



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Departamento de Informática

Programa de Doctorado en Informática

**DISEÑO, MONITORIZACIÓN Y CONTROL DE
APLICACIONES COLABORATIVAS PERSONA-ROBOT
EN ENTORNOS INDUSTRIALES**

TESIS DOCTORAL POR

Luis Pérez Castaño

Septiembre 2020



RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

1.- Título de la Tesis	
Español/Otro Idioma: <i>Diseño, monitorización y control de aplicaciones colaborativas persona-robot en entornos industriales</i>	Inglés: <i>Design, monitoring and control of human-robot collaborative applications in industrial environments</i>
2.- Autor	
Nombre: Luis Pérez Castaño	DNI/Pasaporte/NIE: _____
Programa de Doctorado: Informática	
Órgano responsable: Centro Internacional de Postgrado de la Universidad de Oviedo	

RESUMEN (en español)

En el contexto actual de la Industria 4.0, la automatización inteligente, incluyendo la robótica avanzada, es el principal factor para la mejora de la competitividad de la industria. Al igual que en las anteriores revoluciones industriales, la evolución de la tecnología supone un cambio de paradigma para la industria. Los sistemas ciber-físicos controlan la producción de fábricas altamente automatizadas, siendo una inteligencia artificial quien toma las decisiones y ejecuta acciones. Los robots son perfectos sustitutos de la mano de obra en ciertas tareas. Esta idea es precisamente la que ha permitido y limitado al mismo tiempo su implantación, que ha sido relativamente rápida en aquellas industrias con producto seriado y tareas repetitivas, como por ejemplo, la automovilística, y más lenta o no se ha llegado a producir en otras con producto de series muy cortas o piezas grandes y delicadas, como por ejemplo, la aeroespacial, donde se requiere mayor flexibilidad para resolver la complejidad técnica y económica para implantar un robot. En este caso, los robots precisan de tecnologías adicionales para mejorar sus prestaciones y para, en lugar de sustituir a las personas, trabajar colaborativamente con ellas. De esta forma, se aprovechan al máximo las capacidades de ambos para ganar eficiencia y ahorrar tiempos, materiales y energía y mejorar las condiciones de trabajo y seguridad, mejoras que en la industria tradicional estaban limitadas por los procesos manuales.

En este contexto, la motivación de esta Tesis Doctoral es contribuir a la identificación de las tecnologías clave y metodologías para la mejora de las prestaciones de los robots industriales y dotarlos de la capacidad de trabajar colaborativamente con las personas. Para ello, además de estudiar aplicaciones existentes en el estado del arte, se proponen varias metodologías para la formación de operarios, el diseño y la puesta en marcha de celdas robóticas y la monitorización y el control del funcionamiento y la interacción persona-robot. La arquitectura, los métodos y las interfaces propuestas se validan en casos de estudios representativos que puedan ser extrapolados a múltiples industrias, especialmente, en aquellas más reacias al uso de robots.

RESUMEN (en Inglés)

In the current context of Industry 4.0, intelligent automation, including advanced robotics, is the main factor for improving the competitiveness of the industry. As in previous industrial revolutions, the evolution of technology represents a paradigm shift for industry. Cyber-physical systems control the production of highly automated factories, where an artificial intelligence makes decisions and triggers actions. Robots are perfect substitutes for manual workforce for certain tasks. This is what has permitted and at the same time limited their implementation, which has been relatively fast in those industries with serial products and repetitive tasks, such as the automotive, and slower



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

or non-existent in others with short series production or large and delicate parts, such as aerospace, where greater flexibility is required to solve the technical and economic complexity to install a robot. In this case, robots require additional technologies to improve their performance and, instