speckle*. (a) sin reducción de *speckle*, (b) con reducción mediante promediado, (c) con iluminación parcialmente coherente. (*Extraído de [69]*).

un rango dinámico elevado. Un buen ejemplo de de esto es la denominada Holografía Conoscópica Lineal [129]. Esta tecnología está basada en un módulo que contiene dos cristales birrefringentes en una configuración específica. El patrón de interferencia obtenido, al igual que en dispositivo anterior, está formado por franjas equidistantes cuya frecuencia depende casi linealmente de la distancia. Su principio físico, es por tanto, muy similar al descrito por Haüsler et al. [70]. Sin embargo, esta tecnología ha incorporado ciertas mejoras y su patente está explotada por la empresa Optimet. El dispositivo basado en Holografía Conoscópica Lineal se denomina ConoProbe, y una imagen del módulo comercial se muestra en la Fig. 3.12. El patrón bidimensional se enfoca en la dimensión perpendicular a las franjas para obtener una señal unidimensional. Se utiliza un *beam-splitter* polarizador para grabar cada polarización por separado en un sensor lineal. Con estas dos señales se calcula el contraste, ya que proporciona una medida más robusta y compensada de las desuniformidades de la luz y parte del *speckle*. El siguiente paso es un análisis espectral con el fin de determinar la frecuencia de franjas, y posteriormente la distancia medida. Existe toda una gama de este tipo de sensores, en función de la lente seleccionada. La tabla 3.1 muestra una relación de las características del dispositivo ConoProbe.

Los sensores de medida ConoProbe están diseñados para ser instalados fácilmente en cualquier línea de producción sin interferir en el proceso. Según



Figura 3.12: Dispositivo comercial denominado ConoProbe, basada en Holografía Conoscópica Lineal.

los requisitos de cada aplicación, se debe seleccionar una u otra lente, que permite obtener distintas precisiones desde cada distancia de trabajo, indicadas en la tabla 3.1. Existe también una variante que permite obtener medidas de perfil en vez de puntuales. Este dispositivo se denomina comercialmente ConoLine. Sus principales características se indican en la tabla 3.2. Proporciona la distancia de un perfil de 600 puntos por adquisición. El interés de sus aplicaciones para perfilometría in-situ se ha constatado en numerosas ocasiones [44, 6, 3, 47, 55, 92, 113, 123, 113].

El dispositivo empleado para el desarrollo de esta Tesis combina una de las ideas utilizadas en la ConoLine, consistente en proyectar un perfil en vez de un punto, con el principio de funcionamiento básico descrito inicialmente por Häusler, en un montaje de cuyo diseño permite obtener muchas de las ventajas de flexibilidad de los sensores comerciales basados en Holografía Conoscópica, cuyo esquema se muestra en la Fig. 3.1. El objetivo es aplicarlo a medidas submicrométricas, por lo que se ha diseñado para una distancia de trabajo de unos 100 mm, con una lente de 75 mm y más de 5 mm de anillos de extensión.

En el próximo capítulo se introducirá el prototipo y su principio de funcionamiento.

Lente (mm)	Precisión (μm)	Error (μm)	Rango (mm)	Distancia (mm)
25	< 1	< 0,3	1.8	15
50	< 3	< 0,8	8.0	45
75	< 6	< 1,5	18	70
100	< 12	< 3,0	36	90
200	< 40	< 15	125	190
25 (HD)	< 0,5	< 0,2	0.6	15
50 (HD)	< 1	< 0,3	1.8	45

Tabla 3.1: Características principales del sensor comercial ConoProbe, basado en Holografía Conoscópica Lineal. Proporciona medidas puntuales.

3.5 Estudios anteriores

El grupo de investigación del Área de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Oviedo en el que se ha desarrollado la Tesis aporta gran experiencia en el ámbito de la Interferometría de Desplazamiento Lateral. Ha realizado varias colaboraciones con la empresa Optimet, desarrollado varios sensores basados en Holografía Conoscópica, además de múltiples proyectos en los que se aplica esta tecnología.

Por ejemplo, la Fig. 3.14 muestra un ejemplo de sistema de medida instalado en la propia línea de producción de rodamientos síncronos para el sector del automóvil [55]. Un robot se encarga de trasladar cada rodamiento de la línea de salida a una siguiente etapa en la que hay una base giratoria. Se utiliza un sensor óptico ConoProbe para adquirir los datos 3D, que posteriormente son procesados por un ordenador. Cada pieza es inspeccionada, medida y clasificada automáticamente, según sus diámetros principales, que son medidos con precisión cercana a la micra. Por supuesto, este proceso se realiza sin introducir retrasos en la línea de producción. Todas las medidas

Lente (mm)	Precisión (μm)	Error (μm)	Rango (mm)	Distancia (mm)
25	< 5	< 2	1.8	13
50	< 15	< 5	8.0	39
75	< 18	< 10	18	62
100	< 47	< 20	30	90
125	< 60	< 25	45	116

Tabla 3.2: Características principales del sensor comercial ConoLine, basado en Holografía Conoscópica Lineal. Proporciona medidas de perfil.

son almacenadas para posterior análisis.

Otra aplicación interesante puede verse en la Fig. 3.15, en la que se aprovechan al máximo los beneficios de la configuración colineal del sensor ConoProbe. En este proyecto, la superficie interna y externa de sólidos de revolución se mide de forma simultánea. El objeto se va rotando mientras que el sensor va adquiriendo los datos de medida. La cara interna se mide gracias al uso de un periscopio que modifica la dirección del camino óptico introduciendo un ángulo de 90° .

Otras aplicaciones de este tipo de sensor incluyen la medida de vibraciones de baja frecuencia en ambientes hostiles [123], en los que los métodos tradicionales, como acelerómetros no pueden emplearse porque no son capaces de soportar la alta temperatura del objeto a medir, o dan resultados imprecisos si las frecuencias son demasiado bajas.

Los sensores que adquieren un perfil completo en vez de una medida puntual por interferograma se denominan ConoLine. El procesamiento de estas señales se basa en la tecnología de DSPs. Un estudio completo de las técnicas de procesamiento de fase para este tipo de dispositivos se ha realizado en la Tesis de Fernández [50]. Su aplicación en detección de defectos

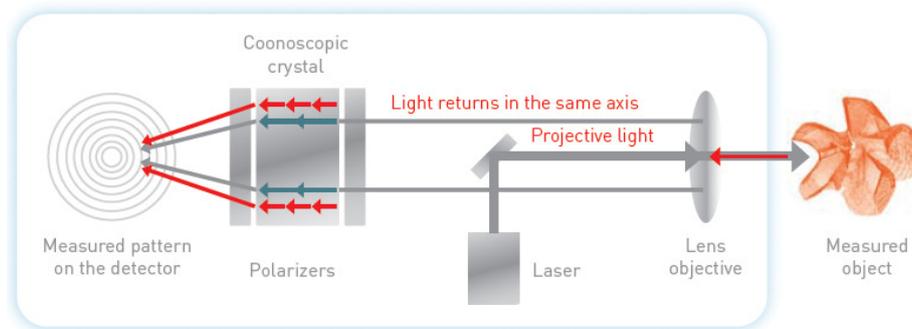


Figura 3.13: Disposición de elementos en un sensor comercial basado en Holografía Conoscópica. Es un dispositivo compacto, fácilmente escalable para distintas distancias de trabajo intercambiado la lente del objetivo.

superficiales ha sido estudiando en la Tesis de Enguita [47], mientras que la de Álvarez [4] utiliza algoritmos genéticos para identificación y calibración del sistema.

La aplicación de estos estudios a la inspección in-situ de desbastes de acero de 7 - 12 metros de largo por 700 - 1600 mm de ancho, y cuyo peso es aproximadamente unas 20 Tm, es uno de los proyectos más ambiciosos [42]. Durante la solidificación de la colada continua de acero, las tensiones termales pueden producir grietas en las superficie de los desbastes. En estos casos, deben ser reparados antes de enviarse a la siguiente etapa del proceso siderúrgico, la laminación. Para poder inspeccionar estos desbastes de forma visual se requiere que estén almacenados durante 3 días para que enfríen, y posteriormente se reparen si es preciso, y posterior calentamiento para continuar con el proceso. Se ha diseñado un sistema de inspección automatizado cuyo objetivo principal es detectar los defectos superficiales en caliente sin interferir en la siderurgia. Las condiciones ambientales son muy adversas, ya que hay altos niveles de ruido electromagnético, polvo, vibraciones, y una temperatura entre 600 y 900° C, por lo que los sensores se han de mantener a una distancia de seguridad que en este caso es de unos 120 mm.

El desarrollo de sensores capaces de proporcionar medidas desde grandes distancias de trabajo ha sido realizado en colaboración con el grupo de in-

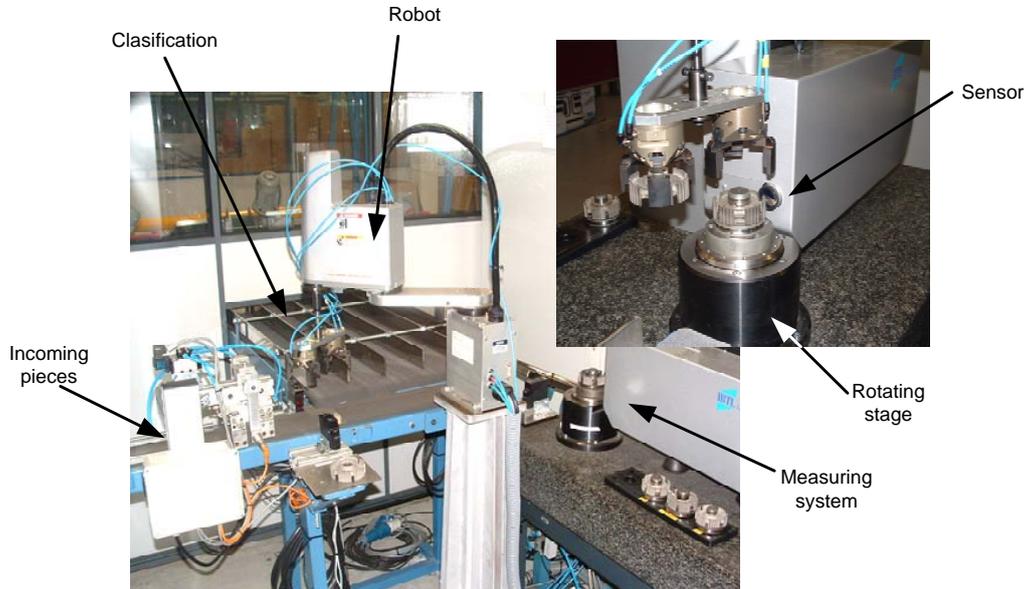


Figura 3.14: Sistema de medida y clasificación automática de rodamientos síncronos, instalado en PMG Asturias.

vestigación de la Universidad de Oviedo [44, 54]. El sensor se ha denominado Long Stadoff Line. En la Fig. 3.16 se muestra el prototipo de laboratorio y sus principales componentes ópticos: un módulo conoscópico, un polarizador con una válvula que permita obtener dos imágenes del mismo objeto con distinta polaridad, una lente cilíndrica que genere una imagen que abarque todo el sensor de la cámara, otro polarizador, un filtro que rechace la luz de diferente longitud de onda del láser, y una cámara CCD con una óptica que recoja el interferograma final.

Estos dispositivos son los utilizados en el equipo instalado en un pórtico construido para tal efecto, capaz de encajar en la cinta transportadora por la que circulan los desbastes recién cortados. Una fotografía de este proyecto, indicando los principales elementos que lo componen se muestra en la Fig. 3.17. Una grieta característica de los desbastes escaneados se muestra en la Fig. 3.18, así como la reconstrucción proporcionada por el prototipo. Este tipo de defectos tienen una longitud que puede variar desde los 100 mm hasta más de un metro, un ancho de 1 mm aproximadamente, y

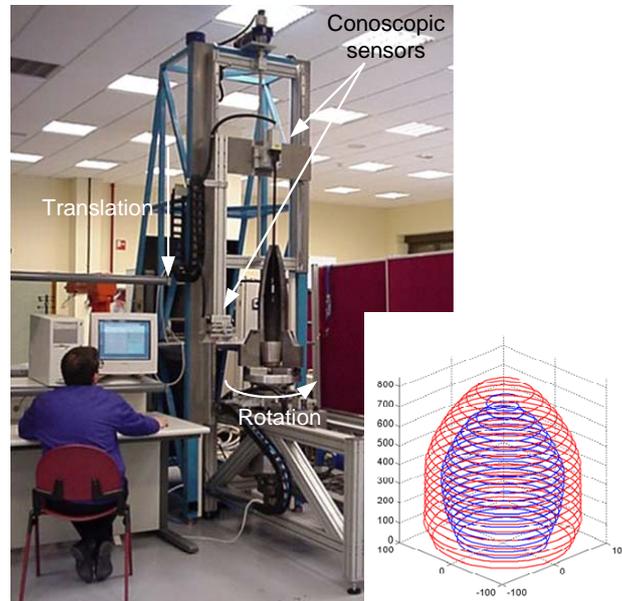


Figura 3.15: Sistema de medida simultánea de las caras interna y externa de un sólido de revolución, aprovechando los beneficios de la configuración colineal del sensor ConoProbe.

una profundidad que suele ser superior al medio milímetro. Este equipo lleva funcionando en la planta de Arcelor en Asturias desde el año 2007 con alta fiabilidad y productividad. Más de 10 millones de toneladas de acero se han inspeccionado desde entonces por este dispositivo diseñado por el grupo de investigación de la Universidad de Oviedo.

3.6 Conclusiones

En este capítulo se ha realizado una breve síntesis del origen de la Interferometría de Desplazamiento Lateral, el famoso test de Ronchi, y se prosigue analizando los principios teóricos y formas típicas de patrones de franjas obtenidos con esta tecnología.

Utilizando los tipos de interferograma como hilo conductor, se han pre-

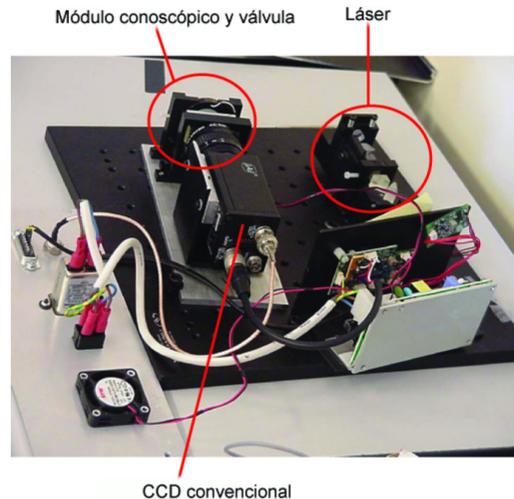


Figura 3.16: Elementos ópticos del dispositivo de desarrollo del sensor Long Standoff Line.

sentado las principales aplicaciones de la Interferometría de Desplazamiento Lateral, desde el análisis de componentes o sistemas ópticos, hasta el campo que nos atañe, la perfilometría óptica. Se ha prestado especial atención a los dispositivos más actuales utilizados para este fin y cuyo principio de funcionamiento es compartido casi en su totalidad por prototipo objeto de la presente Tesis. Estos dispositivos, algunos de ellos altamente competitivos en el mercado actual, pertenecen al grupo de la Holografía Conoscópica. Se ha expuesto la amplia experiencia del grupo de investigación de la Universidad de Oviedo en este ámbito, lo que avala el planteamiento del tema de Tesis.

La Interferometría de Desplazamiento Lateral ha demostrado tener potencial para seguir siendo una línea de investigación en creciente evolución, y sus características la hacen idónea para la perfilometría sin contacto aplicada a medidas submicrométricas.

3.6. CONCLUSIONES

67

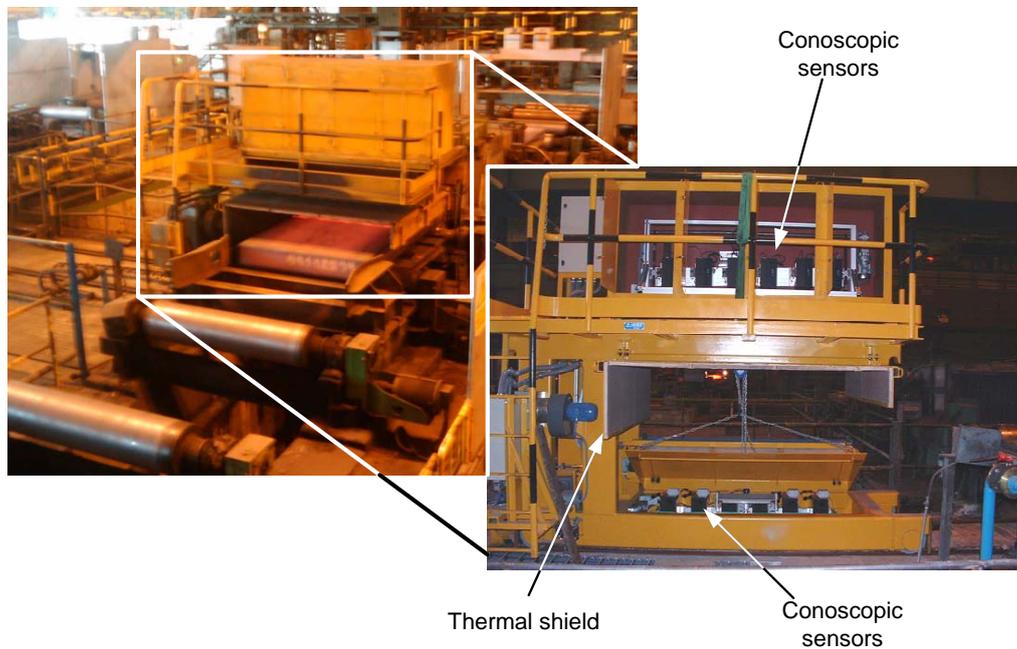


Figura 3.17: Vista exterior del sistema de medida instalado en Arcelor para la medición de desbastes.

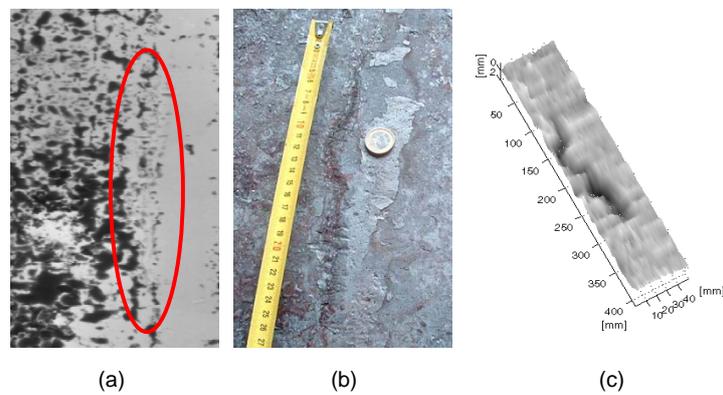


Figura 3.18: Grieta superficial típica de un desbaste. (a) muestra la imagen es escala de grises del desbaste caliente, donde la grieta se ha remarcado con una elipse. (b) es una fotografía de esa misma grieta sobre el desbaste frío, y (c) el mapa de distancias obtenido por el sistema de inspección sobre el desbaste caliente.

Parte II

PROTOTIPO Y CONTRIBUCIONES ORIGINALES

¿Por qué las cosas son como
son y no de otra manera?

Johannes Kepler (1571-1630)

Capítulo 4

Principio de funcionamiento

Debido a las interesantes prestaciones de la Interferometría de Desplazamiento Lateral para la medición de objetos y características superficiales con alta precisión, se han planteado en esta Tesis diversas opciones de configuración para extraer los mejores resultados posibles en cada caso. Durante el transcurso de este capítulo, se pretende esclarecer el funcionamiento de la tecnología seleccionada para el desarrollo de la presente Tesis, la Interferometría de Desplazamiento Lateral aplicada a perfilometría óptica. Su lectura permitirá obtener una visión global de su principio de funcionamiento, fuentes de error, estrategias de procesamiento y herramientas empleadas.

También se presenta el prototipo diseñado para realizar medidas submicrométricas. Ha sido construido sobre una mesa óptica, y se ha ido adecuando para la demostración práctica de las distintas contribuciones originales realizadas en esta Tesis. Para su control, se ha desarrollado un software que incluye las tareas de procesamiento, almacenamiento y visualización, para medir en Tiempo Real. Adicionalmente, se presenta el simulador desarrollado para predecir y cuantificar el comportamiento del sistema sin necesidad de disponer del equipo físico.

A partir de la experiencia del grupo de investigación, se conocen dos posibles variantes de configuración: triangulada y colineal. En este capítulo

se analizan las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas, así como las similitudes y puntos de divergencia de ambas propuestas.

Por completitud, en el último punto se describen las técnicas de procesamiento y extracción de la frecuencia y fase de interferencia empleadas tradicionalmente en este tipo de interferómetros.

4.1 Antecedentes

La tecnología que va a ser objeto de estudio y sobre la que se realizarán las contribuciones de la presente Tesis es Interferometría de Desplazamiento Lateral para mediciones de rango. Esta aplicación, aunque no es la clásica utilidad de *Lateral Shearing*, ha sido tratada por numerosos autores, ya que permite construir interferómetros de camino común que proporcionan gran estabilidad, e inmunidad ante vibraciones y condiciones ambientales desfavorables [104].

Un claro ejemplo de este tipo de aplicaciones es la llamada Holografía Conoscópica [128, 129], que ha sido satisfactoriamente utilizada para este propósito en numerosas ocasiones [55, 123, 51, 150]. Haüsler et al. [70] también propusieron un sistema similar que empleaba un *Savart plate* para general el desplazamiento lateral. En los últimos años, muchos autores han realizado aportaciones a esta vertiente de la Interferometría de Desplazamiento Lateral, como Liu et. al [99], Mehta et. al [106, 105] o Vidal et. al [137].

En todos estos casos el interferómetro se utiliza como medidor de rango, y la configuración puntual es la más sencilla. Consiste en proyectar un pequeño punto de luz sobre la superficie a analizar, y el frente de ondas reflejado por la superficie es duplicado y desplazado lateralmente mediante un elemento birrefringente. Estos dos frentes de ondas son coherentes mutuamente, así que su interferencia se visualizará en un panel de detección. La densidad de franjas del patrón de interferencia dependerá del radio de curvatura de los frentes de onda interfirientes, que se corresponde con la

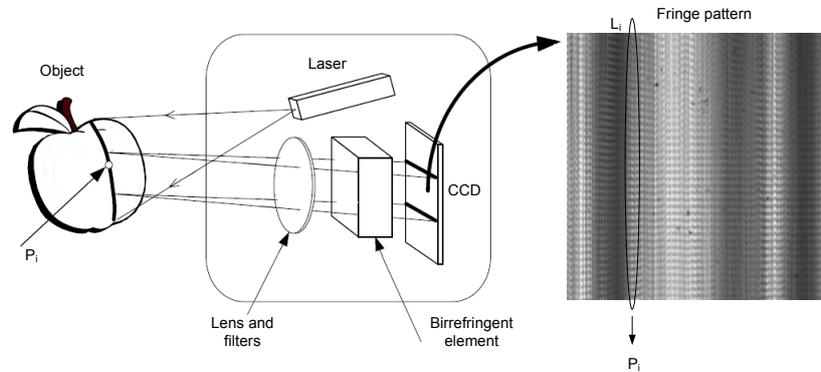


Figura 4.1: Esquema de configuración e interferograma para el prototipo que devuelve la información de un perfil completo en cada adquisición.

distancia deseada al punto del objeto iluminado.

Nuestro sistema es un perfilómetro interferométrico de camino común basado en un *Savart plate*. Se han realizado ciertas adaptaciones en la configuración, que permiten proyectar una línea láser en vez de un punto, con lo que la información de distancia de un perfil completo se obtiene en una única adquisición, permitiendo alcanzar altas velocidades en los escaneos superficiales, estando esta velocidad delimitada por la frecuencia de adquisición de la cámara. Esto permite que los escaneos se pueden realizar sobre objetos en movimiento. El patrón de interferencia que proporciona el sistema está compuesto por señales cosenoidales consecutivas procedentes de la interferencia del frente de ondas procedente de cada punto de la línea láser con su copia virtual proporcionada por el *Savart plate*. Un esquema de la configuración empleada para este tipo de interferómetros se muestra en la Fig. 4.1, en la que se incluye un patrón de interferencia de un perfil real, en este caso, el objeto era una moneda de Euro.

La derivación matemática del principio de funcionamiento y formación física del interferograma se ha descrito en la siguiente sección. Las principales fuentes de error son analizadas en la sección 3. La sección 4 presenta el prototipo empleado, construido según los principios previamente detallados, que ha servido para las pruebas de laboratorio. Las dos variantes sobre las que se han realizado aportaciones originales se introducen en las secciones 5

y 6 respectivamente: la configuración colineal y la triangulada. . Las técnicas de procesamiento básicas aplicables a cada configuración con el fin de extraer las variables que contienen la información de medida codificada en el interferograma se tratan en la sección 7. Por último, en la sección 8 se exponen las conclusiones del presente capítulo.

4.2 Formación del patrón de interferencia

Una fina línea láser es proyectada sobre el objeto a analizar. De cada punto de luz reflejado por el objeto, emerge una onda difusa que será analizada mediante el sencillo montaje de la rama de detección que se muestra en la Fig. 4.2(a). La combinación de una lente cilíndrica y la óptica de la cámara permite visualizar la interferencia entre los dos frentes de onda virtuales correspondientes a un punto del perfil en una columna del CCD.

El *Savart plate* está situado entre dos polarizadores cruzados justo antes del CCD, colocado dentro de un anillo de extensión. Los anillos de extensión son necesarios con el fin de poder enfocar el objetivo a distancias de trabajo relativamente pequeñas en relación con su focal, para maximizar la resolución lateral. El *Savart plate* y uno de los polarizadores han sido ubicados en el interior de estos anillos de extensión para compactar el diseño y aprovechar el espacio. El *Savart plate* duplica los frentes de onda incidentes con un desplazamiento lateral entre ellos. Su orientación ha de ser tal que el desplazamiento lateral produzca en la dirección perpendicular al perfil. En la Fig. 4.2(b) se observa el *Savart plate* fotografiado sobre una hoja rallada. En la zona de la imagen que es afectada por el *Savart plate*, el rallado se visualiza doble. Sus propiedades birrefringentes hacen que los dos frentes de onda virtuales emergentes tengan el mismo radio de curvatura que las ondas incidentes y sean coherentes entre sí. Por tanto, cuando un frente de ondas esférico incide sobre el *Savart plate*, el frente de ondas se duplica virtualmente, y la interferencia entre ambas copias se puede visualizar en el CCD. El patrón de interferencia contiene información sobre el radio de curvatura de estas ondas, que se corresponde con la distancia al punto de luz reflejado por el objeto.

4.2. FORMACIÓN DEL PATRÓN DE INTERFERENCIA

75

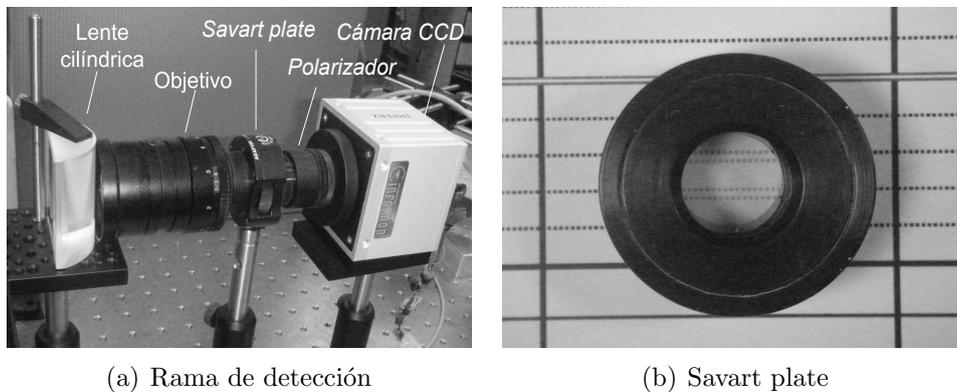


Figura 4.2: Configuración de la rama de detección en la que se forma el patrón de interferencia. En (a) se ha fotografiado la rama de detección del prototipo de laboratorio. En (b) se ha fotografiado el *Savart plate* sobre un folio rallado. Las líneas afectadas por el *Savart plate* se ven dobles por sus propiedades birrefringentes.

Existen dos posibles configuraciones en cuanto a la posición de la rama de detección y la de iluminación. Puede tratarse de una disposición colineal, en la que el frente de ondas reflejado por el objeto es dirigido a la rama de detección a través de un *beam-splitter*, o una configuración triangulada, en la que existe un determinado ángulo entre las ramas de iluminación y detección. Las diferencias entre ambas serán analizadas más adelante. En cualquier caso, los principios físicos de formación de la interferencia son idénticos, así como lo es la rama de detección.

En la Fig. 4.3 se muestra el esquema óptico del *Savart plate*, elemento clave del dispositivo. Consiste en dos cristales uniáxicos idénticos, cortados a 45° y girados 90° uno respecto del otro. Sus ejes ópticos están alineados a 45° con respecto al eje óptico del sistema. Un rayo que incide normal al primer cristal, es dividido en dos, el rayo ordinario *o-ray*, cuyas vibraciones son perpendiculares a la sección principal del primer cristal, y el extraordinario *e-ray*, que vibra en la dirección de la sección principal. De igual forma, al llegar al segundo cristal, estos rayos se vuelven a dividir en dos, generando 4 rayos: *oo-ray*, *oe-ray*, *eo-ray* y *ee-ray*. Como la transmitancia de los rayos *oo-ray* y *ee-ray* es del orden de 10^{-3} o incluso 10^{-4} , sólo se consideran los rayos *oe-ray* y *eo-ray*. El rayo ordinario en el

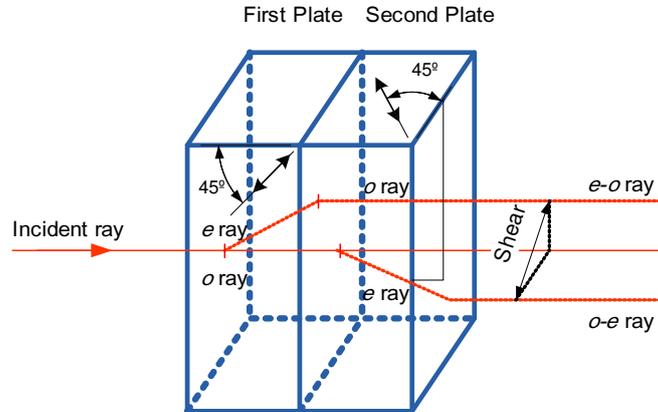


Figura 4.3: Esquema óptico del *Savart plate*. Está formado por dos cristales uniáxicos rotados 90° . El rayo incidente se divide en dos copias virtuales desplazadas lateralmente el valor del *shear*.

En el primer cristal pasa a ser el extraordinario en el segundo cristal, y viceversa. Sus direcciones de vibración son perpendiculares una respecto a la otra, por lo que ha de situarse entre dos polarizadores cruzados para poder visualizar la interferencia. Los rayos de salida son desplazados lateralmente una cantidad que depende principalmente del material del que esté hecho el *Savart plate* y su grosor. Por estas características específicas del *Savart plate*, se considerará que realiza dos copias virtuales del frente de ondas incidente desplazadas lateralmente el *shear* s .

La derivación matemática nos mostrará como el radio de curvatura del frente de ondas incidente sobre el *Savart plate* se puede traducir de forma sencilla a medida de rango.

A continuación, vamos a describir la formación de la interferencia analizando los efectos que se dan en cada eje del sistema: la dirección del perfil (eje-x), y la dirección perpendicular al perfil (eje-y).

En la dirección del perfil la lente cilíndrica no actúa, y la óptica de la cámara enfoca la luz en el CCD. Existe por tanto una discretización de la señal, cuya resolución lateral será la sección longitudinal del perfil que se visualiza en un píxel. Consideraremos por simplicidad en la nomenclatura, que

4.2. FORMACIÓN DEL PATRÓN DE INTERFERENCIA

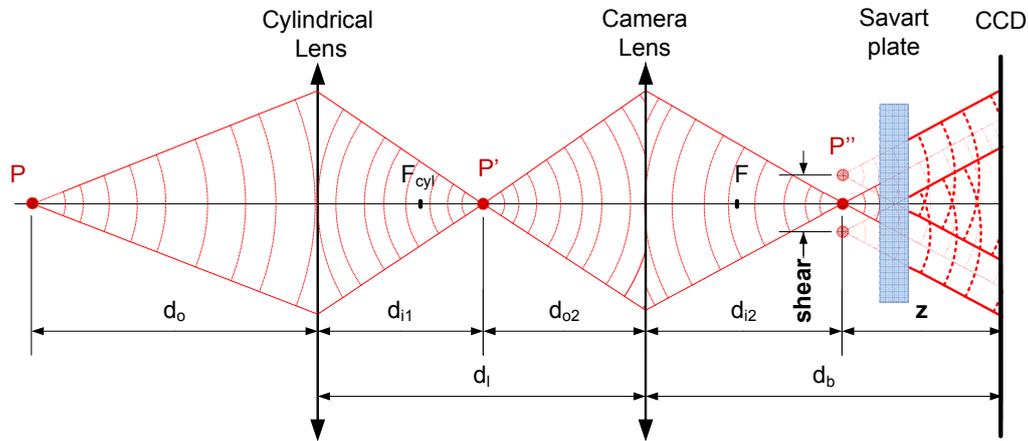


Figura 4.4: Modelo esquemático del proceso de formación de imagen que actúa en la dirección perpendicular al perfil, plano zy .

dicha sección longitudinal corresponde a un punto del perfil. Como el perfil está enfocado sobre el CCD, a cada columna le corresponde la información de un punto del perfil.

La formación de la imagen en la dirección perpendicular al perfil, (eje- y), se define por un sistema formado por dos lentes delgadas, como el que se muestra en la Fig. 4.4, ya que la lente cilíndrica y el objetivo de la cámara actúan en esta dirección. Por tanto, un punto de luz P enfocado sobre la superficie del objeto, tendrá una primera imagen P' por el efecto de la lente cilíndrica, y una segunda imagen P'' por el efecto de la lente de la cámara.

Si P está localizado a una distancia d_o de la lente cilíndrica, lo que consideramos equivalente a la distancia del punto al interferómetro, su imagen P'' está localizada a una distancia z del CCD, que es la distancia que define la frecuencia de franjas. Para calcular z es necesario saber la distancia d_b existente entre el objetivo de la cámara y el CCD, y la distancia d_{i2} a la que se ha focalizado la segunda imagen del punto original:

$$z = d_b - d_{i2}. \quad (4.1)$$

Al mismo tiempo d_{i2} se define en función de la distancia focal F de la lente de la cámara, y la distancia d_{o2} desde la primera imagen P' a la posición de dicha lente:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_{o2}} + \frac{1}{d_{i2}}. \quad (4.2)$$

De nuevo, d_{o2} depende de la separación entre lentes, denotada por d_l , y la distancia d_{i1} a la que se ha formado P' medida desde la posición de la lente cilíndrica:

$$d_{o2} = d_l - d_{i1}. \quad (4.3)$$

La primera imagen del punto P' queda determinada por la focal F_{cyl} de la lente cilíndrica y la distancia original d_o del objeto al prototipo:

$$\frac{1}{F_{cyl}} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_{i1}}. \quad (4.4)$$

Por tanto, de la Ec. 4.1 a la 4.4 se obtiene la expresión que proporciona z a partir de la distancia original d_o :

$$z = d_b - \frac{F(-d_o d_l + F_{cyl} d_l + F_{cyl} d_o)}{-d_o d_l + F_{cyl} d_l + F_{cyl} d_o + F d_o - F_{cyl} F}. \quad (4.5)$$

A modo de nota complementaria, es importante observar que la distancia d_o se incrementa al alejarse del centro del eje óptico en el eje-x. Así que para un perfil plano localizado a una distancia d del interferómetro, la distancia d_o sigue un arco de circunferencia:

$$d_o = \sqrt{d^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}, \quad (4.6)$$

siendo l la longitud de perfil visualizado.

Como se ha indicado anteriormente, la señal recogida en cada columna del CCD corresponde con un punto de la línea proyectada sobre el objeto a analizar, por lo que es suficiente formular la expresión de la interferencia

4.2. FORMACIÓN DEL PATRÓN DE INTERFERENCIA

79

en función de la coordenada y del panel de detección. Dicha señal sigue la *Ley General de Interferencia*, detallada por ejemplo por Hariharan [67], que puede expresarse como:

$$I_p = I_{p(1)} + I_{p(2)} + 2\sqrt{I_{p(1)}I_{p(2)}} m_{12}(\tau) \cos(\alpha_{12}(\tau) - 2\pi\bar{f}\tau), \quad (4.7)$$

donde $I_{p(1)}$ y $I_{p(2)}$ son las intensidades de la fuente de luz, $m_{12}(\tau)$ es el grado de coherencia (entre 0 y 1) para una diferencia de tiempos τ , \bar{f} es la frecuencia media, y $\alpha_{12}(\tau)$ es la diferencia de fase inicial entre los frentes de onda que interfieren a lo largo del tiempo.

Es perfectamente asumible considerar que ambos frentes llegan con la misma intensidad si los polarizadores están orientados correctamente, así que $I = I_{p(1)} = I_{p(2)}$.

Además, teniendo en cuenta que se utiliza un láser para la iluminación, $m_{12}(\tau)$ es constante y se denotará por γ_0 , la frecuencia media \bar{f} pasa a ser la frecuencia f del láser, y el término $\alpha_{12}(\tau)$ se reduce a φ_0 , que es la diferencia de fase inicial entre los frentes de onda, y que ya no depende del tiempo porque los láseres tienen coherencia temporal. La Ec. 4.7 se puede simplificar a

$$I_p = 2 I_0 [1 + \gamma_0 \cos(2\pi f\tau - \varphi_0)]. \quad (4.8)$$

Para el cálculo de la frecuencia de franjas de la interferencia, vamos a fijarnos en el eje- y en nuestro dispositivo. En este eje, la intensidad de un punto del panel de detección o CCD depende de la diferencia de fase entre las ondas incidentes en ese punto. Para dos fuentes virtuales situadas a una distancia z del panel de detección y desplazadas lateralmente el valor del *shear* s introducido por el *Savart plate*, la diferencia de fase es debida únicamente a la diferencia de caminos ópticos ($r_2 - r_1$), tal y como se observa en la Fig. 4.5.

Teniendo en cuenta que la distancia z al panel de detección o CCD es significativamente mayor que la altura del punto y en el que se está analizando

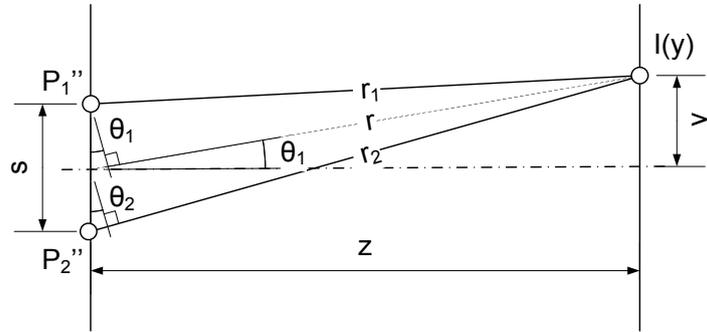


Figura 4.5: Caminos ópticos r_1 y r_2 desde las dos fuentes virtuales en P'' al panel de detección a una altura y . La diferencia entre r_1 y r_2 modula la intensidad $I(y)$ y una señal cosenoidal es visualizada en cada columna del CCD.

la interferencia, se puede aproximar:

$$\begin{aligned} \sin(\theta_1) &\approx \tan(\theta_1) = \frac{y}{z}, \\ \sin(\theta_2) &\approx \tan(\theta_2) = \frac{y + s/2}{z}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Entonces:

$$\begin{aligned} r_2 - r &= \frac{s}{2} \frac{y}{z}, \\ r - r_1 &= \frac{s}{2} \frac{y + s/2}{z}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Además, asumiendo que $s \ll y \ll z$, los términos en s^2 se pueden eliminar, y se puede aproximar $r_2 - r_1 = (r_2 - r) + (r - r_1)$ como:

$$r_2 - r_1 \approx \frac{ys}{z}. \quad (4.11)$$

Finalmente, como $r_2 - r_1 = \tau c$, siendo c la velocidad de la luz en el vacío, la frecuencia angular del término cosenoidal de la Ec. 4.8 se puede expresar

4.3. FUENTES DE ERROR

81

como:

$$2\pi f\tau = 2\pi f \frac{ys}{c} = 2\pi \frac{s}{\lambda z} y, \quad (4.12)$$

siendo λ la longitud de onda de la fuente de luz.

Por tanto, la información del patrón de interferencia en una columna cualquiera se puede modelar como:

$$I(y) = 2 I_0 (1 + \gamma_0 \cos(2\pi \frac{s}{\lambda z} y) + \varphi_0). \quad (4.13)$$

Esta expresión describe una onda cuya frecuencia vale $2\pi \frac{s}{\lambda z}$, y cuya fase inicial φ_0 será nula siempre y cuando el *Savart plate* esté correctamente alineado, ya que ambos frentes de onda son copias entre sí procedentes del mismo punto.

Por tanto, la Ec. 4.13 recoge la esencia del principio de formación de la interferencia. Es aplicable automáticamente a la configuración colineal del prototipo. La configuración con triangulación se rige por el mismo principio, pero se le ha de añadir otro término de fase que se denotará por $\varphi_t(z)$, debido al desplazamiento relativo de la posición vertical de los puntos de la línea láser en función del perfil de distancias. Las características específicas de cada configuración serán tratadas a lo largo del presente capítulo.

4.3 Fuentes de error

Las causas que son susceptibles de provocar errores o decremento de la precisión han sido detalladas por Álvarez [4]. Fundamentalmente, están relacionadas con imprecisiones en la construcción y/o posicionamiento de los elementos físicos que se utilizan (lentes, polarizadores, detector CCD, *Savart plate*).

También se pueden cometer errores por imprecisiones en ciertas suposiciones. El haz láser enfocado sobre el objeto no es un plano ideal de espesor nulo, ni el objeto a medir es perfectamente liso y difuso, sino que el plano

con el objeto tendrá un cierto espesor, y el objeto a medir podrá ser de superficie rugosa. La idea de que cada punto de la línea láser genera una onda de interferencia contenida en una columna del sensor CCD, tampoco es exacta por completo, ya que existe la posibilidad de que llegue algo de luz procedente de otros puntos. El tamaño del píxel en el detector es de valor no nulo, con lo que se integra la luz procedente de toda la zona que ocupe el píxel.

Cualquier distorsión de el haz de luz, como por ejemplo ligeras variaciones en la longitud de onda debidas a la temperatura, podrían afectar el resultado final si no son compensadas.

La utilización de una fuente de luz láser no es estrictamente necesaria, ya que el principio de funcionamiento admite cualquier fuente monocromática. Sin embargo, los láseres son altamente monocromáticos y se pueden enfocar fácilmente en un línea fina con suficiente potencia, así que los empleamos por conveniencia. Su principal contrapartida como fuente de luz coherente, es la aparición de ruido *speckle* [68]. Por ser la causa más importante de error, dedicaremos especial atención a este fenómeno, y se describirán los procedimientos efectuados para su mitigación en el prototipo bajo estudio.

4.3.1 Ruido *speckle*

El fenómeno del *speckle* aparece cuando un rayo de luz incide sobre una superficie rugosa, siendo esta rugosidad mayor que la longitud de onda λ_L de la luz. La luz es por tanto reflejada en todas las direcciones, como se muestra en la figura 4.6. Estas ondas difusas interfieren entre ellas y forman patrones de interferencia que consisten en puntos brillantes y negros, también denominados *speckles*, que se distribuyen aleatoriamente sobre la imagen. Si se utiliza iluminación espacialmente incoherente, este efecto será apenas observable. Sin embargo, si se utiliza luz coherente, como es el caso del láser, este efecto será apreciable, y se visualizarán patrones de ruido *speckle* como los observados en la figura 4.7. La granulometría de cada patrón de ruido depende del tipo de superficie.

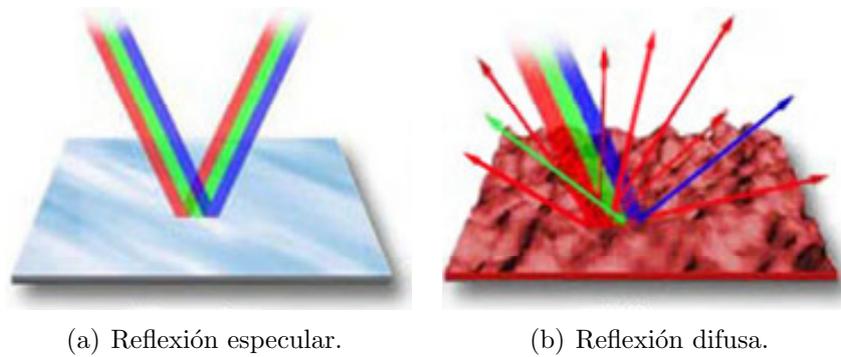


Figura 4.6: Reflexión de la luz en función de las características de la superficie. (a): Reflexión especular para superficie lisa, y (b): Reflexión difusa para superficie rugosa.

El ruido *speckle* es la principal limitación en la resolución de nuestro sistema [69, 10], y afecta al funcionamiento del sensor de dos formas: disminuyendo la resolución en profundidad, ya que la señal está limitada por los niveles de ruido del perfil de distancias; y dificultando el paso de despliegue de fase pudiendo llegar a introducir falsos saltos de 2π radianes. Aunque esta última complicación se puede resolver usando métodos robustos de despliegue como los indicados en [64, 72], presenta un inconveniente en la aplicabilidad de esta tecnología.

Si la superficie rugosa está en movimiento, también se consigue reducir la contribución del *speckle* al ruido total del sistema. El *speckle* se promedia, debido al movimiento relativo de la pieza durante el tiempo de adquisición de cada imagen por el sensor, y el nivel final de ruido *speckle* es similar al generado por superficies de rugosidades inferiores. Este fenómeno se produce durante los escaneos 3D, ya que la muestra a analizar, colocada sobre la mesa de precisión, se desplaza de forma controlada con el fin de obtener varios perfiles consecutivos. Aunque el ruido es reducido de forma considerable, también se han probado otras configuraciones que permiten el procesamiento de interferogramas procedentes de muestras estáticas. El movimiento se considerará tan sólo una forma adicional de mejora en cuanto a reducción de *speckle*, pero tiene como contrapartida el promediado de las zona desplazada durante el tiempo de adquisición, lo que disminuye la resolución lateral entre

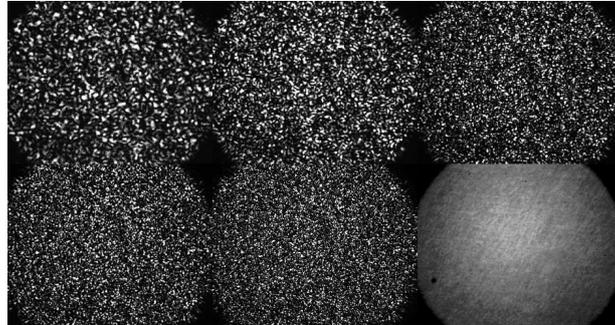


Figura 4.7: Ruido *speckle* de diferente granulometría en función de la rugosidad superficial. La superficie más rugosa corresponde con la imagen de arriba a la izquierda, y la más lisa con la de abajo a la derecha.

perfiles.

El método comúnmente utilizado hasta el momento de forma experimental para la reducción de *speckle* utiliza difusores rotacionales [136]. Un ejemplo de reducción de *speckle* en interferogramas mediante difusores rotacionales se observa en la parte superior de la Fig. 4.8.

A modo de breve introducción a los difusores, cabe destacar que existen varios tipos: los *Holographic diffusers*, los *Ground glass diffusers* y los *Opal diffusing glass*. Su respuesta ha sido estudiada por Marina [102]. La diferencia entre estos dos tipos difusores estriba en el material del que están hechos y en el proceso de fabricación. Los difusores de tipo *Ground glass* son de cristal y se construyen proyectando arena, con un determinado tamaño de grano, para conseguir diferentes grados de difusión de la luz. Por otro lado los *Opal diffusing glass* se construyen introduciendo el vidrio en una solución que produce un degradado de la superficie del mismo. Ambos tipos de difusores producen una despolarización de la luz incidente. Por otro lado los *Holographic diffusers* están contruidos cristales birrefringentes, esto hace que a la salida se obtengan dos rayos paralelos con polarizaciones perpendiculares por cada rayo que incide en el difusor.

Cuanta mayor difusión generen, sea por el tamaño del *grit*, (grano de arena), o por el ángulo de difusión que introducen los cristales, mayores serán

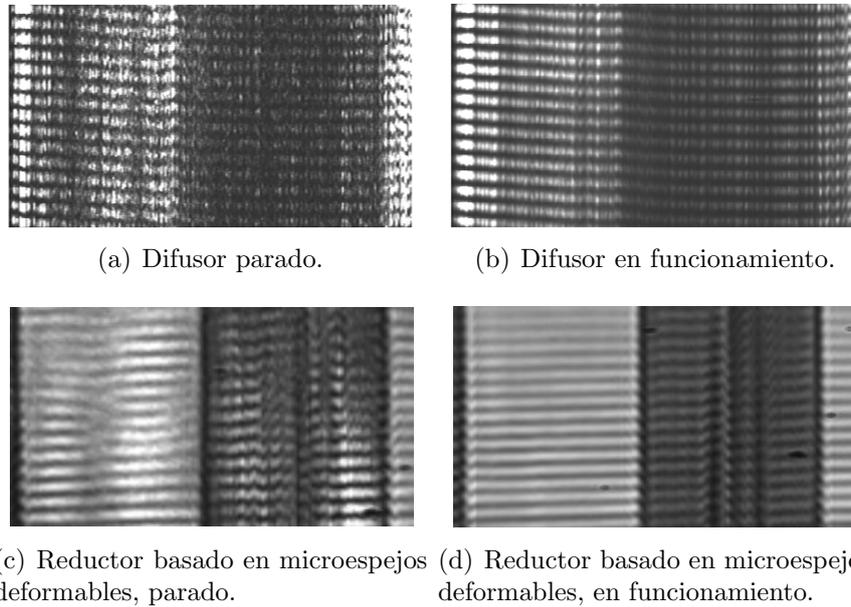


Figura 4.8: Efecto de la reducción de *speckle* en los hologramas. (a) y (b): Difusor rotacional. (c) y (d): Módulo comercial de reducción basado en microespejos deformables.

las pérdidas de potencia en el sistema, y más difícil sería colimarlos posteriormente, por lo que será necesario llegar a una solución de compromiso.

Tras la comparación de varios tipos de difusores, el que mejor resultado ha dado ha sido un difusor holográfico con un ángulo de difusión pequeño (0.5°). Este modelo proporciona mejores resultados que los tradicionales *ground-grit diffusers*, ya que generan menos pérdidas de potencia y el rayo resultante es más sencillo de focalizar, a la vez que mantiene una buena reducción de *speckle*.

El montaje experimental en el dispositivo objeto de estudio se puede ver en la Fig. 4.9(a). El difusor está colocado en el prototipo antes del módulo de generación de línea, y gira solidariamente al eje de un pequeño motor de continua de velocidad regulable por tensión ($\pm 2,5V$), descentrado del punto de enfoque. Gracias a este movimiento del difusor, se hace posible

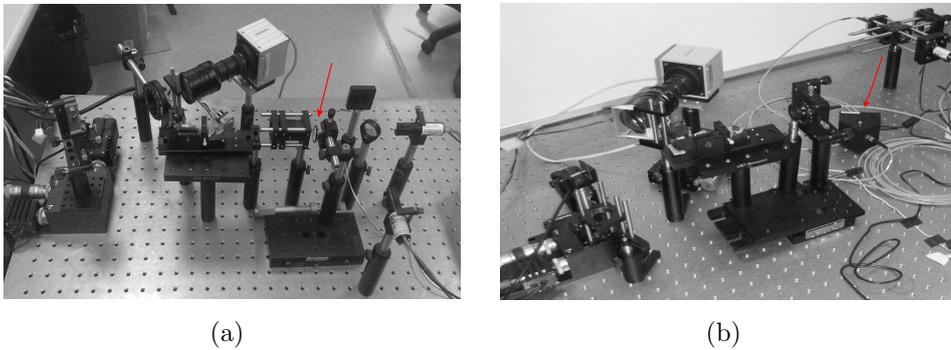


Figura 4.9: Montajes usados para cada método de reducción de speckle utilizado. (a): Con difusor rotacional ,y (b): Módulo comercial basado en microespejos, con conexionado de fibra óptica.

la cancelación o promediado de varios patrones de ruido *speckle* durante el periodo de adquisición de un perfil por parte del prototipo. A mayor velocidad de giro, en concordancia con el periodo de adquisición, mayor cancelación del ruido *speckle*. También se puede lograr el mismo efecto, desalineando en mayor medida el eje del motor con respecto al centro de incidencia del haz de luz.

El problema del uso de difusores, es que implican la existencia de parte móviles en el diseño del prototipo, lo que hace perder robustez ante aplicaciones industriales en ambientes hostiles, con vibraciones mecánicas, o simplemente, un deterioro más rápido de esas piezas. Esta era la única debilidad del montaje hasta el momento, ya que la parte óptica de la tecnología es suficientemente robusta por ser un método de camino común. De todas formas, su empleo industrial ha sido verificado en numerosas ocasiones para alcanzar precisiones submicra [7, 42, 112, 3, 2], como se recoge en el trabajo de investigación realizado por Marina [102].

En esta Tesis se han introducido, de forma novedosa para esta tecnología, los métodos de reducción de *speckle* basados microespejos deformables, con el fin de subsanar esta debilidad de diseño. Se ha sustituido el difusor rotacional (Fig. 4.9(a)), por el módulo comercial *SpeckleFreeTM* de *Dioptyka* (Fig. 4.9(b)). Este dispositivo está compuesto por un módulo DMD (*Digital*

4.3. FUENTES DE ERROR

87

Micromirror Device), que consiste en microespejos deformables que varían su orientación de forma continua, permitiendo así la integración de varios patrones de *speckle* en cada adquisición del perfilómetro. El resultado se observa en la parte inferior de la Fig. 4.8. La reducción de *speckle* conseguida, medida como desviación estándar de los valores de píxeles promediados en la proyección de la línea o punto, es superior a 3 veces respecto a los valores de un interferograma que no utilice este reductor. Además es capaz de integrar patrones de *speckle* a una frecuencia 500 Hz, por lo que no pone limitaciones a la velocidad de adquisición admisible por el sistema.

Para una aún mayor reducción del ruido, se podrían emplear métodos de filtrado, basados en la direccionalidad de las franjas, y que han sido desarrollados y chequeados para esta tecnología en condiciones ambientales diversas, como se indica en [46]. Su inconveniente es la disminución de resolución en el sentido de los ejes laterales y en profundidad.

Obviamente, la mejor opción sería el uso de luz no coherente, ya que la Holografía Conoscópica simplemente requiere fuentes de luz monocromáticas. La elección del láser se ha realizado por la dificultad y coste que conlleva la concentración de luz monocromática con la intensidad requerida por el sistema. Como alternativa, se han probado LEDs superluminiscentes, y fuentes de luz blanca a las que se les interponía un filtro de paso estrecho, pero ninguna de estas opciones consigue un espectro suficientemente estrecho como para visualizar la interferencia con suficiente contraste. Los sistemas descritos en este apartado, además están adaptados para el uso de luz láser, por lo que por comodidad y eficacia, ha sido la solución adoptada. Otros métodos más avanzados de reducción de *speckle* están descritos en [136, 138, 15, 139].

Además de los métodos de reducción de *speckle* existentes, sean tanto físicos o de procesamiento, es conveniente realizar algún tipo de acondicionamiento de los interferogramas para no perder precisión en ninguna de las etapas de medida. Aunque esta sea de las primeras operaciones a realizar, es interesante conocer con anterioridad los métodos de extracción de la información de frecuencia y fase que se van a emplear, para poder seleccionar el filtrado más conveniente. Por esto, la siguiente sección abordará los métodos de recuperación de la información de medida, y especificará que tipos de acondicionamiento de señal se adecuan a cada caso.

4.4 Prototipo de validación

Para el desarrollo de las numerosas pruebas experimentales, se ha ido realizando modificaciones sobre un prototipo de laboratorio. En este apartado se describirán sus características globales. Los resultados de las distintas configuraciones chequeadas se irán describiendo en las secciones que corresponda según su aportación a lo largo de la presente Tesis.

La Fig. 4.10 muestra el esquema general del prototipo. Tanto el sistema óptico como la mesa de posicionamiento sobre la que se sitúa la muestra se controlan a través del PC.

4.4.1 Hardware

Todos los elementos ópticos que conforman el prototipo se han montado sobre una estructura compuesta por soportes de orientación regulable y estabilizada mediante postes y elementos de sujeción específicos, para garantizar la correcta alineación del sistema.

Rama de iluminación

La alimentación y selección de la potencia del láser se realiza mediante una caja de control eléctrico.

La longitud de onda utilizada en la mayor parte de los experimentos es de 685 nm. También se han realizado pruebas con láseres de 635, 660, 670 y 785 nm. En la descripción de cada experimento se indicará la longitud de onda empleada. Para facilitar el intercambio y posible combinación de distintas longitudes de onda, se ha montando un soporte con capacidad para dos láseres que se muestra en la Fig. 4.11(a). Estos son de potencia controlable, y la luz procedente de cada uno de ellos se combina en un único haz mediante un *beam-splitter*. Gracias a esta disposición es posible utilizar

4.4. PROTOTIPO DE VALIDACIÓN

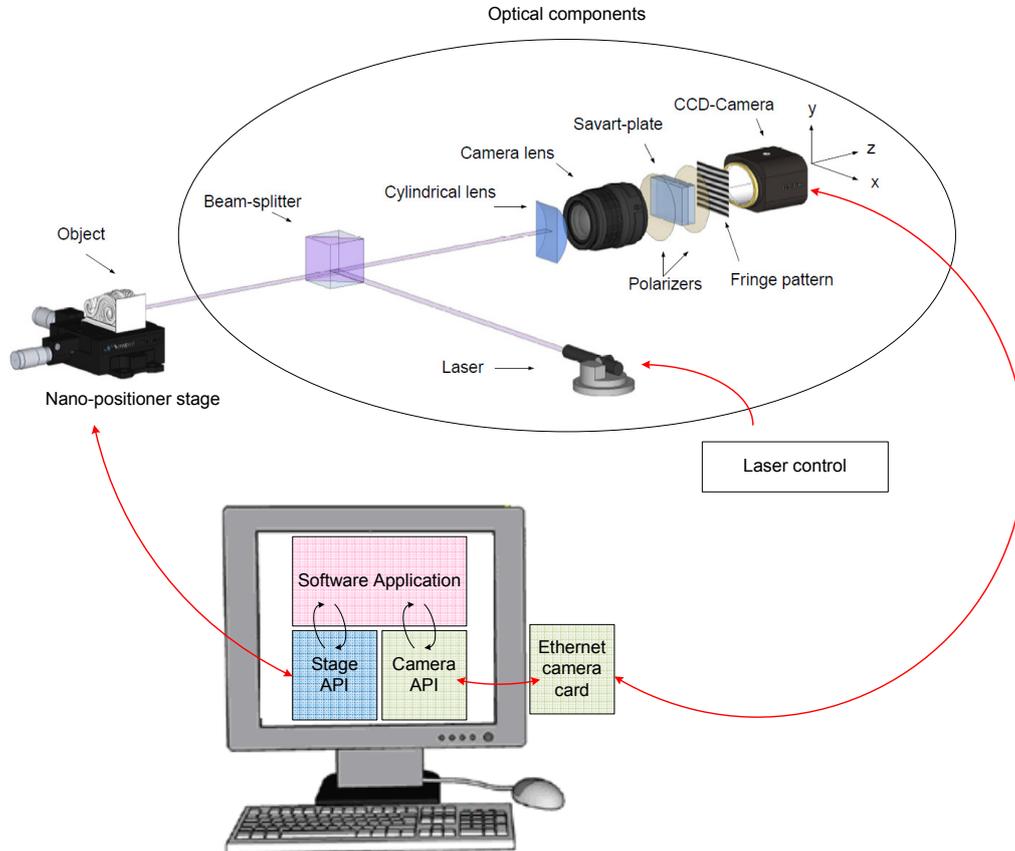
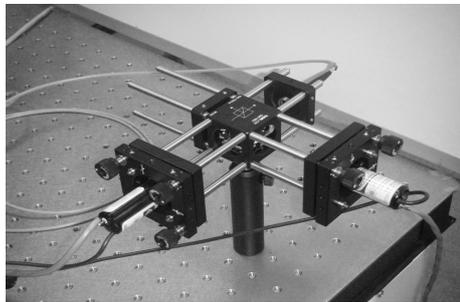


Figura 4.10: Esquema general del prototipo de validación.

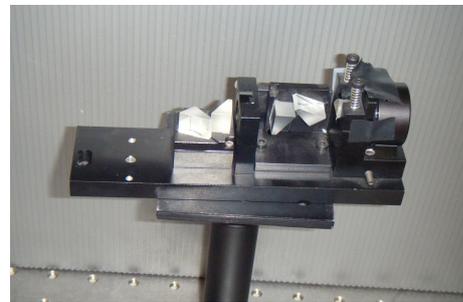
una o dos longitudes de onda simultáneamente. La salida de este módulo, está dotada por un conector de fibra óptica que transporta la señal hasta la entrada del módulo reductor de *speckle*.

La siguiente etapa es la generación de línea. Tradicionalmente se ha utilizado un montaje compuesto por un colimador, un módulo de conversión de punto a línea a base de prismas anamórficos, y una lente de enfoque, como se muestra en la figura 4.11(b).

La obtención de una línea fina y bien enfocada es crucial para la genera-



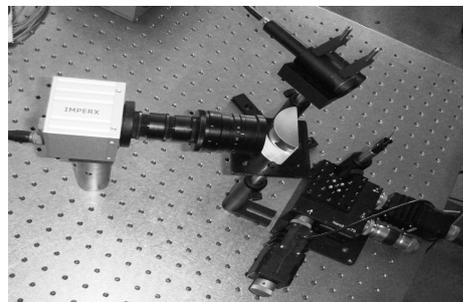
(a) Iluminación.



(b) Generador con prismas anamórficos.



(c) Generador compacto.



(d) Vista general del montaje.

Figura 4.11: *Setup* del perfilómetro. (a): Detalle del conjunto de iluminación. (b) y (c): Detalles de los módulos de generación de línea empleados. (d): Vista general.

ción de patrones de interferencia con un buen contraste, y consiguientemente, influirá de forma crítica en la resolución de la medida final del sistema. Por este motivo, paralelamente a la utilización del módulo *SpeckleFreeTM* para reducir el ruido *speckle*, se ha adquirido un generador de línea compacto del mismo fabricante *Dyoptyka*, capaz de generar una línea de unas $300\ \mu\text{m}$ de espesor, enfocada a 100 mm. Se muestra en detalle en la figura 4.11(c), y es el empleado en la configuración final del prototipo (Fig. 4.11(d)). Aunque la línea es ligeramente más gruesa, el montaje es más compacto, estable, y genera menos pérdidas de luz.

4.4. PROTOTIPO DE VALIDACIÓN

91

Posicionamiento de la muestra

La línea es proyectada sobre el espécimen, que se fija mediante los dispositivos de sujeción pertinentes, y está colocado sobre la mesa de posicionamiento. La proyección de la línea se realiza en dirección vertical para facilitar el escaneo.

La mesa de posicionamiento *NanoMax-TS*, de *Thorlabs*, dispone de su propia hardware de control y alimentación y se comunica con el PC mediante un puerto RS-232. Tiene automatizados y controlados mediante ordenador los desplazamientos en los ejes X e Y. El desplazamiento en altura se puede realizar de forma manual, mediante un tornillo de ajuste fino graduado. La mesa es controlable en velocidad, aceleración y distancia recorrida, y funciona con resolución de nanómetros.

Rama de adquisición

En la rama de adquisición, el primer elemento es una lente cilíndrica de focal 50.8 mm, que actúa en la dirección perpendicular al perfil, por lo que la luz llega al CCD expandida en dicha dirección. Se utiliza un cámara ImperX IPX-2M30H-G con un área activa de imagen de $14,21 \times 8$ mm de acuerdo con las especificaciones dadas por el fabricante, una densidad de píxeles de 1920x1080 (el tamaño del píxel es $7.4 \mu\text{m}$). La cámara se conecta al PC a través de una tarjeta de ethernet. Ha sido rotada 90° para maximizar la resolución lateral a lo largo del perfil. El objetivo de cámara es de 75 mm de distancia focal y ha de enfocar al espécimen. Esta lente proporciona un ángulo de visión en torno a 10° . Así, trabajando a una distancia típica de unos 100 mm, es posible obtener perfiles de 19 mm de longitud con una resolución lateral de $10 \mu\text{m}$ por píxel aproximadamente. Todos los componentes del prototipo están recubiertos por un *coating* antireflejos, con el fin de maximizar el rendimiento y reducir el *ghosting*.

Al objetivo de la cámara se le han añadido dos anillos de extensión de 2.5 mm cada uno, que contienen respectivamente el *Savart plate* y un

polarizador. El otro polarizador se ha colocado a la salida del generador de línea por conveniencia, aunque podría estar situado delante del *Savart plate*, como en las Figs. 4.14 y 4.17. La orientación de los polarizadores ha de estar en concordancia con el *Savart plate* y han de estar cruzados entre ellos, ya que los dos frentes virtuales generados por el *Savart plate* están polarizados ortogonalmente. La distancia entre la lente cilíndrica y el objetivo de la cámara es de 120 mm, y la distancia desde el objetivo al CCD es de 80 mm. El *Savart plate* utilizado es de calcita, de 7 mm de grosor, y genera un *shear* de 0.53 mm para la longitud de onda de 685 nm e incidencia normal. Un estudio detallado del comportamiento real del *Savart plate* ha será efectuado en el capítulo 6, haciendo especial hincapié sobre la cuantificación del efecto del ángulo de incidencia. La rotación del *Savart plate* también será analizada, pero cabe adelantar que ha de ser tal que genere el desplazamiento lateral entre los frentes de onda virtuales en la dirección perpendicular al perfil, para que las réplicas de un mismo punto estén localizadas en la misma columna del CCD, y facilitar así el procesamiento.

4.4.2 Software

Aplicación de control en Tiempo Real

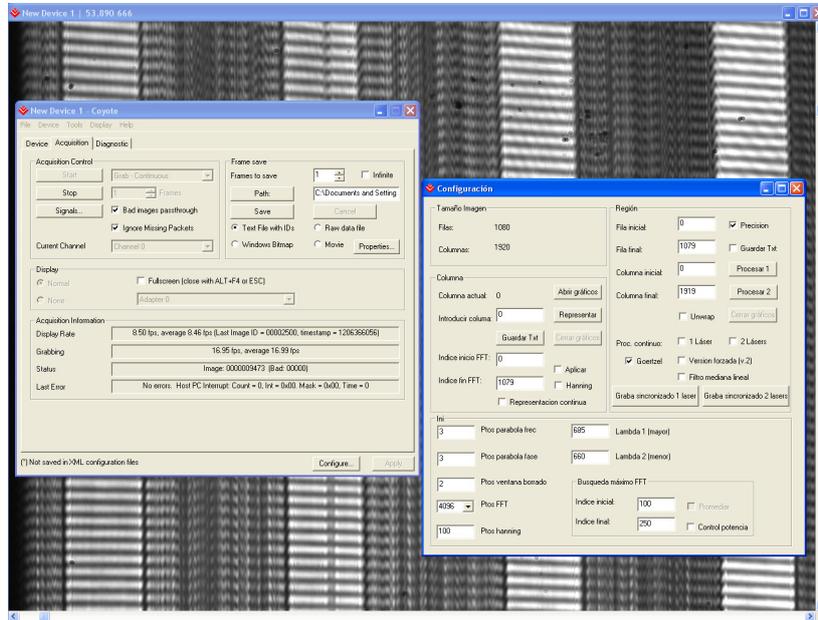
Con el fin de dotar al usuario de una herramienta versátil, sencilla, y completa para la realización las pruebas con el prototipo interferométrico, se ha desarrollado una aplicación de *software* que engloba las operaciones propias de la cámara: adquisición de imagen y control de la cámara, integradas por el propio fabricante en el *LYNXGigETMSDK*, junto con los subsistemas de procesamiento, almacenamiento y visualización de resultados.

El control de la mesa de posicionamiento se realiza mediante el *APTU ser*, que *Thorlabs* proporciona para tal fin.

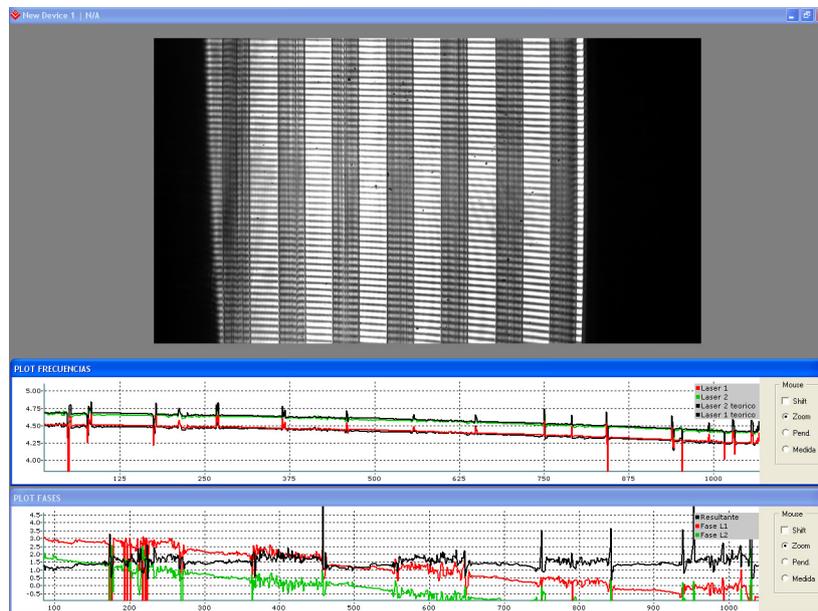
En las Fig. 4.12 se muestra este programa en funcionamiento.

4.4. PROTOTIPO DE VALIDACIÓN

93



(a) Diálogos de control



(b) Ventanas de visualización de resultados

Figura 4.12: Captura del software desarrollado para el manejo del prototipo. (a): Diálogos de control de la cámara y de los parámetros de configuración, con el holograma adquirido de fondo. (b): Ventanas de visualización de la adquisición y frentes de frecuencia y fase resultantes del procesamiento..

Simulador

Con el fin de predecir y cuantificar el comportamiento del sistema ante cambios concretos en su configuración, se ha desarrollado un simulador basado en las ecuaciones proporcionadas el apartado de formación de la interferencia.

Este software no requiere estar conectado a ningún dispositivo físico, y utiliza un archivo de configuración es el que se puede definir la configuración del prototipo fácilmente, introduciendo el valor adecuado en los campos correspondientes a los parámetros físicos que se desee. También es posible escoger los parámetros físicos que se quieren conocer. El simulador es capaz de proporcionar directamente la frecuencia de franjas final correspondiente a una determinada superficie, y/o el interferograma sintético en sí mismo. Si se requiere el interferograma sintético, su cálculo se realiza por trazado de rayos y posteriormente se digitaliza la señal de intensidad. Si sólo se desea conocer la frecuencia final del perfil, se emplean ecuaciones analíticas optimizadas para agilizar los cálculos.

Un ejemplo de sus resultados se muestra en la Fig. 4.13. En ella se realiza la comparación entre un patrón de interferencia real y simulado correspondientes a una superficie plana. Las franjas están afectadas por variaciones en el *shear*, lo que repercute en la forma global del interferograma. Esta tendencia es debida a cambios en el ángulo de incidencia al *Savart plate* motivados por el ángulo de apertura del sistema A_p . Pero esto no afecta el comportamiento del sistema, ya que su respuesta está perfectamente modelada.

A continuación, se describirán las dos variantes principales de configuración con las que se ha trabajado en función de los requisitos de cada aplicación. La mayor parte de los métodos de procesamiento son de aplicabilidad en las dos configuraciones, al igual que las principales fuentes de error y ruidos de medida. En los apartados dedicados al montaje colineal y el triangulado respectivamente, se hará especial hincapié en las originalidades de cada configuración, que son principalmente conceptuales desde el origen, y nos permiten obtener sistemas con distintas sensibilidades y características realizando ligeros cambios. También se indicarán las técnicas de procesamiento e interpretación de la información específicas de cada caso,

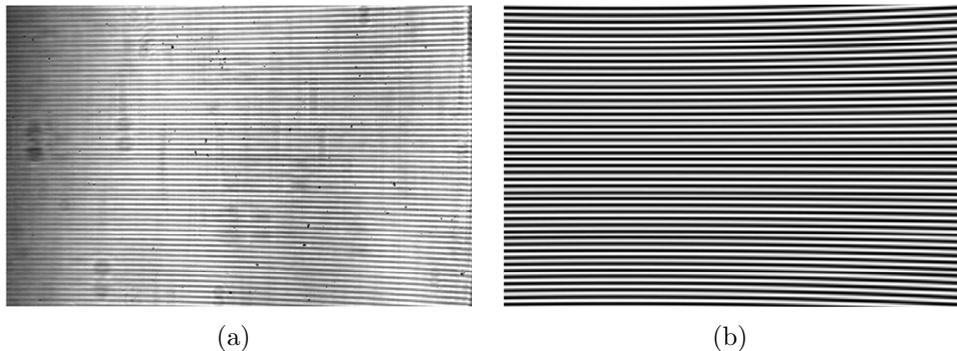


Figura 4.13: Patrones de interferencia simulado (a) y real (b) para una superficie de referencia plana. Las simulaciones, que incluye el efecto de la apertura, concuerda fuertemente con los datos experimentales.

que posteriormente serán descritas englobadas entre el total de algoritmos aplicables. A pesar de la inminente recopilación de elementos diferenciales, cabe resaltar que son muchos más los puntos en común de las dos configuraciones presentadas.

4.5 Montaje colineal

El montaje más compacto es una disposición colineal de la rama de detección con respecto al objeto a analizar, como el que se muestra en la Fig. 4.14. Una fina línea láser es proyectada sobre el objeto a analizar. Se utiliza un *beam-splitter* para garantizar la colinealidad entre el haz reflejado por el objeto y la rama de detección, que es idéntica a la descrita de modo genérico en el apartado de prototipo de validación.

Es comúnmente sabido que un interferómetro de camino común presenta mayor estabilidad de medida, y es más robusto frente a vibraciones, turbulencias de aire o imperfecciones en los componentes ópticos. Además de estas ventajas, el interferómetro objeto de esta Tesis permite realizar un montaje colineal, lo que permite la supresión de zonas ocultas o efecto sombra, facilita compactar el prototipo, y permite inspeccionar zonas de difícil acceso.

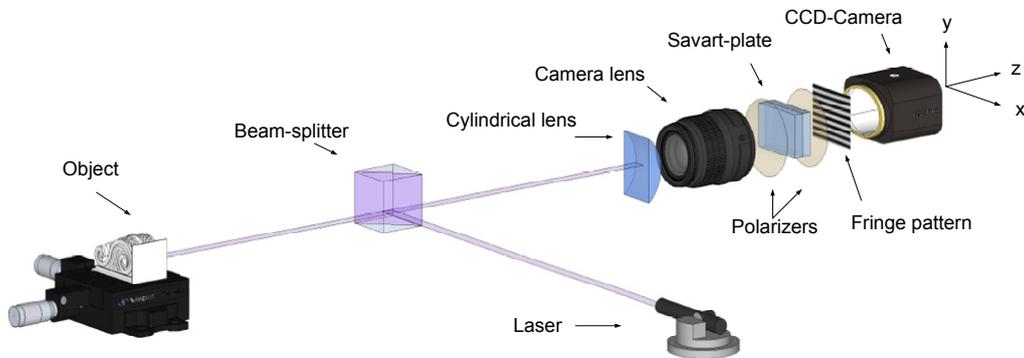


Figura 4.14: Montaje colineal del perfilómetro óptico. Se proyecta una línea láser sobre la muestra. Un *beam-splitter* garantiza la colinealidad entre el objeto y la rama de detección. La combinación de una lente cilíndrica con el objetivo de la cámara permite la reconstrucción punto a punto del perfil. El *Savart plate* duplica el frente de ondas incidente, y como está ubicado entre dos polarizadores cruzados, la interferencia entre ambas copias se visualiza en el CCD.

Una imagen del montaje realizado en el laboratorio puede verse en la Fig. 4.15. La iluminación es enfocada sobre el objeto a inspeccionar a través de un *beam-splitter*. La luz reflejada por la superficie pasa a su vez a través del mismo *beam-splitter* para llegar a la rama de detección. No se produce deformación de la luz proyectada ni la visualizada ya que las tres superficies son perpendiculares al eje óptico. Es muy común realizar este montaje situando la fuente de luz en paralelo a la rama de detección, y con un espejo, dirigir la luz hacia el *beam-splitter*. Así se pueden encapsular fácilmente todos los componentes en un dispositivo único fácil de instalar y transportar. Esta misma idea de disposición es la que utiliza, por ejemplo, la cámara puntual *Conoprobe*, fabricada por *Optimet*. Un ejemplo de las ventajas de esta configuración son analizadas por Álvarez en [5], donde dicha cámara permite medir simultáneamente las caras interna y externa de un sólido de revolución hueco utilizando un periscopio.

La información relativa a la distancia de cada punto del perfil está contenida en el valor de frecuencia de cada columna del CCD, tal y como se

4.5. MONTAJE COLINEAL

97

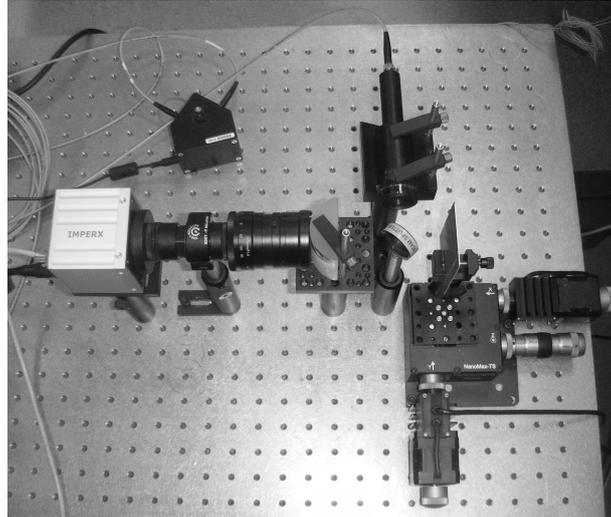


Figura 4.15: Fotografía del montaje en colineal. Se observa la rama de detección y la de iluminación, la mesa de coordenadas sobre la que se sitúa la muestra, y el dispositivo de reducción de *speckle*.

ha demostrado en la Ec. 4.12. Para calcular dicho valor de frecuencia con exactitud se utilizan algoritmos basados principalmente en la Transformada Rápida de Fourier, desarrollados específicamente para este propósito y serán analizados más adelante.

Conocidos los parámetros del sistema, la obtención del perfil de distancias originales d_o es inmediato, ya que está relacionado con la distancia z , medida desde el punto donde se forma la segunda imagen al CCD, a través de las ecuaciones que modelan el conjunto de lentes y que dan lugar a la Ec. 4.5.

Con la configuración colineal del prototipo experimental se ha evaluado la frecuencia de los interferogramas obtenidos y se han comparado con los datos simulados. Los resultados se muestran en la Fig. 4.16, donde se enfrentan los valores de desplazamiento continuo de un espejo plano con la frecuencia obtenida de los correspondientes patrones de interferencia. Cabe destacar que pequeños diferencias entre las señales simulada y adquirida pueden ser debidas a defectos sobre la superficie de referencia, parámetros del modelo

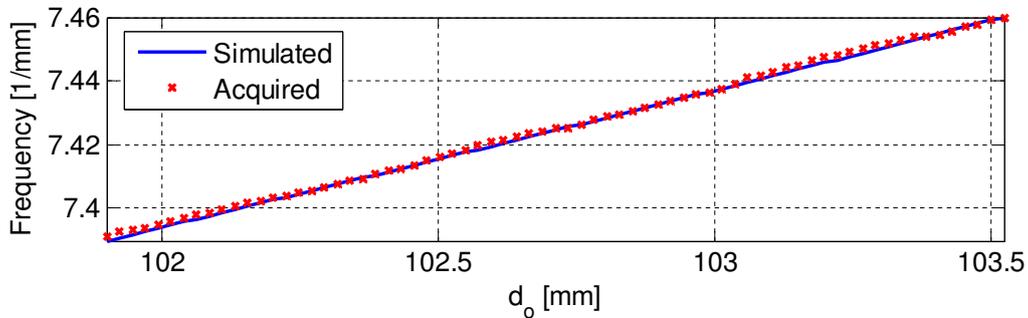


Figura 4.16: Medidas de frecuencia frente a distancia base del objeto para el montaje colineal. Permite el cálculo de la incertidumbre de esta configuración.

ligeramente imprecisos, o por vibraciones o velocidad no uniforme durante el movimiento del espejo. Con este experimento se ha podido calcular la incertidumbre del sistema, que es de $\pm 10\mu m$ para una distancia de trabajo de 102 mm.

Otra de las principales ventajas de esta configuración es que siempre y cuando nos encontremos dentro de los límites de la profundidad de campo del sistema de visión, que es de 4 mm aproximadamente para el prototipo de validación, las medidas obtenidas a partir de la señal de frecuencia son medidas de rango, es decir, medidas absolutas desde el inicio del prototipo hasta cada punto del perfil. Esto permite que el rango dinámico del sistema sea tan grande como su profundidad de campo, siendo esta una ventaja competitiva muy importante frente a otros métodos basados en el análisis de señal de fase, y que por tanto presentan rangos dinámicos limitados.

Esta tecnología se ha empleado con éxito en numerosas ocasiones, pero durante la realización de ciertos ensayos de laboratorio en los que se pretendía obtener precisiones muy elevadas trabajando a cortas distancias, se detectaron ciertos fenómenos que no se podían explicar mediante el proceso de formación de franjas descrito hasta el momento. Estas desviaciones consistían en variaciones de la señal de interferencia que no se correspondían con los cambios en profundidad de la pieza a analizar. En ocasiones, incluso se detectaban cambios en la señal de frecuencia para saltos en el perfil del

objeto muy inferiores a los límites de resolución del sistema.

Por este motivo, se ha realizado un análisis exhaustivo de todos los parámetros que definen la formación de la interferencia, cuantificando la influencia de cada uno de ellos en el OPD. Este trabajo ha sido recopilado en [40], y se describirá en el capítulo 6, junto con las aportaciones realizadas a partir de ellos.

4.6 Montaje triangulado

Para aumentar la precisión del sistema manteniendo la distancia de trabajo, si solo se demandan medidas relativas, es posible introducir triangulación entre las ramas de proyección y adquisición del dispositivo, como el que se muestra en la Fig. 4.17. La línea láser se enfoca directamente sobre el objeto a analizar. La rama de detección es idéntica a la descrita de modo genérico en el apartado de prototipo de validación y forma un determinado ángulo con la de proyección.

La frecuencia del patrón de interferencia adquirido por el sensor sigue la misma Ec. 4.12 que en el montaje colineal. La diferencia radica en que cuando hay una variación de distancia en la superficie a medir, la triangulación provoca un desplazamiento aparente de la señal de frecuencia.

El punto original que refleja la luz del objeto se desplaza en el eje-y ante un cambio de profundidad, tal y como se observa en la Fig. 4.18. En este esquema se ha representado solamente la evolución de un punto de luz desplazado verticalmente sobre el sistema de imagen. Se ha evitado la representación del Savart-plate, de la copia virtual del punto, y de la expansión de ambos frentes de onda hasta el panel de detección por claridad. El diagrama completo sería análogo al de la Fig. 4.4 pero con ambos frentes de onda desplazados en el eje-y la cantidad correspondiente al *shift* indicado en la Fig. 4.18.

Es exactamente el mismo fenómeno que se utiliza en las técnicas tradi-

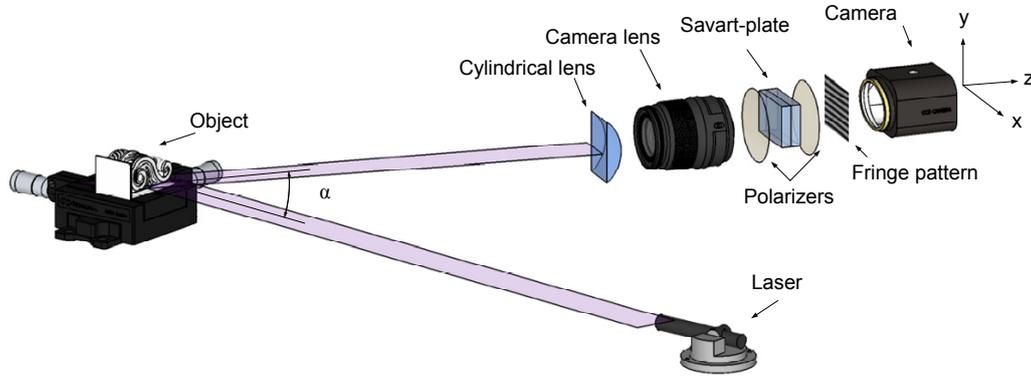


Figura 4.17: Montaje triangulado del perfilómetro óptico. Se proyecta una línea láser sobre la muestra. La luz reflejada es direccionada por un *beam-splitter* a la rama de detección. La combinación de una lente cilíndrica con el objetivo de la cámara permite la reconstrucción punto a punto del perfil. El *Savart plate* duplica el frente de ondas incidente. Está ubicado entre dos polarizadores cruzados por lo que la interferencia entre ambas copias se visualiza en el CCD.

cionales de triangulación activa ay descritas en el estado del arte, pero en este caso, en vez de visualizar la proyección original desplazada, visualizamos la señal de frecuencia desplazada, es decir, con diferente fase inicial. Este fenómeno es el permite interpretar esta configuración interferométrica como una mejora de la triangulación clásica [5].

Medir este desplazamiento o *shift* con precisión es el objetivo del sistema. Recordando la ecuación que define la formación de la interferencia, ese desplazamiento puede modelarse en términos de aportación de fase, denotada por $\varphi_t(z)$

$$I(y) = 2 I_0 (1 + \gamma_0 \cos(2\pi \frac{s}{\lambda z} y) + \varphi_t(z)), \quad (4.14)$$

donde $I(0)$ es la intensidad de fondo, γ_0 el grado de coherencia, s el *shear* introducido por el *Savart-plate*, λ la longitud de onda del láser, y z la distancia desde el punto de enfoque del punto de luz al CCD, que está relacionada con la distancia original del punto de luz al inicio del sistema a través de las ecuaciones que modelan la formación de imagen.

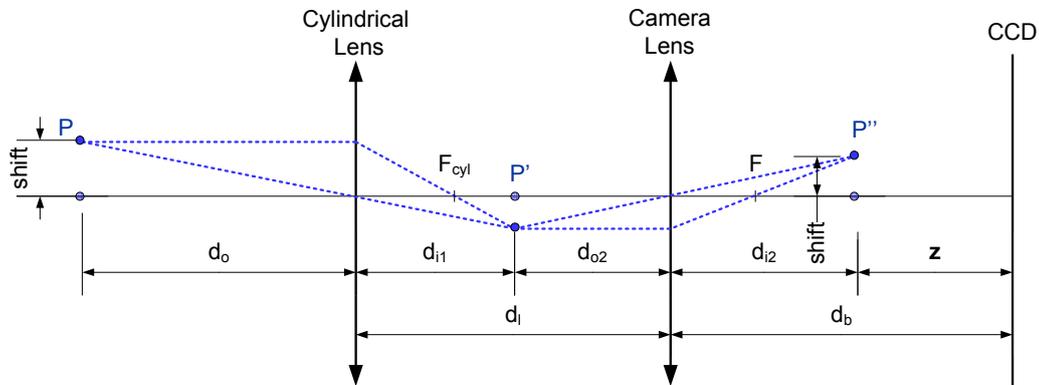


Figura 4.18: Desplazamiento o *shift* en el eje-y sufrido por un punto iluminado ante un cambio de profundidad sobre la superficie en un montaje con triangulación.

Para calcular dicho valor de fase con exactitud se han analizado varios algoritmos, algunos basados en en la Transformada Rápida de Fourier de forma análoga al procedimiento para calcular la frecuencia, y otros específicos para extracción de la señal de fase, creados originalmente para otras disciplinas interferométricas (*Phase Shifting*). Todos ellos serán analizados a lo largo del presente capítulo. Un estudio mucho más completo de las técnicas de procesamiento de fase se ha realizado por Fernández [50].

Estudios previos a la presente Tesis realizados por Enguita et. al [42] han demostrado que la resolución de la señal de fase tiene al menos un orden de magnitud más que la de la señal de frecuencia.

Por tanto, para obtener un perfil de distancias de un objeto, basta calcular para columna del CCD la fase $\varphi_t(z)$ aportada por la triangulación y calibrarla adecuadamente.

Si solamente se emplea la señal de fase para realizar la medida, no se tiene una referencia de la distancia a la que se encuentra el objeto, aunque sí de los cambios de profundidad a lo largo del perfil. Por esto, si no se utiliza información adicional, en triangulación se obtienen medidas relativas.

La contrapartida es que existe una limitación en la máxima variación de distancias que se puede obtener sin ambigüedad. Esta limitación que es inherente a la propia naturaleza de la variable de fase: los valores de salida están limitados al intervalo $[-\pi, \pi)$. Una de las aportaciones de esta Tesis consiste en aminorar esta limitación, y se analizará en el capítulo 5.

4.7 Extracción de frecuencia y fase de la interferencia

Las tecnologías ópticas cuya información está codificada en patrones de franjas son de muy variada naturaleza, desde interferometría, interferometría speckle o proyección de franjas, hasta deflectometría, entre otras. Una exhaustiva clasificación de estas técnicas se da en [101]. Pero independientemente de su principio físico, comparten ciertos procedimientos de análisis y métodos de extracción de la información [120]. Y como no, también tienen en común restricciones y tácticas de mejora. En todas ellas, la precisión con la que se calculen estos parámetros de partida va a ser crítica para delimitar la incertidumbre de la medida final. En esta sección tan sólo se describirán los procedimientos que son de aplicación directa al tipo de interferograma objeto de estudio.

Como ya se ha visto anteriormente, las variables fundamentales del sistema que contienen información relativa al perfil de distancias del objeto son la frecuencia, y la fase en el caso de tener un montaje triangulado. La información de cada punto del perfil está contenida en la señal de interferencia de una columna del CCD, por lo que los métodos descritos a continuación se aplican columna por columna de interferograma, tal y como se simboliza en la Fig. 4.19.

En la Fig. 4.20 se muestra el patrón de interferencia recogido por el sensor, procedente de una muestra con escalones sobre su superficie. Servirá como dato de partida para ejemplificar los resultados procedentes de los distintos procesamientos.

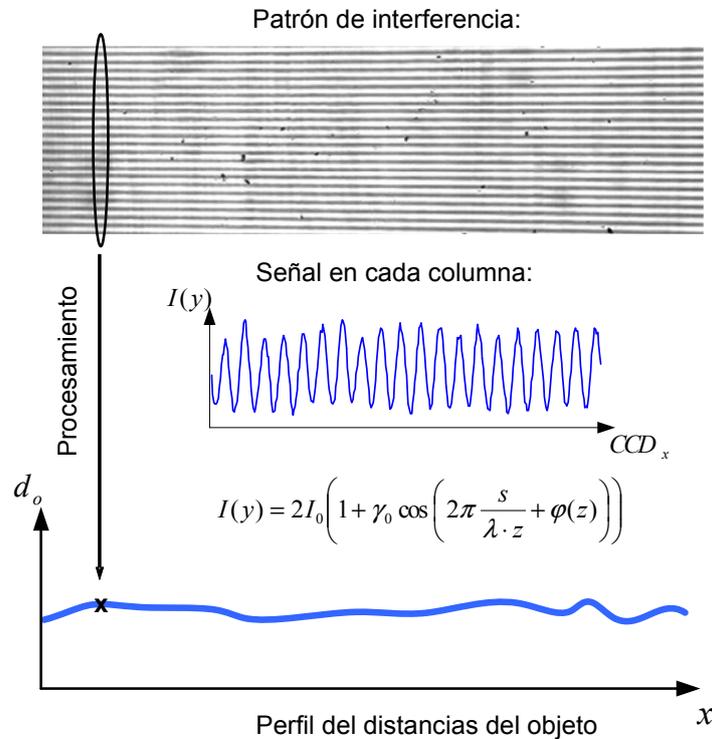


Figura 4.19: Esquema de los pasos de procesamiento

4.7.1 Recuperación de la frecuencia

El procedimiento basado en la Transformada Fourier para la extracción del valor de frecuencia de cada punto es de aplicación en las dos configuraciones disponibles. Obviamente, se utiliza como procesamiento fundamental cuando se realizan medidas absolutas a partir del montaje colineal, pero también es un paso intermedio en uno de los métodos utilizados para las medidas en triangulación.

Se ejecuta en cada columna el algoritmo que implementa la Transformada Rápida de Fourier, y se detecta el pico máximo del espectro frecuencial, que se corresponde con el valor de la frecuencia de la interferencia. Para incrementar la precisión, una vez que se ha localizado el máximo dentro de una

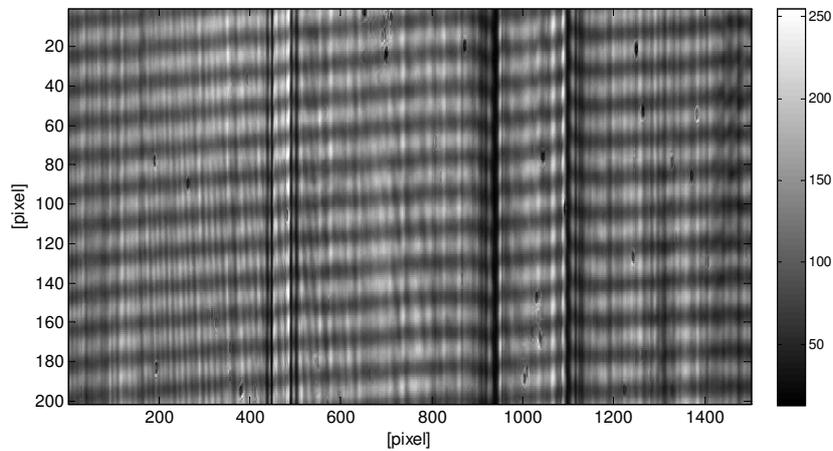


Figura 4.20: Patrón de interferencia de ejemplo para la descripción de los algoritmos fundamentales de procesamiento de la presente sección.

ventana de búsqueda, el valor que se toma como válido se calcula siguiendo los pasos enumerados a continuación. El cálculo del índice frecuencial preciso se ha esquematizado en la Fig. 4.21.

- Considerar i el índice del máximo y v_i el valor del módulo de la Transformada de Fourier para el índice i .
- Usar los pares $(i - 1, v_{i-1})$, (i, v_i) , $(i + 1, v_{i+1})$ para realizar un ajuste parabólico.
- Calcular la derivada del polinomio anterior. Su raíz es el nuevo valor del índice, de mayor precisión, \hat{i} .

Este método es capaz de calcular correctamente los índices precisos del frente de frecuencia, incluso usando Transformadas de Fourier de menor número de puntos. Como ejemplo, nuestro *software* de procesamiento actual trabaja típicamente con Transformadas de Fourier de 4096 puntos, pero hemos comprobado experimentalmente que usar una Transformada de 2048 puntos con el método anterior proporciona valores idénticos. Incluso se pueden utilizar Transformadas más pequeñas, mientras haya suficiente resolución como para encontrar el máximo correctamente. La eficacia del método

4.7. FRECUENCIA Y FASE DE LA INTERFERENCIA

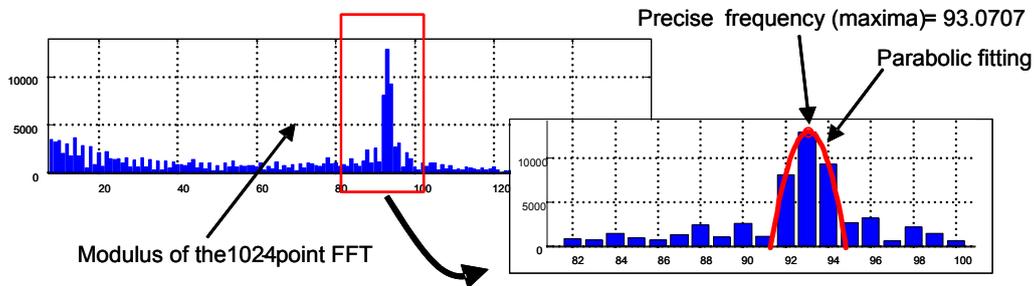


Figura 4.21: Esquema de los pasos a seguir para el cálculo de los índices precisos del valor de la frecuencia extraída de un patrón de interferencia minimizando el consumo de recursos.

se puede estimar mediante la figura 4.22, donde se observa que empleando el ajuste parabólico se llega el valor real de índice preciso usando una FFT de 2048 puntos, mientras que si se prescindiera de él y tomáramos como valor valor el índice i correspondiente al máximo módulo de la FFT, sería necesario implementar una FFT de más de 16384 puntos para obtener la misma precisión. En la gráfica se ve como ambos procedimientos tienden a converger. Este procedimiento se debe aplicar a cada columna en el patrón de franjas para obtener los datos de todo el perfil.

Este proceso se ha aplicado al patrón de interferencia de ejemplo de la Fig. 4.20. Los resultados se muestran en las gráficas de la Fig. 4.23. Se comparan las señales frecuenciales obtenidas tras identificar la componente principal utilizando una FFT de 4096 puntos, usando el procedimiento básico (arriba), y tras aplicar el ajuste parabólico para el aumento de precisión (abajo).

Mejoras adicionales para eliminar ciertos fenómenos que pueden llegar a comprometer la precisión final de la señal han sido descritos por Enguita [47]. Consisten en aplicar ciertos tipos de precondicionamiento a la señal de partida, como puede ser por ejemplo, es uso de una ventana de Hanning, cuyos efectos se mostrarán más adelante.

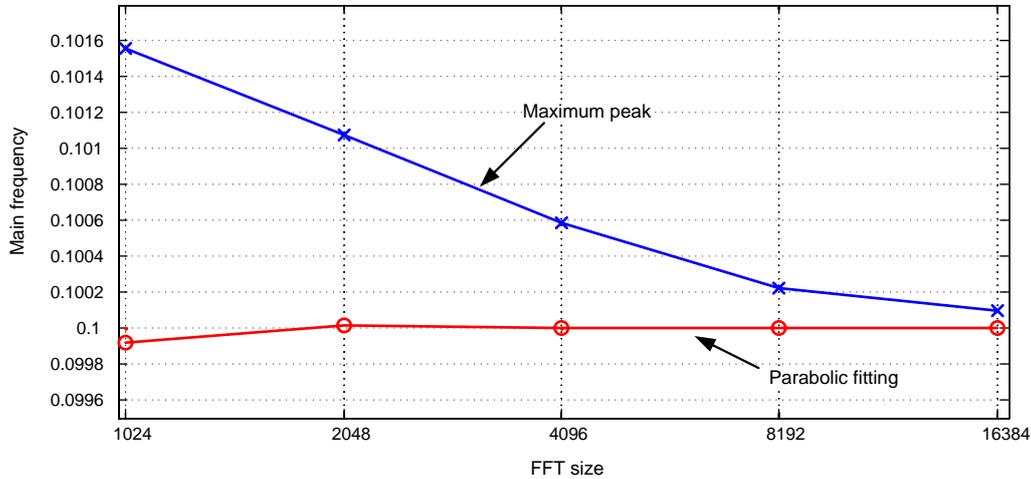


Figura 4.22: Cuantificación de la eficacia del método basado en ajuste parabólico para la obtención del índice frecuencial para el que del módulo de la FFT es máximo. La señal de entrada es una cosenoidal de 0.1 ciclos por píxel.

4.7.2 Recuperación de la fase de triangulación

Típicamente, para el tipo de interferogramas a analizar, existen dos alternativas para la extracción de la señal de fase $\varphi(z)$: los métodos basados en Transformadas de Fourier [132, 133], o en técnicas de *Phase Shifting* [25, 26, 32, 20].

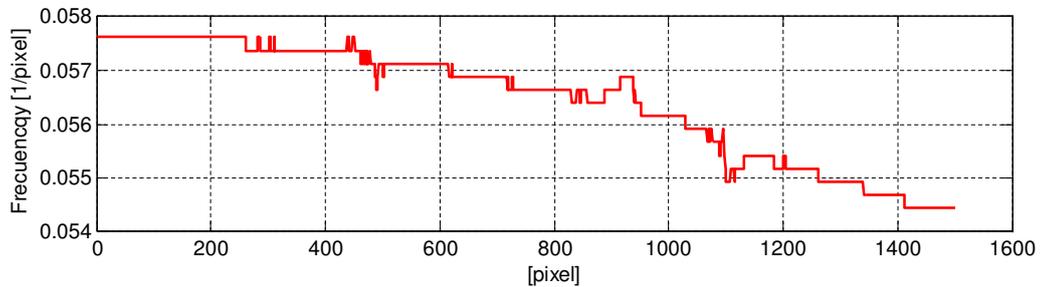
En este punto, es importante mencionar que la fase de triangulación $\varphi_t(z)$ debe ser medida en la fila que corresponda al eje óptico del interferograma. Si la señal de fase se mide en la primera fila, debe corregirse con el valor de la frecuencia con el fin de obtener la fase en la fila central. Este cálculo a efectuar es

$$\varphi_t(z) = \varphi_{tprimera}(z) + \frac{x_1}{f}, \quad (4.15)$$

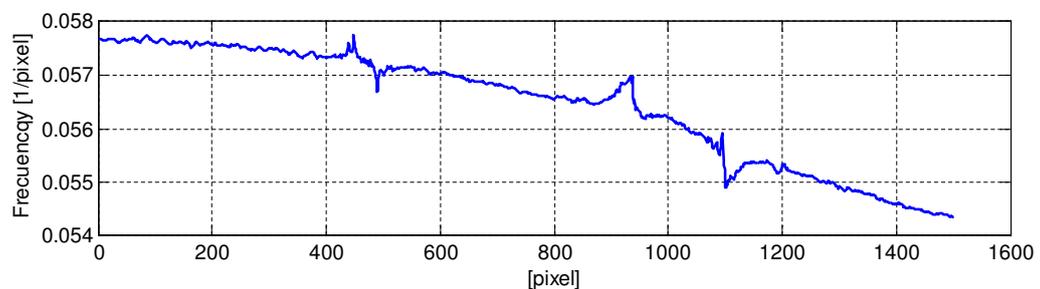
siendo f la frecuencia de franjas para un punto determinado, $\varphi_{tprimera}(z)$ la fase correspondiente a la primera fila del interferograma para ese punto y x_1 la distancia de la primera fila a el centro del eje óptico en el eje-y.

Esta corrección es especialmente importante en los casos en los que existe

4.7. FRECUENCIA Y FASE DE LA INTERFERENCIA



(a)



(b)

Figura 4.23: Señales de frecuencia, precisa (a) y no precisa (b) para el patrón de interferencia de ejemplo, según los procedimientos descritos.

resolución en frecuencia suficiente para detectar un determinado cambio de la señal. Es cierto que en la mayor parte de las configuraciones en triangulación han sido seleccionadas porque no hay resolución en frecuencia para efectuar la medida, por lo que la diferencia relativa de fases entre dos puntos del perfil va a ser igual en cualquier fila del interferograma. Pero si no es así, debe realizarse la corrección para facilitar la etapa de calibración.

En las descripciones específicas de cada método de procesamiento, no se volverá a reiterar este procedimiento, que sin embargo debe ser tenido en cuenta en los casos que corresponda.

Método basado en Transformadas de Fourier

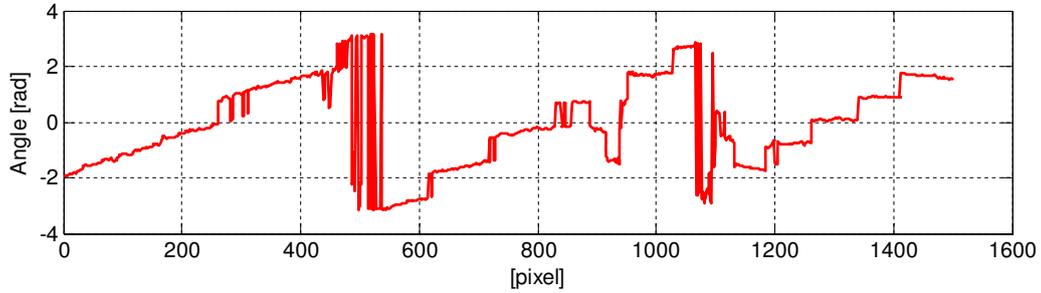
El primer procedimiento basado en Transformadas de Fourier requiere el cálculo previo del valor preciso de frecuencia siguiendo los pasos anteriores. Para el ejemplo que estamos tratando, la señal mostrada en la Fig. 4.23. La Transformada Rápida de Fourier devuelve el espectro frecuencial y las fases iniciales o ángulos de dichas componentes frecuenciales. Se ha de desplegar la señal de ángulos iniciales y efectuar sobre ella el mismo tipo de ajuste parabólico que para el cálculo de la frecuencia precisa en un entorno de ésta. Al evaluar este polinomio en el índice correspondiente a la frecuencia precisa, se obtiene el valor de fase de la primera fila del interferograma, con la precisión incrementada, de forma análoga al procedimiento para incrementar la precisión en frecuencia. El resultado de la señal de fase para el interferograma de ejemplo se muestra en la Fig. 4.24, donde de nuevo se puede identificar a simple vista el importante incremento de precisión que proporciona el ajuste parabólico. Como recordatorio, este valor debe ser corregido con la frecuencia adecuada si los cambios en frecuencia son significativos, para obtener el valor de la fase de triangulación $\varphi_t(z)$ en la zona central del eje óptico. Utilizando este método se dispone tanto de la frecuencia como de la fase en la primera fila, por lo que la corrección es inmediata.

Una alternativa a este primer método es, en vez de trabajar con todos los valores de ángulos iniciales del espectro frecuencial, implementar el cálculo de la Transformada Discreta de Fourier (DFT), y evaluar su valor para la frecuencia precisa previamente calculada. Para el cálculo de la DFT se ha implementado la rutina del algoritmo de Goertzel. La utilización de este algoritmo permite agilizar los cálculos. La precisión obtenida depende de la precisión de la señal de frecuencia en la que se evalúe la DFT, por lo que, para los mismos parámetros de cálculos, la precisión de fase obtenida es igual utilizando la DFT o el ajuste parabólico.

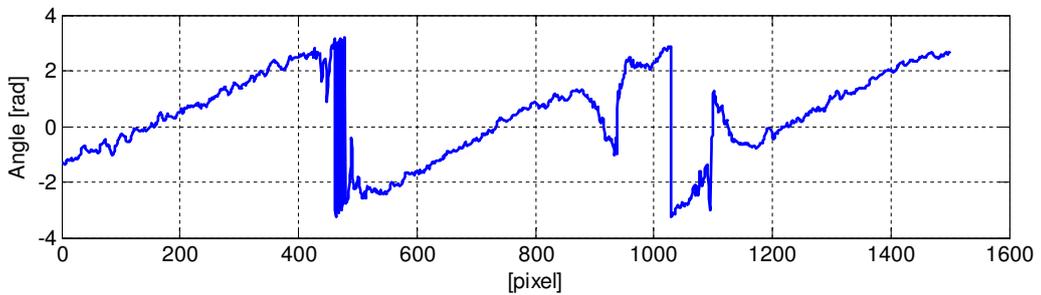
A modo de resumen, a los pasos esquematizados en el apartado anterior para la recuperación de la frecuencia, se añadiría la sentencia:

- Aplicar el mismo tipo de ajuste parabólico a los valores de ángulos desplegados y evaluar ese polinomio en \hat{i} . Como alternativa, calcular

4.7. FRECUENCIA Y FASE DE LA INTERFERENCIA



(a)



(b)

Figura 4.24: Señales de fase, precisa (a) y no precisa (b) para el patrón de interferencia de ejemplo, según los procedimientos descritos.

el valor de la DFT en \hat{i} y extraer su ángulo. Las solución es idéntica. Este es el valor buscado de fase.

Método basado en *Phase Shifting*

La segunda opción no requiere disponer previamente del perfil de frecuencias, por lo que es aún más rápida. Se ha de aplicar cuando solamente se requiera la señal de fase.

De forma genérica, es posible expresar la intensidad en un punto por

$$I_k(x, y) = F + A \cdot \cos(\Phi - \alpha) = F + A \cdot (\cos(\Phi) \cos(\alpha) + \sin(\Phi) \sin(\alpha)), \quad (4.16)$$

siendo F la constante de intensidad correspondiente al fondo, y Φ el valor instantáneo de fase.

Es decir, cada columna de un interferograma es en sí misma un interferograma unidimensional que contiene la información de la distancia de un punto modulada sobre una portadora. De esta manera, todas los puntos que componen está señal son equivalentes, con una diferencia de fase que queda definida por la onda portadora. Esta deducción hace posible aplicar técnicas de recuperación de fase computacionalmente muy eficientes. Estas técnicas PSI (*Phase Shifting Interferometry*) se dividen en dos grupos: las temporales, que toman los datos de manera secuencial en el tiempo, y las espaciales, en la que los datos son tomados simultáneamente apoyándose en una onda portadora, como es el caso.

Simplemente se ha de considerar la frecuencia del patrón de interferencia como la frecuencia portadora del método *Spatial Carrier Phase Shifting* [134, 86]. Conocidos un cierto número de valores de intensidad captados por el sensor en un entorno del punto donde se quiere calcular la fase, basta aplicar la expresión correspondiente según el algoritmo seleccionado, por ejemplo cualquiera de los descritos en [122, 101].

El caso más sencillo es el algoritmo de tres pasos desarrollado por Creath [23]. Se denotará α el *shift* o desplazamiento conocido de la onda portadora para una serie de puntos. El cálculo de la frecuencia de una sola fila del patrón de interferencia nos permite estimar el desplazamiento de fase que se produce por píxel; y también, una vez determinado el ángulo de *shift* con que deseamos obtener distintas muestras de intensidad, saber a cuanta distancia corresponde en el CCD.

Para un mínimo de tres ecuaciones, si tomamos puntos de intensidad en 0 , $-\alpha$ y α , se tiene el siguiente sistema

$$\begin{aligned} I_1 &= F + A \cdot \{ \cos(\Phi) \cos(-\alpha) + \sin(\Phi) \sin(-\alpha) \}, \\ I_2 &= F + A \cdot \{ \cos(\Phi) \cos(0) + \sin(\Phi) \sin(0) \}, \\ I_3 &= F + A \cdot \{ \cos(\Phi) \cos(\alpha) + \sin(\Phi) \sin(\alpha) \}, \end{aligned} \quad (4.17)$$

de donde es posible despejar la fase instantánea Φ , que sigue la expresión

$$\Phi(x, y) = \arctan \left\{ \left[\frac{1 - \cos(\alpha)}{\sin(\alpha)} \right] \frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3} \right\}. \quad (4.18)$$

Si tomamos un shift α aproximadamente de 90° para la toma de los elementos I_1 , I_2 e I_3 , la ecuación anterior se simplifica a

$$\Phi(x, y) = \arctan \left(\frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3} \right). \quad (4.19)$$

Una recopilación exhaustiva de las alternativas para la extracción de fase se ha realizado por Fernández [43, 50] donde se presentan algoritmos optimizados para este propósito, que utilizan hasta 32 líneas del interferograma y se ejecutan prácticamente en tiempo real.

4.7.3 Despliegue de fase

Siempre que se trabaja con señales de fase, es habitual proceder al despliegue de esta, porque a priori no se puede conocer el orden de franja, tan sólo la fracción de 2π correspondiente, ya que la señal se adquiere plegada en el intervalo $(-\pi, \pi]$. Esto provoca saltos de fase entre píxeles adyacentes de π a $-\pi$ o en el sentido inverso. El proceso para conectar los puntos de discontinuidad, asumiendo la continuidad espacial de la distribución, se denomina despliegue de fase, y es necesario para conocer la distribución física final de la señal. Este concepto se ejemplifica en la Fig. 4.25.

En el caso más sencillo, descrito por Itoth [74], las diferencias de fase entre píxeles adyacentes siguiendo un camino de despliegue unidimensional se conectan utilizando el siguiente criterio:

$$\begin{aligned} & \text{If } \Phi(r_{i+1}) - \Phi(r_i) > \pi, \\ & \quad \Phi(r_{i+1}) = \Phi(r_{i+1}) - 2\pi, \\ & \text{else, if } \Phi(r_{i+1}) - \Phi(r_i) \leq -\pi, \\ & \quad \Phi(r_{i+1}) = \Phi(r_{i+1}) + 2\pi, \end{aligned} \quad (4.20)$$

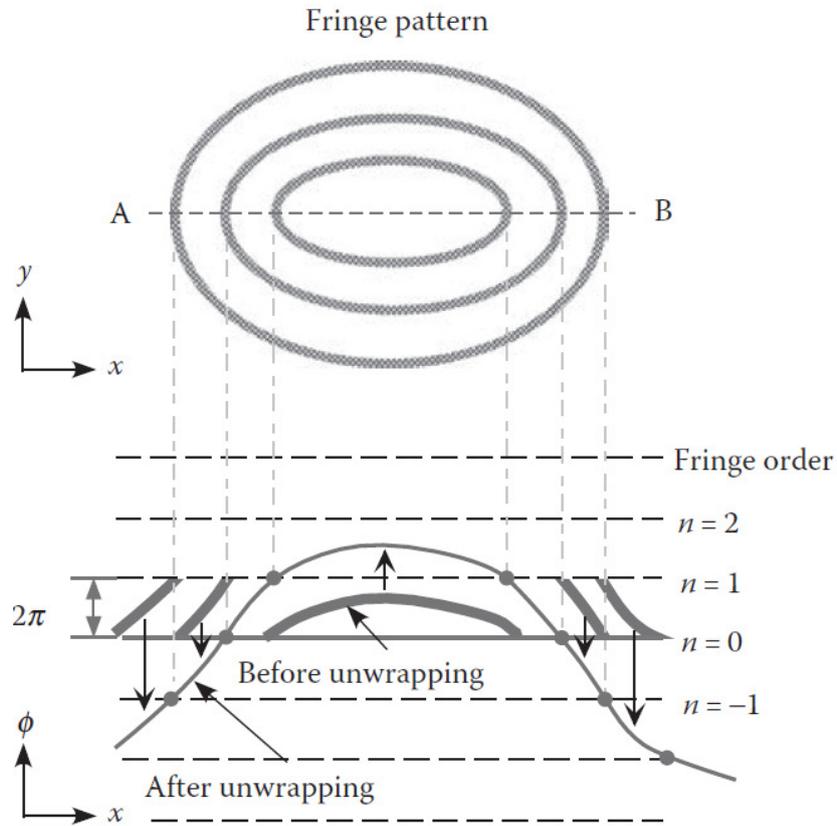


Figura 4.25: Esquema para visualizar el concepto despliegue de fase

siendo r la posición vectorial del número de píxel i .

Para el perfil de fases de la Fig. 4.24, aplicando el criterio unidimensional, se obtiene la señal de fase desplegada mostrada en la Fig. 4.26. Sin embargo, al aplicar este procedimiento de forma recursiva a una superficie, el resultado no es el deseado, ya que los posibles errores son acumulativos y el procedimiento unidimensional no tiene en cuenta la información de los datos del entorno. Esto es lo que ocurre en el ejemplo de la Fig. 4.27, donde se muestra el escaneo procedente de una superficie plana sobre la que hay escalones de resina de una micra de altura. En la parte superior de la imagen se observa el mapa de fases de la superficie tal cual se ha obtenido, y en la imagen inferior, ese mismo mapa sobre el que se ha tratado de realizar el

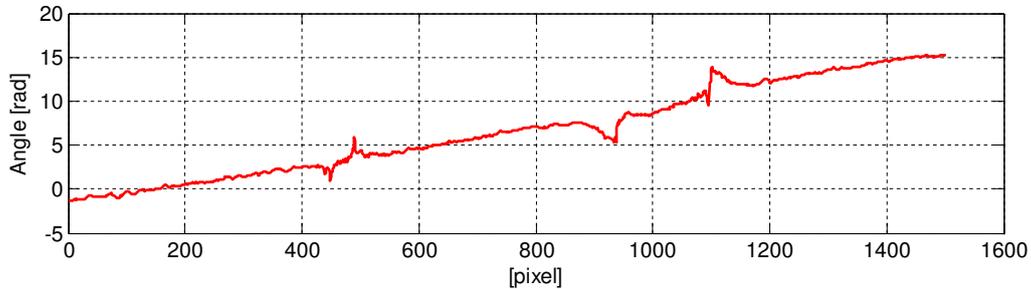


Figura 4.26: Señal de fase del ejemplo, una vez aplicado el procedimiento de despliegue de fase.

despliegue línea a línea. Obviamente, el resultado no es satisfactorio.

El proceso de despliegue unidimensional prácticamente no admite variaciones. Pero la tarea de despliegue de fase aplicada a una superficie puede ser mucho más compleja. Cuando se trabaja en una dimensión, si existe algún dato no válido a lo largo del perfil, es imposible desplegar si no se dispone de conocimiento adicional. Cuando se aplica en dos dimensiones, existen múltiples caminos en los que desplegar los datos, por lo que el resultado final va a depender de los caminos seleccionados.

Estos métodos bidimensionales se pueden clasificar en métodos de camino guiado, o métodos de la mínima norma, que tratan de minimizar las diferencias entre los gradientes de la fase plegada y la solución. Existen numerosos trabajos relacionados con el problema de despliegue de fase, especialmente para aportar soluciones frente a datos ruidosos o corruptos, como por ejemplo los descritos en [16, 124, 78].

En nuestro caso, los algoritmos de despliegue de fase bidireccionales se emplean cuando se dispone de un mapa de superficie en fase procedente de un escaneo, como en la figura anterior. Un ejemplo de aplicación de dos métodos bidireccionales diferentes se muestra en la Fig. 4.28. La solución desplegada varía en algunas zonas según el método seleccionado.

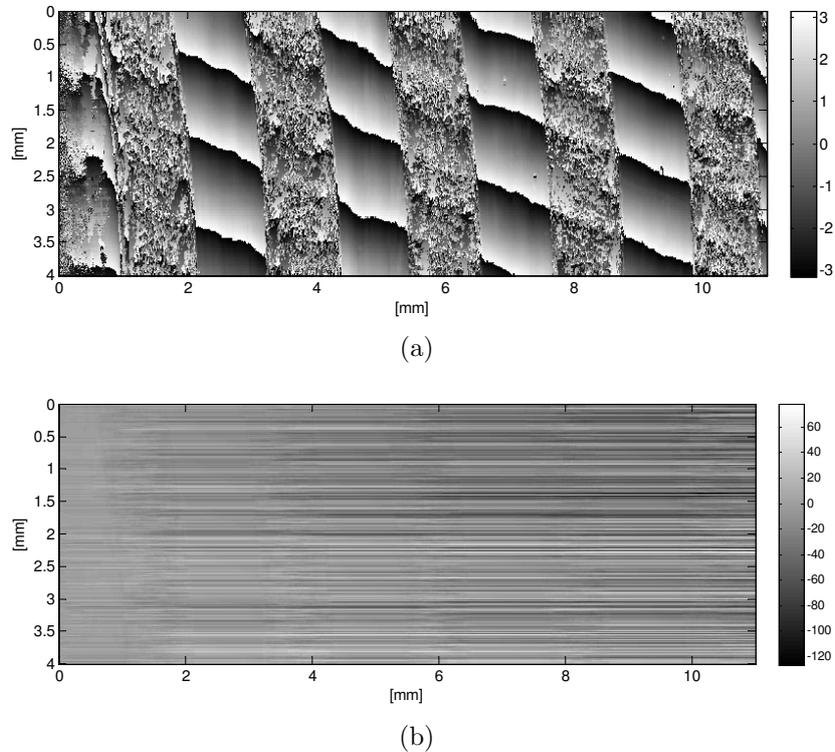


Figura 4.27: Mapa de fase de una superficie con escalones de una micra de altura. (a): plegado, y (b): desplegado línea a línea. El despliegue unidireccional no es satisfactorio para este ejemplo.

4.7.4 Preacondicionamiento de interferogramas

Es deseable eliminar en todo lo posible el ruido mediante algoritmos de filtrado que permitan obtener un interferograma más limpio con una distorsión mínima de la señal. Existen algoritmos que pueden trabajar sobre cada una de las líneas que componen el holograma de manera independiente (filtrado 1D) o sobre la imagen completa (filtrado 2D). En los próximos apartados se examinará el comportamiento de los algoritmos más comunes de ambos tipos.

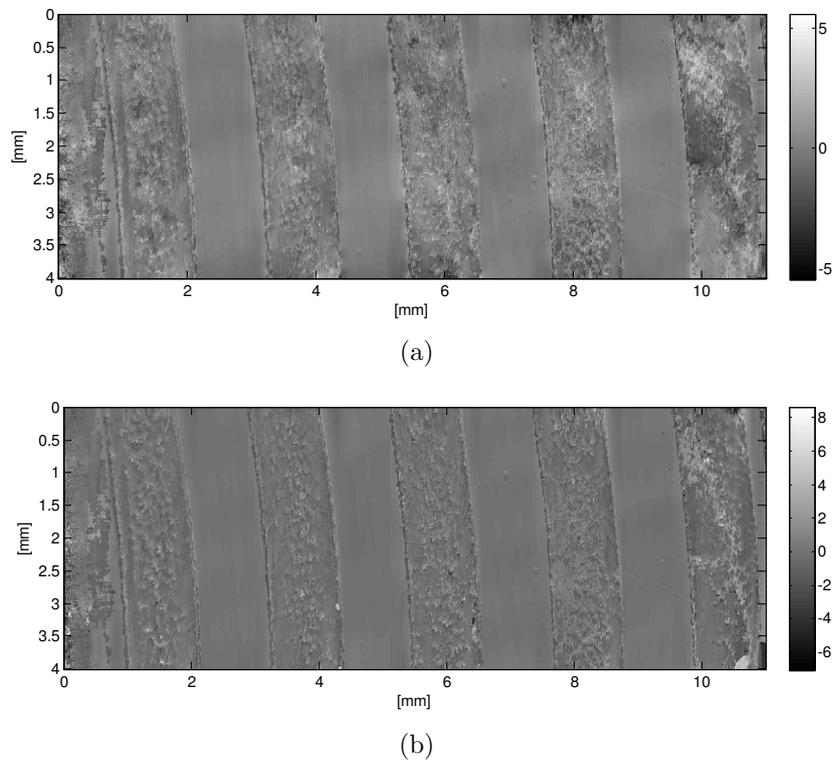


Figura 4.28: Despliegue de fase bidireccional aplicado a un mapa de una superficie plana con escalones de una micra de altura. En (a) se ha utilizado el método *unweighted least-squares*, y en (b) el *minimum L_p -norm*.

Filtrado 1D del interferograma

En [54] C. Fraga realiza un análisis exhaustivo de distintos métodos de filtrado. En su trabajo se comparan los resultados obtenidos mediante la aplicación de filtros pasa banda, FIR e IIR tanto en la disminución del ruido, como en la distorsión ocasionada en la señal.

Las principales conclusiones obtenidas son:

- La transformada de Fourier es de por sí un filtro suficientemente fuerte. El empleo de filtrados más potentes sólo se justifica en el caso de que

el ruido sea de una magnitud equiparable a la propia señal.

- Los filtrados mediante FIR e IIR aumentan la relación señal/ruido final, aunque los efectos de éste no son significativos.
- Al aplicar un filtrado se distorsionan los primeros valores de la secuencia de datos, por lo que deben truncarse los primeros $n/2$ elementos en el caso de un filtro FIR o utilizar un filtrado de tipo *cero-fase* en el caso de utilizar un filtrado de *Butterworth*.
- Los filtros distorsionan la amplitud de la señal y también su fase. La desviación es lineal en el caso de los filtros de respuesta de duración finita, pero no para los de respuesta infinita. Es por ello necesario utilizar filtros *cero-fase*, lo que también provoca distorsiones importantes en la frecuencia final.

En todo caso, este tipo de filtrado se muestra ineficaz en situaciones de ruido intenso, debido sobre todo a que utilizan la información en una dimensión para realizar su cometido.

Es pues necesario irse a métodos de filtrado en 2D, que aprovechen la información de varios puntos físicos consecutivos, aun a riesgo de perder precisión en la medida.

Filtrado 2D del interferograma

La mayoría de los filtros lineales de procesamiento de imágenes proporcionan una buena reducción del ruido pero ocasionan una pérdida en los detalles que no es deseable en este caso. Los filtros no lineales (como el filtro de mediana) se comportan bastante mejor en este aspecto.

Sin embargo estos filtros no producen buenos resultados en presencia de ruido *speckle*. Como resultado de las recientes investigaciones en el área de la interferometría por radar (SAR) se han desarrollado filtros específicos para lidiar con este tipo de ruido:

Los filtros Kuan [85], Lee [95] y Nathan se basan en el criterio del Mínimo Error Cuadrático Medio (MMSE), y desarrolla un modelo para el ruido multiplicativo. El filtro de Frost [57] se basa en un modelo adaptativo del filtro de Wiener. Otros filtros aplicables a este problema son el filtro Gamma, el filtro de Kalman o el filtro Oddy. Este tipo de filtros se comportan generalmente bastante bien en la mayoría de las imágenes (sobre todo Frost y Gamma).

Posteriormente L. Gagnon y A. Jouan [60] desarrollaron un método de filtrado basado en wavelets (WCS) que proporciona una mejor relación Señal-Error-Cuadrático-Medio (S/MSE) que los filtros tradicionales.

La idea básica es utilizar una transformada Wavelet Discreta (DWT) compleja sobre el logaritmo de la imagen (para convertir el ruido multiplicativo, en ruido aditivo). Los coeficientes de la DWT son umbralizados (seleccionados) mediante consideraciones morfológicas (orientación y distribución en el plano parte real/parte imaginaria de los coeficientes) y la imagen es regenerada de nuevo.

Sin embargo ninguno de estos filtros aprovechan la alta orientación espacial y la buena localización frecuencial de la información presente en el interferograma, y en algunos casos son complejos de parametrizar. Estudios en para seleccionar los umbrales más convenientes se han realizado por Donoho [36, 35, 37].

Los filtros de Gabor [58] son una buena elección ya que pueden orientarse en diferentes ángulos. El filtrado mediante bancos de filtros de Gabor, elimina casi completamente el ruido presente en interferogramas de baja calidad aún en los peores casos, con una mínima pérdida de resolución (prácticamente nula) y una baja distorsión de la señal resultante. Esta técnica se basa en el análisis tiempo-frecuencia de una señal 2D es relativamente muy similar al análisis de *wavelets*. Sus propiedades han sido descritas por Daugman [30, 31]. Debido a estas propiedades, los Filtros de Gabor han sido utilizados con éxito en numerosos problemas de análisis de texturas [117], extracción de características [103] [94] y análisis de imágenes en general [144], [142], [18].

Un estudio completo de los resultados de distintos tipos de filtros en

para procesamiento de interferogramas procedentes de tecnologías de desplazamiento lateral ha sido desarrollado por Enguita [39].

Filtros más empleados para el prototipo de validación

Cuando se quiere obtener la señal de frecuencia del interferograma, el preprocesamiento que se aconseja realizar siempre es la utilización de una ventana de *Hanning* en el cálculo de la Transformada de Fourier. Debido al uso de un filtro rectangular para el cálculo de la Transformada aparecen ondulaciones de amplitud significativa (o “rizados”) en la señal de frecuencia resultante. Esto se conoce como el fenómeno de Gibbs [115, 121], y puede solucionarse utilizando un filtrado menos exigente, como una ventana de Hanning aplicada en los extremos de la señal. En la Fig. 4.29 se observa como repercute en la señal de interferencia la aplicación de una ventana de *Hanning*, y la consiguiente mejora en el espectro frecuencial.

Cuando se requiere directamente la señal de fase del interferograma, es conveniente realizar otro tipo de filtrado. El perfil de fase está definido por la función tangente, y esta presenta discontinuidades: saltos de π a $-\pi$ o viceversa. Para mitigar este problema, se utiliza la conocida expresión de la tangente como cociente de la función seno partida de la función coseno. Para ambas, la fase devuelta es continua. Por esto, es mejor filtrar el numerador y el denominador independientemente antes de realizar el cociente. Esto es aplicable, por ejemplo, en el numerador y denominador de alguno de los algoritmos de *Phase Shifting* de los que se ha tratado anteriormente.

$$\tan(\Phi) = \frac{\sin(\Phi)}{\cos(\Phi)} \approx \frac{\text{filter}(\sin(\Phi))}{\text{filter}(\cos(\Phi))}, \quad (4.21)$$

siendo Φ la fase o ángulo instantáneo del interferograma.

Si el filtrado no se realiza correctamente, incluso los algoritmos de despliegue de fase robustos pueden fallar, como se ve en la Fig. 4.30, que muestra un mapa de la superficie plana con escalones de una micra de altura. La señal original de este ejemplo es ligeramente más ruidosa que las utilizadas anteriormente, y en (a) no se ha aplicado ningún tipo de filtrado. Al proceder al

4.7. FRECUENCIA Y FASE DE LA INTERFERENCIA

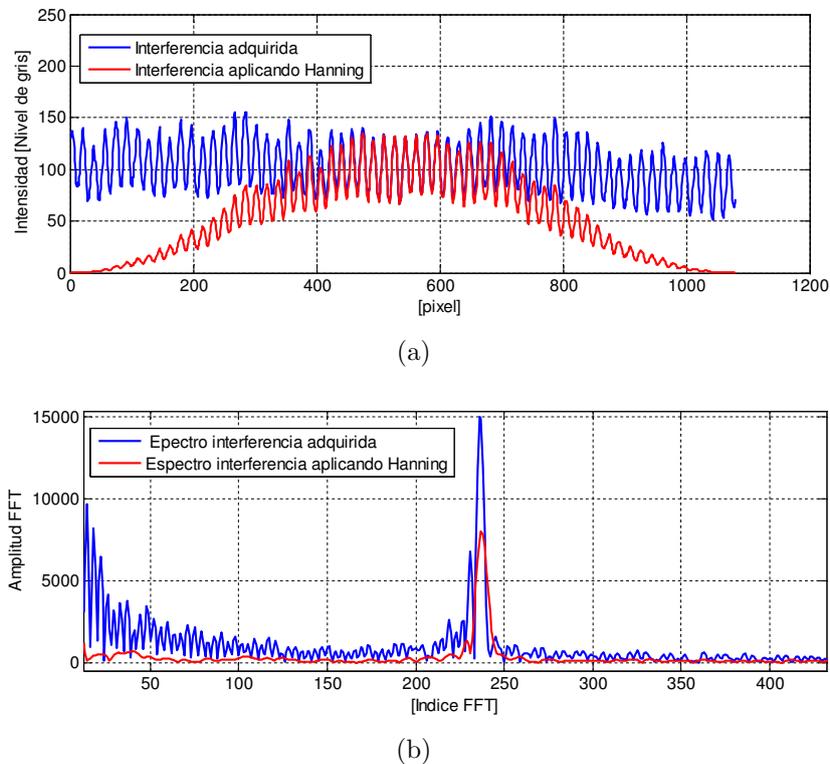


Figura 4.29: Visualización del efecto ventana de *Hanning* sobre una señal del patrón de interferencia. En (a) se muestra la cosenoidal adquirida y se compara con la misma señal tras aplicarle una ventana de *Hanning*, y en (b) se visualiza como repercute este filtrado en la Transformada de Fourier, eliminando ondas y frecuencias indeseables.

despliegue, aparecen áreas que están a una altura que no se corresponde con la realidad. Sin embargo, si el despliegue se aplica sobre el mapa una vez filtrado, como se ha hecho en (b), los escalones están correctamente definidos. Para esta muestra, cabe mencionar que la zona alta de los escalones es una deposición de resina muy porosa, por lo que la apariencia granulosa de esas zonas es esperable en cualquier caso.

Existen numerosos trabajos a cerca de este tipo de filtros, como por ejemplo [17, 73, 9].

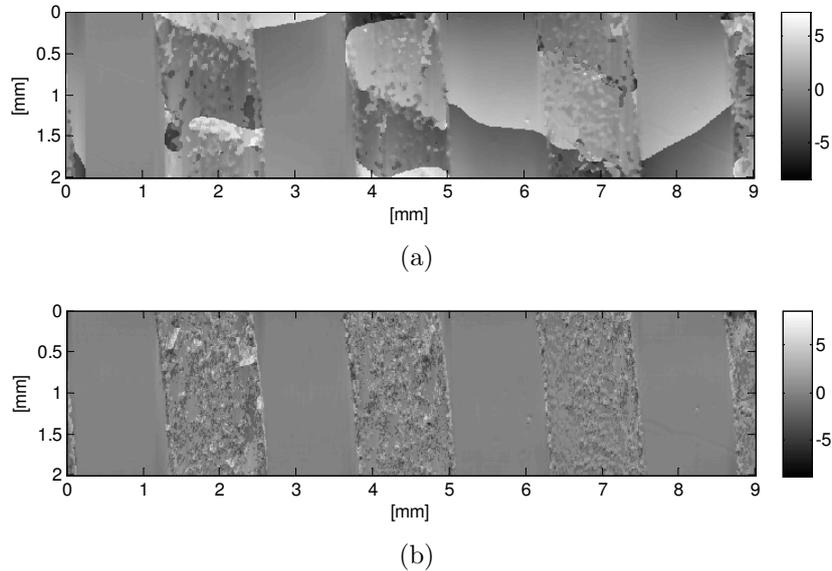


Figura 4.30: Despliegue de fase bidireccional aplicado a un mapa de una superficie plana con escalones de una micra de altura mediante el método *minimum Lp-norm*. El mapa inicial era ruidoso. (a): sin filtrar, y (b): filtrado. El ruido original provoca errores en el despliegue en la imagen (a).

4.8 Conclusiones

A lo largo de este capítulo se han detallado minuciosamente las claves de comportamiento de la tecnología en torno a la que se desarrolla la presente Tesis, la Interferometría de Desplazamiento Lateral aplicada a perfilometría óptica.

Se ha descrito el principio de funcionamiento del conjunto y de cada parte que conforma el prototipo; el proceso de formación de la interferencia, el principal ruido del sistema, el *speckle* y las formas de combatirlo; y los procedimientos y algoritmos específicos de procesamiento para extraer la información de medida. También los filtrados de preconditionamiento que son recomendables en cada caso si se pretende obtener altas precisiones de medida.

4.8. *CONCLUSIONES*

121

También se han introducido las dos variantes de configuración, el montaje colineal para medidas absolutas y el montaje triangulado para medidas relativas. Ambas se fundamentan en los mismos principios, pero las peculiaridades de cada una nos van a permitir entender con mayor nitidez las estrategias escogidas para la extensión del rango de funcionamiento, que serán descritas en los próximos capítulos.

Con todo esto, el prototipo, su funcionamiento, y su aplicabilidad, se vuelven transparentes al lector, y disponibles para proseguir la investigación en la materia.

Un hombre con un reloj sabe
la hora que es; uno con dos
no está tan seguro.

Anónimo

Capítulo 5

Extensión del rango de medida para la configuración en triangulación

Una de las características más importantes de un sistema de medida es su rango de funcionamiento (valores mínimo y máximo entre los que es capaz de medir); para un perfilómetro capaz de trabajar en líneas de producción, este parámetro es fundamental para que el equipo tenga robustez y se adapte a las condiciones de funcionamiento.

En otras tecnologías utilizadas (microscopía, triangulación, etc.) este rango de medida es muy limitado, por lo que se reduce su aplicabilidad en condiciones on-line.

Para la tecnología utilizada, cuando se utiliza la configuración en triangulación, la limitación proviene no tanto de características ópticas como del uso de la señal de fase para la medición, ya que dicha señal pliega cada 2π y por tanto no es posible resolver las ambigüedades. Al aumentar la precisión de medida, el rango de distancias para la transición de 2π se reduce.

En este capítulo se analizan en profundidad la problemática relativa a

la limitación del rango de medida sin ambigüedad cuando se utiliza la señal de fase del interferograma para las medidas de distancia. La extensión de los límites de funcionamiento se realiza aplicando por primera vez técnicas de múltiple longitud de onda en esta tecnología, que permitirán disponer de varias señales de fase a las que aplicar un despliegue conjunto que incrementa la longitud de onda efectiva, esto es, el rango de distancias para una transición 2π . Se presentarán dos posibilidades de implementación física, una utilizando *Savart plates* de distintos grosores, y la otra mediante el empleo de dos longitudes de onda en la iluminación.

Se presentan ejemplos experimentales de los resultados de este prototipo triangulado que corroborarán la aplicabilidad, características y conclusiones de los puntos discutidas a lo largo de este capítulo.

Finalmente, se presentan novedades en el procesamiento que aprovechan el uso de dos longitudes de onda para reducir el coste computacional, lo que redundará en mejoras en la velocidad del sensor.

5.1 Motivación

Al igual que en la mayoría de técnicas interferométricas, el hecho de que la información de medida esté codificada en la señal de fase presenta un problema inherente a la naturaleza de esta variable, que es que está limitada al intervalo $[0, 2\pi)$.

Como la información de fase se mide módulo 2π , generalmente se asume que la variación entre dos píxeles consecutivos del perfil a obtener no excede del equivalente a π radianes en la señal de fase. De este modo es posible recuperar la información de distancia sin ambigüedades. Sin embargo esta restricción fundamental acerca de la superficie impone un límite al gradiente de distancias medible por estos métodos: si el cambio de fase entre dos píxeles adyacentes es superior a π , es imposible resolver la ambigüedad.

Aunque en teoría es posible utilizar una configuración óptica que resul-

te en un interferograma con señales de frecuencia menor para ampliar el gradiente máximo admisible entre dos píxeles, se ha comprobado que esto es muy perjudicial para la precisión total del sistema, que depende directamente de dicha frecuencia de franjas, o, más concretamente, de que el rango $[0, 2\pi)$ radianes en la señal de fase, represente la menor variación de distancia posible (aumentando la resolución efectiva del sensor). Esto resulta en un agravamiento del problema en objetos que presentan variaciones superficiales complejas, especialmente con saltos bruscos de distancia o en zonas de borde. La utilización de elementos ópticos como los *zoom*, aunque pueden paliar el problema, resultan en un menor campo de visión. Otro problema adicional es la presencia de ruido, lo que complica el proceso de despliegue de la fase para la obtención de la topografía del objeto, al introducir transiciones 2π falsas. Aunque es posible la utilización de algoritmos de despliegue de fase robustos también utilizados satisfactoriamente en el estudios previos [50, 64], éstos no resuelven correctamente todos los casos. Por otra parte la utilización de métodos de filtrado de la señal, resuelve parcialmente el problema, pero reduce la resolución final obtenida, debido al promediado de los datos [47, 50, 46].

En términos genéricos, una magnitud física $q(x, y)$ se relaciona con la fase del patrón de interferencia mediante una expresión de la forma

$$q(x, y) = \frac{k}{2\pi} \lambda \phi(x, y), \quad (5.1)$$

siendo k una constante de proporcionalidad, y λ la longitud de onda efectiva (distancias para la que ocurren saltos de 2π radianes en los respectivos frentes de fase).

En este punto, es importante no confundir la longitud de onda efectiva que determinará la variación de valores del rango de medida, con la longitud de onda de la fuente de luz, o con el periodo de franjas de los interferogramas capturados. Son tres conceptos diferentes, aunque relacionados entre sí.

Para el análisis de la señal de fase existen numerosos métodos, como técnicas de rastreo de fase, técnicas heterodinas espaciales o temporales, o algoritmos de *phase-shifting* que se describen en la literatura [101, 125]. Independientemente de la aproximación seleccionada, el resultado del análisis

del patrón de franjas no es $\phi(x, y)$ en sí mismo, sino el valor $\tan(\phi(x, y))$. Por causa de la ambigüedad de la siguiente función trigonométrica:

$$\phi(x, y) = (m + \epsilon)2\pi, \quad (5.2)$$

el valor de $\phi(x, y)$ sin ambigüedad se obtiene en el rango en el que $0 \leq \epsilon < 1$, siendo m un entero desconocido.

La resolución de la ambigüedad- 2π se conoce como despliegue de fase, tema que ha sido expuesto en el capítulo anterior por ser una tarea crítica para la extracción de la información contenida en el frente de fase. Generalmente se utilizan criterios de suavidad, imponiendo una limitación al máximo salto admisible: el despliegue sin ambigüedad es posible siempre que la diferencia entre dos píxeles adyacentes sea menor que π radianes.

En la Ec.5.1, para la magnitud física $q(x, y)$, π radianes en la señal de fase equivalen a un salto de $\Delta q < k\frac{\lambda}{2}$ para píxeles adyacentes.

El criterio de suavidad no es válido en muchas aplicaciones prácticas, como por ejemplo, en la medida de la geometría de superficies con saltos o áreas deformadas con altos gradientes, lo que lleva a errores de medida sistemáticos.

Una forma de solventar esta limitación es el empleo de técnicas de múltiple longitud de onda, que se describirán a continuación.

5.2 Descripción de las técnicas de múltiple longitud de onda

Afortunadamente, el rango de medida se puede extender más allá del límite del criterio de suavidad, si se proporciona información adicional. Esto se puede hacer, repitiendo la medida con diferentes longitudes de onda efectivas

5.2. TÉCNICAS DE MÚLTIPLE LONGITUD DE ONDA

127

λ_1, λ_2 . De las Eqs. 5.1 y 5.2 se obtiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} q = \frac{k}{2\pi}(m_1 + \epsilon_1)\lambda_1 \\ q = \frac{k}{2\pi}(m_2 + \epsilon_2)\lambda_2 \end{array} \right\} \leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{q}{\lambda_1} \frac{2\pi}{k} = m_1 + \epsilon_1 \\ \frac{q}{\lambda_2} \frac{2\pi}{k} = m_2 + \epsilon_2 \end{array} \right\} \leftrightarrow q = \frac{k}{2\pi}(m_{12} + \epsilon_{12})\lambda_{12}. \quad (5.3)$$

Si m_{12} y ϵ_{12} son seleccionados adecuadamente, así como la longitud de onda combinada λ_{12} ,

$$\lambda_{12} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_2 - \lambda_1|}. \quad (5.4)$$

esta seguirá igualmente la expresión de la Ec. 5.1.

En relación a las ecuaciones 5.3 y 5.4, es obvio que el rango de medida se puede extender deliberadamente seleccionando λ_1 y λ_2 tal que $\lambda_{12} > 2\Delta q/k$.

El set de datos de doble longitud de onda puede ser desplegado posteriormente siguiendo el criterio convencional. Desafortunadamente, el ruido también se ha amplificado en un factor de aproximadamente 1.5 veces λ_{12}/λ_1 .

Mientras que el ruido de la señal combinada sea significativamente menor que $\lambda_1/2$, los datos de la señal de doble longitud de onda se pueden utilizar para desplegar las señales de longitud de onda individual. De esta forma, se mantiene simultáneamente la información de las señales individuales y de la combinada. Mediante resultados experimentales se ha comprobado que el rango de medida de puede expandir, de forma genérica, en torno a un orden de magnitud.

Una mayor extensión del rango de medida es posible utilizando técnicas de múltiple longitud de onda, que en principio, se pueden formular como múltiples iteraciones del concepto de la doble longitud de onda. Un ejemplo exhaustivo se muestra en [20]. El algoritmo para tres longitudes de onda se ha representado gráficamente en la Fig. 5.1. En él se puede visualizar como mediante la combinación progresiva de las distintas longitudes de onda se va resolviendo la ambigüedad. Como ejemplo numérico, si se parte de tres longitudes de onda $\lambda_1 = 828 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 633 \text{ nm}$, y $\lambda_3 = 786 \text{ nm}$, combinando

dos longitudes de onda conseguiríamos que la señal no plegase hasta $\lambda_{12} = 2,7 \mu m$ ó $\lambda_{23} = 3,3 \mu m$, y combinado de nuevo estas dos, la longitud de onda combinada sería $\lambda_{123} = 15,5 \mu m$, lo que representa aproximadamente un incremento de 20 veces el rango de medida conseguido con las longitudes de onda individuales.

Las tecnologías cuya información de medida está codificada en patrones de franjas son muchas. En la tabla 5.1 se cita algunos ejemplos de la literatura en los que se ha aumentado el rango de medida mediante la aplicación de técnicas de múltiple longitud de onda.

En el campo de la Interferometría de Desplazamiento Lateral, las únicas publicaciones científicas en las que se aplicando múltiple longitud de onda hasta la fecha, son las realizadas durante el desarrollo de la presente Tesis. En la tabla 5.2 se indica que aportaciones originales se han realizado en cada artículo. En los siguientes apartados se estudia en profundidad la aplicabilidad de múltiple longitud de onda en el prototipo con triangulación.

5.2. TÉCNICAS DE MÚLTIPLE LONGITUD DE ONDA

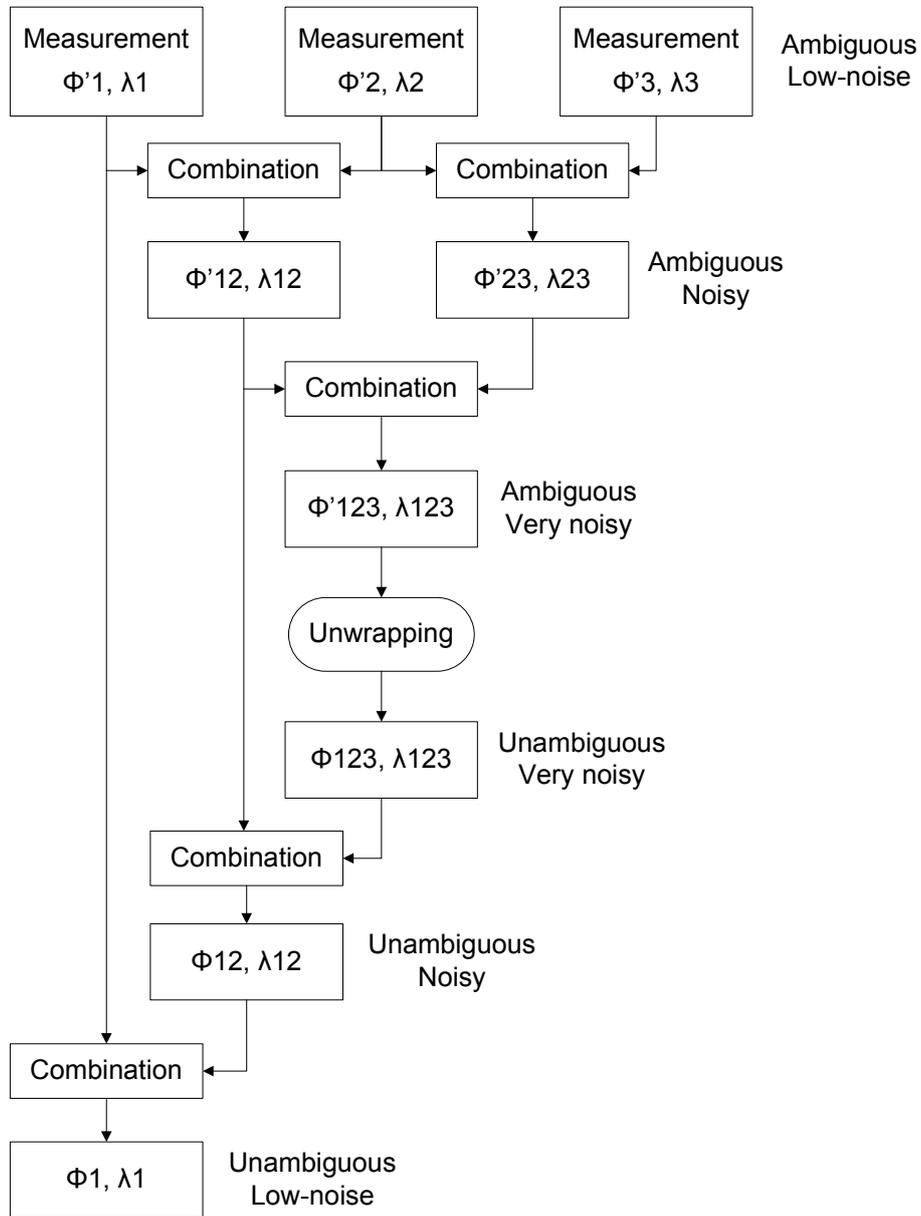


Figura 5.1: Diagrama de utilización de tres longitudes de onda para extender el rango de medida y resolver ambigüedades. Φ' denota en frente de fase ambiguo, y Φ sin ambigüedad.

Tecnología utilizada	Título del artículo	Ref.
<i>Speckle pattern interferometry</i>	<i>Two-wavelength micro-interferometry for 3-D surface profiling</i>	[87]
<i>Digital fringe projection Fast phase-shifting</i>	<i>High-resolution, real-time 3D absolute coordinate measurement based on a phase-shifting method</i>	[147]
<i>Modulation Sideband Technology for Absolute Ranging</i>	<i>MSTAR: a submicrometer absolute metrology system</i>	[93]
<i>Moiré phase-shifting interferometry</i>	<i>Two-wavelength phase-shifting interferometry using an electrically addressed liquid crystal spatial light modulator</i>	[13]
<i>MEMS spectrometry with integrated diffraction grating</i>	<i>Two-Wavelength Grating Interferometry for MEMS Sensors</i>	[49]
<i>Diffraction patterns phase retrieval</i>	<i>Phase retrieval using multiple illumination wavelengths</i>	[12]
<i>Interferometry</i>	<i>Unusual techniques for absolute distance measurement</i>	[33]
<i>White light interferometry</i>	<i>Theoretical analysis of the optimum wavelength combination in a two-wavelength combination source for optical fiber interferometric sensing</i>	[139]
<i>Interferometry</i>	<i>Simultaneous five-wavelength interferometry for head/tape spacing measurement</i>	[149]

Tabla 5.1: Literatura en la que se describe la aplicación de múltiple longitud de onda en diversas tecnologías.

Aportación original	Título del artículo	Ref.
Revisión de la <i>HC</i> . Descripción, límites de funcionamiento, aplicabilidad y tendencias.	<i>On-line Metrology with Conoscopic Holography: Beyond Triangulation</i>	[5]
Introducción a la múltiple longitud de onda en <i>HC</i> . Métodos de generación patrones de diferente longitud de onda.	<i>Toward extended range sub-micron Conoscopic Holography profilometers, using multiple wavelengths and phase measurement</i>	[45]
Estudio de la configuración de doble longitud de onda en la iluminación para <i>HC</i> .	<i>Common-path two-wavelength interferometer with sub-micron precision for profile measurements in on-line applications</i>	[40]
Descripción general del prototipo basado en <i>HC</i> , procesamiento de señal, límites de funcionamiento y resultados.	<i>Common-path two-wavelength interferometer with sub-micron precision for profile measurements in on-line applications</i>	[41]

Tabla 5.2: Literatura publicada a partir de las investigaciones realizadas para la presente Tesis, en la que se describe la aplicación de múltiple longitud de onda en Interferometría de Desplazamiento Lateral.

5.3 Extensión del rango de medida mediante aplicación de técnicas de doble longitud de onda

Como se ha visto en anteriormente, en Interferometría de Desplazamiento Lateral con triangulación, la obtención del perfil de distancias se realiza a partir del frente de fase. A pesar de los múltiples beneficios que proporciona esta señal, tiene limitado el rango de medida sin ambigüedad a la mitad de la variación de distancias para la que se produce el pliegue de la señal de fase (paso de π a $-\pi$), como se muestra en la Fig. 5.2.

Para minimizar esta limitación, se ha recurrido al empleo de técnicas de múltiple longitud de onda [19, 20, 26, 27]. Con ello se consigue extender el rango de medida sin ambigüedad hasta el dado por la longitud de *onda combinada*, que para el caso de doble longitud de onda viene dado por la Ec. 5.4.

Según esta expresión de λ_{12} , el empleo de longitudes de onda cercanas entre sí aumenta el rango de medida en mayor cuantía. Asimismo, el sistema es más insensible a aberraciones cromáticas, ya que se cancelan casi por completo al afectar del mismo modo a las dos longitudes de onda constituyentes. Como contrapartida, la sensibilidad al ruido aumenta, ya que es escalado por un factor inversamente proporcional a la diferencia entre longitudes de onda, aunque hay estudios que tratan de minimizar este efecto [19].

La cercanía entre las longitudes de onda constituyentes está limitada también por el hecho de que han de ser distinguibles individualmente en presencia de ruido. Longitudes de onda excesivamente cercanas para una cierta configuración, provocarían que ambas informaciones se solaparan, siendo el nivel de incertidumbre del sistema superior a la diferencia entre ambas longitudes de onda. Si el periodo de la longitud de onda combinada, λ_{12} , es demasiado grande, también sería imposible extraer la información de fase que contiene, ya que estaría enmascarado por el ruido de continua del sistema.

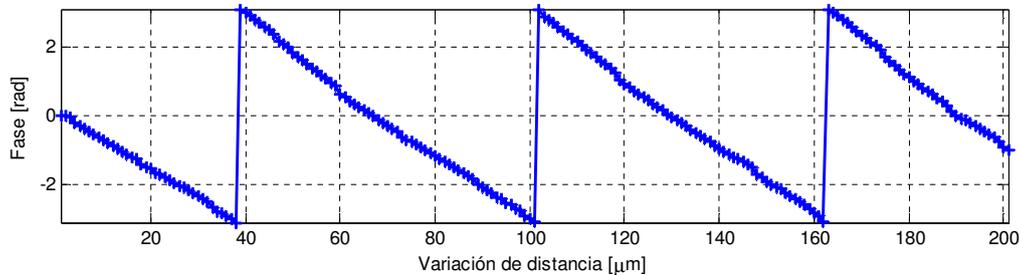


Figura 5.2: Ejemplo frente de fase para un perfil de distancias.

En el sistema a tratar, las longitudes de onda efectivas, dependen de la longitud de onda de la fuente de iluminación, del ángulo de triangulación, y de la frecuencia del patrón de interferencia.

De acuerdo con las relaciones anteriores, es posible obtener longitudes de onda efectiva de diversos modos. En este trabajo, se analizarán casos en los que se obtuvieron las longitudes de onda efectivas individuales λ_1 y λ_2 a partir de modificaciones en la frecuencia del patrón de interferencia. Esta elección se fundamentó en que el ángulo de triangulación no es fácil de modificar con precisión si no se dispone del material adecuado, aunque si se dispusiera de un sistema de posicionamiento fidedigno, sería otra posibilidad totalmente válida.

Tal y como se ha adelantado en el capítulo anterior, la frecuencia del patrón de interferencia se puede simplificar mediante la expresión

$$f = \frac{s}{\lambda z}, \quad (5.5)$$

siendo este modelo aplicable a cada línea del detector. La variable s denota el desplazamiento o *shear* generado por el *Savart-plate* (que fundamentalmente depende de su grosor), λ la longitud de onda de la fuente de luz, y z la distancia entre la imagen del punto de luz reflejado por la muestra y el panel de detección.

Si se modifica la frecuencia del patrón de franjas, un mismo gradiente del perfil de distancias a medir, provocará un mismo desplazamiento en el

holograma, pero que conllevará una variación diferente de la señal de fase correspondiente a cada frecuencia del patrón. Así se consiguen las diferentes longitudes de onda efectivas de las que hablábamos.

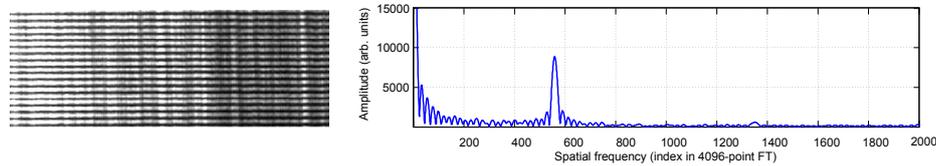
A continuación, se estudiarán dos posibilidades para modificar la densidad de franjas del patrón de interferencia: utilizando simultáneamente dos *Savart plates* de distinto grosor, o dos fuentes de luz de diferente longitud de onda.

5.3.1 *Savart-plate* de distinto grosor

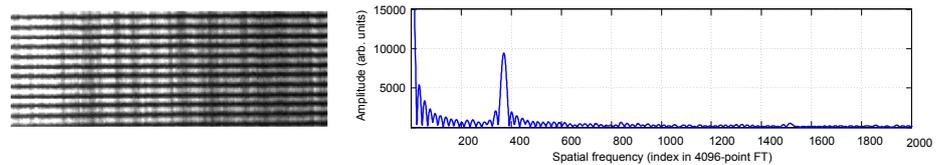
Este primer método se basa en la utilización de dos elementos birrefringentes con grosores diferentes. El *shear* generado por cada *Savart-plate* depende principalmente de su grosor, por lo que, atendiendo a la Ec. 5.5, se obtiene un patrón de interferencia de distinta frecuencia para cada uno.

Este montaje necesitaría dos cámaras, o un sistema para poder capturar en el mismo sensor ambos patrones de interferencia. La iluminación consistiría en una única fuente de luz monocromática, a la que se le debe aplicar algún método de reducción de *speckle* [136, 138, 15, 139], y que será proyectada en forma de línea fina sobre el espécimen. Cada patrón de franjas se obtendrá después del paso de la luz reflejada a través de cada *Savart-plate*. El procesamiento de sendos interferogramas proporcionará las dos señales de fase de λ_1 y λ_2 , asociadas al perfil iluminado por el láser.

Un sencillo experimento muestra la aplicabilidad de este método. Se han utilizado dos *Savart-plate* diferentes, uno de 15mm y otro de 10mm de grosor, y se han capturado dos interferogramas de distinta frecuencia, simplemente sustituyendo un cristal por el otro en el prototipo. La Fig. 5.3 muestra sendos patrones de interferencia y la respuesta espectral de un punto de cada uno de ellos, donde claramente se aprecia la diferencia en densidad de franjas. Para las dos adquisiciones, se ha medido experimentalmente la frecuencia de franjas, y la relación entre ellas resulta ser 1.5044, muy cercano a la relación teórica entre los grosores de los cristales 15/10.



(a) Con *Savart-plate* de 15 mm.



(b) Con *Savart-plate* de 10 mm.

Figura 5.3: Detalle de los patrones de interferencia obtenidos con dos *Savart-plate*, y la respuesta espectral de una columna de cada patrón. (a): para el *Savart-plate* de 15 mm de grosor y, (b): para el *Savart-plate* de 10 mm. A mayor grosor, mayor frecuencia del patrón de franjas.

La Fig. 5.4 muestra las respectivas señales de fase asociados a cada *Savart-plate*, en el escaneo de un objeto cuyo relieve presenta un escalón. La señal de fase combinada se calcula mediante sustracción de las 2 señales de fase, y despliegue. La ambigüedad que se da en cada señal de fase individual ha sido resuelta, y el perfil del objeto se ha obtenido correctamente. Aunque este proceso requeriría una calibración apropiada, se han mantenido las medidas en radianes para esta primera aproximación. Los resultados son razonablemente válidos. Lógicamente, el factor de escalado que correspondería a la señal de fase combinada es bastante más grande que el de las señales de fase individuales.

Se puede calcular fácilmente la mejora en el rango de medida, simplemente considerando el grosor del cristal empleado, ya que el *shear*, s en la Ec. 5.5 depende prácticamente de forma lineal de este parámetro, y el resto de variables de la fórmula se mantienen constantes.

En este caso, la longitud de onda combinada de la Ec. 5.4 se puede formular en términos del factor de mejora sobre la longitud de onda efectiva

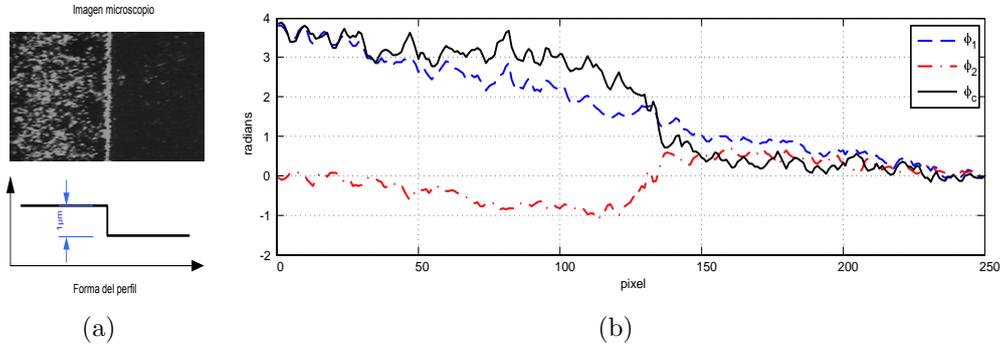


Figura 5.4: (a): Objeto en cuya topografía hay una variación de distancias de forma brusca. (b): Frentes de fase desplegados de un perfil de ese objeto. ϕ_1 es la fase del Savart-plate de 15mm de grosor, ϕ_2 la del de 10mm, y ϕ_c es la combinada: $\phi_1 - \phi_2$.

de cada uno de los dos cristales, simplemente usando la proporción entre sus grosores.

Así, siendo $t_1 > t_2$ los grosores de los cristales empleados, y λ_1 la longitud de onda efectiva correspondiente al cristal más grueso (el que proporciona mejor resolución), este factor de mejora es el dado por la Ec. 5.6, y la nueva longitud de onda se puede expresar como en la Ec. 5.7

$$K_m = \frac{\frac{t_1}{t_2}}{\left| \frac{t_1}{t_2} - 1 \right|}, \quad (5.6)$$

$$\lambda_{12} = K_m \cdot \lambda_1. \quad (5.7)$$

En el ejemplo analizado, en el que los grosores eran de 15 y 10mm respectivamente, el rango de medida proporcionado por el Savart-plate de 15mm se extiende aproximadamente unas 3 veces. Este valor de K_m no es muy elevado, ya para los valores de ejemplo, la diferencia entre grosores de los cristales empleado es relativamente grande. En cualquier caso, el experimento muestra como la aplicación de esta técnica es posible.

Como aspectos negativos del método, cabe mencionar, que en el caso de realizarlo con dos cámaras distintas, hay que aplicar técnicas de *matching* a las imágenes, para asegurarse de combinar la señales correspondientes exactamente a la misma zona del perfil, lo que puede ser complicado. Adicionalmente, tolerancias en la propia fabricación del cristal birrefringente podrían introducir datos falsos en la señal de fase, que se trasladarían al resultado final y necesitarían ser compensados. En último lugar, el *setup*, sea con dos cámaras, o con una obteniendo ambos interferogramas a la vez, puede resultar complicado.

Aunque este método ha demostrado experimentalmente su validez para extender el rango de medida, a continuación se describe otra alternativa que ha resultado ser la más conveniente, y por tanto, sobre la que se han realizado más aportaciones.

5.4 Iluminación con distintas longitudes de onda: *Dual-Laser Setup*

Esta segunda posibilidad se basa en combinar mediante el uso de un *beam-splitter* la luz procedente de dos láseres de diferente longitud de onda, como se muestra en la Fig. 5.5. Este haz debe ser enfocado sobre en espécimen a escanear, formando una única línea fina. Así se generará un único interferograma, en el que es posible observar el fenómeno del *beat*, que de explicará a continuación.

5.4.1 Fenómeno del *beat* en la interferencia

El *beat* aparece por el solapamiento de dos ondas que tienen la misma amplitud y viajan en la misma dirección, pero cuya frecuencia, y por tanto longitud de onda, es diferente. La amplitud de la onda resultante aumenta y disminuye periódicamente, según coincida interferencia constructiva, cuando los dos puntos de las ondas individuales tienen el mismo signo, o destructi-

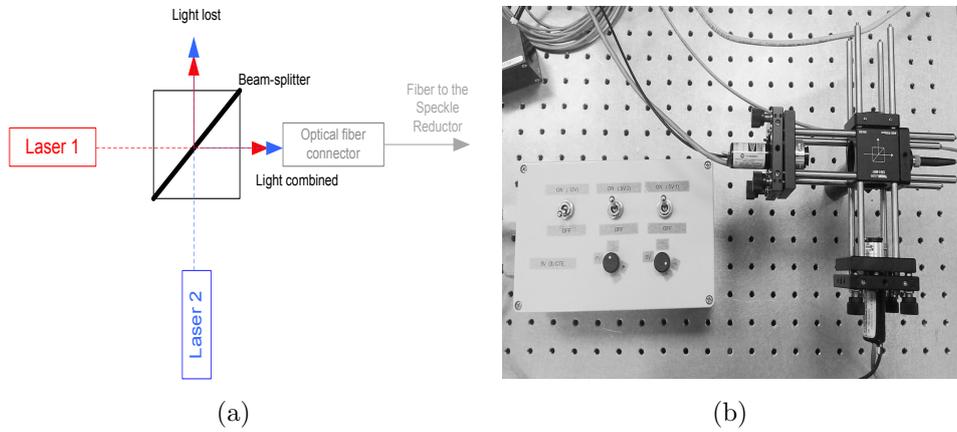


Figura 5.5: Configuración para combinar dos longitudes de onda en la iluminación. El *beam-splitter* deja pasar el 50 % de la luz incidente y refleja el otro 50 % en la dirección que corresponda según el diagrama mostrado en (a). La intensidad de cada láser se regula a través de la caja de control de potencia, que se muestra en fotografía del dispositivo en (b).

va, cuando se suman puntos de signos contrarios. La figura 5.6 aclara este concepto.

Usando el siguiente principio de superposición:

$$I(y)_{1+2} = I_{01} (1 + \gamma_1 \cos(2\pi f_1 y + \varphi_1(z))) + I_{02} (1 + \gamma_2 \cos(2\pi f_2 y + \varphi_2(z))), \quad (5.8)$$

y reagrupando los términos, la onda resultante se puede expresar como:

$$I(y)_{1+2} = I_{01} + I_{02} + (I_{01} + I_{02}) \cdot \cos\left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} y - \frac{\varphi_1(z) - \varphi_2(z)}{2}\right) \cdot \sin\left(2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} y - \frac{\varphi_1(z) + \varphi_2(z)}{2}\right). \quad (5.9)$$

En esta expresión, aparece un término senoidal, que oscila con una frecuencia media $f_{sin} = \frac{f_1 + f_2}{2}$, que es la frecuencia percibida por un receptor;

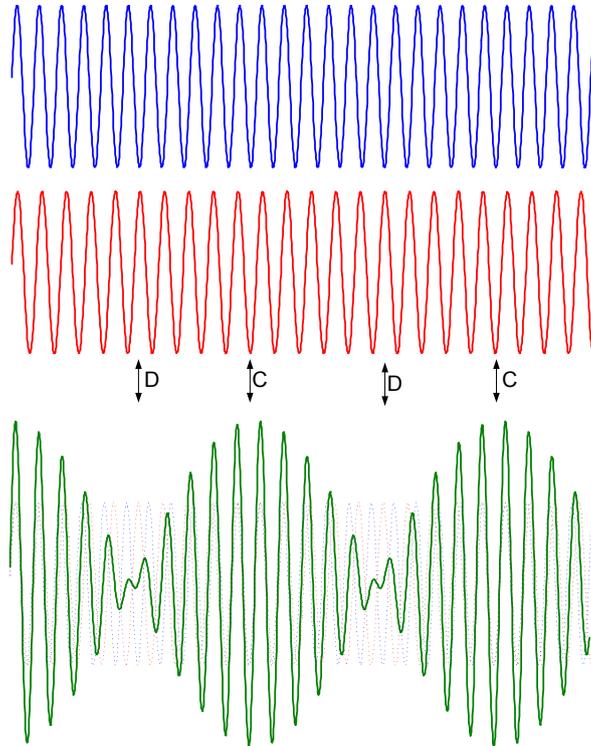


Figura 5.6: Esquema teórico de formación del fenómeno del *beat* o *latido*. Dos ondas de diferente frecuencia (roja y azul), se combinan dando lugar a una onda cuya amplitud varía periódicamente en el tiempo (verde), más lentamente que las ondas originales, en función de que la interferencia sea constructiva (C) o destructiva (D) en cada instante.

y un término cosenoidal, cuya onda oscila según la diferencia de frecuencias $f_{cos} = \frac{f_1 - f_2}{2}$, y es la que determina la amplitud de la envolvente o *envelope* que causa la percepción del *beat*. La frecuencia real del *beat* es $f_{beat} = f_1 - f_2$.

5.4.2 Montaje

Para los experimentos, se han empleado dos láseres de longitudes de onda de 685 nm y 660 nm respectivamente, con control de potencia externo pa-



Figura 5.7: Patrón de interferencia obtenido del montaje con iluminación de doble longitud de onda.

ra poder ajustar ambas intensidades de forma correcta. Se han combinado mediante un *beamsplitter*, y han sido proyectados, a través de un sistema de reducción de *speckle* y generación de línea sobre una oblea de silicio, utilizada como objeto de referencia.

El patrón de franjas obtenido se muestra en la Fig. 5.7, donde aparece la formación del *beat* de baja frecuencia. La zona correspondiente a la interferencia destructiva, donde la onda tiene menor amplitud, se visualiza con menor contraste, lo que da esa apariencia de “emborronamiento” de la señal, ya que el contraste también disminuye.

Esto se ve de forma más clara aún, en la Fig. 5.8, donde se ha dibujado una columna del patrón.

En el módulo de la Transformada de Fourier de cada columna, aparecerán dos picos, uno asociado a la longitud de onda de cada láser, haciendo posible la extracción de ambos frentes de fase. El espectro frecuencial de la línea anterior, mostrado en la Fig. 5.9, muestra los dos picos con los índices de los máximos en los valores 343 y 331. La relación entre los índices es 1.0363, que de nuevo, concuerda fuertemente con el ratio nominal entre las longitudes de onda del láser, 685 nm y 660 nm, que es 1.0379.

De forma análoga a la propuesta utilizando *Savart plates* de distinto gro-

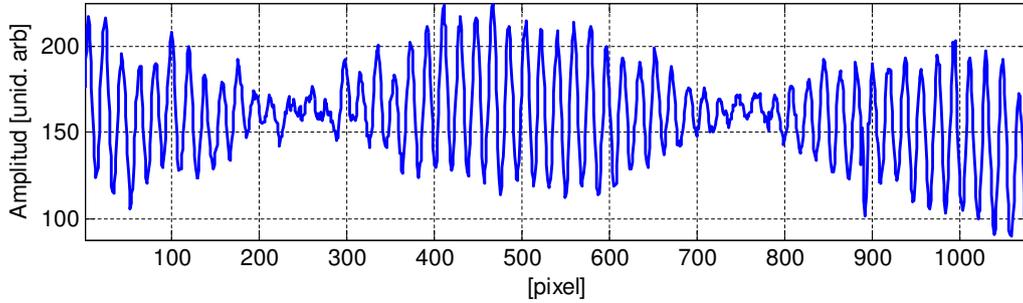


Figura 5.8: Señal de interferencia correspondiente a una columna del patrón. Se puede visualizar el fenómeno del *beat* de baja frecuencia.

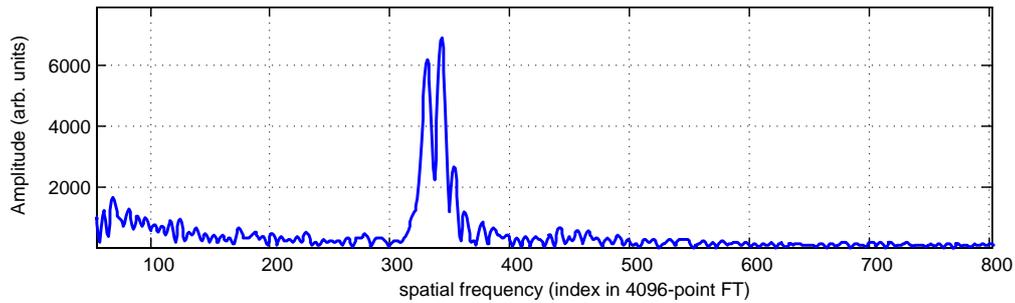


Figura 5.9: Módulo de la Transformada de Fourier de una columna del CCD. Cada pico se corresponde a una longitud de onda de la iluminación.

Por lo tanto, es posible calcular el factor de mejora en el rango de medida, empleando la relación entre las longitudes de onda. Así, siendo $\lambda_{L1} < \lambda_{L2}$ las longitudes de onda de la fuente de luz, y λ_1 la longitud de onda efectiva correspondiente a la variación de distancias para la que pliega la fase obtenida con λ_{L1} (el que proporciona mejor resolución), este factor de mejora es el dado por la Ec. 5.10, y la nueva longitud de onda se puede expresar como en la Ec. 5.11. Para nuestros valores, se extiende el rango de medida algo más de 27 veces, en comparación con el rango proporcionado por el láser de 660 nm.

$$K'_m = \frac{\lambda_{L1}}{\lambda_{L2} \left| \frac{\lambda_{L1}}{\lambda_{L2}} - 1 \right|}, \quad (5.10)$$

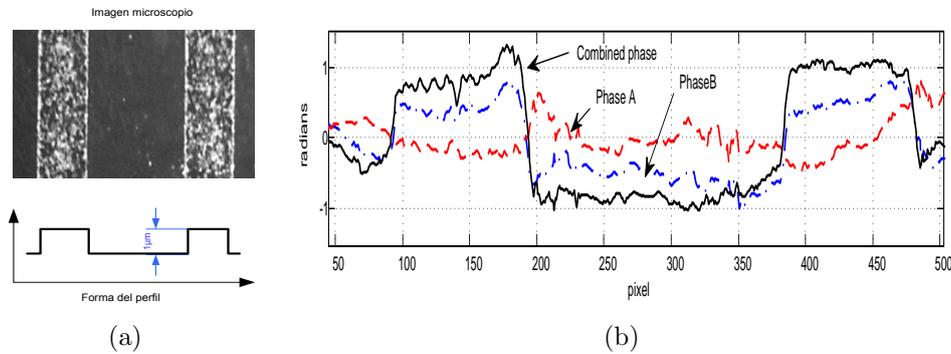


Figura 5.10: (a): Objeto en cuya topografía hay una variación de distancias de forma brusca. (b): Señales de fases desplegadas para interferogramas de longitudes de onda de iluminación diferentes. La combinación de ambas señales resuelve la ambigüedad de las fases individuales.

$$\lambda_{12} = K'_m \cdot \lambda_1. \quad (5.11)$$

En la figura 5.10 se muestra como la extensión del rango de medida resuelve la ambigüedad.

Este método presenta varias ventajas respecto al uso de dos *Savart-plate* de distinto grosor. Simplifica la gestión de las adquisiciones y permite la implantación *on-line* del prototipo. Adicionalmente, si se escogen longitudes de onda cercanas entre sí para aumentar el rango de medida efectivo, además se compensan algunas aberraciones del sistema óptico, como ciertas aberraciones cromáticas, ya que afectan prácticamente de igual forma a ambas longitudes de onda, como se analiza en [146].

Por estos motivos, esta es la configuración definitiva con la que profundizaremos en el análisis del prototipo. Para facilitar la referencia a este montaje, en lo sucesivo lo denominaremos *Dual-Laser Setup*. A continuación se describen las técnicas de procesamiento específicas de este montaje.

5.4.3 Procesamiento para múltiple longitud de onda

Existen dos alternativas para la extracción de la señal de fase de la longitud de onda combinada λ_{12} . Se diferencian en qué frecuencia es la analizada: la frecuencia sintética (debida al fenómeno del *beat*), o las dos frecuencias correspondientes a las longitudes de onda individuales.

Obtención de la fase de cada longitud de onda efectiva de forma individual

Cada longitud de onda efectiva produce un pico en la frecuencia que corresponda del espectro de la Transformada de Fourier. Siempre y cuando puedan ser diferenciados independientemente, esta información es susceptible de ser usada para la extracción de la señal de fase combinada.

Tal y como se muestra en la Fig. 5.9, dos picos claramente diferenciados aparecen en el espectro de frecuencia, uno asociado a cada longitud de onda. Esto es una diferencia importante entre esta técnica y otras en las que se localiza un único pico a la frecuencia media, ya que elimina la necesidad de realizar diferentes adquisiciones, una para cada longitud de onda, o una en la que ambas longitudes de onda sean procesadas a la frecuencia de *beat*, y otra con una longitud de onda individual, para proporcionar precisión a la medida final.

Para conseguir los datos de fase individuales, una posibilidad consiste en buscar el módulo máximo en una ventana del espectro frecuencial, obtener su valor de fase siguiendo los algoritmos de procesamiento descritos en el capítulo 3, filtrar esa frecuencia (y una pequeña ventana a su alrededor), y repetir este proceso para obtener la señal de fase individual de la otra longitud de onda. Los valores obtenidos deben ser reordenados en función del índice frecuencial que les corresponda, ya que el pico máximo no tiene por qué corresponder a la misma longitud de onda necesariamente para todo el perfil.

Para hacer el proceso más robusto, se ha tenido en cuenta el hecho que la proporción entre ambos índices frecuenciales debe ser constante, e igual al ratio entre las longitudes de onda. Una vez que el pico más alto se ha localizado, se realizará la búsqueda en del segundo pico en posiciones predefinidas, (en la práctica en una pequeña ventana), a la izquierda o derecha del primer pico. Adicionalmente, la diferencia entre el ratio nominal y el de los máximos encontrados se puede usar como índice de medida de la calidad de la señal. De este modo, errores locales pueden ser solucionados, o al menos detectados, si esta magnitud cae por debajo de un umbral dado. Este procedimiento está esquematizado en la Fig. 5.11.

Una vez que ambos frentes de onda $\varphi_1(x)$ y $\varphi_2(x)$ han sido extraídos, la fase para la longitud de onda combinada $\phi(x)$ se puede calcular mediante una simple resta:

$$\phi(x) = \varphi_1(x) - \varphi_2(x). \quad (5.12)$$

Obtención de la fase en la frecuencia de *beat*

Además de los picos distinguibles en el espectro frecuencial para las longitudes de onda efectivas de forma individual, aparece otro pico procedente de la combinación de ambas a la frecuencia de *beat*. Se puede trabajar directamente con la información contenida en la frecuencia de *beat*, como se ha hecho en [104]. La fase se calculará como el ángulo de la Transformada de Fourier a la frecuencia de *beat*, para lo que es imprescindible que se pueda distinguir de de otras señales de baja frecuencia (principalmente los niveles de continua). La Fig. 5.12 muestra esta frecuencia para nuestro prototipo.

Como las dos longitudes de onda empleadas son muy próximas, esta frecuencia es muy baja, y la ventana de búsqueda del algoritmo de propuesto anteriormente debe ser muy pequeña. Esto conduce a errores ante la presencia de ruido, y si sólo se utiliza esta información, se estará coartando la verdadera potencialidad de las técnicas de múltiple longitud de onda, que

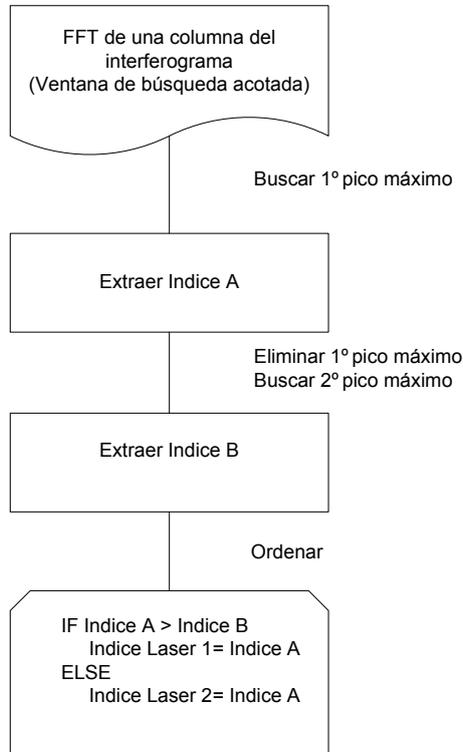


Figura 5.11: Esquema de los pasos de procesamiento para la obtención de las señales individuales en un interferograma de doble longitud de onda.

es el aprovechamiento de la multiplicidad de información precisa que hay en los frentes de fase de las longitudes de onda individuales.

Sí resulta interesante el empleo de esta información “triplicada” para solventar posibles ambigüedades en los saltos de fase de 2π radianes de los datos de cada longitud de onda individual, como han propuesto Cheng y Wyant en [19] como forma de reducir el efecto de amplificación del ruido que se produce en las técnicas de múltiple longitud de onda.

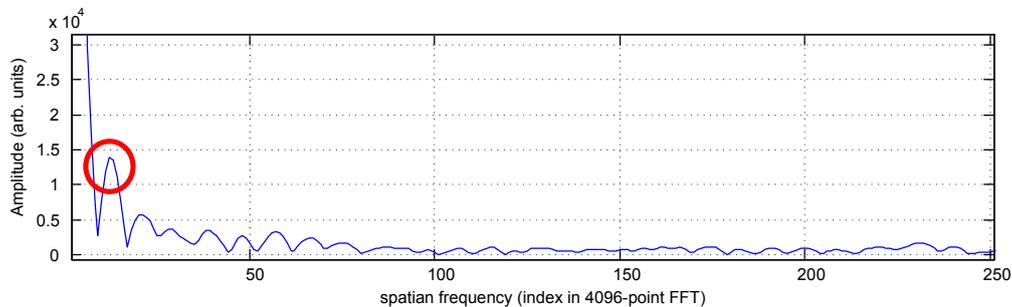


Figura 5.12: Detalle de una FFT de 4096-puntos de la señal de la Fig.5.8, en la que se muestra la frecuencia del *beat*.

5.5 Primer ensayo de viabilidad

Se ha diseñado un experimento en el que se demuestra por primera vez cómo mediante el prototipo de iluminación de doble longitud de onda, es posible resolver la ambigüedad existente en gran parte de las medidas del frente de fase.

Para realizar dicha comprobación, era necesario que el montaje y las características del sistema estuvieran totalmente controladas, se minimizaran las fuentes de ruido, y las leyes de interpretación de la información proporcionada fueran los más sencillas posibles. De igual forma, eran necesario tener información lo más continua posible de la evolución individual de cada frente de fase, y de la combinada.

Un espécimen de calibración para este propósito parece la solución inmediata, pero su diseño sería muy costoso, además de no ser totalmente fiable, ya que si la superficie presentara discontinuidades, la difracción podría falsear la señal, y si fuera continuo pero con inclinación, los ángulos de incidencia sobre el *Savart-plate* podían modificar la resolución de medida. Por estos motivos, la solución escogida radica en suprimir el espécimen de la configuración durante el ensayo de viabilidad, para comprobar el efecto de los desplazamientos en la señal de fase de forma aislada. Un efecto similar de desplazamiento es que generará en prototipo en su modo de trabajo con

5.5. PRIMER ENSAYO DE VIABILIDAD

147

triangulación. Para este ensayo, los desplazamientos serán forzados mediante el propio dispositivo.

El diseño de experimento de viabilidad consistente en interponer en parte de la trayectoria de la luz incidente en el prototipo, un cristal de índice de refracción 1.52, que va girando progresivamente desde -40 a 40 grados. El montaje se muestra en la Fig. 5.13(a).

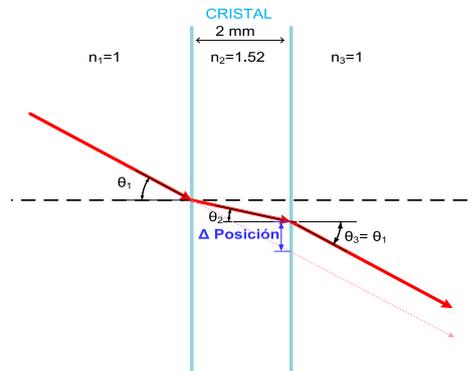
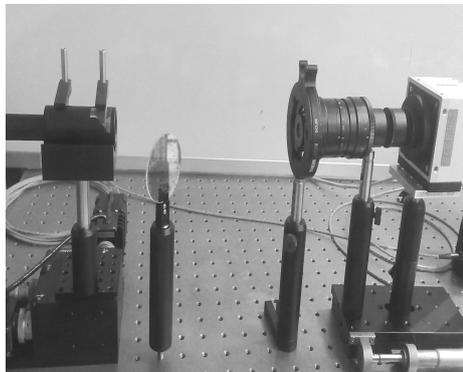
La parte de la línea láser que atraviesa el cristal cambia su trayectoria original, ya que se ha desplazado lateralmente, tal y como muestra la Fig. 5.13(b). La distancia lateral desplazada depende del ángulo de giro de cristal, ya que este determina la distancia recorrida por su interior. El ángulo de salida del rayo del cristal, es el mismo que el de entrada. La sección recorrida por el rayo es su interior se incrementa con valor absoluto de ángulo de giro, y como en el interior la trayectoria se modifica en función del índice de refracción, el desplazamiento lateral provocado también aumenta.

Por simplicidad en el dibujo, en la Fig. 5.13(b) se ha supuesto que es cada rayo de luz el que llega con un cierto ángulo de incidencia, mientras que el cristal permanece inmóvil. El resultado numérico es idéntico, aunque en realidad es el cristal el que modifica su ángulo, y la fuente de luz permanece invariante.

Para esta prueba, se ha enfocado directamente la línea láser sobre el *Savart-plate*, con el fin de no añadir ruidos provocados por posibles irregularidades no previstas en una superficie de referencia. No se pretende medir distancias, sólo comprobar como la doble longitud de onda resuelve la ambigüedad, por lo que el giro de cristal es una forma efectiva de modificar controladamente la posición de la línea en el CCD, y por tanto la señal de fase.

Para este experimento se han realizado más de 200 adquisiciones modificando los ángulos progresivamente.

Es la Figs. 5.14 y 5.15 se muestran respectivamente los ángulos de giro del cristal, y los incrementos aparentes de posición que provocan. En este documento se analizarán a modo representativo 6 posiciones diferentes, que



(a) Montaje experimento con el cristal in- (b) Esquema para el cálculo del despla-
terpuesto en parte de la trayectoria de la zamiento lateral en función del ángulo de
línea láser . incidencia en el cristal.

Figura 5.13: Experimento diseñado para comprobar la efectividad del prototipo ante señales ambiguas.(a):Foto del montaje; y (b):Diagrama para el cálculo del desplazamiento lateral introducido por el giro del cristal.

son las señalizadas en las gráficas mediante marcadores.

En la Fig. 5.16 se ve como, efectivamente, se produce un desplazamiento de la parte de la línea que atraviesa el cristal, en función de su ángulo de giro. En la Fig. 5.17 se ven los hologramas correspondientes, y en las figuras de la 5.18 a la 5.23 se muestran las señales de fase obtenidas para los interferogramas anteriores. Incluyen tanto las señales individuales ambiguas procedentes de cada láser, como la señal de fase combinada, en la que la ambigüedad está resuelta.

Hay que fijarse como la parte izquierda de cada imagen se corresponde con la zona de la línea láser que ha atravesado el cristal. En los primeros ejemplos los desplazamientos aparentes son positivos respecto a la zona de la línea cuya trayectoria permanece invariante. Se debe tener en cuenta que en las capturas de la Fig. 5.16 se considera la primera fila de píxeles la de arriba de la imagen. En las señales de fase de los láseres individuales, hay ambigüedad en muchos casos. Por ejemplo, en la Fig. 5.19, para el frente de fases correspondiente al láser de 660 nm, los valores correspondientes a la zona de línea que atravesó el cristal, toman valores inferiores a los de

5.5. PRIMER ENSAYO DE VIABILIDAD

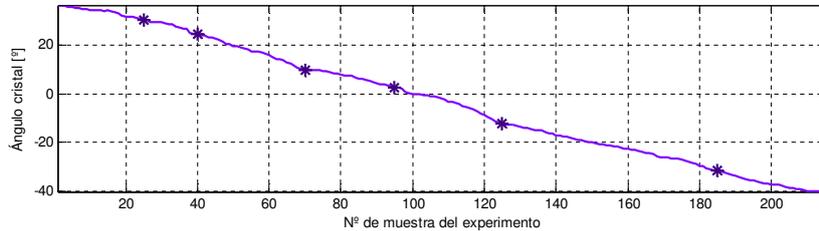


Figura 5.14: Ángulos de giro del cristal que se han analizado en el experimento. Los puntos señalados con marcadores son los mostrados en el presente trabajo.

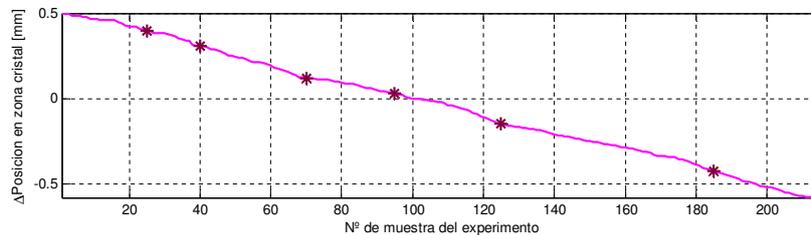


Figura 5.15: Incrementos de posición aparentes introducidos por el giro del cristal. Los puntos señalados con marcadores son los mostrados en el presente trabajo.

la parte invariante de la proyección. Para el frente procedente del láser de 685 nm, en la zona izquierda se produce un pliegue de fase, que pasa de valores negativos a positivos. Combinando ambas señales, se resuelve la ambigüedad, y efectivamente, las diferencias muestran como el salto en la línea fue originalmente un incremento positivo. Viendo las señales individuales de forma aislada, no se podría saber el sentido del salto. Lo mismo ocurre en la Fig. 5.20, en la que la zona izquierda de la línea toma valores inferiores para ambos frentes de fase individuales, pero el salto original es de nuevo positivo, como correctamente muestra la fase combinada.

Para comparar los resultados más fácilmente, en la Fig. 5.24 se muestra en un mismo gráfico todas las señales de fase de λ_{eq} anteriores. Se observa, de forma más clara, como el giro consecutivo del cristal desplaza la trayectoria de la línea desde incrementos de posición positivos a negativos. La cuantificación de estos incrementos se indica en la tabla 5.3, para los 6 puntos del experimento que se están describiendo. La fase combinada Φ correspondiente a λ_{12} resuelve correctamente, mientras que los saltos producidos en φ_1 y φ_2 ,

correspondientes a λ_1 y λ_2 respectivamente, oscilan de forma ambigua. La eficacia y viabilidad de la utilización de doble longitud de onda queda por tanto demostrada. Para mostrar de los resultados de este ensayo de forma más detallada, en la tabla 5.4, se indican los valores de φ_1 , φ_2 y Φ , para 12 puntos consecutivos del experimento total, comprendidos entre las muestras 79 y 90, del todas mostrado en las figuras 5.14 y 5.15.

Nº marcador	$\Delta\varphi_1$ [rad]	$\Delta\varphi_2$ [rad]	$\Delta\Phi$ [rad]
1	1.6556	0.7681	0.8874
2	-2.4345	3.6705	0.1782
3	-0.5139	-0.5810	0.0671
4	-2.2576	-2.2669	0.0093
5	-0.0760	0.0798	-0.1558
6	-0.7236	-0.1243	-0.5993

Tabla 5.3: Cuantificación del efecto del giro sobre cada λ . Es posible observar como la fase combinada Φ correspondiente a λ_{12} resuelve correctamente, mientras que los saltos producidos en φ_1 y φ_2 , correspondientes a λ_1 y λ_2 respectivamente, oscilan de forma ambigua. Para el cálculo de la diferencia, se ha tomado como referencia los puntos de los píxeles 150 y 350 del cada señal de fase.

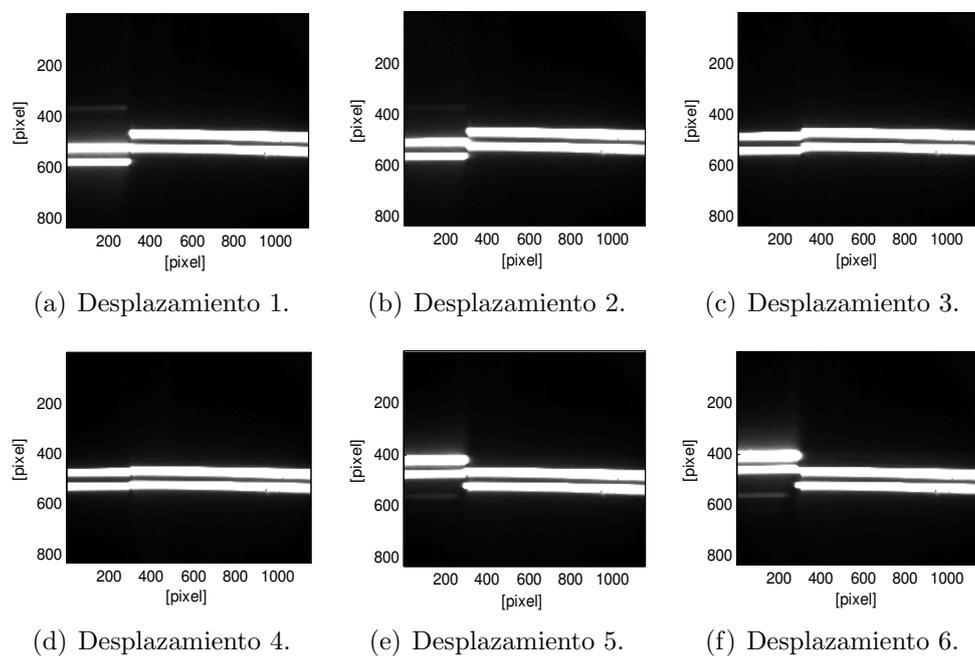


Figura 5.16: Línea láser duplicada por el *Savart-plate* que es capturada en el CCD. Su visualización es posible quitando la lente cilíndrica del prototipo. La parte de la línea que ha atravesado el cristal sufre un desplazamiento lateral que depende del ángulo de giro de este.

Nº muestra	$\Delta\varphi_1$ [rad]	$\Delta\varphi_2$ [rad]	$\Delta\Phi$ [rad]
79	2.2916	1.5239	0.7677
80	2.3942	1.6532	0.7410
81	-3.6499	1.9716	0.6617
82	-3.4822	2.1909	0.6100
83	-3.1644	2.6288	0.4900
84	-3.1299	2.6874	0.4659
85	-2.9986	2.8753	0.4093
86	-2.8172	3.1613	0.3047
87	-2.4345	3.6705	0.1782
88	-1.9824	-2.0923	0.1098
89	-1.8777	-1.9391	0.0614
90	-1.1370	-1.1594	0.0224

Tabla 5.4: Cuantificación del efecto del giro sobre cada λ , en detalle. Es posible observar como la fase combinada Φ correspondiente a λ_{12} no tiene ambigüedad, evoluciona progresivamente, mientras que los saltos producidos en φ_1 y φ_2 , que corresponden a λ_1 y λ_2 respectivamente, toman valores positivo y negativos, por causa de que pliegan en ese rango de medida, son señales ambiguas. Para el cálculo de la diferencia, se ha tomado como referencia los puntos de los píxeles 150 y 350 del cada señal de fase.

5.5. PRIMER ENSAYO DE VIABILIDAD

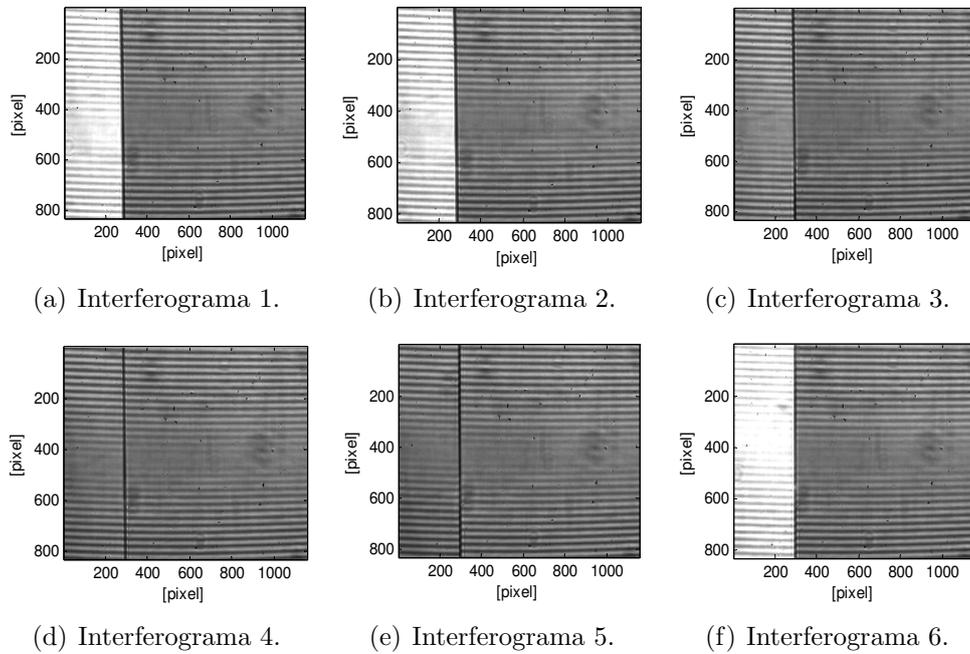


Figura 5.17: Interferogramas capturados en el CCD, para diferentes ángulos de giro del cristal. Se corresponden con las líneas de la figura 5.16.

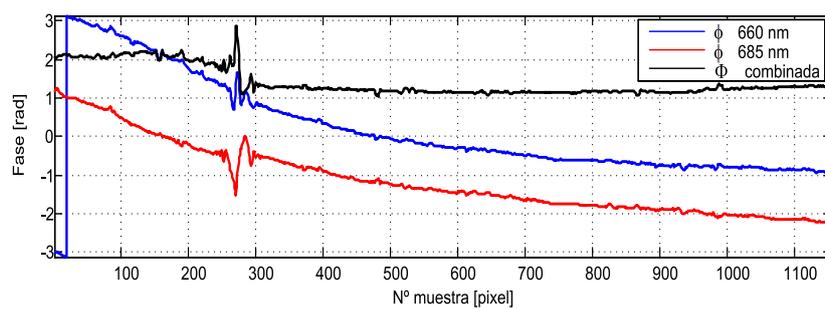


Figura 5.18: Fases obtenidas del Interferograma 1. Línea azul: láser 660nm. Línea roja: láser 685nm. Línea negra: λ_{eq} combinada.

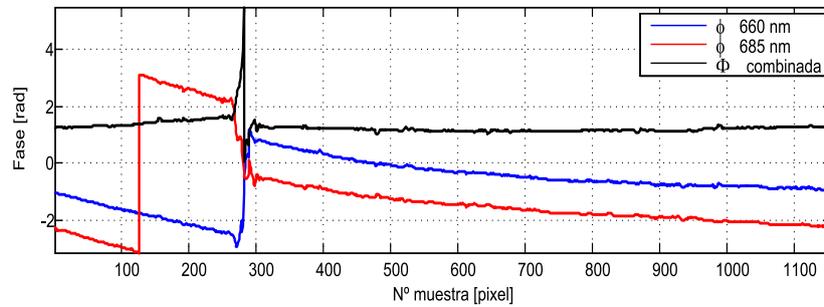


Figura 5.19: Fases obtenidas del Interferograma 2. Línea azul: láser 660nm. Línea roja: láser 685nm. Línea negra: λ_{eq} combinada.

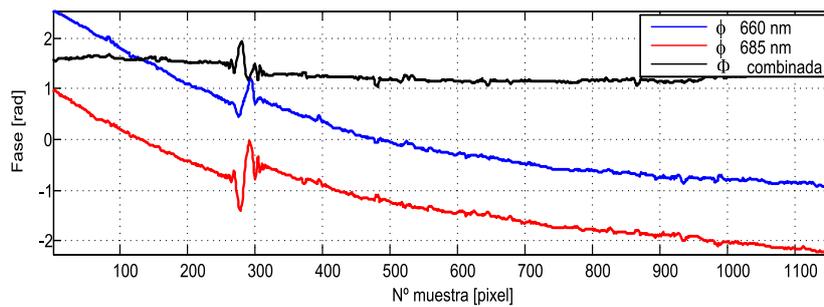


Figura 5.20: Fases obtenidas del Interferograma 3. Línea azul: láser 660nm. Línea roja: láser 685nm. Línea negra: λ_{eq} combinada.

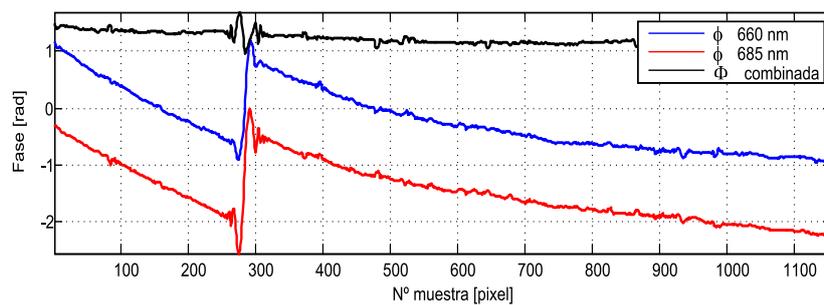


Figura 5.21: Fases obtenidas del Interferograma 4. Línea azul: láser 660nm. Línea roja: láser 685nm. Línea negra: λ_{eq} combinada.

5.5. PRIMER ENSAYO DE VIABILIDAD

155

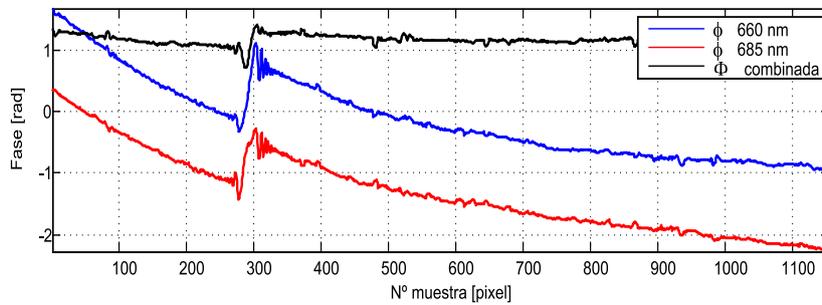


Figura 5.22: Fases obtenidas del Interferograma 5. Línea azul: láser 660nm. Línea roja: láser 685nm. Línea negra: λ_{eq} combinada.

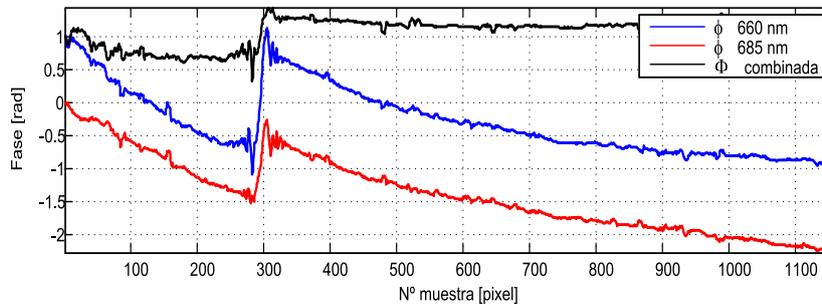


Figura 5.23: Fases obtenidas del Interferograma 6. Línea azul: láser 660nm. Línea roja: láser 685nm. Línea negra: λ_{eq} combinada.

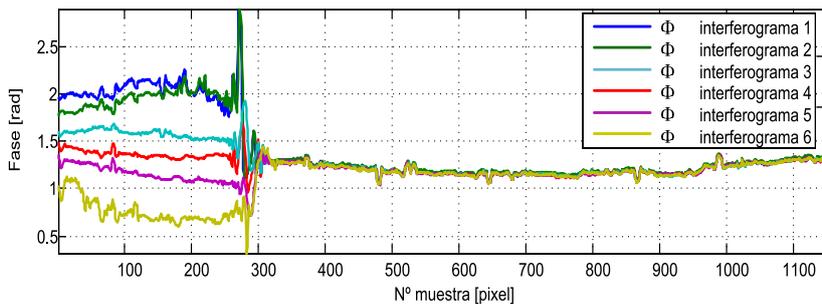


Figura 5.24: Fases combinadas de todos los interferogramas analizados. La ambigüedad de las fases individuales es resuelta correctamente en todos los casos. Los desplazamientos producidos evolucionan de incrementos positivos a negativos progresivamente, respecto a la parte de la línea cuya trayectoria no se ha modificado.

5.6 Reducción del tiempo de procesamiento

Los dos métodos descritos hasta ahora requieren utilizar el procesamiento basado en las Transformadas de Fourier, que conlleva un alto coste computacional. Los algoritmos PSI descritos en el capítulo anterior no son aplicables directamente en un interferograma con dos longitudes de onda simultáneamente, ya que no existe una única frecuencia portadora.

Con el fin de agilizar el procesamiento, se ha desarrollado una alternativa inspirada en un algoritmo de procesamiento propuesto por Larkin [91] para la detección de envolventes en interferometría de luz blanca.

De forma previa al planteamiento de la propuesta, se va a presentar el método de Chim y Kino [21] para disponer de un criterio de medida del coste computacional de un determinado algoritmo. Es comúnmente sabido que operaciones matemáticas como divisiones, y la evaluación de funciones y raíces cuadradas son mucho más significativas en cuanto al tiempo de cálculo que las operaciones de adición y sustracción. Por eso, para la estimación de la carga de un procedimiento numérico, conviene ignorar las sumas y restas y contabilizar simplemente el resto de operaciones.

Siendo N el número de muestras, la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de un vector de números reales requiere $N \cdot \log_2 N$ operaciones significativas, y un ajuste por mínimos cuadrados optimizado (LSF) requiere N operaciones más. Para obtener el valor de fase de un único punto del perfil, los métodos previamente descritos basados en la Transformada de Fourier emplean una FFT, típicamente de 2^{12} puntos, y seguidamente un ajuste parabólico en torno a cada uno de los picos detectados, de 4 puntos cada uno. Este ajuste reduce significativamente la longitud de la FFT necesaria para alcanzar una determinada precisión submuestra [41]. Este método necesita realizar un total de 49160 operaciones.

Propuesta basada en la posición relativa del máximo de modulación para interferogramas con *beat*

La alternativa propuesta aprovecha el efecto del *beat*, y consiste en detectar de forma precisa la posición en el eje-y del máximo de intensidad dentro de un periodo de *beat* de cada columna. Escalando este valor con el factor $2\pi f_{beat}$, se obtiene la fase equivalente $\phi(x)$ a la longitud de onda combinada λ_{12} . Con esta operación es posible estimar el desplazamiento relativo en fase de triangulación de cada punto del perfil.

Como las dos frecuencias individuales son bastante similares para generar un aumento considerable del rango de medida, el término senoidal de la Ec. 5.9 oscila varias veces durante un periodo de *beat*, como se puede ver en la señal sintética creada para comprobar el algoritmo de la Fig. 5.29. Esto dificulta la detección del pico del término cosenoidal de forma precisa, por lo que se requiere un cálculo previo de la envolvente de la señal. Para garantizar la minimización del coste computacional, la detección del pico máximo de la envolvente se puede realizar con la función de modulación del algoritmo de tres pasos de *Spatial Carrier Phase-Shifting*. Esta opción consiste en calcular en todo el patrón de interferencia el factor M de modulación descrito en la Ec. 5.13 usando pasos de 90° a la frecuencia media de las dos longitudes de onda empleadas. La siguiente tarea es localizar el máximo de esta envolvente.

$$M = \frac{1}{2} \sqrt{(I_3 - I_2)^2 + (I_2 - I_1)^2}. \quad (5.13)$$

Esta función de modulación conserva una traza del segundo armónico de la estructura de franjas, como se muestra en la Fig. 5.25. Para deshacerse de la influencia de este armónico, se debe realizar un ajuste parabólico centrado en el máximo de la señal de modulación y de longitud algo inferior al periodo de *beat*. El pico máximo de este ajuste proporciona la posición deseada del máximo de la zona de interferencia constructiva. Aplicando este procedimiento a cada columna del patrón de interferencia, y escalando adecuadamente con el factor $2\pi f_{beat}$, se recupera el frente de fase a la longitud de onda equivalente. Los pasos a seguir para el procesamiento están esquematizados en la Fig. 5.26.

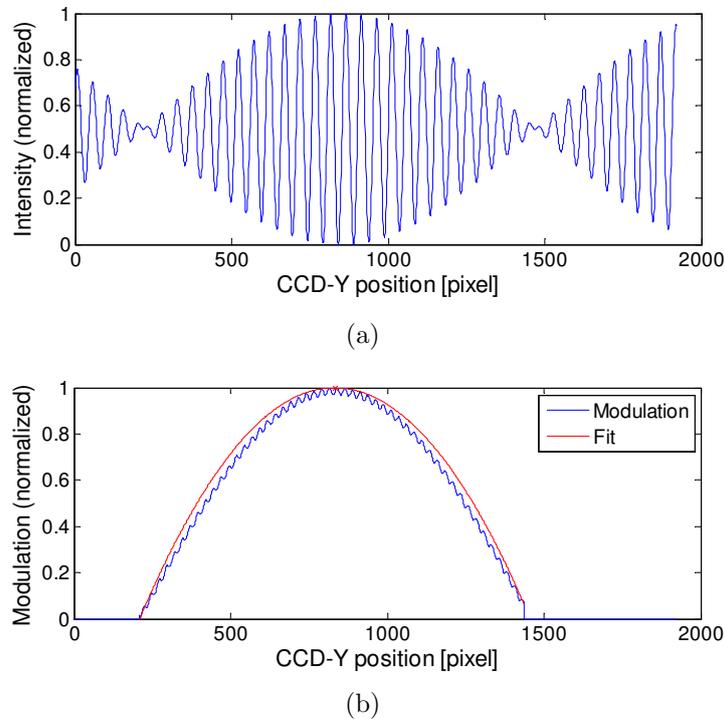


Figura 5.25: Procedimiento para el cálculo de la posición del *beat* de interferencia. (a): señal sintética de una columna del patrón (b): modulación y ajuste parabólico para la determinación del máximo de intensidad.

Este nuevo método requiere para el cálculo de la función de modulación 5 multiplicaciones por el número de muestras (píxeles) en el eje-y que ocupe el periodo de *beat*. El número máximo de píxeles en el eje-y es 1080 para nuestro prototipo. Esta operación es seguida de un ajuste. El total es 6480 operaciones en las mismas condiciones de trabajo que el valor calculado previamente para el método basado en Transformadas de Fourier. El coste computacional es por tanto 7 veces inferior utilizando este procedimiento.

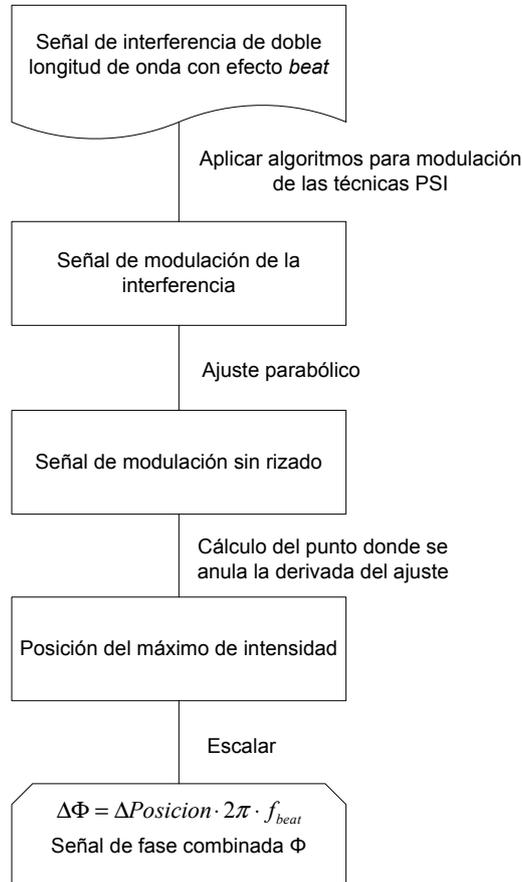


Figura 5.26: Esquema de los pasos de procesamiento para la obtención directa de la fase combinada según el algoritmo propuesto.

Comparación de resultados para el cálculo de la fase equivalente

Para la comprobación de los errores cometidos con el nuevo algoritmo propuesto, se ha simulado un perfil que presenta un escalón de $50 \mu m$. Para estimar el error cometido se han probado los algoritmos de procesamiento en interferogramas simulados a los que se ha añadido ruido *speckle* de diferentes desviaciones estándar σ . La Fig. 5.27 muestra el interferograma sintético si ruido añadido, y con ruido *speckle* forzado con una desviación estándar de 0.01. Para esta simulación se ha despreciado la influencia de los

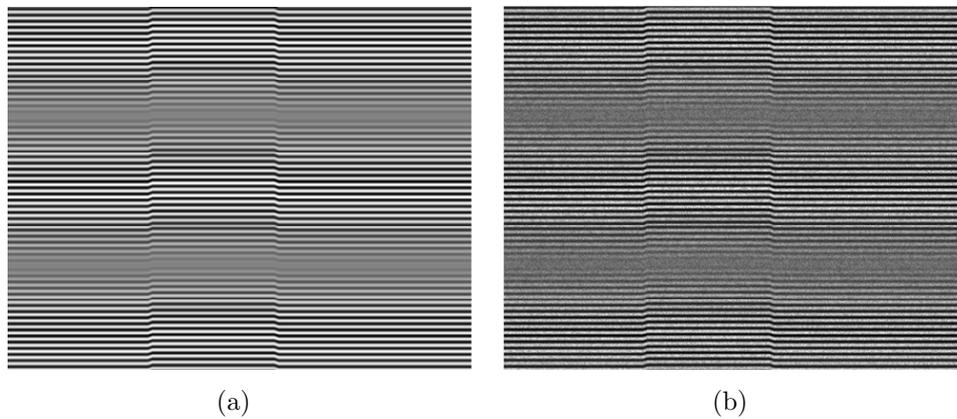


Figura 5.27: Interferogramas simulados para un perfil con un escalón de $50 \mu m$, iluminado con doble longitud de onda de 660 y 685 nm . (a): sin ruido añadido. (b): con ruido *speckle* añadido de $\sigma = 0,01$.

ángulos de incidencia por simplicidad. Este tema se tratará en profundidad en el capítulo siguiente.

Para el método basado en Transformadas de Fourier, se muestra en la tabla 5.5 los valores correspondientes a las longitudes de onda individuales $\varphi_1(x)$ y $\varphi_2(x)$ para las longitudes de onda de iluminación de 685 y 660 nm respectivamente. También se ha indicado la longitud de onda combinada $\phi(x)$, para la zona alta y baja del escalón. En los resultados se puede apreciar como el mismo salto de escalón de $50 \mu m$ genera un mayor incremento en las fases individuales cuanto mayor sea la longitud de onda de la iluminación, por lo que las fases individuales presentan mejor resolución, aunque menor rango de medida sin ambigüedad. Combinando ambas señales, obtenemos un salto de 0.07 radianes en la fase combinada, lo que nos permite tener margen de medida sin ambigüedad para poder medir escalones de mayor tamaño.

El procedimiento basado en la detección del máximo de la modulación para estimar la posición relativa del *beat* dentro del patrón de interferencia se puede visualizar en la Fig. 5.28. De nuevo, las trazas azules proceden de la zona baja del escalón, y las rojas de la zona alta de $50 \mu m$. Las líneas en trazo discontinuo son la propia señal de interferencia. Las líneas en trazo

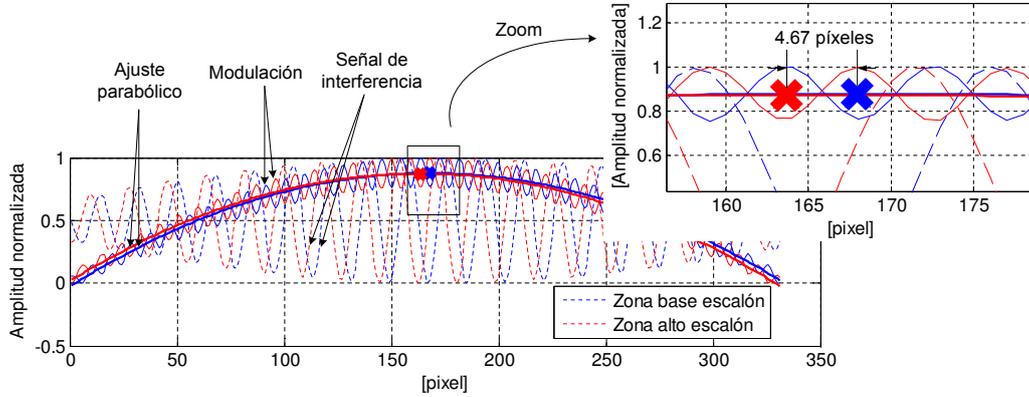


Figura 5.28: Localización de los máximos de modulación para las señales de interferencia de un punto de la zona baja (azul) y alta (roja) de un perfil con un escalón de $50 \mu m$. La línea a trazos es la señal de interferencia, la línea continua su función de modulación, y sobre esta el correspondiente ajuste parabólico sobre el que se ha señalado la posición del máximo de modulación con una aspa.

continuo son la modulación de sendas señal de interferencia respectivamente. Sobre ellas se ha representado el ajuste parabólico que facilita la detección sub-píxel del máximo de modulación, que se ha representado sobre cada ajuste mediante una aspa. La diferencia entre ambas posiciones es de 4.67 píxeles. Este valor se ha de escalar con el factor $2\pi f_{beat}$. Para este ejemplo en el que las longitudes de onda de láser utilizadas son 660 y 685 nm, se han detectado dos picos en el espectro frecuencial en los índices 233.81 y 224.04 para una FFT de 4096 puntos, lo que genera un factor de escalado de

$$2\pi f_{beat} = 2\pi \frac{233,81 - 224,04}{4096} = 0,015. \quad (5.14)$$

Con este factor se corrige la diferencia de posición del en el patrón para las zonas alta y baja del escalón, con lo que la diferencia relativa entre fases equivalentes para este escalón es de $4.67 \text{ píxeles} \times 0.015 = 0.07 \text{ rad}$, valor que se corresponde con el proporcionado por el método anterior.

Los resultados de ambos métodos de cálculo de la señal de fase equivalente para interferogramas que contienen dos longitudes de onda simultáneamente son satisfactorios. Para probar su robustez ante la presencia de ruido *speckle*, el más común en este dispositivo, se ha añadido este tipo de ruido

Zona	$\varphi_1(x)$	$\varphi_2(x)$	$\phi(x)$
Base escalón	-4.03	0.75	4.78
Alto escalón	-2.34	2.51	4.85
Incremento	1.69	1.76	0.07

Tabla 5.5: Valores de las fases individuales ($\varphi_1(x)$, $\varphi_2(x)$) y combinada ($\phi(x)$) para un perfil con un escalón de $50 \mu m$ obtenidos del procesamiento basado en Transformadas de Fourier.

de forma sintética, y se ha estudiado la respuesta de ambos procesamientos. En la tabla 5.6 se indican los errores máximos y RMS cometidos en presencia de ruido *speckle* con desviaciones desde 0.001 hasta 0.01 para el método basado en Transformadas de Fourier. De forma análoga, los resultados para el método basado en el cálculo relativo de la posición del *beat* se indican en la tabla 5.7. Para visualizar estos resultados de forma gráfica, se han representado en la Fig. 5.29 las señales de fase equivalentes para todo el perfil procesado para las distintas cantidades de ruido *speckle* inducido. La desviación estándar del ruido es de 0.01 para la señal de trazo rojo, 0.005 para la negra, 0.002 para la magenta, 0.001 para la azul, y 0 para la verde.

Noise (σ)	RMS Error (rad)	Maximum Error (rad)
0.001	0.0057	0.0184
0.002	0.0080	0.0314
0.005	0.0129	0.0466
0.01	0.0178	0.0599

Tabla 5.6: Error en la extracción de la fase equivalente para el método basado en Transformadas de Fourier.

Los resultados de esta comparación muestran como el método basado en

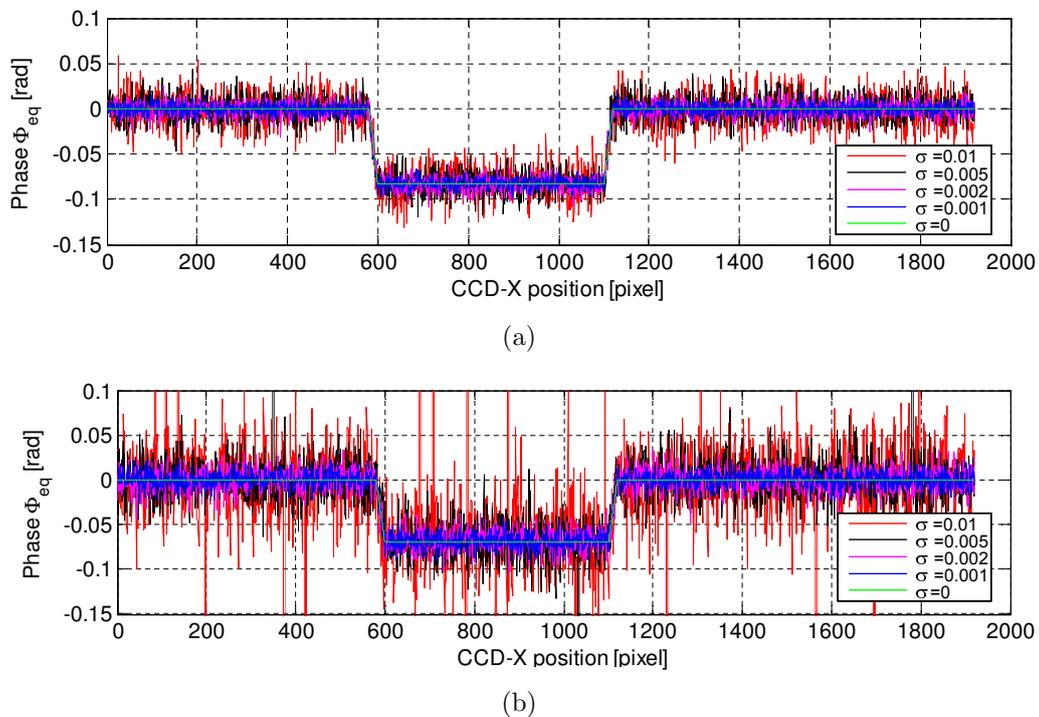


Figura 5.29: Señal de fase equivalente $\phi(x)$ correspondiente a un perfil con un escalón de $50 \mu\text{m}$. Resultados para interferogramas con ruido *speckle* sintético, con σ desde 0 hasta 0.01. (a): Procesamiento basado en Transformadas de Fourier. (b): Procesamiento basado en la posición de la modulación del *beat*.

la posición del máximo de la función de modulación del *beat* es más sensible al ruido que el método basado en Transformadas de Fourier, pero es 7 veces más rápido en términos computacionales. Estos aspectos deben de ser tenidos en cuenta a la hora de escoger el tipo de procesamiento según las características específicas de cada aplicación. En cualquier caso, existen preprocesamientos específicos para minimizar los efectos negativos del ruido que ya han sido descritos en el capítulo anterior y se pueden combinar con cualquiera de los dos métodos. Otro aspecto a sopesar es la posibilidad de disponer simultáneamente de las señales de fase en las longitudes de onda individuales y en la combinada para poder acceder a las ventajas de cada una: mejor resolución para las fases individuales, y mayor rango de medida sin ambigüedad para la fase combinada. Los métodos que trabajan directamente

Noise (σ)	RMS Error (rad)	Maximum Error (rad)
0.001	0.0082	0.0286
0.002	0.0123	0.0491
0.005	0.0650	2.6643
0.01	0.2087	3.0761

Tabla 5.7: Error en la extracción de la fase equivalente para el método basado en la posición del máximo de la función de modulación del *beat*.

en la frecuencia de *beat* no tienen acceso a las fases individuales.

5.7 Resultados

Durante el estudio de aplicabilidad de técnicas de múltiple longitud de onda se han ensayado diversos tipos de superficies, para ajustar en cada momento los parámetros adecuados de la configuración del prototipo.

Para todos los especímenes analizados, se ha utilizado un *Savart plate* de 7 mm de grosor, y las mediciones se han realizado a una distancia de trabajo de 100 mm, con un ángulo de triangulación entre las ramas de iluminación y visualización de 25°.

Se va a comenzar presentando ejemplos de superficies reconstruidas con el prototipo en triangulación con una única longitud de onda de 660 nm, para analizar la precisión máxima del dispositivo.

La resolución límite de un sistema de triangulación láser está dada por el criterio de Rayleigh. Resolver la posición de de dos fuentes de luz, o incluso detectar la presencia de ambas aún utilizando métodos sub-píxel, es posible

5.7. RESULTADOS

165

sólo si están separadas como mínimo la distancia δl dada por:

$$\delta l = 1,22 \frac{f\lambda}{D}, \quad (5.15)$$

donde λ es la longitud de onda de la luz, z es la distancia de trabajo, y D es el diámetro de apertura del objetivo de imagen.

Un simple experimento puede demostrar como la técnica propuesta basada en Interferometría de Desplazamiento Lateral puede sobrepasar el límite de Rayleigh de nuestro prototipo, que se puede calcular mediante las Ecs. 2.2 y 5.15. Es necesario conocer el diámetro de apertura del objetivo de imagen D . Este se puede calcular como $D = \frac{f}{f/\#}$, siendo f la distancia focal del objetivo y $f/\#$ el número f, que es una medida relativa de su apertura numérica. Combinando las dos ecuaciones, se obtiene un límite de resolución en triangulación de δz ,

$$\delta z = 1,22 \lambda f/\# \frac{\cos(i)}{\sin(i+o)}. \quad (5.16)$$

El prototipo emplea un objetivo de $f = 75$ mm, $f/\# = 1,8$, $\lambda = 660$ nm (un segundo láser de $\lambda = 685$ nm utiliza para aplicaciones de doble longitud de onda), y un ángulo de triangulación de unos 25° reflexión especular ($i = o \approx 12,5^\circ$). Con estos datos, la Ec. 5.16 da un valor de $\delta z = 3,47 \mu\text{m}$. Por tanto, variaciones en la altura del perfil más pequeñas que este valor no se pueden distinguir mediante métodos de triangulación, incluso sin la presencia de ruido *speckle*.

El prototipo propuesto basado en interferometría permite obtener precisiones por debajo de este límite. Se ha escaneado un espécimen consistente en bandas de resina de una micra de altura sobre oblea de silicio. El mapa 3D resultante se muestra en la Fig. 5.30, donde estas bandas se visualizan claramente, así como otros detalles de menor tamaño, como un araño y deposiciones sobre el silicio, demostrando que la precisión final del sistema está por debajo de la micra.

El espécimen de *Rubert Co. 511*, consistente en una superficie de referencia con un surco de una micra de profundidad y 100 micras de ancho. Es

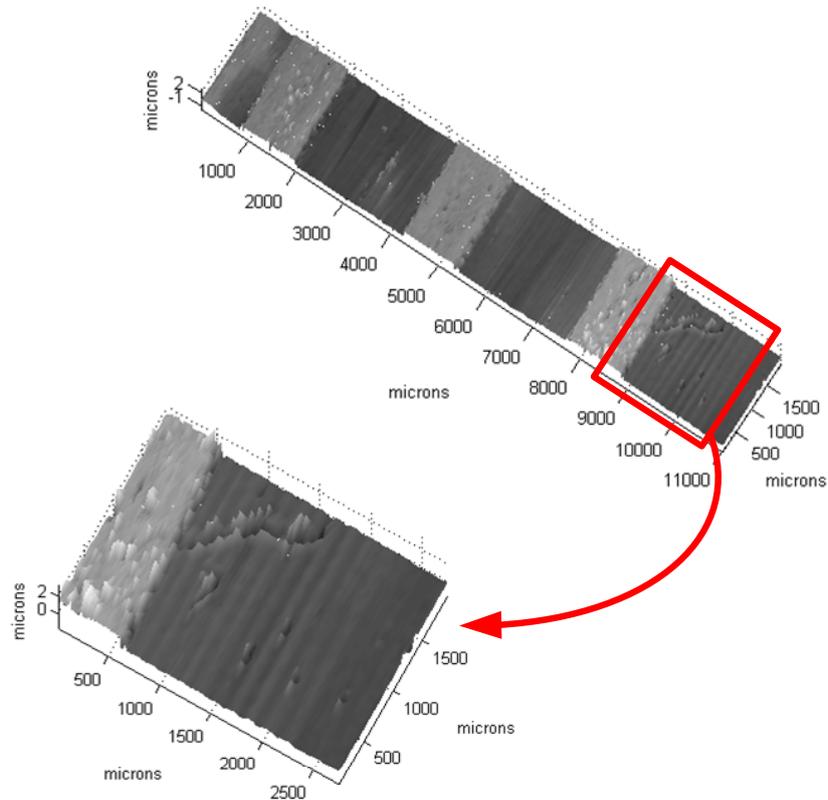


Figura 5.30: Detalle del escaneo 3D del espécimen testado. Adicionalmente a los escalones de $1 \mu m$, se visualizan claramente otros detalles superficiales de menor tamaño, como arañazos a defectos sobre el silicio.

un espécimen de referencia tipo A según la norma ISO 5436 parte 1:2000. Se puede visualizar en la Fig. 5.31. Un ejemplo de reconstrucción de una superficie especialmente compleja se muestra en la Fig. 5.32. En este caso el espécimen de *Rubert Co. 531*, consistente en un patrón senoidal de 100 micras de periodo y una micra de amplitud (especimen de referencia tipo C según la norma ISO 5436 parte 1:2000). La principal dificultad proviene de las múltiples reflexiones que se producen sobre la superficie, que genera ruidos en la reconstrucción proporcionada por nuestro prototipo. Aún así, utilizando una parte de la reconstrucción para calcular los parámetros de rugosidad de acuerdo con la norma ISO 4278, con una longitud de onda de corte de 0.8 mm, los valores obtenidos concuerdan con los valores me-

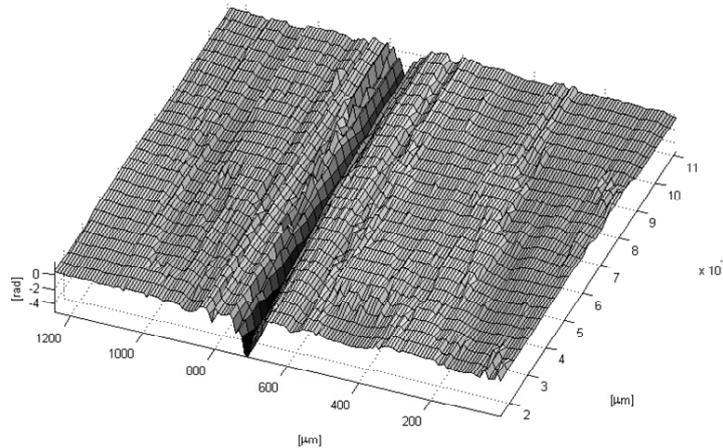


Figura 5.31: Detalle del escaneo 3D del espécimen *Rubert Co. 511*, un patrón de referencia con un surco de profundidad una micra y ancho de 100 micras.

dios proporcionados por el fabricante. Los datos se pueden consultar en la tabla 5.8. Las desviaciones estándar son algo mayores en los datos de nuestro prototipo debido a la presencia de ruido. Se podrían aplicar técnicas de filtrado más sofisticadas para la realización completamente automática de este tipo de análisis, pero el objetivo de esta sección sólo trata de mostrar el comportamiento del sistema, incluso en este caso crítico.

La repetibilidad es bastante alta a lo largo del perfil. Midiendo consecutivamente la fase combinada para 15 adquisiciones, se produce una desviación media estándar de $\sigma = 0,0165$ radianes, lo que equivale a $\sigma < 0,04\mu m$ para esta configuración.

Un espécimen de características similares al primer ejemplo, compuesto de bandas de resina de 2mm de ancho separadas 2mm entre ellas y un micra de espesor, ha sido escaneado con las longitudes de onda 660 y 685 nm. En la Fig. 5.33 se visualizan las fases individuales. Se observa como algunos de los escalones aparecen invertidos. Este fenómeno desaparece en la longitud de onda combinada. Este mapa se ha representado sin calibrar para poder apreciar el problema de la ambigüedad de la medida en fase.

A continuación, en la Fig. 5.34 se muestra la reconstrucción del espéci-

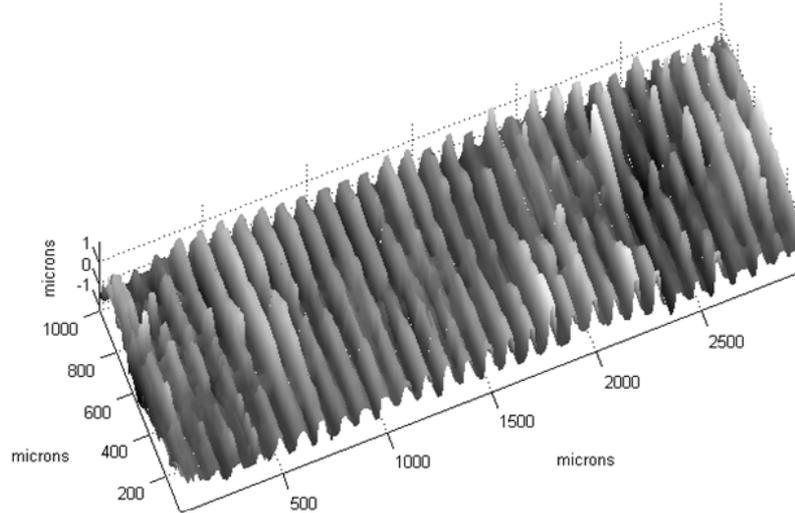


Figura 5.32: Detalle del escaneo 3D del espécimen *Rubert Co. 531*, un patrón senoidal de amplitud una micra y periodo de 100 micras.

men de *Rubert Co. 513*, que es un espécimen de referencia tipo A según la norma ISO 5436 parte 1:2000. Es una muestra con surcos de 30 y 200 micras de profundidad respectivamente. Lógicamente, esos saltos hubiera sido imposible medirlos correctamente sin ambigüedad sin la utilización de dos longitudes de onda.

Otra de las aplicaciones de el prototipo es la detección de defectos sobre diferentes tipos de superficies. Ejemplos de este tipo de aplicaciones se visualiza en la Figs. 5.35 y 5.36. Un espejo y una oblea de silicio han sido escaneados para validar su calidad superficial. Los resultados obtenidos se han contrastado con imágenes de un microscopio. La señal de fase presenta errores en los bordes de los defectos, que probablemente sean debidos a efectos de difracción o dispersión de la luz durante el movimiento. Sin embargo, las formas de los defectos se corresponden con los datos del microscopio, y se ha validado incluso la detección de defectos de muy pequeño tamaño. Los mismos fenómenos que falsean el valor de fase en los bordes facilitan la visualización de otros defectos para los que no se dispondría de resolución (lateral o en profundidad) suficiente.

Parámetro	Fabricante (μm)	Interferómetro (μm)
$\overline{R_a}$	0.3175	0.316124
$\overline{R_z}$	1.022	1.070571
σR_a	0.00123	0.053190
σR_z	0.018	0.154289

Tabla 5.8: Comparación entre factores R_a y R_z calculados utilizando el interferómetro objeto de análisis y los datos proporcionados por el fabricante para el espécimen de *Rubert Co. 531*.

5.8 Conclusiones

A lo largo de este capítulo se han presentado las limitaciones de la Interferometría de Desplazamiento Lateral cuando se trabaja en triangulación, y la restricción que conlleva el aumento de sensibilidad: la disminución del rango de medida sin ambigüedad.

Para mitigar este problema, se han introducido los principios de múltiple longitud de onda, y se han comparado dos formas diferentes de implementarlos físicamente en nuestro prototipo: utilizando *Savart plates* de distintos grosores, o empelando iluminación de múltiple longitud de onda, que ha resultado ser la forma más ventajosa.

Por tanto, se han descrito y analizado las peculiaridades de el montaje con láser dual, como el fenómeno del *beat* en la interferencia. Se han descrito las alternativas de procesamiento compatibles con este fenómeno.

Se han mostrado de forma muy sencilla los resultados de un primer ensayo de viabilidad de las técnicas de múltiple longitud de onda conseguidas a través de iluminación láser dual, con una disposición de los elementos total-

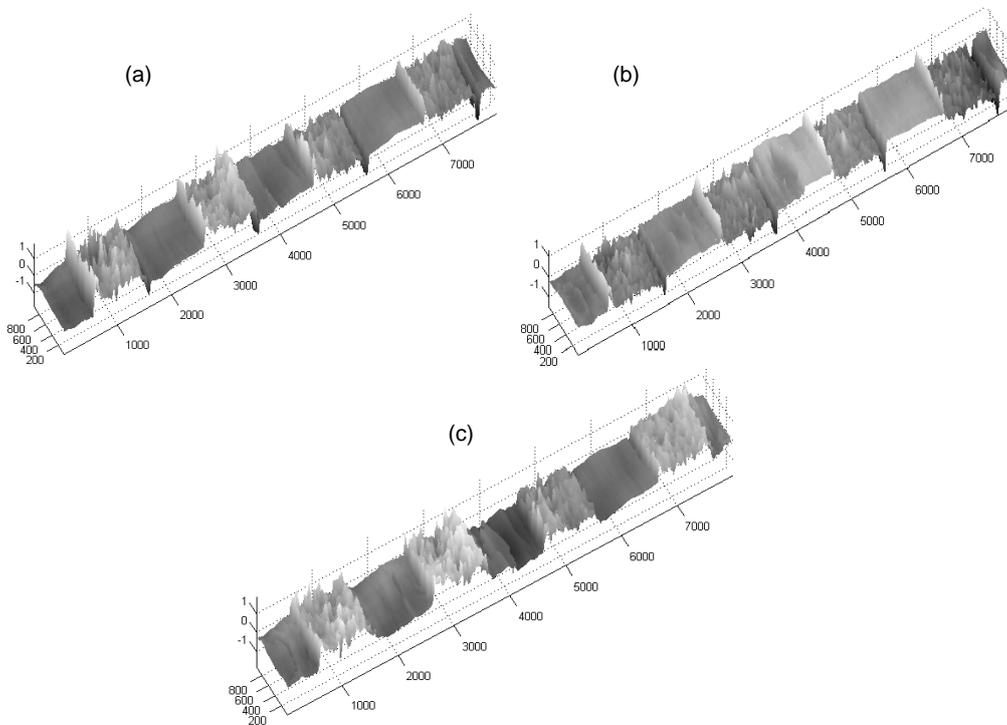


Figura 5.33: Mapas de fase en bruto obtenidos para es espécimen son escalones de $1 \mu m$. Las imágenes (a) y (b) muestran los mapas de fase correspondientes a las longitudes de onda individuales, y (c) en la longitud de onda combinada equivalente. Los ejes X e Y están en micras, y el eje Z en radiantes.

mente controlada para eliminar del ensayo posibles efectos relativos al tipo de superficie a inspeccionar.

También se han analizado los resultados experimentales del prototipo aplicado a varios tipos de superficies. Mediante estos ejemplos, se ha demostrado la superación del límite de Rayleigh, la resolución de la ambigüedad de medida, y se han detallado las dificultades o ventajas asociadas a cada tipo de objeto o superficie. Las capacidades y puntos débiles del interferómetro de desplazamiento lateral en configuración triangulada han quedado constataadas mediante estos ejemplos reales.

5.8. CONCLUSIONES

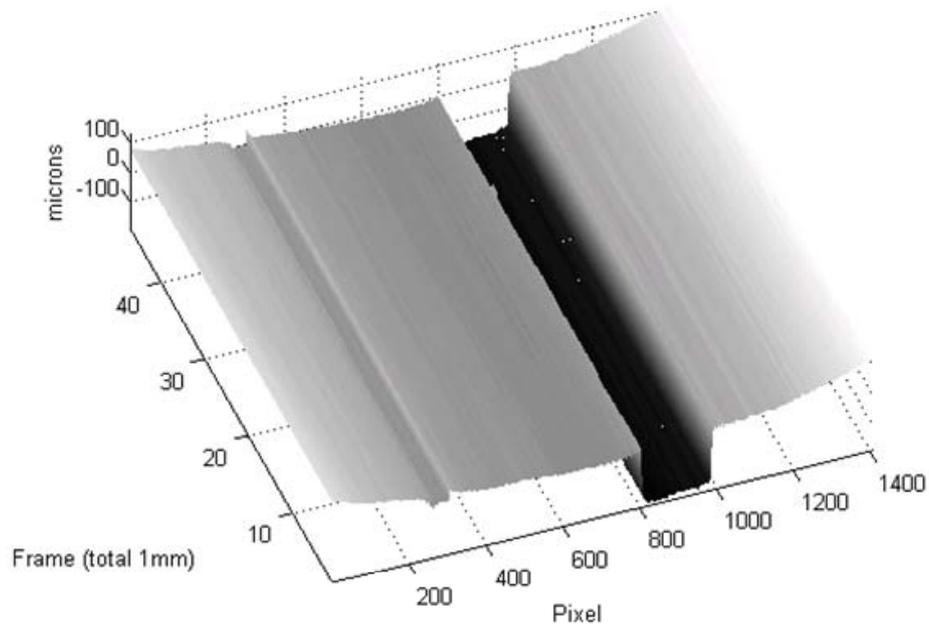


Figura 5.34: Mapa de superficie del espécimen *Rubert Co. 513*, una muestra plana con hendiduras de 30 y 200 micras respectivamente.

Por último, se ha propuesto un método nuevo que permite optimizar los tiempos de cálculo, aunque es ligeramente más sensible al ruido.

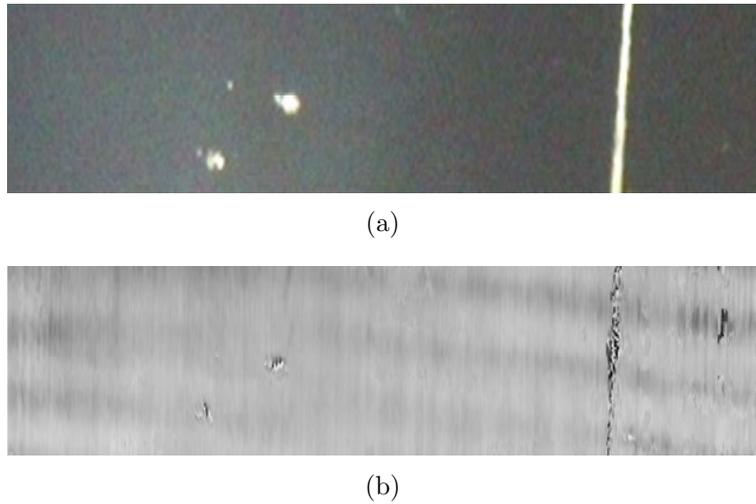


Figura 5.35: Defectos sobre un espejo. Comparación del mapa de fases obtenido sin aplicar ningún procesamiento adicional (abajo) con la imagen capturada por un microscopio (arriba). Superficie de 9 por 2 mm.

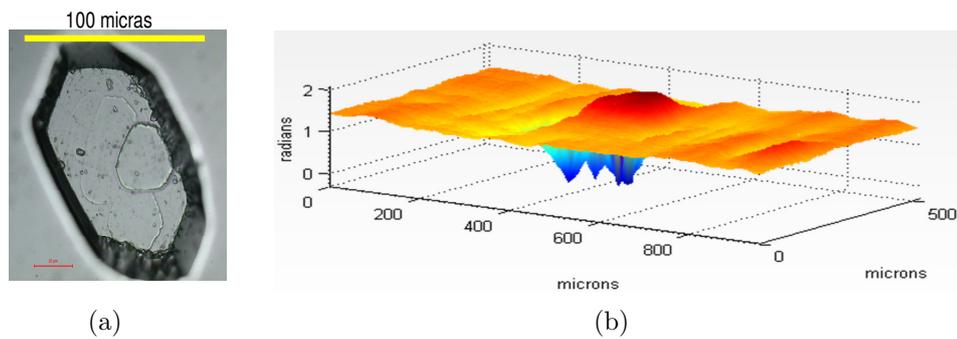


Figura 5.36: Inclusión sobre una oblea de silicio. Comparación del mapa de fases obtenido sin aplicar ningún procesamiento adicional (derecha) con la imagen capturada por un microscopio (izquierda).

Lo que cuenta no es lo que se sabe, sino lo que se sabe que no es así.

Will Rogers

Capítulo 6

Incremento de la precisión para la configuración colineal

A modo de recordatorio, la configuración colineal permite la supresión de zonas ocultas o efecto sombra, facilita compactar el prototipo, y permite inspeccionar zonas de difícil acceso. Como contrapartida, la señal de fase proporcionada por este montaje no contiene la resolución extra que aporta la triangulación, por lo que se utiliza simplemente la señal de frecuencia para medir. Por tanto, para una misma distancia de trabajo, esta configuración presenta menor precisión que la triangulada si se usan los métodos clásicos de procesamiento, lo que motiva la búsqueda de técnicas que mejoren la precisión del sistema.

En este capítulo se presentan dos aspectos en los que se ha extendido la aplicabilidad de prototipo en su configuración colineal.

Por un lado, se propone un método de mejora de la resolución en profundidad aplicable a superficies suaves. Se proporcionan ejemplos experimentales y un detallado análisis de los límites de funcionamiento. Por otro lado, se desvelan las claves para disminuir el tiempo de medida, empleando una estimación de la señal de frecuencia a partir de valores de fase instantáneos.

La semilla de estas aportaciones ha surgido de un riguroso estudio de la respuesta no ideal del elemento clave del sistema: el *Savart plate*. Los resultados de este análisis, así como la correlación de dichos resultados con parámetros superficiales de las muestras, son descritas a lo largo del presente capítulo. Comencemos revisando las propiedades del *Savart plate*.

6.1 Análisis del *Savart plate*

El *Savart plate* está constituido por dos cristales uniáxicos idénticos cortados de forma que sus ejes ópticos estén alineados a 45° con el eje óptico del sistema, como se muestra en la Fig. 6.1. El eje óptico del segundo cristal es perpendicular al del primero, ya que ambos se han de colocar con la sección principal cruzada. Cuando un rayo incide en el primer cristal, se divide en dos, debido a las propiedades birrefringentes del material del que está compuesto. El rayo ordinario “o” en el primer cristal se convierte en el extraordinario “e” en el segundo cristal. De igual forma, el rayo extraordinario “e” del primer cristal pasa a ser el ordinario “o” de segundo cristal. En la salida del *Savart plate* emergen dos rayos paralelos desplazados lateralmente el valor del *shear*. Estos dos rayos tienen coherencia mutua y están polarizados ortogonalmente, por lo que es necesario colocar el *Savart plate* entre dos polarizados cruzados para poder visualizar la interferencia.

El *shear* es función de los índices de refracción ordinario y extraordinario del material del que esté hecho el *Savart plate*, y depende de la longitud de onda de la luz incidente. Por lo tanto, las principales características que definen la respuesta de un *Savart plate* son el material y el grosor del cristal. A modo de ejemplo, para una longitud de onda de 500 nm, el *shear* es aproximadamente 0.075 veces el grosor total del cristal si el material es calcita, o 0.0042 si es cuarzo. Pero ésta aproximación, que es la expresión proporcionada en la hoja de características del fabricante, es sólo válida para incidencia normal.

En los últimos años, varios autores han estudiado el efecto de los parámetros que definen el comportamiento del *Savart plate*. Por ejemplo, Zhang et.

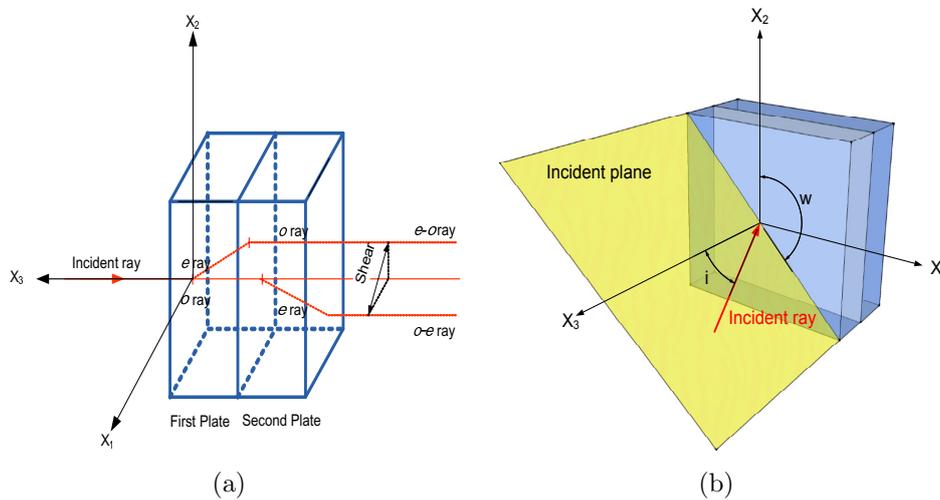


Figura 6.1: *Savart plate*. (a) geometría, y (b) sistema de coordenadas. Denotaremos por w en ángulo del plano de incidencia con el plano X_1 - X_2 , y mediante i el ángulo del rayo incidente.

al [22] han analizado la influencia de la dirección del eje óptico, y Wu et. al [141] han detallado los coeficientes de reflexión y refracción en el cambio de cristal del *Savart plate*.

En el presente análisis, nos centraremos en las variaciones de *shear* y OPD (*optical path difference*) que derivan del hecho de que la condición de incidencia normal no se mantiene cuando trabajamos a distancias cortas con el fin de obtener altas precisiones. Expresiones más exactas se han empleado en varios estudios teóricos, como el realizado por Mu et. al [110] para el espectrómetro de polarización de interferencia basado en un *Savart plate*. Estas mismas expresiones serán las utilizadas para el análisis del perfilómetro objeto de esta Tesis.

El *shear* y OPD en el *Savart plate* se pueden calcular como una suma de términos en la que intervienen los siguientes parámetros: los índices de refracción del rayo ordinario y extraordinario n_o and n_e , el índice de refracción del medio incidente n_i , el grosor de cada cristal t , el ángulo de incidencia sobre la sección principal del primer cristal i , y el ángulo entre el plano de

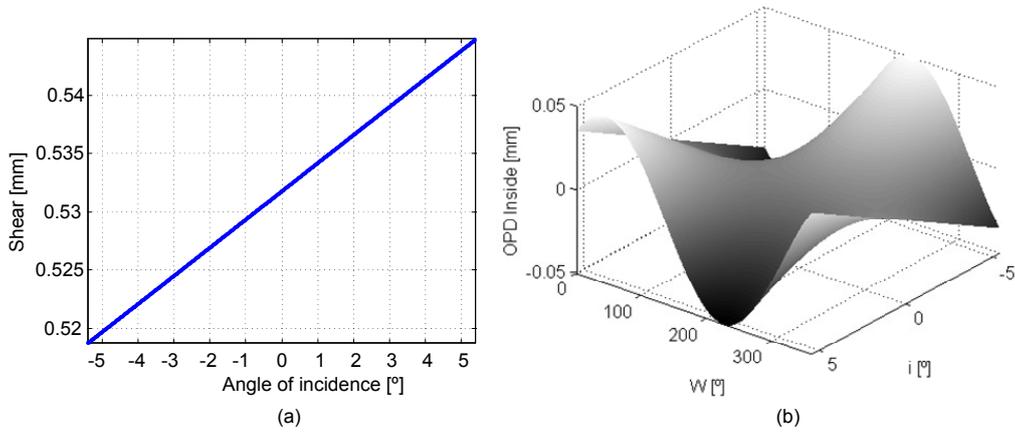


Figura 6.2: Respuesta del *Savart plate* cuando la incidencia no es perpendicular. (a) variaciones del *shear* debidas al ángulo de incidencia i . (b) OPD añadido internamente por el *Savart plate* ante variaciones de los ángulos i y w .

incidencia y la sección principal del primer cristal w . Estas expresiones han sido proporcionadas por Françon y Mallick [56]. Para un *Savart plate* de espesor total $2t$, el desplazamiento lateral o *shear* se puede aproximar por:

$$s = \sqrt{2} t \left\{ \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2} + n_i \sin(i) \left[\frac{n_o n_e}{\left(\frac{n_o^2 + n_e^2}{2}\right)^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{n_o} \right] \right\}. \quad (6.1)$$

En la Fig. 6.2(a) se pueden observar las variaciones de *shear* correspondientes a una iluminación de 685 nm de longitud de onda, para ángulos de incidencia pequeños, $[-5^\circ, 5^\circ]$, que son comunes en la configuración de nuestro sistema.

Para incidencia normal, ambos frentes de onda emergentes del *Savart plate* han recorrido caminos análogos, así que la diferencia de camino óptico (OPD) es cero, y el *Savart plate* no modifica la fase inicial de la interferencia. Pero el ángulo de incidencia i , además de modificar el *shear*, también hace que la longitud de los caminos que siguen los rayos “eo’ y “oe” no sea igual.

El OPD generado internamente por el *Savart plate* es:

$$\begin{aligned}
 OPD_i = & t \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2} (\cos w + \sin w) n_i \sin i + \\
 & + \frac{t}{\sqrt{2}} \frac{n_o}{n_e} \frac{n_o^2 - n_e^2}{(n_o^2 + n_e^2)^{\frac{3}{2}}} (\cos^2 w - \sin^2 w) n_i^2 \sin^2 i.
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

En la Fig. 6.2(b) se muestra el resultado de evaluar la ecuación anterior variando los valores de i y w , de nuevo para una longitud de onda de 685 nm. Hay que resaltar que el OPD interno generado por el *Savart plate*, que se añade a la fase inicial de cada señal de interferencia, es nulo si $w = 135^\circ$ o $w = -45^\circ$, pero toma valores que pueden ser significativos para diferentes ángulos del plano de incidencia. Para $w = 45^\circ$ y $w = 225^\circ$ el OPD interno alcanza los valores máximos.

A modo de resumen, el ángulo de incidencia i modifica el *shear* y el OPD existente entre los dos rayos emergentes. Cambios en el *shear* a lo largo del perfil conllevan un cambio directo de la frecuencia de franjas. Un cambio en el OPD interno implica una contribución añadida a la fase inicial del patrón de franjas φ_0 , que se debe tener en cuenta si se utiliza una configuración triangulada, ya que en ese caso la medida se obtiene a partir del perfil de fases.

6.1.1 Repercusión en el prototipo

El prototipo de ensayos ya ha sido descrito detalladamente en la sección 4.3. En este apartado, se describirán únicamente los efectos que el comportamiento real del *Savart plate* provoca en la interferencia, y por tanto en la señal que se utiliza para obtener la medida.

En el sistema a analizar, la línea láser siempre se proyecta sobre el objeto de forma que la línea reflejada esté en la dirección del lado más largo del CCD, que en nuestro caso es el eje-x. La lente cilíndrica se ha situado de forma que desenfoca la luz únicamente en la dirección perpendicular a

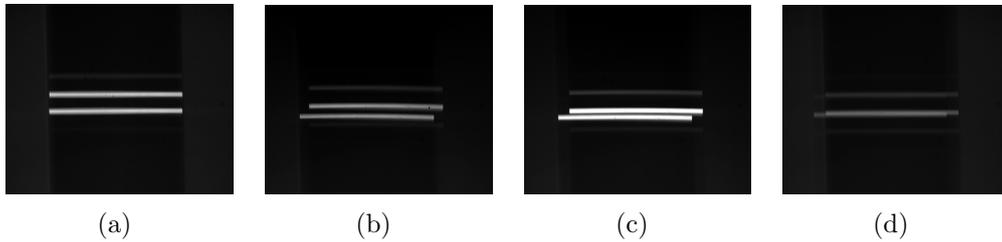


Figura 6.3: Capturas de la línea láser proyectada adquiridas por la rama de adquisición tras haber eliminado la lente cilíndrica para poder observar las dos líneas virtuales emergentes del *Savart plate*. En (a) la orientación del *Savart plate* es la correcta: $w = 135^\circ$, en (b) y (c) se ha girado progresivamente, y en (d) el shear se llega a producir en la misma dirección de la línea: $w = 45^\circ$.

la línea, para permitir la visualización de la interferencia de cada punto. El *Savart plate*, por tanto, debe estar orientado de forma que el plano de incidencia forme un ángulo $w = 135^\circ$ o $w = -45^\circ$ con la sección principal del primer cristal. De esta forma, además de no añadir OPD interno, nos aseguramos que el *shear* se genera en la dirección perpendicular al perfil, lo que es estrictamente necesario para que cada señal de interferencia este formada por dos frentes de onda virtuales procedentes del mismo punto del objeto. En la Fig. 6.3 se puede visualizar la posición relativa de ambos frentes virtuales para diferentes rotaciones del *Savart plate*. Para que la visualización fuera posible, se ha eliminado la lente cilíndrica en estas adquisiciones.

Pequeños cambios en la orientación del *Savart plate* provocan variaciones en el patrón de franjas final. La Fig. 6.4 muestra los patrones de interferencia simulados y reales correspondientes a una superficie plana, un espejo, ante ligeras rotaciones del *Savart plate*. Mientras que la señal de frecuencia no sufre ninguna alteración por esta rotación, ya que w no afecta al *shear*, la señal de fase varía sustancialmente con el ángulo de incidencia i de acuerdo con la Ec. 6.2. Las simulaciones se han realizado calculando el OPD total a cada uno de los puntos del CCD, y concuerdan fuertemente con los datos experimentales.

La Fig. 6.5 muestra el efecto del comportamiento real del *Savart plate* para variaciones en frecuencia. En (a) se observa la forma de la señal de dis-

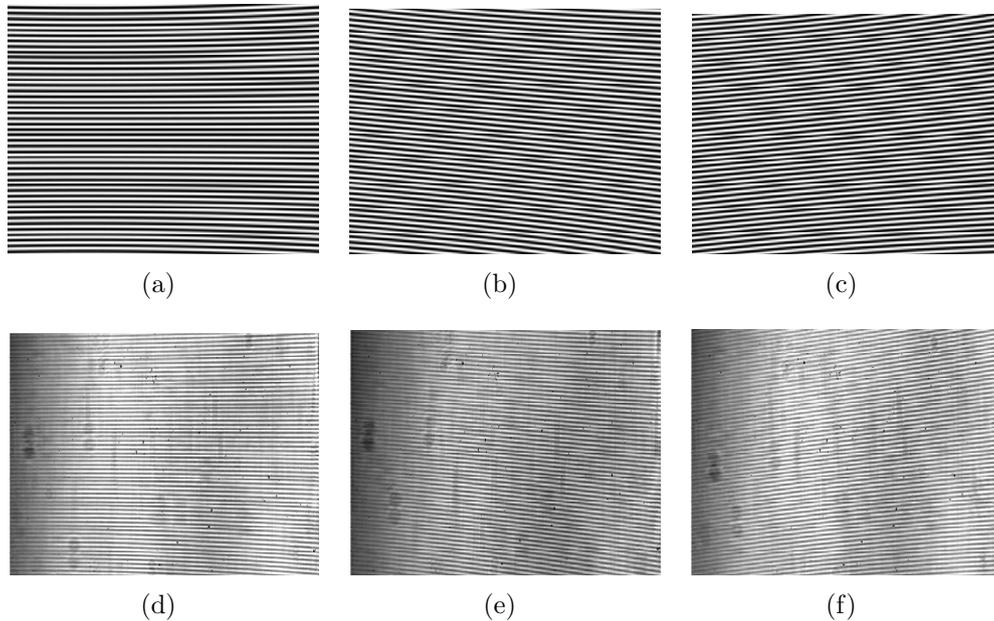
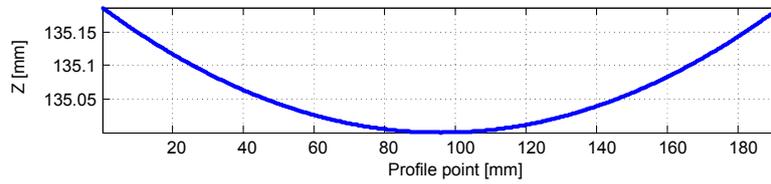


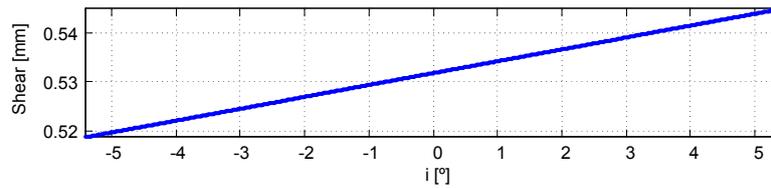
Figura 6.4: Patrones de franjas simulados (arriba) y reales (abajo) para diferentes valores del ángulo w . En (a) y (d) el *Savart plate* está alineado correctamente. En (b) y (e) se ha añadido una ligera rotación de 2° en sentido horario. En (c) y (f) la misma rotación en sentido antihorario.

tancias, un arco de circunferencia centrado en el medio del perfil, ya que la distancia entre la superficie del objeto y el detector aumenta según nos alejamos del centro. Para distancias de trabajo grandes, la forma de la señal de frecuencia es inversamente proporcional a la distancia. Sin embargo, en este caso, el *shear*, mostrado en (b), modifica la forma de la señal de frecuencia hasta llegar a influir en magnitudes sustanciales. Para un perfil plano y un *Savart plate* perfectamente alineado, cuando trabajamos a distancias cortas la frecuencia está muy afectada por las variaciones en el *shear* provocadas por el ángulo de incidencia, como se observa en (c). En este caso, el OPD interno es cero, ya que la rotación del *Savart plate* es 135° , por lo que la señal de fase inicial no se ve modificada.

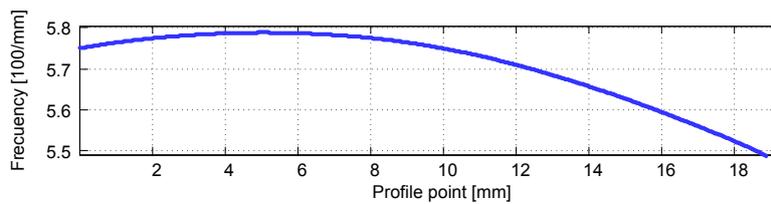
Debido a estos fenómenos, es crucial cuantificar la influencia de pequeñas variaciones en los ángulos de incidencia en comparación con variaciones en la



(a)



(b)



(c)

Figura 6.5: Influencia del comportamiento real del *Savart plate* en frecuencia. Para el patrón de franjas simulado y perfectamente alineado mostrado en la Fig 6.4(a), (a) muestra el vector de distancias al prototipo, (b) el efecto del ángulo de incidencia sobre el *shear*, y (d) la señal de frecuencia obtenida.

distancia al perfil. Los resultados de este cálculo se muestran en la Fig. 6.6, donde ángulos de incidencia en el orden de $0,1^\circ$ provocan variaciones de la señal de frecuencia en el mismo orden de magnitud que un cambio en profundidad de una micra sobre la superficie.

Este resultado es de gran interés, ya que demuestra que cambios en la pendiente de un perfil o en su topología que modifiquen el ángulo de incidencia, van a generar cambios en el perfil de frecuencias que pueden ser detectados.

Estos datos desvelan una posible causa de los fenómenos detectados cuan-

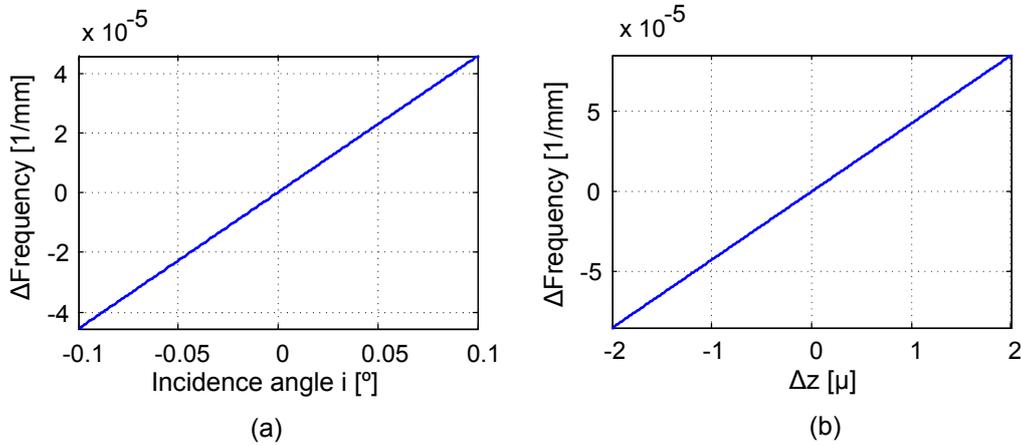


Figura 6.6: Variaciones en la frecuencia de franjas. (a) ante cambios en el ángulo de incidencia i , y (b) ante cambios en la profundidad del perfil z .

do se trata se conseguir altas precisiones desde distancias de trabajo cortas, como la detección de defectos más pequeños que el límite de resolución del prototipo, o la imposibilidad de calibrarla distancia frente a los cambios en frecuencia en ciertos casos. Pero para relacionar de manera fidedigna el ángulo de incidencia con los fenómenos detectados, y la influencia de la superficie del objeto, es preciso hacer una batería de ensayos específica para este propósito.

6.2 Identificación de parámetros superficiales susceptibles de modificar el ángulo de incidencia

Con el fin de identificar las variables que provocan el comportamiento no lineal de la señal de frecuencias, se han realizado 12 escaneos diferentes, de 6 patrones normalizados para medidas de rugosidad, con el fin de poder relacionar los valores conocidos de la superficie, con las mediciones efectuadas por el prototipo. Estas superficies se han escogido porque todas ellas

presentan no linealidades a lo largo del perfil, es decir, los cambios en frecuencia desplazando la superficie adelante y atrás no guardan relación con los cambios en frecuencia provocados por la superficie en cada adquisición.

Los ensayos efectuados se indican en la tabla 6.1. Los especímenes de precisión utilizados como referencia son fabricados por *Rubert Co.*, y sus tallas son de tipo senoidal y diente de sierra. Los parámetros teóricos que se han considerado para el análisis son: la longitud de onda de la fuente de luz monocromática λ , el periodo de la forma tallada en la superficie Sm , la rugosidad superficial Ra , la amplitud de pico a pico de la talla Pt , y la forma de la talla. Las señales procedentes de los índices en frecuencia del patrón de interferencia de cada perfil han sido filtrados mediante el algoritmo de *Butterworth*, para su posterior análisis espectral, del que se han obtenido los valores instantáneos de amplitud, periodo, y localización relativa del espécimen.

Para una primera identificación de las correlaciones existentes entre los parámetros más significativos, se ha hecho uso de los mapas topográficos auto-organizados (SOM) [83, 82], ya que permiten una análisis visual muy intuitivo de procesos complejos mediante proyecciones en un espacio 2D. La aplicabilidad de esta herramienta para la caracterización de procesos industriales fue originalmente propuesta por Kohonen et al. [81], y su eficacia se ha constatado en numerosas ocasiones [14, 34, 65].

La visualización de las diferentes características del SOM se lleva a cabo a través de los diferentes *planos* o *mapas* que pueden ser definidos. Los *planos de componentes* o *mapas de características* permiten representar a través de una escala de color la componente escalar j – *esima* de los vectores de codificación \mathbf{M} correspondiente a cada una de los puntos \mathbf{g}_i del espacio de visualización. De esta manera existen tantos planos de componentes en un SOM como dimensión posea el espacio de entrada. Se pueden ver estos mapas de componentes como un mapa “*mudo*” del proceso, donde cada plano de características aportaría la información de una variable para un estado de funcionamiento del proceso, como en la Fig. 6.7. Para interpretar estos mapas, hay que identificar patrones que se repitan en las proyecciones de varias variables. Los datos que están proyectados sobre esas zonas guardan relación entre sí.

6.2. IDENTIFICACIÓN PARÁMETROS SUPERFICIALES

N°	Espécimen	λ (nm)	Sm (μm)	Ra (μm)	Pt (μm)	Forma
1	531X	685	100	0.3	1.0	Senoidal
2	530X	685	100	1.0	3.0	Senoidal
3	527-RS4	685	100	3.0	10	Senoidal
4	526-RS3	685	100	3.15	10	Senoidal
5	529-RS6	685	10	0.1	0.3	Senoidal
6	521-RS2	685	15	0.4	1.6	Sierra
7	531X	660	100	0.3	1.0	Senoidal
8	530X	660	100	1.0	3.0	Senoidal
9	527-RS4	660	100	3.0	10	Senoidal
10	526-RS3	660	100	3.15	10	Senoidal
11	529-RS6	660	10	0.1	0.3	Senoidal
12	521-RS2	660	15	0.4	1.6	Sierra

Tabla 6.1: Características de las superficies de referencia de *Rubert Co.* sobre las que se realizaron los ensayos numerados del 1 al 12.

Las medidas más relevantes proporcionadas por el interferómetro, para la medida de las ondas talladas en los especímenes ensayados, son periodo y amplitud, por lo que se han realizado dos análisis diferentes de datos, para poder identificar los parámetros más influyentes en cada una de estas magnitudes de la mejor forma posible. En cuanto al SOM obtenido, la proyección de estos datos se realizará en un plano virtual, tal y como se indica en [81], lo que es perfectamente válido para la identificación de correlaciones entre variables.

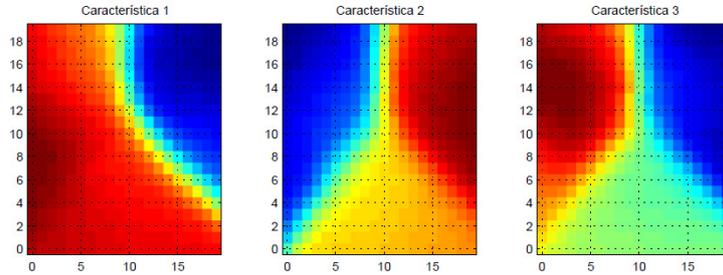


Figura 6.7: Mapas de características SOM de ejemplo. Se pueden distinguir tres zonas de funcionamiento claramente relacionadas si atendemos a las características 2 y 3, y dos zonas en cuanto a la característica 1.

6.2.1 Parámetros influyentes sobre la medida de periodo en especímenes senoidales

El primer mapa topográfico se ha realizado para comprobar la resolución lateral de las medidas efectuadas. Para este estudio se han utilizado únicamente los especímenes cuyo periodo teórico es igual a $100\mu m$, para poder identificar, si existen desviación en la medida de periodo de las senoidales talladas, y algún tipo de correlación entre la dirección del error cometido y el resto de variables.

En la Fig. 6.8(e) y (f) muestran como, ni la longitud de onda de la fuente de luz, representada en la variable “Lambda teórica”, ni variaciones en la distancia de trabajo entorno al punto de enfoque de la lente, representadas en “Posicion Ref”, tienen influencia sobre el periodo medido con el interferómetro, Fig. 6.8(a).

A modo de curiosidad, resulta muy fácil identificar visualmente la relación directa que hay entre el par de valores teóricos amplitud y rugosidad, representados en las Figs. 6.8(c) y (d) respectivamente, debida a la propia definición del parámetro Ra . También es posible identificar en el SOM, una zona que indica como los valores medidos de periodos más exactos, se corresponden a muestras con amplitud y rugosidad reales bajas, pero en líneas generales, se puede decir que el pequeño error cometido en las medidas de periodo no guarda relación con las características de la muestra.

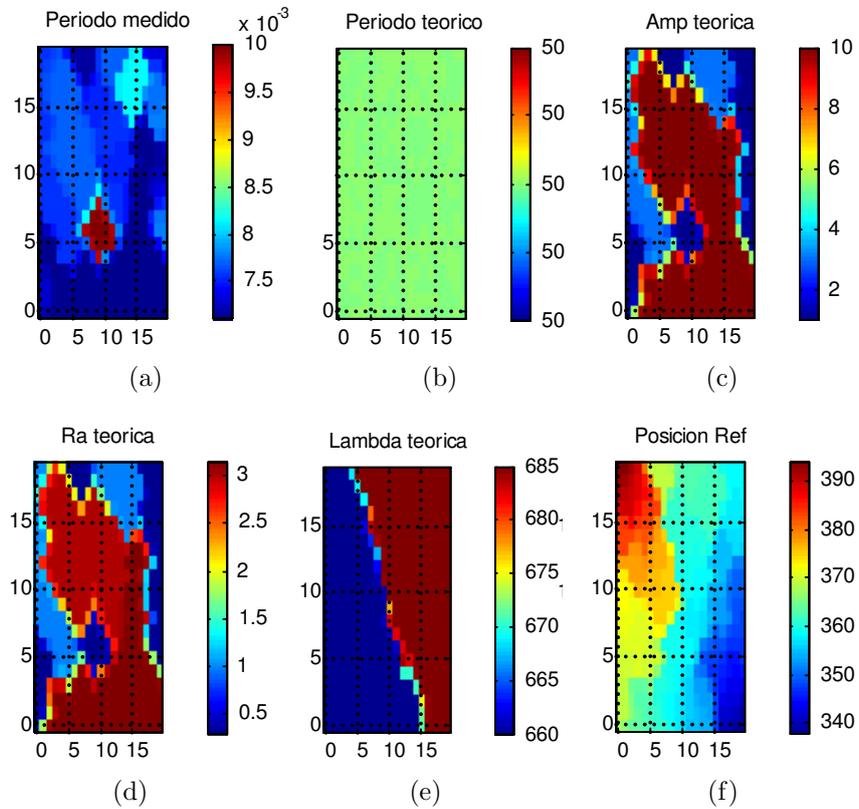


Figura 6.8: Mapas topográficos auto-organizados SOM para la identificación de parámetros que pudieran modificar las medidas de resolución lateral.

Las medidas empíricas del periodo, Fig. 6.8(a), varían en un entorno muy pequeño, lo que indica elevada precisión y repetibilidad lateral en el sensor interferométrico.

6.2.2 Parámetros influyentes sobre la medida de amplitud en especímenes de referencia

En la Fig. 6.9 se observa como los valores de amplitud medidos por el sensor no guardan correlación con las amplitudes teóricas de los especímenes de

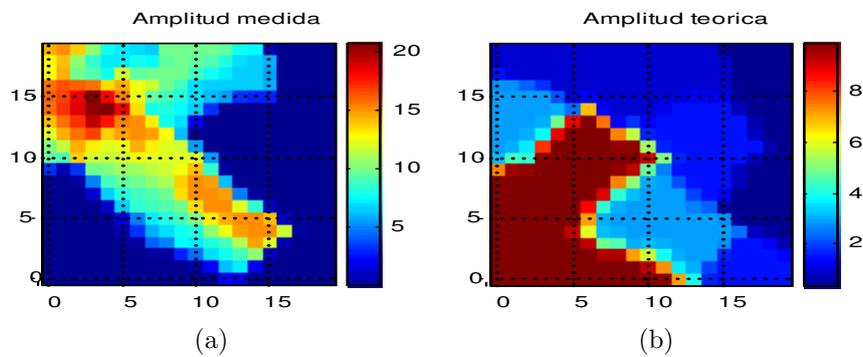


Figura 6.9: Mapas topográficos auto-organizados SOM donde se visualiza la falta de correlación entre las amplitudes medidas y las teóricas cuando se trabaja con altas precisiones.

referencia, lo que hace de nuevo manifiesto la ausencia de linealidad cuando se trabaja con precisiones muy altas.

Con el fin de identificar las causas que pudieran modificar la resolución el profundidad del prototipo, en la Fig. 6.10 se muestran los mapas SOM auto-organizados de una serie de parámetros característicos de cada superficie. La falta de correlación observada en la medida de resolución en profundidad se ha cuantificado mediante un parámetro definido en la variable “Magnificación”, que se define como la proporción existente entre la amplitud real de la muestra y la medida por el interferómetro. Su mapa característico es el de la Fig. 6.10(d). Esta amplitud medida de referencia ha sido calculada utilizando el valor de mediana de las amplitudes existentes a lo largo de cada perfil.

Destaca la altísima correlación existente entre el parámetro de magnificación, Fig. 6.10(d), y el ratio amplitud real dividido entre periodo real de la muestra, Fig. 6.10(e), en los entornos de periodo y amplitud que se han especificado en la tabla 6.1. En estos mapas es posible identificar las mismas áreas, y existe una relación lineal entre los datos pertenecientes a ambos parámetros.

Como información adicional, cabe destacar la independencia de la longi-

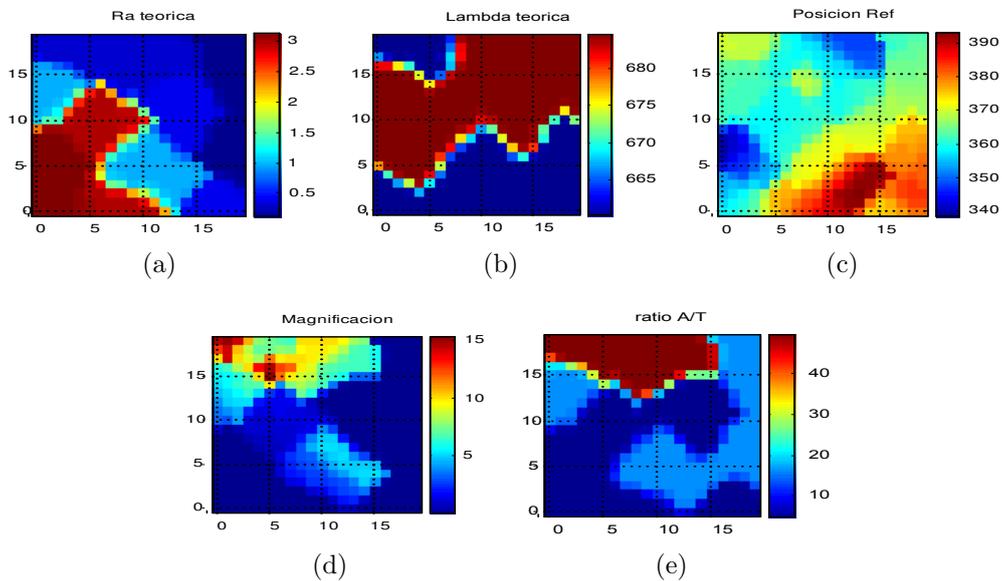


Figura 6.10: Mapas topográficos auto-organizados SOM para la identificación de las causas que pudieran modificar las medidas de resolución en profundidad.

tud de onda del láser utilizado, Fig. 6.10(b), y de la posición de la muestra en un entorno del punto de enfoque, Fig. 6.10(c), con la magnificación.

6.2.3 Vinculación del ángulo de incidencia con la derivada superficial

El uso de mapas auto-organizados nos ha permitido identificar que existe relación entre las Figs. 6.10(d) y (e). Es decir, entre la magnificación detectada en la señal de frecuencia que se sale del comportamiento esperable del prototipo, y la relación amplitud partido de periodo de la muestra. La forma de los especímenes empleados es senoidal o diente de sierra, por lo que el cociente amplitud periodo está estrechamente ligado a la pendiente de las tallas de la muestra, es decir a la derivada de la superficie.

Una primera estimación de la relevancia de esta observación puede ha-

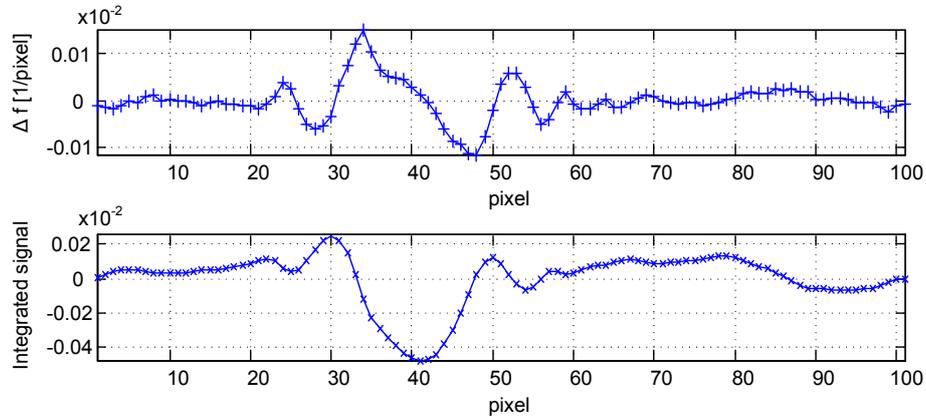


Figura 6.11: Escaneo de una muestra con una hendidura de 1 micra de profundidad, realizado en configuración colineal trabajando a 100 mm de distancia. La gráfica de arriba muestra la señal de frecuencia con la tendencia eliminada. La gráfica inferior muestra la misma señal tras haberla integrado e invertido. La hendidura aparece claramente.

cerse en torno a la aplicabilidad de este fenómeno como método para reconstruir formas. La Fig. 6.11 muestra el perfil para un objeto con una hendidura con una micra de profundidad. Este experimento realizado en el laboratorio muestra los cambios en frecuencia provocados por las pendientes existentes a lo largo del perfil. Para la configuración del prototipo empleada, saltos de una micra están fuera de la precisión del sistema, pero tal y como se observa, la derivada de la superficie es significativa. Una simple integración de la señal de frecuencia revela la verdadera forma del perfil.

Mediante el uso de los mapas SOM y ciertos experimentos de comprobación como el ejemplo de la Fig. 6.11 se ha podido identificar la vinculación del ángulo de incidencia con la derivada de la superficie.

Utilizando el hecho de que el ángulo de incidencia se modifica con la pendiente superficial, se han calculado las expresiones que utilizando las leyes de formación de imagen relacionan la derivada de la superficie con el ángulo de incidencia sobre el *Savart plate*. Utilizando dicha vinculación, se ha desarrollado un algoritmo de procesamiento que permite utilizar esta información para aumentar la precisión del sistema, que se presenta a continuación.

6.3 Método de precisión optimizada para análisis de acabados superficiales

En esta sección se describe un método simple para obtener el perfil de la superficie mejorando la resolución, que aprovecha la información de la derivada contenida en la señal de frecuencia. Es aplicable para análisis de rugosidades, propiedades de acabados superficiales o detección de defectos en superficies planas. Este método ha sido publicado en [52].

6.3.1 Algoritmo de reconstrucción

Lo primero es caracterizar la influencia de las pendientes existentes en el perfil a inspeccionar sobre la señal de frecuencia. Este estudio debe hacerse en el plano zx , que es el plano en el que se miden los ángulos de incidencia y en el que la lente cilíndrica no tiene efecto.

Para una superficie plana situada a una distancia óptica d_d del objetivo de la cámara, el ángulo de incidencia sobre el *Savart plate* puede definirse mediante la apertura del sistema A_p , que sigue la expresión:

$$A_p = \arctan \frac{x}{d_b - F}, \quad (6.3)$$

siendo x el punto de incidencia sobre el CCD en la dirección del perfil, d_b la distancia del objetivo al CCD, y F el valor de la distancia focal del objetivo.

Pequeñas variaciones de la superficie modifican la dirección principal del frente de ondas incidente, y este efecto debe ser tenido en cuenta. La Fig. 6.12 ayuda al cálculo del nuevo ángulo de incidencia, que queda definido por:

$$i = \arctan \frac{x_p - (x + d_d \frac{\partial d_o}{\partial x})}{d_b}, \quad (6.4)$$

siendo x_p la posición del punto del perfil a evaluar, y $\partial d_o / \partial x$ la pendiente del perfil en este punto.

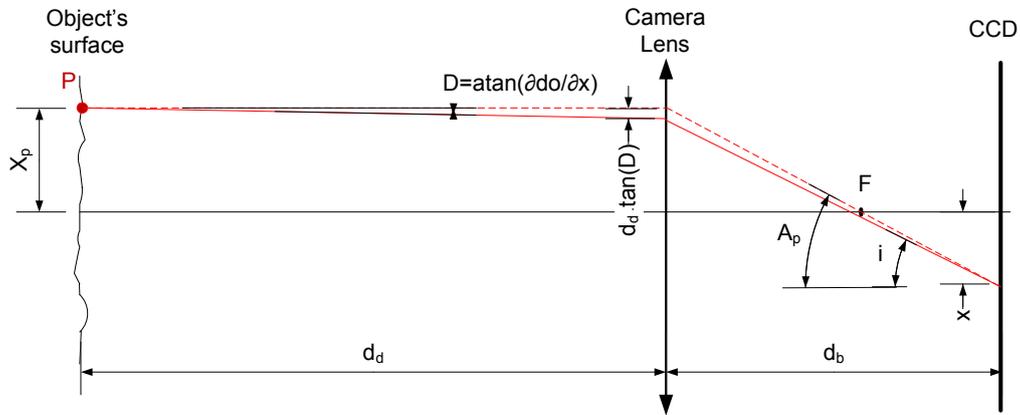


Figura 6.12: Configuración esquemática para medir el ángulo de incidencia, plano zx .

Si una superficie eminentemente plana tiene ligeras ondulaciones que están fuera del límite de resolución en profundidad del sistema, es válido considerar que todas las desviaciones que sufre la señal de frecuencia con respecto a la forma ideal son causadas por la pendiente del perfil y no por cambios en la distancia. Es posible aproximar $\partial d_o / \partial x$ como $(d_k - d_{k-1}) / \Delta x_p$, siendo Δx_p la resolución lateral a lo largo del perfil, y d_k y d_{k-1} el valor de distancia al prototipo de dos píxeles consecutivos.

Del patrón de interferencia se obtiene un vector \mathbf{f} que contiene el valor de la frecuencia de franjas para cada punto k del perfil. La distancia base d_d del objeto bajo test debe de ser conocida de antemano, o estimada utilizando un valor promedio de la señal de frecuencias. La variable \hat{z} denota la distancia al perfil (medida desde P) para un objeto puramente plano situado a la misma distancia base d_d que la muestra actual. Entonces, usando la ecuación que modela la interferencia (Ec. 4.13), y la Ec. 6.1, es posible calcular el valor del ángulo de incidencia i causado por ligeras variaciones en la derivada y

6.3. MÉTODO DE PRECISIÓN OPTIMIZADA

191

que provocan los cambios en el vector de frecuencias \mathbf{f} , como:

$$i_k = \arcsin \left(\frac{f_k \lambda \hat{z}_k - A}{B} \right), \text{ donde:}$$

$$A = \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2}, \quad (6.5)$$

$$B = \frac{n_o n_e}{\left(\frac{n_o^2 + n_e^2}{2} \right)^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{n_o}.$$

Una vez que el ángulo de incidencia es conocido, el perfil de distancias ópticas \mathbf{d} medidas al objetivo, y que contiene las irregularidades que modifican en ángulo de incidencia, se calcula aplicando la Ec. 6.4 a cada elemento k :

$$d_k = d_{k-1} - \frac{\Delta x_p [x - x_p + d_b \tan(i_k)]}{d_d}. \quad (6.6)$$

El método de reconstrucción al completo se ilustra en la Fig. 6.13. Se ha escaneado un perfil del espécimen de referencia *Rubert Co. 130*, correspondiente a una superficie mecanizada mediante la técnica de *Horizontal Milling*, en este caso el N7, con nuestro prototipo y un perfilómetro de contacto, para poder comparar. Las diferencias entre los perfiles procedentes de ambos equipos se deben principalmente a la imposibilidad de escanear exactamente el mismo área y en la misma dirección. La Fig. 6.13 muestra también la señal de frecuencia, sobre la que se aplica el método propuesto en esta sección.

6.3.2 Resultados

El error de reconstrucción depende de la forma del perfil, ya que aumenta con la derivada de la superficie, pero para superficies relativamente suaves es casi despreciable. Se ha calculado para superficies senoidales sintéticas de amplitud creciente hasta $20 \mu\text{m}$, y el error está por debajo del 0.1 %.

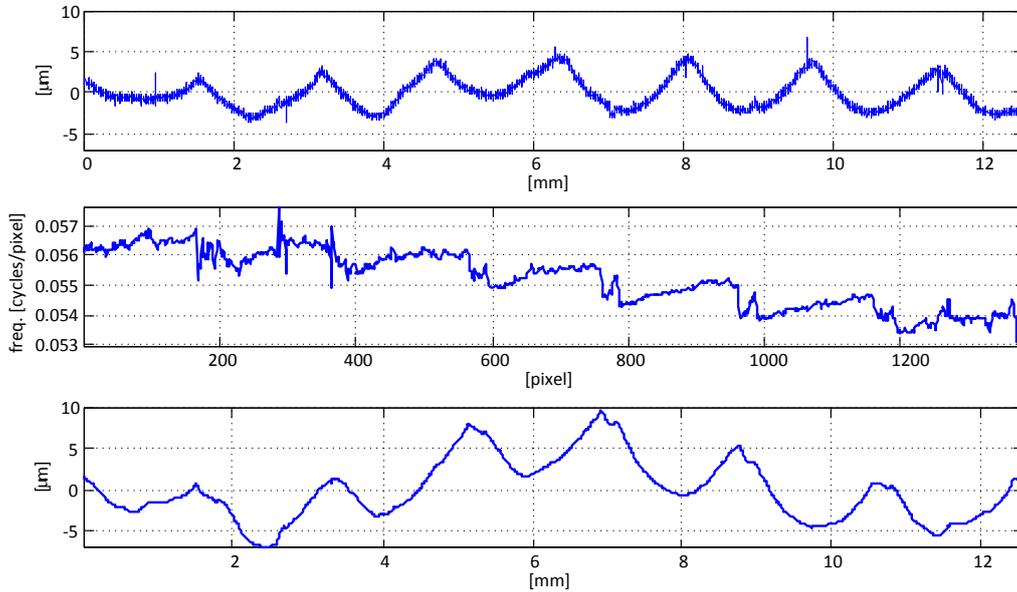


Figura 6.13: Ejemplo de reconstrucción de un perfil de distancias. En la parte de arriba se muestra el perfil proporcionado por un perfilómetro de contacto, en la gráfica central la señal de frecuencia de obtenida de un patrón de interferencia, y abajo el perfil reconstruido según en método descrito.

Una vez que se ha estimado el perfil de distancias al completo, se puede emplear un proceso iterativo para reducir los errores de reconstrucción. En cada iteración, el perfil calculado previamente se utiliza como referencia, en vez de una superficie plana. Para la estimación anterior del error de reconstrucción calculado sobre señales sintéticas, disminuye rápidamente desde el 0.1% para el primer cálculo en 2 ó 3 órdenes de magnitud después de 5 iteraciones.

La comprobación y análisis experimental se ha llevado a cabo mediante espécimen de referencia fabricados por *Rubert Co.* para tal fin, muy adecuados para la calibración y cálculo del error cometido.

Un detalle del mapa de superficie reconstruido para el espécimen de *Rubert Co. 531*, espécimen de referencia tipo C según ISO 5436 parte 1:2000 se muestra en la Fig. 6.14. Es un patrón senoidal de una micra de amplitud

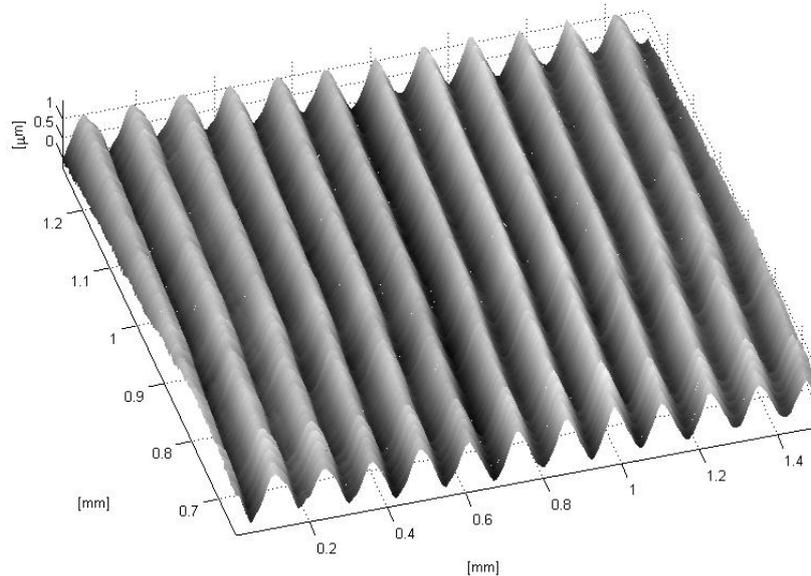


Figura 6.14: Detalle del escaneo superficial de una muestra tipo C según ISO 5436. Presentan una talla senoidal de amplitud una micra y periodo 100 micras.

y 100 micras de periodo. Esta figura se ha referenciado a cero.

La diferencia en profundidad entre los picos más altos y más bajos durante varios ciclos y perfiles del mapa anterior, tomando exactamente 910 puntos, se ha representados en el histograma de la Fig. 6.15. Sobre las barras que representan el número de muestras que miden una determinada amplitud, se ha dibujado el ajuste mediante una gaussiana, por ser la curva que mejor se ajusta a esta distribución, con el fin de facilitar el cálculo de la precisión y exactitud del sistema medida experimentalmente. Cabe recordar que en ingeniería y estadística, la precisión y exactitud no son equivalentes. La precisión se refiere a la dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas de una magnitud, por lo que se puede expresar utilizando la desviación estándar. Sin embargo, la exactitud, se refiere a cuán cerca del valor real se encuentra el valor medido.

En este caso, el valor medio de amplitud es $1.04 \mu\text{m}$, lo que indica una exactitud de 40 nm. Este pequeño desplazamiento respecto al valor de re-

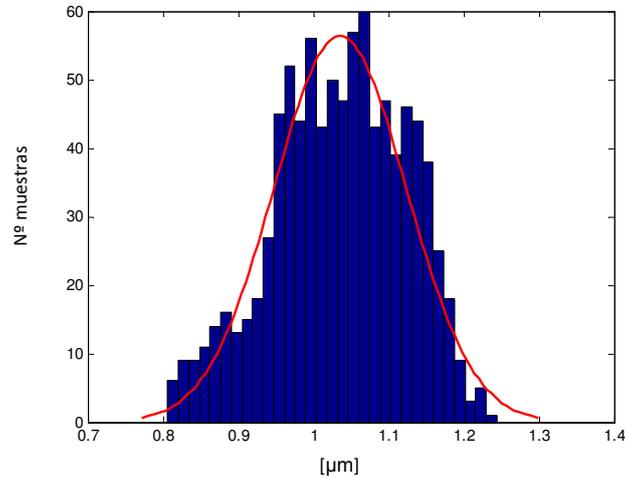


Figura 6.15: Histograma representativo de la amplitud de la superficie senoidal del espécimen de *Rubert Co. 531* utilizado para calcular la precisión del sistema.

ferencia de $1 \mu\text{m}$ puede ser debido a inexactitudes en los parámetros del modelo. La desviación estándar es $\sigma = 88 \text{ nm}$, lo que puede subestimar la precisión del sistema por causa de pérdidas de luz ocasionales en los valles o incluso algo de polvo puede haberse depositado sobre la superficie, en adición al escaneo en movimiento. Este espécimen es especialmente complejo, por lo que estos datos son el caso más desfavorable.

Como el algoritmo descrito en la Ec. 6.6 efectúa una integración sobre las pendientes superficiales para obtener la información de distancias de profundidad, es susceptible de contener errores de integración. Esto no afecta a los detalles del acabado superficial, por lo que el método presentado sirve perfectamente para el propósito de medidas de rugosidad o detección de defectos. La Fig. 6.16 muestra el resultado de dicho error de integración sobre el perfil reconstruido de una lámina metálica. La gráfica contiene el mismo perfil de la superficie rugosa, obtenido en 50 adquisiciones diferentes realizadas durante 15 minutos. Los pequeños detalles, que son muy inferiores a una micra, están perfectamente preservados, aunque existe un *offset* en el valor absoluto de las medidas de distancia realizadas en distintas adquisiciones. A pesar de que estos errores de integración aumentan la incertidumbre global del sistema hasta $\sigma = 0,2 \mu\text{m}$, el interferómetro en sí mismo es muy

6.3. MÉTODO DE PRECISIÓN OPTIMIZADA

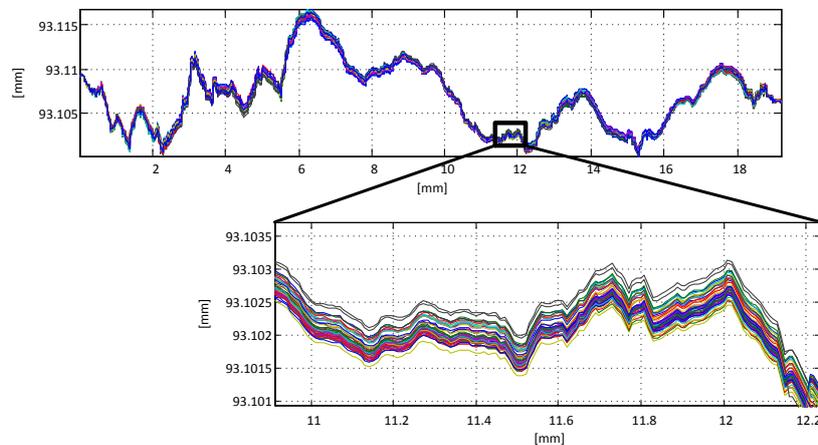


Figura 6.16: Efecto del error de integración en el perfil de distancias reconstruido correspondiente a una lámina metálica.

estable, ya que las medidas presentan sólo una desviación de $\sigma = 10$ nm si se eliminan mediante un filtro pasa-altos las variaciones de baja frecuencia de esa superficie, quedándose únicamente con los detalles superficiales.

Otro ejemplo sobre el que se han comprobado los resultados es el espécimen de *Rubert Co. 511*. Consistente en una superficie de referencia con un surco de una micra de profundidad y 100 micras de ancho. Es un espécimen de referencia tipo A según la norma ISO 5436 parte 1:2000. Su reconstrucción, realizada con el montaje colineal, se puede visualizar en la Fig. 6.17.

Estos ejemplos demuestran como el método de reconstrucción propuesto es sencillo, y válido para el análisis de propiedades de superficies mecanizadas, o medidas de rugosidad sobre placas metálicas. Permite mejorar la resolución en profundidad del prototipo para una misma distancia de trabajo. Para la configuración analizada, se han obtenido resoluciones bastante inferiores a la micra para distancias de trabajo superiores a los 90 mm, con una precisión que podemos considerar de $0.2 \mu\text{m}$. Sin embargo, tiene una serie de restricciones que se describen a continuación.

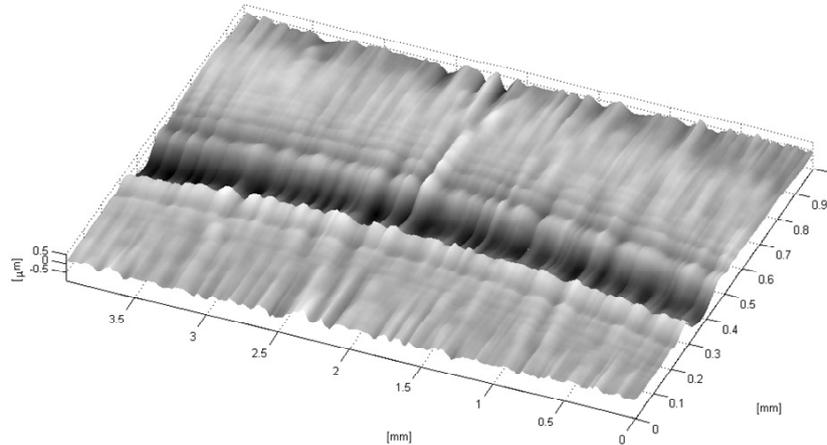


Figura 6.17: Detalle del escaneo 3D del espécimen *Rubert Co. 511*, un patrón de referencia con un surco de profundidad una micra y ancho de 100 micras.

6.3.3 Limitaciones

Cuando se aplica este procedimiento a análisis de superficies con pendientes inferiores a los $\pm 5^\circ$, los errores cometidos por en las medidas se deben principalmente a ruidos en la señal adquirida por el interferómetro: ya sea ruido speckle, brillos indeseados o falta de luz. Cualquiera de estos fenómenos puede generar errores. Con el fin de evitar que estos errores repercutan en el resultado final de forma significativa, conviene aplicar algún método señal-ruido para identificar las zonas susceptibles de sufrir este problema. Según las características del objeto que se pretenden medir, también es posible realizar filtros en el perfil de distancias, desechando las variaciones cuyas frecuencias no coincidan con la frecuencia de variación de la parte característica del objeto que es interesante para la medida. Este filtro se ha aplicado a modo de ejemplo en la Fig. 6.18, y las variaciones de distancia son referenciadas a cero.

También es importante destacar que la distancia base que se utiliza como dato de partida para la ejecución del algoritmo debe ser calculada con precaución, tomando como dato válido para el cálculo, por ejemplo, un valor promedio de una pequeña zona de frecuencias donde se sabe que la superficie tiene derivada nula. Si esto no es posible, cabe esperar un error de offset en

6.3. MÉTODO DE PRECISIÓN OPTIMIZADA

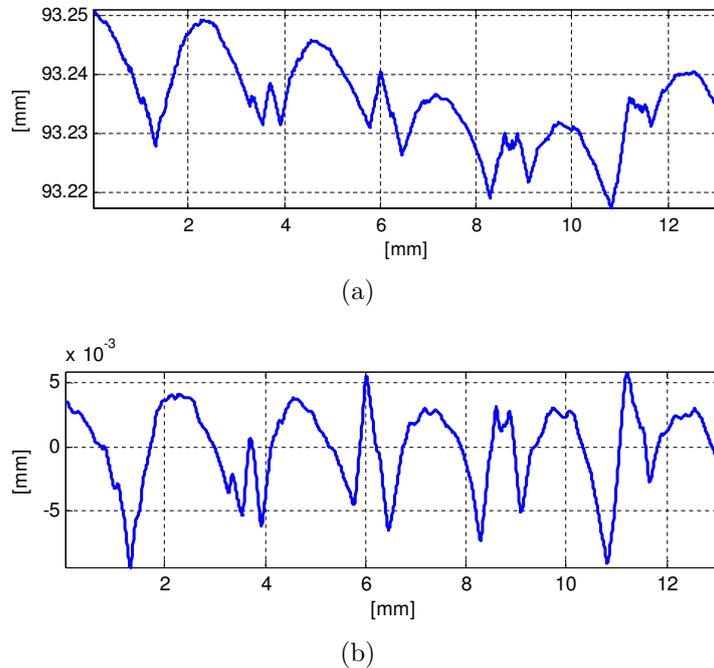


Figura 6.18: Perfil de la muestra de *Rubert Co. N8 Horizontal Milling*. (a): ruidos de integración provocan una tendencia hacia abajo del perfil de distancias. (b): mismo perfil tras haber filtrado las variaciones inferiores a los 0.1 mm y las superiores a los 3 mm.

el perfil de distancias. En cualquier caso, es constante para todos los puntos de dicho perfil, por lo que no modifica la precisión a lo largo del perfil. Este fenómeno ya ha sido ejemplificado en la Fig. 6.16.

Pero la restricción más importante viene dada por el criterio fundamental para poder aplicar el método propuesto es que la superficie sea eminentemente plana o con ligeras pendientes, no superiores a $\pm 5^\circ$. Este límite se ha detectado experimentalmente, y coincide con la mitad de la apertura del objetivo del sistema.

Un ejemplo de superficie en la que no se ha podido obtener una reconstrucción válida es la mostrada en la Fig. 6.19. Se trata de una placa galvanizada sobre la que se han estampado un texto. Este tipo de dispositi-

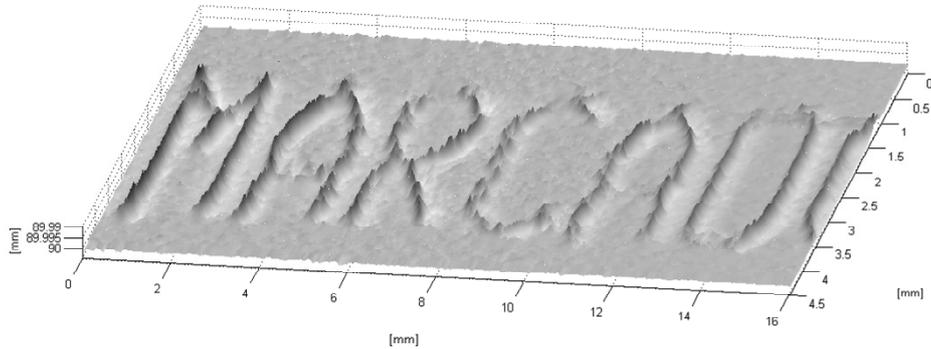
vos funcionan por impacto, y cada letra se compone de una serie de puntos producidos por una serie de bastones metálicos. Por tanto, cada trazo queda definido por una serie de puntos de material eliminado de la placa, y en el contorno de cada punto existe un exceso de material que sobresale por encima del nivel plano de la placa, es la rebaba. Así, aunque la tallado sea en profundidad, la rebaba afecta al conjunto sobresaliendo por encima de lo que consideramos el nivel original de referencia antes de la impresión. Esta superficie contiene desniveles superiores al ángulo máximo de derivada que es capaz de captar nuestro prototipo, por lo que sólo ha adquirido señal procedente de las zonas de exceso de material, y la reconstrucción muestra el texto como si este hubiera sido realizado por aportación de material, ya que hay menos distancia al prototipo desde las letras que desde la zona plana de la placa. Aunque es posible reconocer el texto, la dimensión y de la huella de estampado proporcionad por el prototipo son erróneas.

Además de verificar mediante las pruebas experimentales la mejorar de precisión en profundidad utilizando el método propuesto, se han realizado estudios para aumentar la velocidad de procesamiento cuando se trabaja con la señal de frecuencia. Son descritos en la siguiente sección.

6.4 Reducción del tiempo de procesamiento

Para el tipo de interferogramas generados por el prototipo objeto de estudio, cuando se utiliza una sola longitud de onda en la iluminación, cada señal de interferencia contenida en una columna del CCD corresponde a un punto del perfil y se puede modelar como una cosenoidal de frecuencia única. Por tanto, es posible estimar la frecuencia de esa onda a partir de los valores de fase instantánea en una serie de puntos del CCD.

Para ello, es necesario proceder al despliegue de los puntos de fase de los que se dispone en cada columna de CCD, y ajustar cada serie de valores a una recta. La pendiente de la recta de cada ajuste, dividida entre 2π , se corresponde con el valor de la frecuencia estimada en dicha columna. Los pasos a seguir se han esquematizado en la Fig. 6.20. Para obtener las



(a)



(b)

Figura 6.19: (a) Mapas de distancia obtenido con el prototipo para una superficie con letras estampadas mediante una impresora de puntos matricial mostrado en (b). Aunque es posible reconocer el texto, la dimensión y sentido de la huella de estampado son erróneas en la reconstrucción.

fases instantáneas requeridas por el procedimiento se puede utilizar cualquier algoritmo de *Spatial Carrier Phase Shifting*, ya descritos en el capítulo 4.

Con el fin de determinar el error cometido en esta estimación, en comparación con la frecuencia calculada por el método basado de Transformadas de Fourier, se han realizado una serie de pruebas, tanto con interferogramas sintéticos como reales. Los errores cometidos se muestran en la Fig. 6.21. Estos ensayos han permitido identificar que el error disminuye cuantos más puntos se utilicen para el despliegue y posterior ajuste, y cuanto más cercanos al centro óptico del interferograma se encuentren esos puntos. La desviación cuadrática media de error en los interferogramas sintéticos es igual

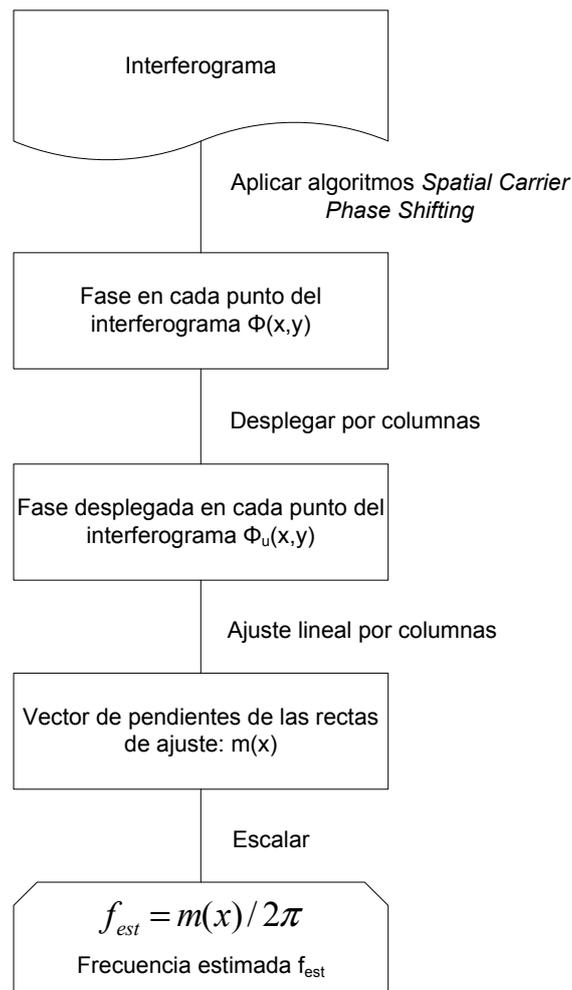


Figura 6.20: Esquema de los pasos de procesamiento para la obtención de la frecuencia estimada reduciendo el tiempo de procesamiento mediante la aplicación de métodos de *Spatial Carrier Phase Shifting*.

6.4. REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE PROCESAMIENTO

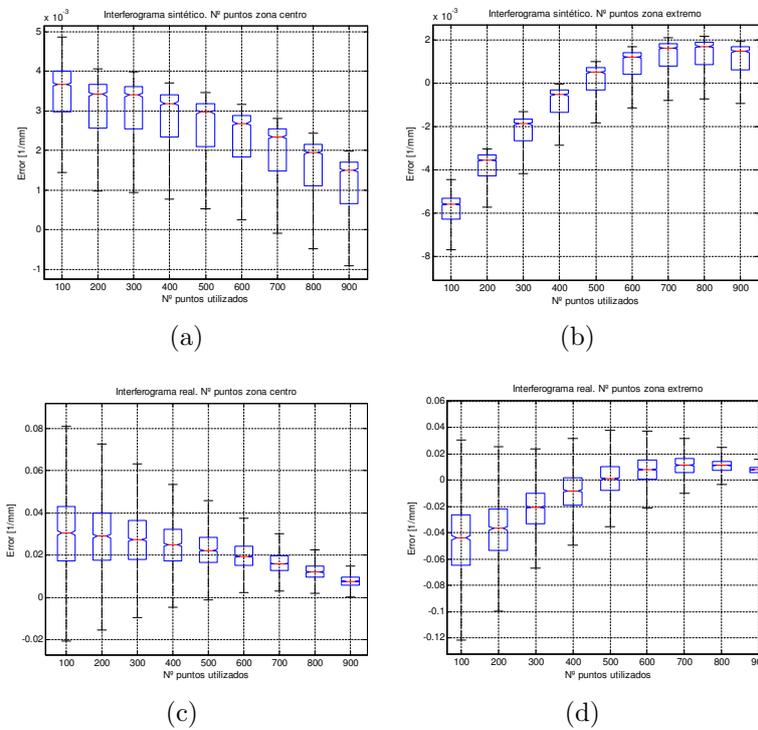


Figura 6.21: Error cometido mediante el método propuesto para estimar la frecuencia de franjas según la zona del interferograma y el número de puntos empleados. (a) y (b) sobre interferogramas sintéticos, y (c) y (d) sobre reales.

independientemente del número de puntos utilizados y de la zona a la que pertenezcan, pero los límites entre los que se sitúan la mayor parte de los valores son más cercanos a cero según aumenta el número de puntos empleados. Para los interferogramas reales, tanto el valor promedio como la dispersión del error disminuye al aumentar el número de puntos empleados en torno a la zona central.

Para las pruebas con interferogramas reales el número de puntos pasa a tener más relevancia que la zona donde se encuentren, ya que han de compensar otro tipo de errores ya infiltrados en la propia señal de interferencia. Un ejemplo de aplicación en interferogramas reales se muestra en la Fig. 6.22, donde utilizando 900 puntos de fase para la estimación de la señal

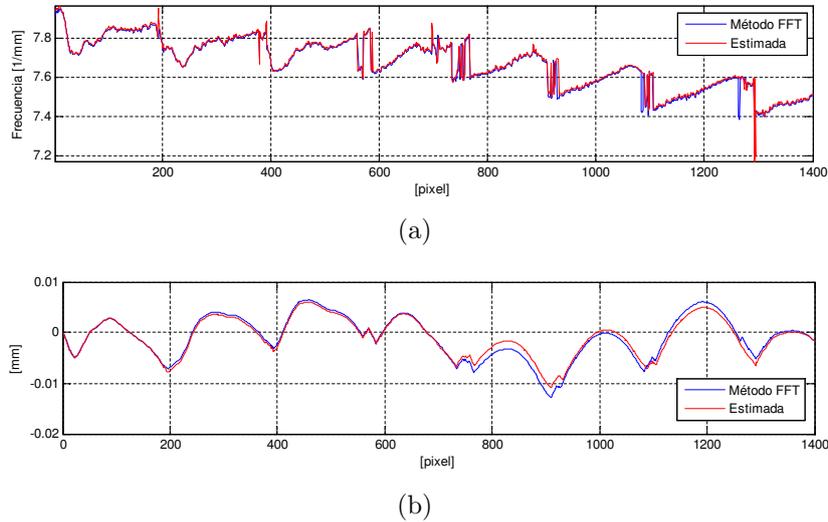


Figura 6.22: Comparación de resultados para el método de reducción del tiempo de procesamiento y el basado en Transformadas de Fourier. (a) señal de frecuencia, y (b) reconstrucción del perfil de distancias.

de frecuencia se consigue un error cuadrático medio de 0.0277 mm^{-1} y un error máximo de 0.22 mm^{-1} que corresponde a la zona en las que existen ruidos en el interferograma. Si se compararan las reconstrucciones de distancias obtenidas con ambas señales, el error cuadrático medio del perfil de distancias es $0.81 \mu\text{m}$, y el máximo de $2.2 \mu\text{m}$, pero es referente a la posición de referencia del perfil o a los errores de integración, no a la amplitud de sus ondulaciones filtradas, tal y como se observa en la Fig. 6.22(b). El error máximo en la amplitud está muy por debajo del límite determinado para el prototipo de $0.2 \mu\text{m}$, por lo que lo consideramos despreciable.

En cuanto al ahorro en el tiempo de procesamiento, lo calcularemos según [21], en función de las operaciones matemáticas significativas para cada método. Siendo N el número de muestras, la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de un vector de números reales requiere $N \times \log_2 N$ multiplicaciones en coma flotante, y un ajuste por mínimos cuadrados optimizado (LSF) requiere N multiplicaciones.

Para obtener el valor de frecuencia de un único punto del perfil, los méto-

6.4. REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE PROCESAMIENTO

203

dos previamente descritos basados en la Transformada de Fourier emplean una FFT, típicamente de 2^{12} puntos, y seguidamente un ajuste parabólico en torno al pico detectado, de 4 puntos cada uno. Este ajuste reduce significativamente la longitud de la FFT necesaria para alcanzar una determinada precisión submuestra [41]. Este método necesita realizar un total de 26 operaciones por punto del perfil. El método propuesto permite reducir drásticamente ese tiempo 10 veces sin escatimar en el número de valores utilizados para los cálculos.

Utilizando uno de los algoritmos más precisos (y más costosos computacionalmente) de *Spatial Carrier Phase Shifting*, el de 32 pasos descrito por Fernández [50], se requiere una única Transformada de Fourier para todo el interferograma. Por tanto, utilizando de nuevo una FFT de 2^{12} puntos, resulta que cada punto del perfil necesitaría 25 operaciones para estimar la frecuencia portadora del algoritmo SCPS. Por cada píxel del interferograma, se requieren 4 operaciones para calcular el valor de fase instantánea. Si N_f es el número de valores de fase seleccionado para aplicar el método propuesto, se necesitarán $N_f \cdot 4$ operaciones para obtener el vector con la fase desplegada, y un ajuste LSF de N_f puntos para calcular la pendiente. Sólo queda añadir la última cuenta para escalar dicha pendiente en unidades de frecuencia. Por tanto, nuestro método demanda $N_f \times 5 + 26$ operaciones significativas. Si utilizamos el número máximo de valores de fase por punto del perfil, que es 900, resulta un total de 2.3 operaciones significativas por punto del perfil, valor más de 10 veces inferior al requerido por el método basado en Transformadas de Fourier.

Este valor se puede reducir aún más si se decide emplear algoritmos de *Phase Shifting* menos costosos, como por ejemplo el algoritmo de Carré, que no requiere conocer la frecuencia portadora y nos ahorraría de antemano la FFT inicial. También es posible utilizar menos puntos de fase para realizar el despliegue y el posterior ajuste.

De acuerdo con las pruebas realizadas, se recomienda que los puntos de fase utilizados pertenezcan a una zona lo más extensa posible y centrada en el eje óptico de cada señal de interferencia. Si se realiza un sub-muestreo de los términos de fase por señal de interferencia, nunca debe ser de un paso superior a $\frac{T}{4}$, siendo T el periodo de la frecuencia portadora, con el fin de

garantizar el despliegue correcto.

El número de puntos empleados para el despliegue y ajuste depende de las especificaciones demandadas por cada aplicación, pero podría incluso ser posible la estimación de la frecuencia empleando una cámara lineal y analizando las variaciones de fase relativas dentro de un ciclo de la señal de interferencia. Este sistema podría alcanzar velocidades de adquisición y procesamiento muy elevadas, según el modelo de cámara empleado, y podría ser utilizado para sistemas de triangulación con una única longitud de onda, y para la aplicación del método de precisión optimizada utilizando una estimación de la frecuencia a partir de la fase instantánea.

6.5 Resultados

En esta sección se presentarán diferentes ejemplos de aplicación realizados con el método de precisión optimizada propuesto previamente para el montaje colineal. Se incluyen los resultados del prototipo aplicado a medidas de superficies metálicas mecanizadas mediante diferentes procedimientos, y medidas de rugosidad. Los resultados han sido altamente satisfactorios. También se presentan nuevas vías de investigación abiertas a partir de los resultados obtenidos.

6.5.1 Acabados superficiales

Se han analizado tres muestras diferentes de superficies mecanizadas mediante *Horizontal Milling* del set de *Rubert Co. 130*: N10, N9 y N7, que tienen una rugosidad típica pico-valle de 45, 30 y 6 μm respectivamente. El prototipo ha capturado los perfiles mientras las muestras se desplazaban lateralmente, y los mapas 3D resultantes se muestran en la Fig. 6.23. Aún cubriendo un área considerablemente grande, estos mapas han sido obtenidos en muy pocos segundos, sin necesidad de recalibrar ni reconfigurar el sistema, simplemente cambiando una muestra por otra en el soporte de

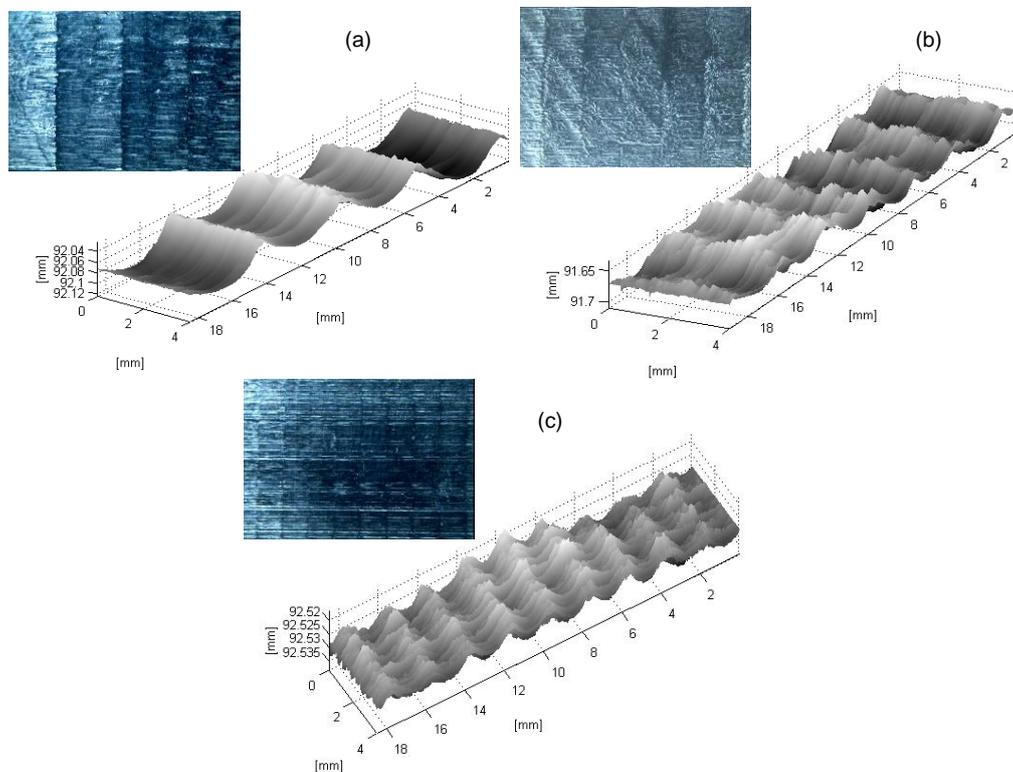


Figura 6.23: Mapas de distancia de tres especímenes mecanizados mediante *Horizontal Milling* del set Rubert *Co. 130*. (a):N10, (b): N9, y (c): N7. Incluye una fotografía de cada espécimen.

la mesa de coordenadas empleada para el desplazamiento lateral. Un perfil concreto de cada uno de estos especímenes se compara con el resultado de un perfilómetro de contacto en la Fig. 6.24.

Otro ejemplo de un cuña mecanizada mediante *Horizontal Milling* se muestra en la Fig. 6.25, superficie compleja por la curvatura de la pieza, y sobre la que se observa la huella dejada por las vibraciones indeseadas de la herramienta.

La Fig. 6.26 muestra los mapas de superficie de las muestras N10 a N7 mecanizadas mediante *Vertical Milling* del set de *Rubert Co. 130*, incluyendo

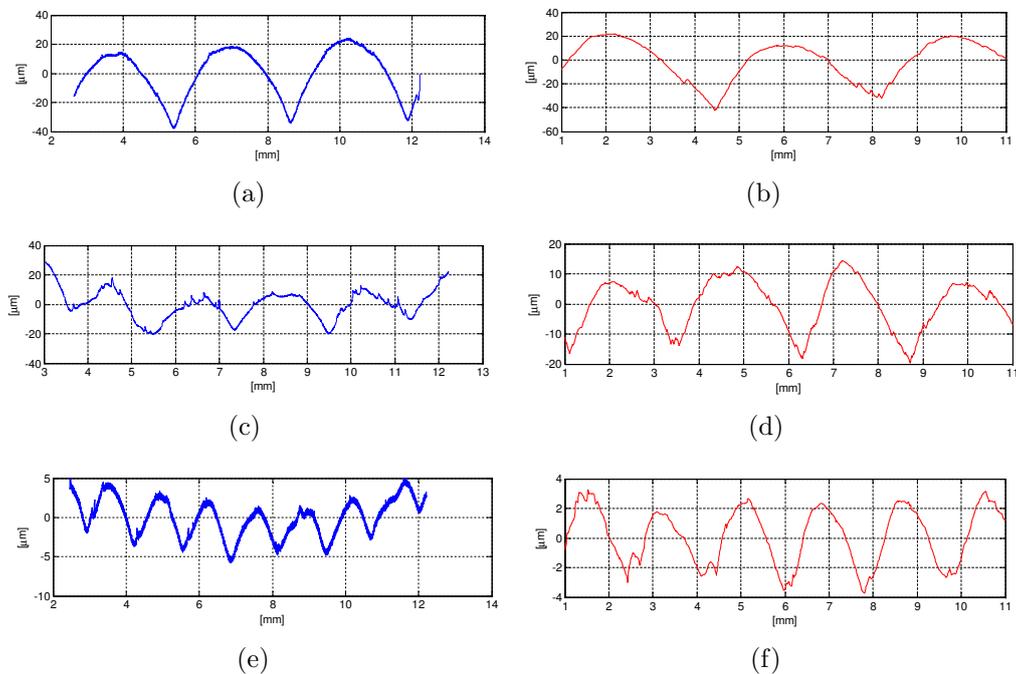


Figura 6.24: Perfiles de distancia de tres especímenes mecanizados mediante *Horizontal Milling* del set Rubert *Co. 130*. (a,b):N10, (c,d): N9, y (d,e): N7. En azul (izquierda) se encuentran los resultados del perfilómetro de contacto, y en rojo (derecha), los del prototipo.

una fotografía de cada una de ellas. Esta misma tecnología se ha utilizado para otras muestras talladas en un laboratorio de mecánica, mostradas en la Fig. 6.27.

Dos superficies de diferentes rugosidades cuyo acabado se ha generado mediante electro-erosión se muestran en la Fig. 6.28.

6.5.2 Medidas de rugosidad y ondulación

La medición de la rugosidad de una superficie puede hacerse de muy distintas formas, tal y como ha descrito Marina [102]. La determinación del estado

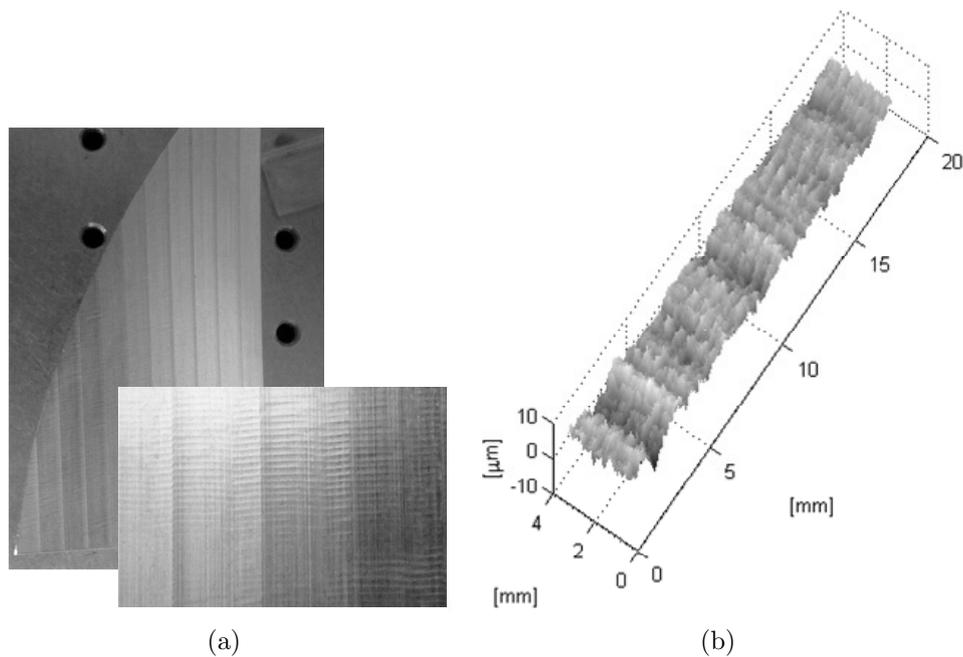


Figura 6.25: Detalle de una cuña mecanizada mediante *Horizontal Milling*. (a): fotografía, y (b): reconstrucción 3D.

superficial es importante, hoy en día, por lo que se están destinando muchos esfuerzos a mejorar y regular los sistemas de medición para que exista un lenguaje común en cuanto a los parámetros y los valores que caracterizan a la superficie.

Como el prototipo objeto de estudio en esta Tesis proporciona el perfil superficial, tomando los parámetros adecuados, puede ser utilizado tanto para medidas de ondulación como de rugosidad.

Un ejemplo de medida de ondulación se puede observar en la Fig. 6.29.

Las principales caracterizaciones utilizadas para la clasificación de la superficie son:

- **Descriptores estadísticos:** proporcionan una media de la estadística

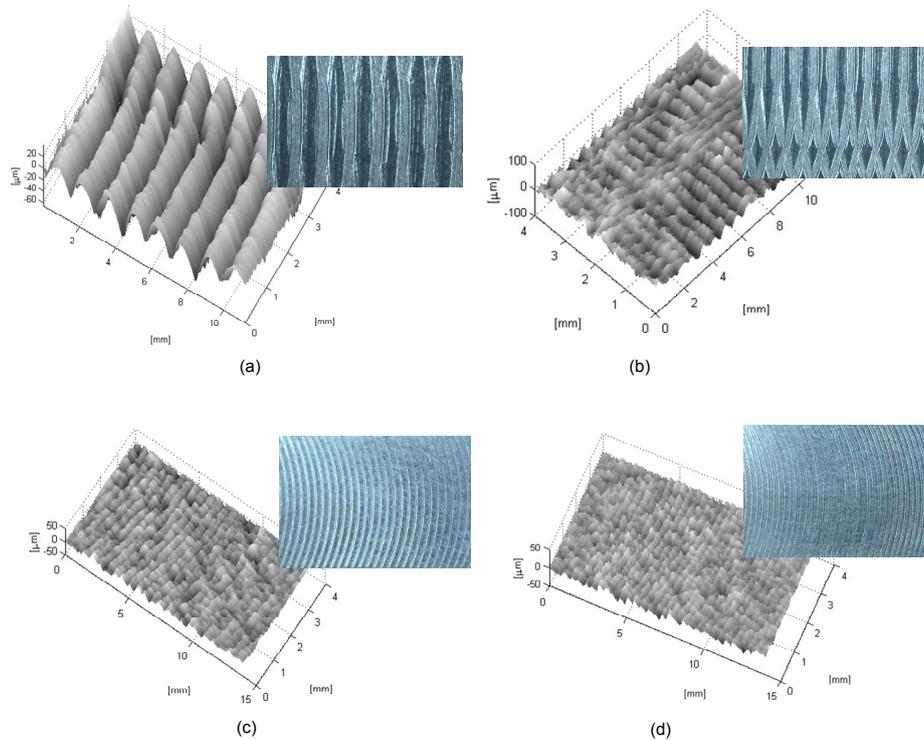


Figura 6.26: Mapas de distancia de cuatro especímenes mecanizados mediante *Vertical Milling* del set Rubert *Co. 130*. (a):N10, (b): N9, (c): N8, y (d): N7. Incluye una fotografía de cada espécimen.

que determina la calidad de la superficie, aunque no hace un estudio de las características puntuales y locales de la misma. Los valores numéricos obtenidos a través de estos descriptores sirven para clasificar la superficie de manera objetiva. Por ejemplo, la desviación estandar de la rugosidad (R_a).

- **Descriptores de los valores extremos y detalles:** al contrario de los anteriores, estos descriptores atienden a las particularidades de la superficie centrándose de los detalles puntuales y en los defectos locales. Estos descriptores son, por tanto, complementarios de los anteriores. Al igual que los anteriores, permiten realizar una clasificación objetiva de la superficie. Un ejemplo de estos descriptores es, la altura máxima de pico (R_p) o la profundidad máxima de valle (R_v).

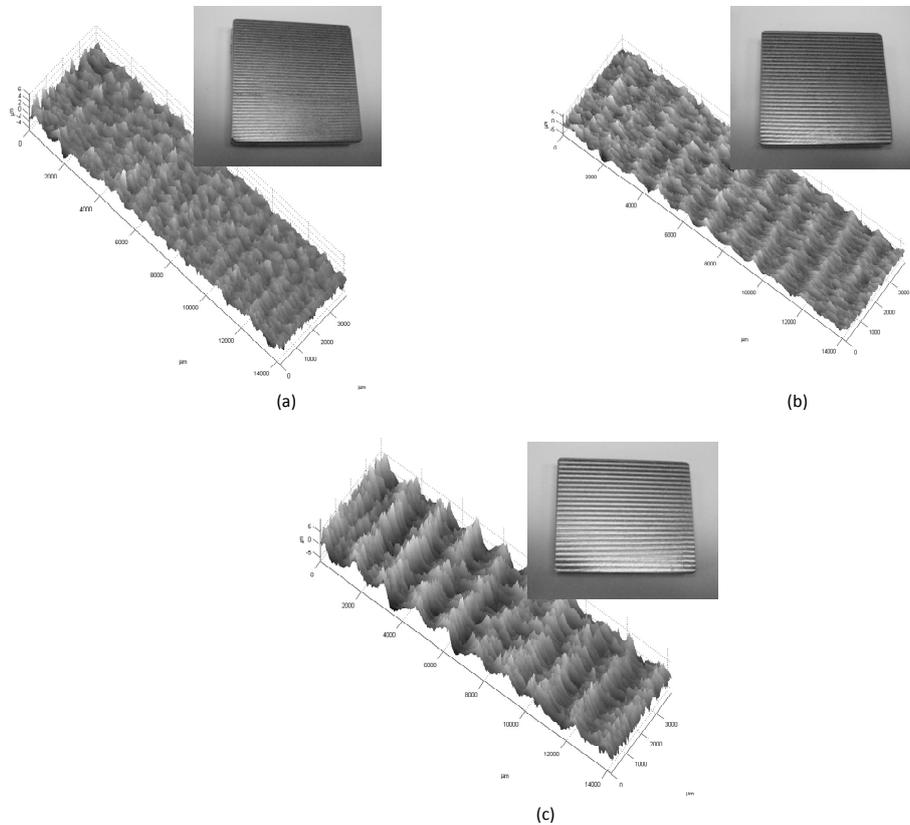


Figura 6.27: Mapas de distancia de tres especímenes mecanizados en el laboratorio mediante *Vertical Milling*. Incluye una fotografía de cada espécimen.

- **Descriptores de texturas:** al contrario de los dos tipos de descriptores anteriores, estos se basan en la comparación de las texturas entre la superficie y unos patrones. Esta comparación suele realizarse de forma visual con lo que la clasificación obtenida puede dar lugar a juicios subjetivos, en general estos descriptores no suelen utilizarse en la industria.

Los descriptores estadísticos y de valores extremos y detalles están perfectamente definidos en un conjunto de normas que permiten la comunicación entre los proveedores y los clientes sin ambigüedades. Las principales normas utilizadas para la medición de rugosidad son: UNE-EN ISO 3274, UNE-EN

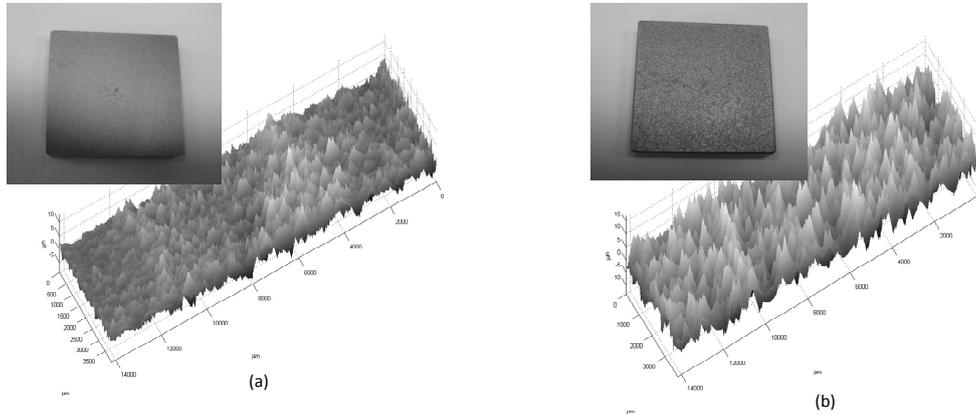


Figura 6.28: Detalle de acabados superficiales generados por electro-erosión

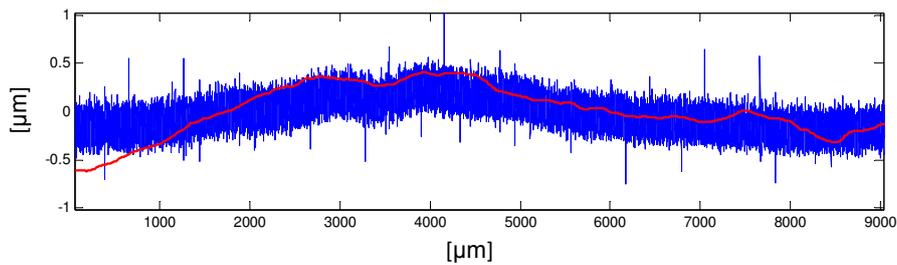


Figura 6.29: Detalle de ondulación de la superficie de un espejo. En rojo se representa el perfil obtenido con el prototipo, y en azul con un perfilómetro de contacto.

ISO 4287, UNE-EN ISO 4288, UNE-EN ISO 11562 y UNE-EN ISO 12085. El cálculo de estos descriptores, estadísticos y de valores extremos, se realiza a partir de un perfil de la superficie, que es un conjunto de puntos ordenados en el espacio y que representan la altura de la superficie; este perfil es filtrado para obtener dos nuevos perfiles, uno que contiene las bajas frecuencias correspondientes a la ondulación de la superficie, y otro que contiene las frecuencias más altas, que corresponden explícitamente a la rugosidad, sobre estos últimos perfiles se calculan los descriptores estadísticos que determinan el estado superficial, y sobre el perfil original se calculan los descriptores de valores extremos y detalles.

En la Fig. 6.30 se puede ver un detalle, a nivel microscópico, de una

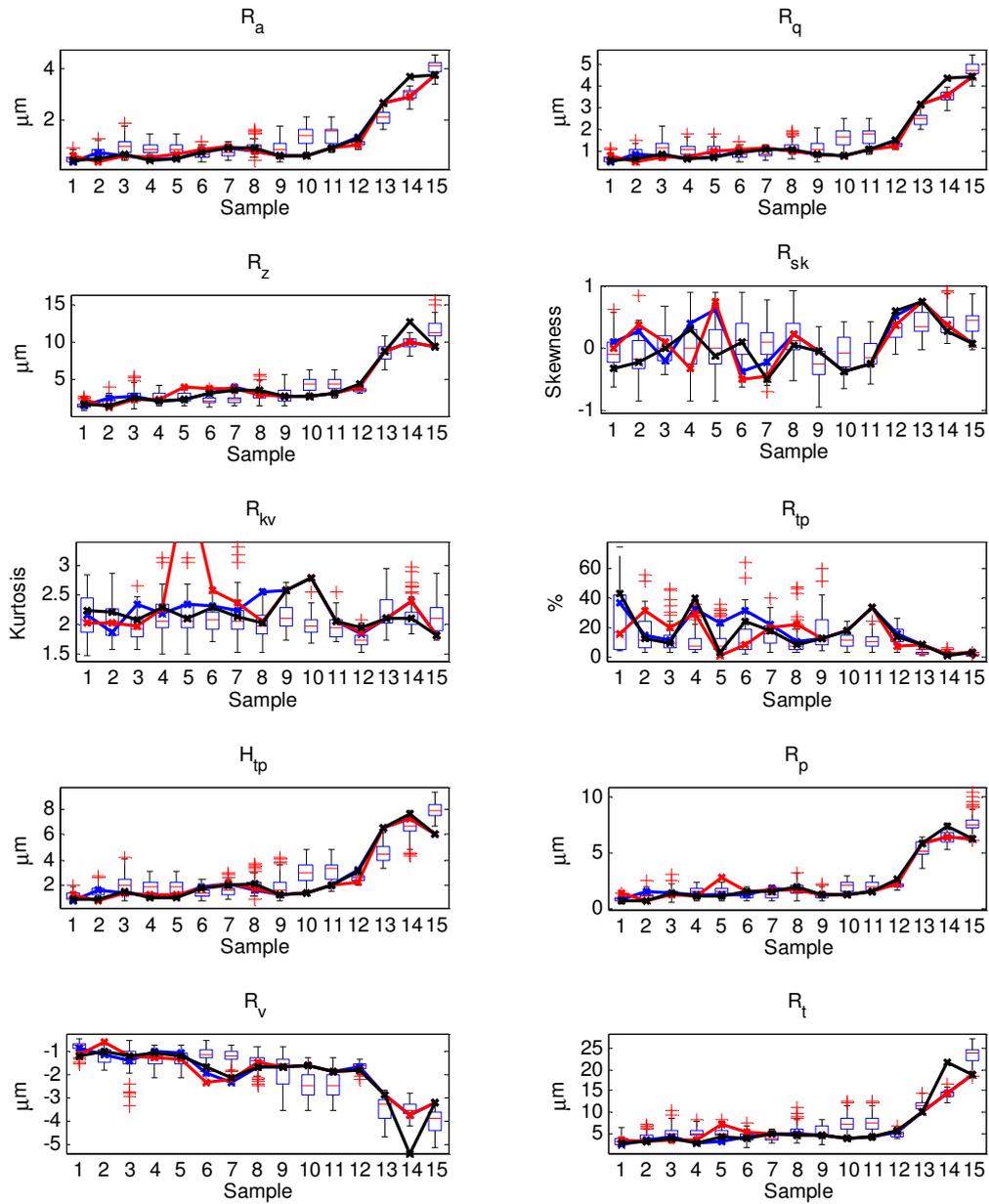


Figura 6.31: Resultados de cada parámetro de ondulación calculado para 15 tipos de muestras. Los datos del prototipo se han representado mediante diagrama de cajas, y se han comparado con los resultados de un perfilómetro de contacto, representados mediante traza continua.

A continuación se hará una definición cualitativa de los principales parámetros utilizados como descriptores de la superficie.

- **Longitud de muestreo:** longitud en la dirección de exploración utilizada para identificar las irregularidades que caracterizan al perfil en evaluación.
- **Ra:** desviación métrica aritmética del perfil de rugosidad, siendo l la longitud de exploración y $Z(x)$ la altura del perfil.

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx. \quad (6.7)$$

- **Rq:** desviación media cuadrática del perfil, media cuadrática de los valores de los puntos del perfil comprendidos en una longitud de muestreo.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx}. \quad (6.8)$$

- **Rp:** mayor altura de un pico en el perfil de rugosidad.
- **Rv:** mayor de las profundidades de los valles del perfil de rugosidad.
- **Rz:** máxima altura del perfil, es la suma de la altura máxima de pico R_p y la máxima profundidad de valle R_v comprendidas en una longitud de muestreo.
- **Rt:** indica la altura total del perfil.
- **Rtp:** indica la distancia media entre el pico más alto y el valle más bajo en la longitud de muestra analizada.
- **Rsq:** el coeficiente de *skewness* es un indicador estadístico de la asimetría de la distribución de alturas de la superficie en un histograma.
- **Rsk:** el coeficiente de *kurtosis* es un indicador estadístico del aplastamiento de la superficie.

- **Rtp:** indica la cantidad relativa de material que se encuentra una micra por debajo del pico máximo.
- **Htp:** indica la diferencia de altura entre las secciones del 20 % y 80 % del perfil.

La Fig. 6.31 muestra los resultados obtenidos de los ensayos de ondulación. Sobre el diagrama de cajas correspondiente a los datos del prototipo, se han representado, para cada parámetro, los valores obtenidos con el perfilómetro de contacto, dibujados como una traza continua. Los resultados se consideran satisfactorios, ya que al ser medidas realizadas sobre perfiles diferentes de una misma superficie, es esperable que los valores varíen en un cierto intervalo. Salvo excepciones, los datos del perfilómetro de contacto están dentro de los límites de dispersión calculados con los datos del prototipo.

6.5.3 Líneas de investigación abiertas

Además de las aplicaciones anteriormente descritas, las pruebas realizadas permiten abrir nuevas líneas de investigación. A continuación se sugieren las más destacadas.

Incremento de la pendiente límite de aplicabilidad

La restricción de aplicabilidad en superficies cuya pendiente sea menor a $\pm 5^\circ$ es impuesta por el desconocimiento de la causa que generó un determinado cambio en la señal de frecuencia. Hasta el momento, no se ha conseguido separar con éxito los efectos de la derivada superficial, es decir, del ángulo de incidencia, de los efectos generados por cambios de distancia.

La frecuencia de franjas, cuyo valor ya se ha deducido en el capítulo 3, debe expresarse teniendo en cuenta el comportamiento real del *Savart plate*,

6.5. RESULTADOS

215

resultando por tanto:

$$f = \frac{s}{\lambda z} = \frac{A + B \sin i}{\lambda z}, \text{ donde:}$$

$$A = \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2}, \tag{6.9}$$

$$B = \frac{n_o n_e}{\left(\frac{n_o^2 + n_e^2}{2}\right)^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{n_o}.$$

Utilizando las Ecs. 4.5 y 6.4 se obtiene:

$$f = \frac{A + B \sin \left\{ \arctan \left[\frac{x_p - (x + d_d) \frac{\partial d_o}{\partial x}}{d_b} \right] \right\}}{\lambda \left[d_b - \frac{F(-d_o d_l + F_{cyl} d_l + F_{cyl} d_o)}{-d_o d_l + F_{cyl} d_l + F_{cyl} d_o + F d_o - F_{cyl} F} \right]}. \tag{6.10}$$

Aunque es posible expresar analíticamente el efecto de ambos fenómenos sobre la señal de frecuencia en función de el vector de distancias d_o , la complejidad de la Ec. 6.10 no permite despejar dicha variable sin tener que efectuar simplificaciones que a la postre impiden distinguir entre el efecto de la derivada y un salto en la distancia. También se han realizado numerosos intentos tratando de despejar de forma cuantitativa para datos reales. En todos los casos, los resultados han sido insatisfactorios, ya que las diferencias entre los órdenes de magnitud de ambos fenómenos hacen que un ruido o imprecisión vinculado a un cambio en distancias afecte a las variaciones vinculadas a la derivada de forma que el error total sea inasumible.

Otros intentos se han fundamentado en el empleo de doble longitud de onda, ya que analíticamente, se dispone de información adicional para saber que parte la variación de frecuencia está vinculada a la derivada de la superficie. Si denotamos con los subíndices 1 y 2 respectivamente los datos procedentes de cada longitud de onda, y efectuamos el cociente de ambas expresiones de frecuencia se tiene:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{\lambda_1 z (A_1 + B_1 \sin i)}{\lambda_2 z (A_2 + B_2 \sin i)}, \tag{6.11}$$

de donde se es posible despejar el ángulo de incidencia, que sigue la expresión:

$$i = \arcsin \left(\frac{-f_1 \lambda_1 A_2 + f_2 \lambda_2 A_1}{f_1 B_2 \lambda_1 - f_2 B_1 \lambda_2} \right). \quad (6.12)$$

Este planteamiento es válido para poder separa ambos fenómenos, y los datos sintéticos así lo demuestran. Sin embargo, experimentalmente no se ha conseguido obtener reconstrucciones certeras, ya que es muy sensible al ruido. La posibilidad de separar el efecto de la derivada y de los cambios en distancia se encuentra por tanto en las líneas de investigación abiertas mediante los trabajos realizados en la presente Tesis.

Implementar este procedimiento ha permitido sin embargo proporcionar un método para calcular experimentalmente, y sin necesidad de ningún componente adicional, la apertura del sistema, lo que puede ser útil en etapas de diseño y calibración. La definición de apertura se da en la Ec. 6.3. Simplemente utilizando la señal de frecuencias del patrón de interferencia para cada longitud de onda, se puede resolver el ángulo de incidencia sobre el *Savart plate* como:

$$i = \arcsin \frac{f \lambda z - A}{B}. \quad (6.13)$$

Lógicamente, para una superficie plana, este valor coincidirá con el ángulo de apertura Ap del prototipo, que en este caso es de $\pm 9,47^\circ$. Esta operación se ha realizado para las dos longitudes de onda de iluminación, siguiendo los pasos de la opción planteada anteriormente para tratar de separar el efecto del ángulo y de la distancia, obteniendo las señales de apertura de la Fig. 6.32. Como se observa en la gráfica, las diferencias entre ambas señales son insignificantes en cuanto al cálculo de la apertura, pero pasan a ser inadmisibles como punto de partida para despejar el ángulo i de la Ec. 6.12, ya que el error se introduce directamente en este cálculo.

A pesar de las limitaciones anteriormente descritas, recordemos que el método de reconstrucción propuesto permite aumentar la precisión del sistema desde las $10 \mu\text{m}$ hasta $0.2 \mu\text{m}$ trabajando desde unos 90 mm en objetos o zonas en los que el perfil de distancias presenta cambios suaves. Esto hace al prototipo fuertemente competitivo en comparación con otras tecnologías que

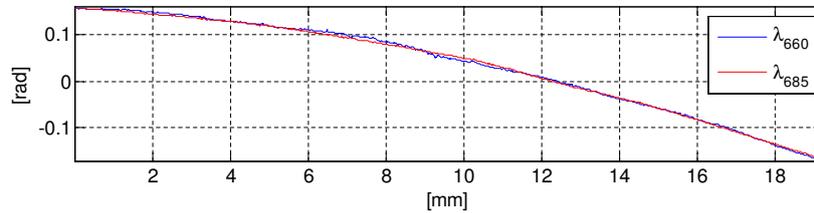


Figura 6.32: Ángulo de apertura del prototipo, medido experimentalmente a partir de la señal de frecuencia del interferograma para cada longitud de onda de iluminación. La forma de arco de los ángulos de apertura es debida a que se ha considerado una distancia z constante para todo el perfil.

para obtener resultados similares necesitan trabajar desde mucho más cerca, como es el caso de cualquier tipo de microscopio, o realizar varias adquisiciones, como ocurre en otras técnicas interferométricas como *vertical-scanning* u holografía digital.

Inspección de distintos tipos de muestra

En otros de los ensayos realizados, se ha abierto la posibilidad de aplicar el prototipo para el análisis de objetos transparentes, que pueden incluir desde determinados tipos de materia plástica o cristales hasta muestras biológicas. Este tipo de muestras suelen estar compuestas de material o tejidos cuya viscosidad o características específicas modifica el camino óptico de luz que las atraviesa.

Existen diversas tecnologías ópticas para la medida de este tipo de objetos, como deflectometría de Moiré [84], variantes de holografía digital especialmente fundamentadas en contraste de fase [118, 90, 79, 148], o tomografía óptica [109, 107]. La tecnología objeto de estudio de esta Tesis, es susceptible de ser utilizada para este propósito, ya que cualquier cambio en la distancia óptica desde el punto reflector de la luz hasta el CCD modificará la señal de interferencia recogida en el sensor.

En la Fig. 6.33 se muestra la reconstrucción de un detalle de una huella

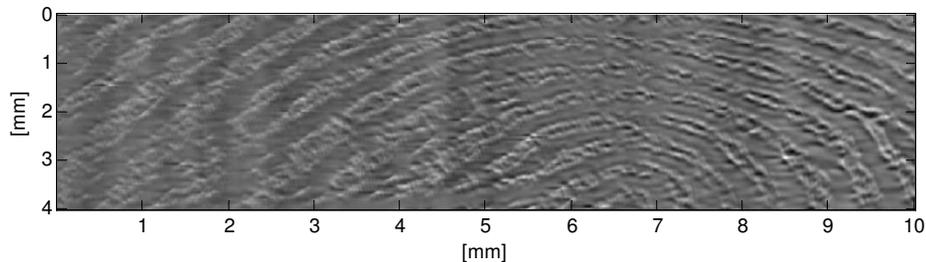


Figura 6.33: Detalle de una huella dactilar captada por el prototipo al escanear la superficie de un espejo que previamente había sido manipulado a mano.

dactilar localizada en un espejo. La grasa corporal depositada sobre la superficie del espejo al manipular este manualmente ha modificado la distancia óptica recorrida por la luz, y por tanto la forma de la huella es perfectamente reconocible. De nuevo, la profundidad de los surcos de grasa depositados no ha sido calibrada, ya que haría falta un método específico que tuviera en cuenta el índice de refracción del material transparente.

Otro ejemplo en este mismo sentido se muestra en la Fig. 6.34, donde se ha escaneado una superficie que previamente había sido rociada con tres tipos distintos de fluidos: (a) agua pulverizadas, (b) laca, y (c) crema solar. En las reconstrucciones es posible identificar la textura característica de cada uno de ellos.

Recordemos que la caracterización de los patrones de franjas obtenidos mediante el análisis del OPD [53] abre la puerta al uso del dispositivo para aplicaciones diferentes a la perfilometría, por lo que se propone, como línea de investigación abierta, el estudio de aspectos concretos de fluidos y/u objetos transparentes.

6.6 Conclusiones

Este capítulo ha comenzado con el análisis de las características reales del *Savart plate*, que ha permitido cuantificar la relevancia del ángulo de inciden-

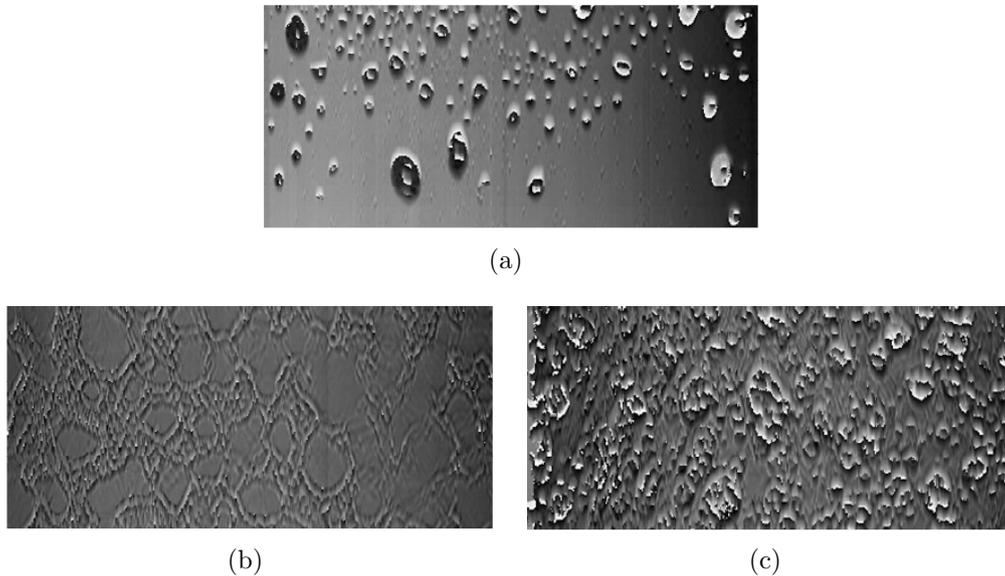


Figura 6.34: Detalle de la reconstrucción de diferentes fluidos pulverizados sobre la superficie de un espejo de 10 x 4 mm. (a) agua, (b) laca, y (c) crema solar.

cia sobre su primera superficie, resultando que ángulos tan pequeños como $0,1^\circ$ producen cambios en la señal de frecuencia equivalentes a un cambio en profundidad de una micra. Este hecho la resultado ser de vital importancia cuando se trabaja a cortas distancias para obtener precisiones elevadas.

El uso de mapas topográficos auto-organizados SOM aplicados a experimentos realizados con el prototipo, y el análisis realizado usando trazado de rayos, ha permitido identificar las relaciones existentes entre la derivada superficial y el ángulo de incidencia de un frente de ondas sobre el *Savart plate*. Esta relación ha permitido crear un algoritmo capaz de aumentar considerablemente la precisión de medida, desde 10 hasta $0.2 \mu\text{m}$ para superficies cuya derivada no supere los 5° trabajando a unos 90mm de distancia.

Las pruebas experimentales realizadas para caracterizar este método han abierto la puerta a nuevos retos. Entre ellos, el uso de doble longitud de onda para distinguir cambios en frecuencia debidos al ángulo de incidencia de cambios generados por una salto en profundidad, o la medida de objetos

transparentes.

La última de las mejoras propuestas para la configuración colineal es la reducción del tiempo de procesamiento. El empleo de valores de fase como estimadores de la frecuencia en un punto del perfil permiten una disminución de más de un orden de magnitud en el gasto computacional.

Parte III

CONCLUSIONES

La ciencia sirve para darnos
una idea de cuán basta es
nuestra ignorancia.

Robert De Lamennais

Capítulo 7

Conclusiones y trabajo futuro

En este último capítulo se recogen las conclusiones extraídas de las investigaciones llevadas a cabo durante la elaboración de la Tesis y se sugieren diversos trabajos futuros que complementarían el realizado a lo largo de la misma. Adicionalmente, se detallan las principales aportaciones originales derivadas de los estudios desarrollados y las publicaciones y ponencias en congresos a los que éstos han dado lugar.

7.1 Conclusiones de la Tesis

Como en todo trabajo científico, el primer acercamiento al problema debe ser de tipo documental, recopilando y analizando los trabajos ya realizados en el ámbito al que pertenece, con el fin de comprobar, primero la originalidad de la idea propuesta, y posteriormente, su viabilidad.

En el caso que nos incumbe, la experiencia del grupo de investigación de *Modelado, Inspección, Diagnóstico y Automatización de procesos Industriales* de la Universidad de Oviedo en el que se ha desarrollado la Tesis, ha permitido detectar una vertiente prácticamente sin explorar de las técnicas

de perfilometría óptica destinadas a control dimensional y medidas de forma y superficie. Se trata de las tecnologías ópticas susceptibles de ser aplicadas in-situ, por ejemplo, sobre una línea de producción, destinadas a realizar medidas submicrométricas.

Por tanto, esta Tesis se ha dedicado específicamente al estudio de técnicas, métodos, configuraciones, algoritmos de procesamiento y cualquier otra faceta de la perfilometría óptica que permitan la aplicabilidad in-situ de un sistema destinado a mediciones submicrométricas.

Típicamente, las técnicas de *phase-shifting* e interferometría de múltiple longitud de onda presentan una excelente resolución, pero rangos dinámicos de medida limitados. Sin embargo, la interferometría de escaneo vertical, como las técnicas de *white-light*, tiene mayor rango dinámico pero menor resolución y tiempos de medida elevados. Estos métodos, junto con la holografía clásica, la holografía digital, y la interferometría *speckle*, son las tecnologías más populares en cuanto a metrología de microsistemas [108, 119, 88, 111]. Generalmente se utiliza un cabezal de microscopio para inspeccionar la superficie de áreas pequeñas (1 o 2 mm²) con resolución de varios nanómetros. Las restricciones de aplicabilidad in-situ e inspección automática frecuentemente suponen problemas a las técnicas descritas anteriormente, así que existen otras alternativas para estos casos. Por ejemplo, se utiliza *light-scattering* para estimar los parámetros de acabado superficial de objetos rugosos (por ejemplo en [80, 100]). La contrapartida de este tipo de métodos es que no devuelven la topología tridimensional de la superficie, sólo sirven para calcular parámetros de rugosidad. Otra posibilidad es utilizar triangulación láser [1], que suele proporcionar resultados muy satisfactorios, pero necesita trabajar desde distancias muy pequeñas para poder alcanzar precisiones altas, lo que conlleva una disminución del campo de visión y de la profundidad de campo.

Durante la etapa de documentación y elaboración del estado del arte de la tecnología, adicionalmente a la experiencia investigadora del grupo, se ha seleccionado la tecnología y el dispositivo más adecuado para cumplir los objetivos.

- ✓ Ha quedado patente que la Interferometría de Desplazamiento Lateral

7.1. CONCLUSIONES DE LA TESIS

225

es una tecnología robusta, precisa y muy versátil. Admite muy diversas configuraciones y aplicaciones, que van desde la inspección de sistemas de lentes hasta la medición de rango.

- ✓ El dispositivo seleccionado, un interferómetro de desplazamiento lateral basado en un *Savart plate*, es adecuado para medidas in-situ ya que proporciona un perfil a partir de una única adquisición, y su configuración es de camino común. Es aplicable en un amplio rango de distancias de trabajo. Ha demostrado teórica y experimentalmente su adecuación también para mediciones submicrométricas.

Se ha diseñado y construido de un prototipo básico de laboratorio dimensionado para medidas submicrométricas, que permite ajustes de manera sencilla. Ha servido para el análisis del principio de funcionamiento, configuración, fuentes de error, y herramientas empleadas. De las pruebas realizadas de funcionamiento básico se han extraído las siguientes conclusiones:

- ✓ Existen dos configuraciones posibles del dispositivo. En términos generales, la triangulada es capaz de alcanzar mayores precisiones, pero el rango de medida es limitado, y existe la posibilidad de que haya zonas ocultas. La configuración colineal proporciona medidas absolutas.
- ✓ La disposición de elementos en el prototipo permite una compactar casi totalmente el dispositivo de medida. El *Savart plate* situado en el interior de un anillo de extensión simplifica el traslado del prototipo y montaje in-situ, a la vez que lo hace más estable. En la versión colineal es muy fácil incluir la fuente de luz en el mismo bloque compacto utilizando un espejo adicional para dirigir la luz.
- ✓ La utilización de el módulo comercial *SpeckleFreeTM* basado en microespejos deformables para la reducción del ruido *speckle* presenta varias ventajas con respecto al difusor rotacional. Es más robusto frente a vibraciones, tiene una vida útil sin mantenimiento más larga. La reducción de *speckle* conseguida, medida como desviación estándar de los valores de píxeles sopesados en la proyección de la línea o punto, es superior a 3 veces. Admite una velocidad de hasta 500 Hz.

La similitud del dispositivo seleccionado con los sensores basados en Holografía Conoscópica permite adecuar gran parte de la investigación realizada con anterioridad a esta Tesis por el grupo de la Universidad de Oviedo al nuevo prototipo. Las técnicas de partida seleccionadas para el procesamiento básico y preacondicionamiento de interferogramas para la extracción de frecuencia y fase son compartidas por los sensores de Holografía Conoscópica Lineal. Para comprobar los resultados de estos métodos, paralelamente al prototipo físico, se ha desarrollado de un software que incluye el control de dicho dispositivo, así como la evaluación de diferentes algoritmos de procesamiento de señal y la visualización de resultados.

Uno de los principales objetivos de esta Tesis ha partido del uso de la configuración triangulada del prototipo, ya que es capaz de conseguir hasta 10 veces más resolución que la colineal utilizando la señal de fase del interferograma en lugar de la de frecuencia. Con este dispositivo ya se tenía experiencia en grandes escalas, y a priori, debido a su alta precisión, ha sido una buena opción de acercamiento al mundo microscópico. Pero el uso de la señal fase conlleva la contrapartida de la ambigüedad de la variable medida. El rango de trabajo está limitado al intervalo en el que fase varía de 0 a 2π . Con el fin de paliar esta limitación se optó por la investigación de técnicas de múltiple longitud de onda, incluyendo tanto el estudio como implementación física y validación. Se llegaron a las siguientes conclusiones:

- ✓ Se ha comprobado mediante un ensayo de viabilidad totalmente controlado la aplicabilidad de técnicas de múltiple longitud de onda al dispositivo para resolver el problema de la ambigüedad en el rango de medida cuando se utiliza la señal de fase en triangulación.
- ✓ La obtención de dos señales de distinta longitud de onda correspondientes al mismo perfil mediante el empleo de *Savart plates* de distinto grosor proporciona resultados válidos. Amplia el rango de medida unas 3 veces para grosores de 10 y 15 mm respectivamente, pero presenta los inconvenientes de requerir dos cámaras diferentes y la aplicación de técnicas de *data-matching*.
- ✓ El uso de iluminación con doble longitud de onda es la opción más adecuada para aplicar técnicas de múltiple longitud de onda. Ha generado

un aumento de más de 27 veces el rango de medida conseguido con una sola longitud de onda, utilizando láseres de potencia regulable de 660 y 685 nm respectivamente. El uso de longitudes de onda cercanas entre sí incrementa el rango de medida y corrige ciertas aberraciones cromáticas. En la interferencia se observa el efecto de *beat*.

- ✓ Los ejemplos experimentales de aplicación de técnicas de doble longitud de onda son satisfactorios. El dispositivo consigue resoluciones superiores al criterio de Rayleigh (límite de la triangulación láser). Se obtiene una repetibilidad de $\sigma < 0,04 \mu m$ para la configuración estudiada. Se han detectado algunos efectos experimentales que facilitan la detección de defectos superficiales, pero que no son explicables por el modelo utilizado hasta ese momento.

Durante el desarrollo de la investigación se han detectado fenómenos que no se producen en otras escalas y que han merecido un estudio adicional. Se decidió por tanto ampliar los objetivos de la Tesis, y realizar una evaluación mucho más profunda del dispositivo, incluyendo una caracterización exhaustiva de la formación de la interferencia, que ha permitido aumentar el conocimiento en los aspectos siguientes:

- ✓ El comportamiento real del *Savart plate* cuando la incidencia de la luz no es perpendicular a la primera superficie provoca fenómenos en la interferencia que sólo ocurren cuando se buscan altas precisiones desde distancias de trabajo cortas. El ángulo de incidencia modifica el valor de *shear*, y en consecuencia de la frecuencia de franjas. Ángulos de incidencia en el orden de $0,1^\circ$ provocan variaciones en la señal de frecuencia en el mismo orden de magnitud que un cambio en distancia de una micra. La rotación del *Savart plate* aporta OPD interno para ángulos distintos a 135° y -45° , efecto que se traslada a la señal de fase.
- ✓ Existe una vinculación entre la derivada superficial y el ángulo de incidencia sobre el *Savart plate*. Esta relación puede ser incluida en el modelo de formación de la interferencia y utilizada para aumentar la precisión de medida.

La caracterización realizada mediante técnicas de trazado de rayos de todos los parámetros que influyen sobre la medida, ha llevado a aprovechar esta información con el fin de aumentar la precisión del sistema. En esta etapa de la investigación se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- ✓ El algoritmo propuesto de reconstrucción que utiliza información de la derivada superficial es aplicable si la superficie es eminentemente plana, $\pm 5^\circ$ para nuestro dispositivo. El error de reconstrucción está por debajo del 0.1 %, y decrece rápidamente en 2 ó 3 órdenes de magnitud tras 5 iteraciones. La exactitud del sistema medida experimentalmente es de 40 nm, y la incertidumbre global del sistema (precisión) es de $\sigma = 0,2 \mu\text{m}$.
- ✓ El método propuesto basado en el uso de doble longitud de onda para separar los efectos que repercuten en la señal de frecuencia debidos a un cambio en distancias y los debidos a un cambio del ángulo de incidencia es demasiado sensible al ruido, lo que no ha permitido obtener resultados experimentales satisfactorios. Si se lograra aislar experimentalmente los efectos de estos dos parámetros, se podría construir in prototipo que sería rápido, de alto rango dinámico y con aún mayor exactitud que el actual.

Entre los objetivos de la Tesis se encuentra el estudio de técnicas avanzadas que permitieran mejorar cualquier aspecto de la Interferometría de Desplazamiento Lateral aplicada a medidas submicrométricas. Así, el diseño y verificación de métodos que permitieran aumentar las capacidades y aplicabilidad del dispositivo, especialmente orientados a disminuir los tiempos de procesamiento, ha sido una constante a lo largo de toda la investigación. Las conclusiones referentes a las aportaciones en el ámbito computacional son:

- ✓ En cuanto al procesamiento de interferogramas con efecto *beat*, se ha confirmado que los métodos que extraen directamente la fase equivalente son menos costosos computacionalmente, pero pierden la alta precisión de las longitudes de onda individuales. También son más sensibles al ruido.

- ✓ El algoritmo propuesto para extraer la fase equivalente a la frecuencia de *beat* usando la envolvente de la interferencia es 7 veces más rápido que la opción basada en Transformadas de Fourier.
- ✓ La estimación de la señal de frecuencia a partir de la señal de fase permite aumentar en más de 10 veces la velocidad de procesamiento, siendo necesario llegar a una solución de compromiso entre precisión y velocidad.

7.2 Aportaciones originales

Las principales aportaciones originales son:

1. Diseño, construcción y validación de un prototipo flexible basado en Interferometría de Desplazamiento Lateral dimensionado para realizar medidas submicrométricas.
2. Desarrollo de un software de control versátil capaz de proporcionar los resultados de medida en tiempo real, permitiendo la implementación y pruebas de distintas rutinas de procesamiento. Permite además la visualización de resultados intermedios y finales en tiempo real.
3. Análisis exhaustivo de todos los parámetros que determinan el OPD en el interferómetro. Desarrollo de un simulador de interferogramas sintéticos mediante trazado de rayos que permite emular cualquier cambio en la configuración. Se ha desarrollado también una versión simplificada del simulador que proporciona directamente la frecuencia y fase inicial del interferograma sintético, agilizando considerablemente el tiempo de cálculo.
4. Aplicación por primera vez técnicas de múltiple longitud de onda en un interferómetro basado en Holografía Conoscópica - Interferometría de Desplazamiento Lateral-. Realización de un montaje con diferentes grosores de *Savart plate*, y otro con láseres de diferentes longitud de onda.

5. Propuesta y análisis de un método de reducción del tiempo de procesamiento para los interferogramas con efecto *beat* utilizando la envolvente de la amplitud de la interferencia para estimar la señal de fase equivalente.
6. Cuantificación de la influencia del comportamiento real del *Savart plate* para el prototipo aplicado a medidas submicrométricas. Repercusión de los ángulos de incidencia y rotación sobre las señales de frecuencia y fase inicial del interferograma.
7. Demostración de la vinculación de la derivada superficial y el ángulo de incidencia sobre el *Savart plate* mediante el uso de mapas auto-organizados (SOM) basados en redes neuronales.
8. Propuesta de un método de precisión optimizada aplicable a superficies suaves empleando la información de la derivada a partir de la señal de frecuencia del interferograma.
9. Aplicación de los métodos propuestos a ejemplos reales concretos, como mediciones de ondulación o reconstrucción de chapas mecanizadas.
10. Propuesta y análisis de un método de reducción del tiempo de procesamiento para la configuración colineal basado es la estimación de la señal de frecuencia a partir de la señal de fase del interferograma.

7.3 Publicaciones

Las investigaciones llevadas a cabo durante la elaboración de la Tesis han dado lugar a las siguientes publicaciones en revistas indexadas JCR:

- Ignacio Álvarez, José M. Enguita, María Frade, Jorge Marina, and Guillermo Ojea. “On-line metrology with conoscopic holography: Beyond triangulation.” *Sensors*, 9(9):7021-7037, 2009.

7.4. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN ABIERTAS

231

- José María Enguita, Ignacio Álvarez, María Frade, and Jorge Marina. “Common-path two-wavelength interferometer with submicron precision for profile measurements in on-line applications.” *Optical Engineering*, 49(2):023602, 2010.
- María Frade, José M. Enguita, Ignacio Álvarez. “In-situ 3D profilometry of rough objects with a lateral shearing interferometry range finder.”. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(11):1559-1567, 2012.

Y los siguientes congresos internacionales:

- José M. Enguita, Ignacio Álvarez, Jorge Marina, Guillermo Ojea, José A. Cancelas, and María Frade. “Toward extended range sub-micron conoscopic holography profilometers using multiple wavelengths and phase measurement.” volume 7356, page 735617. SPIE, 2009.
- José M. Enguita, Ignacio Álvarez, María Frade, and Jorge Marina. “Common path two-wavelength interferometer with submicron precision for profile measurements in online applications.” In Peter H. Lehmann, editor, *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI*, volume 7389, page 73890W. SPIE, 2009.
- María Frade, José M. Enguita, Ignacio Álvarez, and Silvia Rodríguez-Jiménez, “Fringe pattern characterization by opd analysis in a lateral shearing interferometric profilometer.” volume 8082, page 80821S. SPIE, 2011.

7.4 Líneas de investigación abiertas

A continuación se propone una serie de trabajos futuros para el complemento, mejora o continuación de las investigaciones llevadas a cabo durante la realización de la Tesis.

- Investigar aspectos concretos sobre nuevas aplicaciones diferentes a la metrología de forma y superficie.

La caracterización de los patrones de franjas obtenidos mediante el análisis del OPD [53] abre la puerta al uso del dispositivo para aplicaciones diferentes a la perfilometría. En dicho estudio, se ha cuantificado la influencia de cada parámetro que es susceptible de modificar el camino que siguen los rayos hasta llegar a formar la interferencia en el panel de detección. Por tanto, parece razonable ser capaz de extraer del patrón de interferencia la información de otras variables físicas diferentes al perfil de distancias de un objeto, siempre que se tomen las precauciones necesarias. Por ejemplo, se podría utilizar para detectar cambios en el índice de refracción de un cierto cristal. Bastaría con colocar este componente óptico entre el origen de la luz reflejada y el inicio de la rama de detección, asegurándose de que las características generales del componente a analizar, en condiciones normales, permiten visualizar la interferencia sin *aliasing* y cumpliendo el criterio de muestreo de Nyquist-Shannon. En la medida en que los índices de refracción se modifican con la temperatura, otra posible aplicación sería identificar las diferencias de temperatura en un determinado proceso de fabricación.

Siguiendo el mismo razonamiento de utilización de otras variables físicas que modifiquen el OPD del sistema, otra alternativa es la medición o detección de fallos en el espesor de un material transparente. Si entramos en el campo de los fluidos, se podrían detectar impurezas, cambios de densidad, o medir poblaciones de células en el caso de fluidos biológicos.

Para que cualquiera de estas potenciales aplicaciones tenga éxito, se requiere un estudio mucho más concreto y extenso sobre la variable física a medir. En la investigación realizada a lo largo de la Tesis, se ha realizado este tipo de estudio, centrado en el hecho de que la señal de frecuencias contiene información de la derivada de la superficie, adicionalmente a la información de la distancia a la que se encuentra dicha superficie. Este trabajo ha permitido plantear un método usando la información de la derivada que consigue obtener precisiones mucho más altas a lo largo del perfil que las obtenidas basándose únicamente en la información de distancias. Aunque es una aportación muy significativa, este procedimiento sólo es aplicable a superficies

7.4. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN ABIERTAS

233

eminentemente planas, o con ondulaciones suaves. Además, la distancia absoluta a la que se localiza el perfil, se obtiene con el error propio del método tradicional que no considera la información de la derivada. Estas restricciones son debidas a que aún no se han obtenido resultados experimentales satisfactorios en cuanto a la distinción de que parte de la variación de la señal de frecuencia es debida a un cambio de distancias, y cuál a un cambio en el ángulo de incidencia, es decir, en la derivada de la superficie. Separar el efecto de la derivada superficial del efecto de los cambios en profundidad es un reto complejo debido a la alta sensibilidad al ruido de el método de separación propuesto en esta Tesis.

→ Se sugiere continuar la investigación en cuanto a procedimientos de separación de la información procedente de los cambios en distancia de la superficie de referencia, a la de los cambios en la derivada superficial. Esto permitiría aumentar el tipo de superficies a las que se puede aplicar el método de precisión optimizada, y diseñar otros algoritmos que proporcionaran una distancia absoluta del perfil de mayor precisión, además de evitar gran parte de los ruidos de integración del método propuesto. La competitividad del prototipo final aumentaría significativamente.

Aunque queda fuera del alcance de esta Tesis, con el fin de transferir los conocimientos a la industrial y el mercado actual, es clave realizar aportaciones destinadas a facilitar la interacción entre el usuario y el dispositivo.

En el mismo sentido, es conveniente establecer protocolos de verificación de resultados, con el fin de tener grandes cantidades de datos de respuesta del sistema, que sirvan para retroalimentar el proceso de mejora y actualización de la tecnología, además de enfocar de la mejor forma posible las investigaciones venideras.

Science serves to give us an
idea of the extent of our
ignorance.

Robert De Lamennais

Chapter 8

Conclusions and future work

This last chapter gathers the conclusions extracted from the research performed during the preparation of this Thesis. In order to complement the fulfilled work, some future trends are suggested. In addition, the main original contributions derived from this study are detailed, as well as the scientific publications and congress papers.

8.1 Conclusiones de la tesis

As in every scientific work, the first approach to the problem must be a reviewing stage, gathering together and analyzing the previous work already performed in the field of the research, in order to check, first, the originality of the idea, and then, its viability.

In this case, the experience of the research group in which the Thesis has been developed, named *Modelling, Inspection, Diagnosis and Automation of Industrial Systems*, of the University of Oviedo, allowed the detection of an unexplored branch of the optical profilometry techniques aimed at dimensional control, defect detection and shape and surface measurement.

Therefore, this Thesis is focused in the study of techniques, methods, configurations, processing algorithms and any other aspect of the optical profilometry that leads to the in-situ applicability of a system used for sub-micron measurements.

Typically, phase shifting techniques and multiple wavelength interferometry have excellent resolution but limited dynamic ranges, whereas vertical scanning interferometry has a wider dynamic range but lower resolution and longer measurement time. These methods, along with holography, digital holography and digital speckle interferometry are the most popular technologies for microsystems metrology [108, 119, 88, 111]. Typical systems use a microscope head and obtain the surface map of small areas (1 or 2 mm²) with resolutions of a few nanometers. Restrictions about in-situ applicability and automatic inspection often pose problems for the above techniques, so there are other alternatives. For example, light scattering can be used to estimate the finishing properties of rough objects, typically roughness parameters (see for instance [80, 100]), but these techniques do not retrieve the 3D topology of the surface. Another possibility is using laser triangulation [1], which usually gives very good results, but needs to work from very short distances to achieve high resolutions, and hence, have small fields of view and depth of field.

Thanks to the background of the research group, during the documentation stage and the preparation of the technology review for the Thesis, the most suitable technology and mechanism to fulfil the objectives has been devised.

- ✓ It has been made evident that the Lateral Shearing Interferometry is a very accurate, robust and versatile technology. It accepts very different configurations and applications, which goes from lens systems inspection to range sensing.
- ✓ The selected device, a lateral shearing interferometer based on a Savart plate, is suitable for in-situ measurements as it provides a whole profile of the inspected object in a single acquisition. Moreover, it is a common-path setup. It can be used from a large range of working distances.

A basic laboratory prototype, flexible and aimed at the submicron range has been designed. It has been used for the study and evaluation of the working principle, setup, error sources, and specific tools. From the performed tests with this prototype, the following conclusions have been extracted:

- ✓ There are two possible configurations for the prototype. In general terms, the triangulated version is able to provide higher accuracy, but its dynamic range is limited and there can be occlusion of certain areas. The collinear setup provides absolute measurements.
- ✓ The setup allows to build a compact device. The location of the Savart plate, inside an extension ring, simplifies the installation of the prototype and in-situ assembly, and makes it more stable. In the collinear version, it is pretty simple to include the light source into the same compact housing. In this case, an extra mirror is needed.

Coherent illumination result in speckle noise, which limits the resolution. A first attempt of reducing speckle with a rotating difusser yielded promising results but was not robust enough for industrial applications.

- ✓ Using the commercial module *SpeckleFreeTM* based on deformable micromirrors presents several advantages when comparing with the rotational diffuser. It is more robust against vibrations, and it has longer lifespan without maintenance. The achieved speckle reduction, measured as the standard deviation of the pixel values pondered in the projected line of point id higher than 3 times, while keeping a high maximum frequency of acquisition (up to 500 kHz).

The similarity between the selected prototype with the sensors based on Conoscopic Holography makes it possible to adapt a large part of the research performed by the group prior to this Thesis to this new device. The preliminary interferograms processing and pre-processing techniques chosen to extract the frequency and the phase signal are shared with Linear Conoscopic Holography. In order to check the response of these methods, a software application has been developed. It includes the control of the

device and tools to evaluate the different processing algorithms, and final profile visualization.

One of the main objectives of this Thesis was based on the triangulated configuration of the prototype, as it is able to obtain up to 10 times more resolution than the collinear setup, by using the phase signal from the interferogram instead of the frequency signal. This type of device was tested previously for large range measurements, and a priori, due to its high precision, it seemed a good start point to the microscopic world. But using the phase signal has the drawback of the measurement ambiguity. The working range is limited to the interval in which the phase varies from 0 to 2π . In order to overcome this limitation, multiple wavelength techniques were studied, including both physical implementation and validation. The following conclusions were achieved:

- ✓ The applicability of multiple wavelength techniques has been checked using a totally controlled viability experiment to resolve the ambiguity problem in the triangulated setup when the phase signal is used.
- ✓ Getting two different signals of the same profile, by using Savart plates of different thickness, provides valid results. It increases the measurement range by 3 times, for thicknesses of 10 and 15 mm respectively. It has the drawback of demanding two different cameras, and the application of data-matching techniques.
- ✓ The use of two-wavelength light source is the most suitable option for application of multiple wavelength techniques. It has provided an incensement of 27 times in the measurement range obtained using just one wavelength. The test has been performed using adjustable power lasers of 660 y 685 nm respectively. The use of close wavelengths has the benefits of increasing the measurement range and cancelling most of the chromatic aberrations. The beat phenomenon is observed in the interference fringe pattern.
- ✓ Experimental examples of applicability of multiple wavelength techniques are satisfactory. The device achieves resolutions above the Rayleigh criteria (limit of the laser triangulation). The uncertainty

is $\sigma < 0.04 \mu m$ for the studied setup. Furthermore, some unexpected effects that facilitate the defects detection have been observed.

These effects do not occur at other scales and deserved an additional study. Consequently, the objectives of the Thesis were expanded, and a deeper study of the optical effects that occur in the sensor was performed, including an exhaustive characterization of interference formation, which has brought the following new knowledge:

- ✓ The real behaviour of the Savart plate when the incident light is not orthogonal to its main section generates effects in the interference that only occur when high precision is aimed working from short distances. The angle of incidence modifies the shear, and consequently the frequency of fringes. Angles of incidence in the order of 0.1° may cause variation in the frequency in the same order of magnitude than a change in height of one micron. Also the rotation of the Savart plate results in variations in the internally generated OPD for angles different from 135 y -45° , this effect is transferred to the phase signal.
- ✓ There is a relationship between the derivate of the surface and the angle of incidence over the Savart plate. It is possible to include this relationship in the interference formation model, using it to increase the precision of the final measurement.

The interference has been characterized by ray tracing, taking into account all the parameters that could have repercussion into the measurement. The knowledge extracted from this study has driven to a method to increase the precision of the system. The following conclusions were obtained:

- ✓ The proposed reconstruction algorithm is valid for smooth surfaces, with a maximum slope of $\pm 5^\circ$ for the described setup. The reconstruction error is below 0.1%. The accuracy, measured experimentally using a reference specimen is 40 nm, and the global uncertainty -precision- of the system is $\sigma = 0.2 \mu m$.

- ✓ The proposed method based in the use of double wavelength illumination to distinguish from the two types of parameters which modify the frequency of the fringes (distance and incidence angle), is too sensitive to noise. This drawback has hampered the achievement of satisfactory experimental results, and this research line has been proposed for future work. If the effects of this two parameters were isolated experimentally, even a more accurate, quick and high dynamic range prototype could be build.

In the objectives of the Thesis, it was mentioned the study of advanced techniques that were able to improve any aspect of the Lateral Shearing Interferometry applied to submicrometric metrology. In this sense, the design and verification of methods with the purpose of extending the device capabilities, specifically focused on minimizing the processing times, has been a constant along the whole research. The main conclusions regarding contributions in the computational field are:

- ✓ With respect to processing alternatives for beat modulated interferograms, it has been confirmed that the methods that extract directly the equivalent phase signal have less computational cost, but the high precision of the individual wavelength profiles is lost. These methods are also more sensitive to noise.
- ✓ The proposed algorithm to extract the equivalent phase from the beat frequency using the fringe envelope is 7 times quicker that the option based on Fourier Transforms.
- ✓ The suggested estimation of the frequency signal by using the phase signal allows for a processing speed increment up to 10 times. It is necessary to adopt a balanced solution between precision and speed.

8.2 Original contributions

The main original contributions achieved during the development of this Thesis are:

1. Design, construction and validation of a flexible prototype based on Lateral Shearing Interferometry, scaled to perform in-situ submicron profile measurements.
2. Development of a versatile software to control the prototype, able to provide the measurement results in real time, allowing the implementation and test of different processing routines. It also allows the visualization of intermediate and final results, if selected by the user, during the continuous working mode.
3. Exhaustive analysis of all the parameters that determine the interferometer OPD. A synthetic interferogram simulator has been developed using ray tracing. It easily emulates any change of the configuration. A simplified version has also been developed, which provides directly the frequency and phase signals of the synthetic fringe pattern, speeding up the calculation time.
4. Multiple wavelength techniques have been applied to a system based on Conoscopic Holography - Lateral Shearing Interferometry - for first time. Two different assemblies have been built, one using Savart plates of different thicknesses, and the other one using different wavelength lasers.
5. Proposal and analysis of a method to reduce the processing time, applicable to beat modulated fringe patterns. It uses the envelope of the interference amplitude as an estimator of the equivalent phase signal.
6. Influence quantification of the real behaviour of the Savart plate in the prototype designed for submicrometric measurements. Evaluation of the repercussion of the angles of incidence and rotation of the Savart plate over the frequency and first row phase signals of the interferogram.

7. Proof of the connection between the surface derivate and the angle of incidence over the Savart plate by using Self Organized Maps (SOM) based on neural networks.
8. Proposal of a method of optimized precision applicable to smooth surfaces, by using the derivate information extracted from the frequency signal of the fringe pattern.
9. Application of the proposed methods to specific real examples, like waviness measurement or surface analysis of metal sheets.
10. Proposal and analysis of a method to reduce the processing time, applicable to the collinear assembly, based on the estimation of the frequency signal performed from the phase signal.

8.3 Publications

The original contributions made during the elaboration of this Thesis, which have been published at JCR indexed journals are:

- Ignacio Álvarez, José M. Enguita, María Frade, Jorge Marina, and Guillermo Ojea. “On-line metrology with conoscopic holography: Beyond triangulation.” *Sensors*, 9(9):7021-7037, 2009.
- José María Enguita, Ignacio Álvarez, María Frade, and Jorge Marina. “Common-path two-wavelength interferometer with submicron precision for profile measurements in on-line applications.” *Optical Engineering*, 49(2):023602, 2010.
- María Frade, José M. Enguita, Ignacio Álvarez. “In-situ 3D profilometry of rough objects with a lateral shearing interferometry range finder.”. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(11):1559-1567, 2012.

And the papers presented at international congresses are:

- José M. Enguita, Ignacio Álvarez, Jorge Marina, Guillermo Ojea, José A. Cancelas, and María Frade. “Toward extended range sub-micron conoscopic holography profilometers using multiple wavelengths and phase measurement.” volume 7356, page 735617. SPIE, 2009.
- José M. Enguita, Ignacio Álvarez, María Frade, and Jorge Marina. “Common path two-wavelength interferometer with submicron precision for profile measurements in online applications.” In Peter H. Lehmann, editor, *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI*, volume 7389, page 73890W. SPIE, 2009.
- María Frade, José M. Enguita, Ignacio Álvarez, and Silvia Rodríguez-Jiménez, “Fringe pattern characterization by opd analysis in a lateral shearing interferometric profilometer.” volume 8082, page 80821S. SPIE, 2011.

8.4 Future research lines

In this section, a compendium of future research lines is suggested, in order to complement or expand the work performed in this Thesis.

- Research about the specific aspects of novel fields of applicability of this lateral shearing interferometer.

The performed study of fringe pattern characterization by OPD analysis has opened the use of the technology to inspection and metrology of samples of very different nature. In this study, the influence of each parameter susceptible to modify the optical path to the detection plane has been quantified. Therefore, it seems reasonable that it were possible to extract from the fringe pattern, the information regarding other physical variables. As an example, it would be possible to detect changes in the refraction index of a crystal. This component should be placed between the light source and the beginning of the detection branch, making sure that the general characteristics of this optical component, allow the interference visualization without

aliasing. Another application, related to this one, could be the measurement of temperature distribution in a specific manufacturing process, as the refraction index changes with the temperature.

Within the same goal of measuring different physical parameters, another option is the measurement or detection of errors in the thickness of a transparent material/layer. Regarding to the field of fluids, it could be possible to detect impurities, changes in density, or quantify cells population in the case of biological samples.

To be successful in any of these potential applications, a deeper and more specific analysis must be done, centred in the physical variable to be measured.

During the research made in this Thesis, this type of study has already been carried out, focused on the fact that the frequency signal contains information about the derivate of the surface, in addition to the distance value at which the surface is located. This study has provided a new approach using the derivate information that achieves higher precisions along the profile than the ones obtained by the traditional method. Even being a very significant contribution, this procedure can be only used in smooth or slightly wavy surfaces. Besides, the absolute distance at which the profile is located can only be calculated with the precision of the method that does not consider the derivate information. These restrictions are due to the fact that it has not been possible yet to separate experimentally the information of the distance and the derivate of the profile. This is a complex challenge, because of the high noise sensitivity of the procedure proposed in this Thesis.

- It is suggested to continue the research with the aim of isolate the information coming from a change of distance of the information coming from a change in the derivate. This would increase the kind of surfaces at which the optimized precision reconstruction method can be applied to. It also would promote the design of different algorithms which provide a higher precision absolute distance measure to the profile, and to avoid most of the integration errors. The competitiveness of the sensor would increase exponentially.

8.4. *FUTURE RESEARCH LINES*

245

Although out of the scope of this Thesis, in order to transfer the acquired knowledge to the industry and current market, it is essential to make contributions oriented to facilitate the interaction between the device and the user.

In this same sense, it is interesting to establish protocols for result verification, in order to have big amounts of data coming from the prototype which can be used to give feedback to improve and update the technology continuously.

Bibliography

- [1] Ossama B. Abouelatta. 3d surface roughness measurement using a light sectioning vision system. In *Proceedings of The World Congress on Engineering*, volume 1, pages 698–703, 2010.
- [2] I. Alvarez, I. Díaz, and Y. Malet. Dimensional control of h-shaped steel beams with conoscopic holography based profilometers. In *Proceedings of the 7th European Conference on Non-Destructive Testing*, volume 3, page article no 8, Copenhagen, aug 1998.
- [3] I. Álvarez, G.Y. Sirat, C. Fraga, J.M. Enguita, Y. Fernández, and J. Marina. On-line defect detection with the Long Stand-off Conoline profilometer. In *Second International Conference on Metrology*, pages 84–89, Eilat, Israel, nov 2003.
- [4] Ignacio Álvarez. *Identificación y calibración de un sistema de medida 2-D Basado en Hologracia conoscópica con técnicas de algoritmos genéticos*. PhD thesis, Universidad de Oviedo, September 1997.
- [5] Ignacio Álvarez, Jose M. Enguita, María Frade, Jorge Marina, and Guillermo Ojea. On-line metrology with conoscopic holography: Beyond triangulation. *Sensors*, 9(9):7021–7037, 2009.
- [6] Ignacio Álvarez, José M. Enguita, César Fraga, Jorge Marina, and Yolanda Fernández. Conoscopic holography based profilometers for defect detection: improvements in speed, resolution and noise reduction. In Brian Culshaw, Anna G. Mignani, Hartmut Bartelt, and Leszek R. Jaroszewicz, editors, *Optical Sensing II*. Proceedings of SPIE vol. 6189, SPIE Bellingham, WA, CID: 61890H 2006.

- [7] Ignacio Álvarez, José M. Enguita, Jorge Marina, and César Fraga. On-line submicron profile measurements from safe distances with conoscopic holography: feasibility and potential problems. *Optical Engineering*, 47(2):023602, 2008.
- [8] Markus-Christian Amann, Thierry Bosch, Marc Lescure, Risto Myllylä, and Marc Rioux. Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement. *Optical Engineering*, 40(1):10–19, 2001.
- [9] Jr. Armando Albertazzi, Rui Seara, and Policarpo B. Uliana. New amplitude weighted filtering technique for noise reduction in images with 2 pi phase jumps. volume 2003, pages 312–323. SPIE, 1993.
- [10] J.T. Atkinson and M.J. Lalor. The effect of surface roughness on fringe visibility in optical interferometry. *Optics and Lasers in Engineering*, 1(2):131 – 146, 1980.
- [11] R. Bajcsy and L. Lieberman. Texture gradient as depth cue. *Computer Graphics and Image Processing*, 5:52–67, 1976.
- [12] Peng Bao, Fucai Zhang, Giancarlo Pedrini, and Wolfgang Osten. Phase retrieval using multiple illumination wavelengths. *Opt. Lett.*, 33(4):309–311, 2008.
- [13] Youichi Bitou. Two-wavelength phase-shifting interferometry using an electrically addressed liquid crystal spatial light modulator. *Optics Communications*, 242(1-3):1 – 6, 2004.
- [14] Ignacio Blanco, Abel Vega, and Alberto González. Correlation visualization of high dimensional data using topographic maps. In José Dorronsoro, editor, *Artificial Neural Networks. ICANN 2002*, volume 2415 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 134–134. Springer Berlin / Heidelberg, 2002.
- [15] D. M. Bloom. Grating light valve: revolutionizing display technology. In Ming H. Wu, editor, *Projection Displays III*, pages 165–171. Proceedings of SPIE vol. 3013, 1997.

BIBLIOGRAPHY

249

- [16] Donald J. Bone. Fourier fringe analysis: the two-dimensional phase unwrapping problem. *Appl. Opt.*, 30(25):3627–3632, Sep 1991.
- [17] Donald J. Bone, H.-A. Bachor, and R. John Sandeman. Fringe-pattern analysis using a 2-d fourier transform. *Appl. Opt.*, 25(10):1653–1660, May 1986.
- [18] M. Carreira, J. Orwell, R. Turnes, J. Boyce, D. Cabello, and J. Haddon. Perceptual grouping from Gabor filter responses. Technical report, Dep. Electrónica e Informática de la Universidad de Santiago de Compostela y Dpt. de Física del King’s College de Londres, 1998.
- [19] Yeou-Yen Cheng and James C. Wyant. Two-wavelength phase shifting interferometry. *Appl. Opt.*, 23(24):4539–4543, 1984.
- [20] Yeou-Yen Cheng and James C. Wyant. Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry. *Appl. Opt.*, 24(18):3049–3052, Sep 1985.
- [21] Stanley S. C. Chim and Gordon S. Kino. Three-dimensional image realization in interference microscopy. *Appl. Opt.*, 31(14):2550–2553, May 1992.
- [22] Zhang Chun-Min, Ren Wen-Yi, and Mu Ting-Kui. Effects of optical axis direction on optical path difference and lateral displacement of savart polariscope. *Chinese Physics B*, 19(2):024202, 2010.
- [23] K. Creath. Phase-measurement interferometric techniques. *Progress in Optics*, XXVI:350–391, 1988.
- [24] K. Creath. *Interferogram Analysis. Digital Fringe Pattern Measurement Techniques*, chapter 4. Temporal Phase Measurement Methods, pages 94–140. Institute of Physics, 1993.
- [25] K. Creath, Y. Cheng, and J. Wyant. Contouring aspheric surfaces using two-wavelength phase-shifting interferometry. *Optica Acta*, 32(12):1455–1464, 1985.
- [26] Katherine Creath. Phase-shifting speckle interferometry. *Appl. Opt.*, 24(18):3053–3058, Sep 1985.

- [27] Katherine Creath. Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry. *Appl. Opt.*, 26(14):2810–2816, 1987.
- [28] J. L. Crowley. World modeling and position estimation for a mobile robot using ultrasonic ranging. In *Proceedings IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, Scottsdale (Arizona)*, pages 674–680, 1989.
- [29] J. C. Dainty, editor. *Topics in Applied Physics 9: Laser Speckle and Related Phenomena*. Berlin: Springer Verlag, 1975.
- [30] J. G. Daugman. Two-dimensional spectral analysis of cortical receptive field profiles. *Vis. Res.*, 20:847–856, 1980.
- [31] J. G. Daugman. Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters. *Journal of the Optical Society of America A*, 2:1160–1169, 1985.
- [32] Peter de Groot. Derivation of algorithms for phase-shifting interferometry using the concept of a data-sampling window. *Applied Optics*, 34(22):4723–4730, 1995.
- [33] Peter de Groot. Unusual techniques for absolute distance measurement. *Optical Engineering*, 40(1):28–32, 2001.
- [34] Ignacio Díaz. *Detección e identificación de fallos en procesos industriales mediante técnicas de procesamiento digitales de señal y redes neuronales. Aplicación al mantenimiento predictivo de accionamientos eléctricos*. PhD thesis, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y Sistemas, Universidad de Oviedo, 2000.
- [35] D. L. Donoho. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage. *Journal of the American Statistical Association*, 90(432):1200–1224, 1995.
- [36] D. L. Donoho. De-noising by soft-thresholding. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 41:613–627, May 1995.
- [37] D. L. Donoho and I. M. Johnstone. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage. *Biometrika*, 81(3):425–455, 1994.

BIBLIOGRAPHY

251

- [38] R. O. Duda and D. Nitzan. Low-level processing of registered intensity and range data. In *Proceedings 3rd Int. Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1976.
- [39] José Enguita, Yolanda Fernández, Ignacio Álvarez, César Fraga, and Jorge Marina. Denoising of conoscopic holography fringe patterns with orientational filters: a comparative study. In Wolfgang Otsen and Mitsuo Takeda, editors, *Optical Metrology in Production Engineering*, pages 441–452. Proceedings of SPIE vol. 5457, SPIE Bellingham, WA, 2004.
- [40] José M. Enguita, Ignacio Álvarez, María Frade, and Jorge Marina. Common-path two-wavelength interferometer with submicron precision for profile measurements in online applications. In Peter H. Lehmann, editor, *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI*, volume 7389, page 73890W. SPIE, 2009.
- [41] José M. Enguita, Ignacio Álvarez, María Frade, and Jorge Marina. Common-path two-wavelength interferometer with submicron precision for profile measurements in on-line applications. *Optical Engineering*, 49(2):023602, 2010.
- [42] José M. Enguita, Ignacio Álvarez, César Fraga, Jorge Marina, Yolanda Fernández, and Gabriel Sirat. Conoscopic holography-based long-standoff profilometer for surface inspection in adverse environment. *Optical Engineering*, 45(7):073602, 2006.
- [43] José M. Enguita, Ignacio Álvarez, César Fraga, Jorge Marina, and Yolanda Fernández. Improving signal processing performance on a conoscopic holography-based profilometer with phase-shifting interferometry algorithms. *Optical Engineering*, 46(9):093605, 2007.
- [44] José M. Enguita, Ignacio Álvarez, César Fraga, Jorge Marina, Yolanda Fernández, and Gabriel Sirat. A long standoff profilometer for industrial inspection in adverse environments based on conoscopic holography. In Wolfgang Otsen, Christophe Gorecki, and Erik Novak, editors, *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV*, pages 481–490. Proceedings of SPIE vol. 5456 (part I), SPIE Bellingham, WA, 2005.

- [45] José M. Enguita, Ignacio Álvarez, Jorge Marina, Guillermo Ojea, José A. Cancelas, and María Frade. Toward extended range sub-micron conoscopic holography profilometers using multiple wavelengths and phase measurement. volume 7356, page 735617. SPIE, 2009.
- [46] José M. Enguita, Yolanda Fernández, Ignacio Álvarez, César Fraga, and Jorge Marina. Denoising of conoscopic holography fringe patterns with orientational filters: a comparative study. *Optical Engineering*, 44(3):035603, 2005.
- [47] José María Enguita. *Detección de Defectos Superficiales Mediante el Procesamiento de Interferogramas de Holografía Conoscópica*. PhD thesis, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y Sistemas, Universidad de Oviedo, 2002.
- [48] R. K. Erf, editor. *Speckle Metrology*. New York Academic Press, 1978.
- [49] O. Ferhanoglu, M.F. Toy, and H. Urey. Two-wavelength grating interferometry for mems sensors. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 19(23):1895–1897, dec.1, 2007.
- [50] Yolanda Fernández. *Técnicas de procesamiento de fase de interferogramas de Holografía Conoscópica pra detección de defectos superficiales en entornos industriales*. PhD thesis, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y Sistemas, Universidad de Oviedo, 2006.
- [51] R. Fontana, M. C. Gambino, M. Greco, L. Marras, M. Materazzi, E. Pampaloni, and L. Pezzati. A high-precision surface analysis of the roughness of michelangelo s david. In Renzo Salimbeni, editor, *Optical Metrology for Arts and Multimedia*, pages 236–243. Proceedings of SPIE vol. 5146, 2003.
- [52] María Frade, José M. Enguita, and Ignacio Álvarez. In situ 3d profilometry of rough objects with a lateral shearing interferometry range finder. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(11):1559 – 1567, 2012.
- [53] María Frade, José María Enguita, Ignacio Álvarez, and Silvia Rodríguez-Jiménez. Fringe pattern characterization by opd analysis

- in a lateral shearing interferometric profilometer. volume 8082, page 80821S. SPIE, 2011.
- [54] C. Fraga. Cámara conoscópica long standoff line: Influencia de sus componentes. Universidad de Oviedo, Septiembre 2001.
- [55] César Fraga, José M. Enguita, Ignacio Álvarez, Jorge Marina, and Nestor Martínez. On-line non-contact measuring of synchronizer hubs. In Wolfgang Otsen, Christophe Gorecki, and Erik Novak, editors, *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV*, pages 938–959. Proceedings of SPIE vol. 5456 (part II), SPIE Bellingham, WA, 2005.
- [56] M. Françon and S. Mallick. *Polarization interferometers: applications in microscopy and macroscopy*. Wiley-Interscience, London, New York, 1971.
- [57] V. S. Frost et al. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. In *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, volume 4, pages 157–166, 1982.
- [58] D. Gabor. Theory of communication. *Journal of Institute of Electronic Engeneering*, 93(III):429–457, 1946.
- [59] D. Gabor. Holography, 1948-1971. In *Proceedings IEEE*, 60, pages 665–668, 1972.
- [60] Langis Gagnon and Alexandre Jouan. Speckle filtering of sar images: a comparative study between complex-wavelet-based and standard filters. volume 3169, pages 80–91. SPIE, 1997.
- [61] K. J. Gåsvik. *Optical Metrology*. John Wiley and Sons, 1987.
- [62] K. J. Gåsvik. *Interferogram Analysis. Digital Fringe Pattern Measurement Techniques*, chapter 2. Optical Techniques, pages 23–71. Institute of Physics, 1993.
- [63] Didier Gava. *Vision conoscopique 3D: calibration et reconstruction*. PhD thesis, Universite Rene Descartes-Paris V, June 1998.
- [64] D. C. Ghiglia and M. D. Pritt. *Two-dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms and Software*. John Wiley and Sons, Inc., 1998.

- [65] Daniel González. *Modelado de procesos industriales complejos a través de minería de datos en tiempo real. Aplicación a un Tren de Laminación en Frío*. PhD thesis, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y Sistemas, Universidad de Oviedo, 2012.
- [66] R. D. Guenther. *Modern Optics*, pages 469–520. John Wiley and Sons, inc, 1990.
- [67] P. Hariharan. *Optical Interferometry*. Elsevier, Academic Press, San Diego, USA, 2nd edition, 2003.
- [68] Gerd Häusler. *Handbook of Computer Vision and Applications. Sensors and Imaging*, volume 1, chapter 19. Three-Dimensional Sensors-Potentials and Limitations, pages 485–506. Academic Press, may 1999. ISBN-13: 978-0123797704.
- [69] Gerd Häusler and Jürgen M. Herrmann. Range sensing by shearing interferometry: influence of speckle. *Appl. Opt.*, 27(22):4631–4637, Nov 1988.
- [70] Gerd Häusler, J. Huff less, Manfred Maul, and Hans Weissmann. Range sensing based on shearing interferometry. *Appl. Opt.*, 27(22):4638–4644, 1988.
- [71] E. Hecht and A Zajac. *Optics*. Reading Mass.: Addison Welsey, 1974.
- [72] Zhenhua Huang, Albert J Shih, and Jun Ni. Phase unwrapping for large depth-of-field 3d laser holographic interferometry measurement of laterally discontinuous surfaces. *Measurement Science and Technology*, 17(11):3110, 2006.
- [73] J. M. Huntley. Noise-immune phase unwrapping algorithm. *Appl. Opt.*, 28(16):3268–3270, Aug 1989.
- [74] Kazuyoshi Itoh. Analysis of the phase unwrapping algorithm. *Appl. Opt.*, 21(14):2470–2470, Jul 1982.
- [75] R. A. Jarvis. Focus optimisation criteria for computer image processing. *Microscope*, 24:163–180, 1979.

BIBLIOGRAPHY

255

- [76] R. A. Jarvis. A perspective on range finding techniques for computer vision. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-5(2):122–139, Marzo 1983.
- [77] R. Jones and C. Wykes. Holographic and speckle interferometry. *Cambridge University Press*, 1989.
- [78] T.R. Judge and P.J. Bryanston-Cross. A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis. *Optics and Lasers in Engineering*, 21(4):199 – 239, 1994.
- [79] Alexander Khmaladze, Myung Kim, and Chun-Min Lo. Phase imaging of cells by simultaneous dual-wavelength reflection digital holography. *Opt. Express*, 16(15):10900–10911, Jul 2008.
- [80] H.Y Kim, Y.F Shen, and J.H Ahn. Development of a surface roughness measurement system using reflected laser beam. *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131(0):662 – 667, 2002.
- [81] T. Kohonen, E. Oja, O. Simula, A. Visa, and J. Kangas. Engineering applications of the self-organizing map. *Proceedings of the IEEE*, 84(10):1358 –1384, oct 1996.
- [82] T. Kohonen, M. R. Schroeder, and T. S. Huang, editors. *Self-Organizing Maps*. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, 3rd edition, 2001.
- [83] T. Kohonen et al. Engineering applications of the self organizing map. In *Proceedings IEEE*, volume 84, pages 1359+, 1996.
- [84] J. Krasinski, D. F. Heller, and O. Kafri. Phase object microscopy using moire deflectometry. *Appl. Opt.*, 24(18):3032–3036, Sep 1985.
- [85] D. T. Kuan et al. Adaptive restoration of images with speckle. In *IEEE Trans. ASSP.*, volume 35, pages 373–383, 1987.
- [86] Malgorzata Kujawinska and Joanna Wojciak. Spatial-carrier phase-shifting technique of fringe pattern analysis. volume 1508, pages 61–67. SPIE, 1991.

- [87] U. P. Kumar, B. Bhaduri, M. P. Kothiyal, and N. Krishna Mohan. Two-wavelength micro-interferometry for 3-D surface profiling. *Optics and Lasers in Engineering*, 47:223–229, February 2009.
- [88] U. Paul Kumar, Basanta Bhaduri, M.P. Kothiyal, and N. Krishna Mohan. Two-wavelength micro-interferometry for 3-d surface profiling. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(2):223 – 229, 2009. `ice:title;Recent developments in Interferometry for Microsystems Metrology;ce:title;`
- [89] Y. Pavan Kumar and Sanjib Chatterjee. Noncontact thickness measurement of plane-parallel transparent plates with a lateral shearing interferometer. *Optical Engineering*, 46(3):035602, 2007.
- [90] Patrik Langehanenberg, Björn Kemper, Dieter Dirksen, and Gert von Bally. Autofocusing in digital holographic phase contrast microscopy on pure phase objects for live cell imaging. *Appl. Opt.*, 47(19):D176–D182, Jul 2008.
- [91] Kieran G. Larkin. Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry. *J. Opt. Soc. Am. A*, 13(4):832–843, Apr 1996.
- [92] E. Laso, F. Obeso, Y. Malet, C. Nerriec, V. Patera, and I. Alvarez. Omega: novel optical sensor 3d measuring system for complex geometric in adverse environment. *Symposium on Electronic Imaging, Science & Technology: Practical Holography, IX Sesion. San Diego, CA-USA*, 1995.
- [93] O. P. Lay, S. Dubovitsky, R. D. Peters, J. P. Burger, S.-W. Ahn, W. H. Steier, H. R. Fetterman, and Y. Chang. Mstar: a submicrometer absolute metrology system. *Opt. Lett.*, 28(11):890–892, 2003.
- [94] C. Lee and S. Wang. Fingerprint feature extraction using Gabor filters. *Electronic letters*, 35(4):288–290, Febrero 1999.
- [95] J. S. Lee. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. In *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, volume 2, pages 164–168, 1980.

- [96] M. D. Levine, D. A. O’Handley, and G. M. Yagi. Computer determination of depth maps. *Computer Graphics and Image Processing*, 2:134–150, 1976.
- [97] R. A. Lewis and A. R. Jonhson. A scanning laser rangefinder for a robotic vehicle. In *Proceedings 5th Int. Conference on Artificial Intelligence*, pages 772–768, 1977.
- [98] Shyh-Tsong Lin, Sheng-Hsiung Shih, Hsiung-Nien Feng, and Ting-Chiang Tsai. Phase-shifting savart shearing interferometer. *Optical Engineering*, 45(12):125602, 2006.
- [99] X. Liu, Y. Gao, and M. Chang. A new lateral shearing interferometer for precision surface measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(9):926 – 934, 2009.
- [100] Rong-Sheng Lu and Gui Yun Tian. On-line measurement of surface roughness by laser light scattering. *Measurement Science and Technology*, 17(6):1496, 2006.
- [101] D. Malacara. *Optical Shop Testing*. John Wiley & Sons, New York, 2nd edition edition, 1992.
- [102] J. Marina. Alternativas de medida de rugosidad. sistemas basados en holografía consocópica. Universidad de Oviedo, Junio 2005.
- [103] S. J. McKenna, S. Gong, R. P. Wij $\frac{1}{2}$ rtz, J. Tanner, and D. Banin. Tracking facial feature points with Gabor wavelets and shape models. *A aparecer en Proc. 1st Conf. on Audio and Video-based Biometric Person Authentication*, 1997.
- [104] D. S. Mehta, P. Singh, M. S. Faridi, S. Mirza, and C. Shakher. Two-wavelength lateral shearing interferometry. *Optical Engineering*, 44(8):085603–+, 2005.
- [105] Dalip S. Mehta, Priti Singh, Mohd S. Faridi, Saba Mirza, and Chandra Shakher. Three-dimensional range sensing and surface profilometry using lateral shearing interferometry. volume 5532, pages 128–135. SPIE, 2004.

- [106] Dalip Singh Mehta, Priti Singh, Mohammad S. Faridi, Saba Mirza, and Chandra Shakher. Distance measurement with extended range using lateral shearing interferometry and fourier transform fringe analysis. *Optical Engineering*, 44(6):063602, 2005.
- [107] Cruz Meneses-Fabian, Areli Montes-Perez, and Gustavo Rodriguez-Zurita. Directional edge enhancement in optical tomography of thin phase objects. *Opt. Express*, 19(3):2608–2618, Jan 2011.
- [108] Nandigana Krishna Mohan and Pramod K. Rastogi. Recent developments in interferometry for microsystems metrology. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(2):199 – 202, 2009. jce:title Recent developments in Interferometry for Microsystems Metrology /ce:title .
- [109] Areli Montes-Perez, Cruz Meneses-Fabian, and Gustavo Rodriguez-Zurita. Isotropic edge-enhancement by the hilbert-transform in optical tomography of phase objects. *Opt. Express*, 19(6):5350–5356, Mar 2011.
- [110] Tingkui Mu, Chunmin Zhang, and Baochang Zhao. Optical path difference evaluation of the polarization interference imaging spectrometer. *Optics Communications*, 282(10):1984 – 1992, 2009.
- [111] L.I. Muravsky, O.P. Ostash, A.B. Kmet, T.I. Voronyak, and I.M. Andreiko. Two-frame phase-shifting interferometry for retrieval of smooth surface and its displacements. *Optics and Lasers in Engineering*, 49(3):305 – 312, 2011.
- [112] F. Obeso, L.F. Sancho, I. Álvarez, A. Díez, G. Sirat, and R. Falessi. Novel on-line surface quality-control for hot slabs in continuous casting. *La Revue de la Metallurgie*, 3:267–275, march 2002.
- [113] F. Obeso, L.F. Sancho, I. Álvarez, A. Díez, G. Sirat, and R. Falessi. New technology for on-line surface inspection in continuous casting. In *AISE annual convention*, Cleveland-OH, USA, September 2001.
- [114] J. Oliensis and P. Dupuis. Direct method for reconstructing shape from shading. *SPIE Conference 1570 on Geometric Methods in Computer Vision. San Diego, CA*, 5:116–128, Julio 1991.

BIBLIOGRAPHY

259

- [115] Alan V. Oppenheim, Ronal W. Schafer, and John R. Buck. *Discrete-Time signal processing*. Prentice hall edition, February 1999.
- [116] Christopher Outwater and Van Hamersveld. Practical holography. <http://www.holo.com/holo/book/book1.html>, 1999.
- [117] C. Palm, D. Keysers, T. Lehmann, and K. Spitzer. Gabor filtering for complex hue/saturation images for color texture classification. Technical report, Institute of Medical informatics. Aachen University of Technology (RWTH), 2000.
- [118] Feng Pan, Wen Xiao, Shuo Liu, FanJing Wang, Lu Rong, and Rui Li. Coherent noise reduction in digital holographic phase contrast microscopy by slightly shifting object. *Opt. Express*, 19(5):3862–3869, Feb 2011.
- [119] Abhijit Patil, Rajesh Langoju, and Pramod Rastogi. Phase shifting interferometry using a robust parameter estimation method. *Optics and Lasers in Engineering*, 45(2):293 – 297, 2007. Phase Measurement Techniques and their applications Phase Measurement Techniques and their applications.
- [120] Tilo Pfeifer, Rainer Tutsch, Jens Evertz, and Gerd Weres. Generalized aspects of multiple-wavelength techniques in optical metrology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 44(1):493 – 496, 1995.
- [121] John G. Proakis and Dimitris G. Manolakis. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications*. Prentice Hall, October 1995.
- [122] David W. Robinson and Graeme T. Reid, editors. *Interferogram Analysis. Digital Fringe Pattern Measurement Techniques*. Institute of Physics, Bristol and Philadelphia, 1993.
- [123] L. F. Sancho, J. Diaz, and I. Alvarez. Application of conoscopic holography to control the melt stirring. *La Revue de Metallurgie*, 3:121–130, march 2007.
- [124] W. Schwartzkopf, T. Milner, J. Ghosh, B. Evans, and A. Bovik. Two-dimensional phase unwrapping using neural networks. pages 274–277.

- [125] J. Schwider. *Advanced evaluation techniques in interefrometry*. Progress in Optics, 1990.
- [126] Y. Shirai and M. Suwa. Recognition of polyhedrons with a range finder. In *Proceedings 2nd Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, Londres*, pages 80–87, 1971.
- [127] G. Y. Sirat and D. Psaltis. *Optics letters*, 10:4–6, 1985.
- [128] G. Y. Sirat and D. Psaltis. Conoscopic holography. *Optics letters*, 10(4):4–6, 1985.
- [129] Gabriel Sirat, Jacob Vecht, and Yann Malet. Linear conoscopic holography. US patent 5953137, October 1999.
- [130] Gabriel Y. Sirat. Conoscopic holography. i. basic principles and physical basis. *J. Opt. Soc. Am. A*, 9(1):70–83, 1992.
- [131] H. Takasaki. Moiré topography. *Applied Optics*, 12:845–850, 1973.
- [132] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *J.O.S.A.*, (72):156–160, 1982.
- [133] M. Takeda and K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes. *Applied Optics*, 22(24), 1983.
- [134] Mitsuo Takeda. Spatial-carrier fringe-pattern analysis and its applications to precision interferometry and profilometry: An overview. *Industrial Metrology*, 1(2):79 – 99, 1990.
- [135] Andrey Toropov. An effective visualization and analysis method for edge measurement. In Osvaldo Gervasi and Marina Gavrilova, editors, *Computational Science and Its Applications ICCSA 2007*, volume 4706 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 941–950. Springer Berlin / Heidelberg, 2007.
- [136] Jahja I. Trisnadi. Speckle contrast reduction in laser projection displays. In Ming H. Wu, editor, *Projection Displays VIII*, pages 131–137. Proceedings of SPIE vol. 5657, San Jose, CA, 2002.

BIBLIOGRAPHY

261

- [137] Josep Vidal, Josep Nicolas, and Juan Campos. New method to improve the accuracy in a sequential lateral shearing interferometer. *Optical Engineering*, 50(11):115601, 2011.
- [138] Lingli Wang and Theo Tschudi. Speckle reduction in laser projection systems by diffractive optical elements. *Applied Optics*, 37(10), 1998.
- [139] Lingli Wang, Theo Tschudi, Markus Boeddinghaus, Alexander Elbert, Thorsteinn Halldorsson, and Palmi Petursson. Speckle reduction in laser projections with ultrasonic waves. *Optical Engineering*, 39(6):1659–1664, 2000.
- [140] P. M. Will and K. S. Pennington. Grid coding: a preprocessing technique for robot and machine vision. In *Proceedings 2nd Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, Londres*, pages 66–68, 1971.
- [141] Jun-Fang Wu and Chun-Min Zhang. The coefficients of reflection and refraction on interface of the crystals in the savart polariscope. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 121(20):1835 – 1839, 2010.
- [142] Y. Xiong and S. A. Shafer. Variable window Gabor filters and their use in focus and correspondence. Technical report, The Robotics Insitute. Carnegie Mellon University. Pittsburgh Pennsylvania 15213, Marzo 1994.
- [143] Y. Yakimovsky and R. Cunningham. A system for extrancting three-dimensional measurements from a stereo pair of TV cameras. *Computer Graphics and Image Processing*, 7:195–210, 1978.
- [144] S. Yamamoto, Y. Nakajima, Y. Sato, and S. Harino. Extraction of fluorescent dot traces from a scanning laser ophthalmoscope image sequence by spatio-temporal image analysis: Gabor filter and radon transform filtering. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 46(11):1357–1363, Noviembre 1999.
- [145] H. Zebker and R. Goldstein. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysic Research*, 91:4993–5001, 1986.

- [146] L. Zeng, K. Seta, H. Matsumoto, and S. Iwashaki. Length measurement by a two-colour interferometer using two close wavelengths to reduce errors caused by air turbulence. *Measurement Science and Technology*, 10:587–591(5), 1999.
- [147] Song Zhang and Shing-Tung Yau. High-resolution, real-time 3d absolute coordinate measurement based on a phase-shifting method. *Opt. Express*, 14(7):2644–2649, 2006.
- [148] Tong Zhang and Ichirou Yamaguchi. Three-dimensional microscopy with phase-shifting digital holography. *Opt. Lett.*, 23(15):1221–1223, Aug 1998.
- [149] J. Zhu, E. Baugh, and F. E. Talke. Simultaneous five-wavelength interferometry for head/tape spacing measurement. *Tribology International*, 33(5-6):409 – 414, 2000.
- [150] Liang Zhu, Jacob Barhak, Vijay Srivatsan, and Reuven Katz. Efficient registration for precision inspection of free-form surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32:505–515, 2007.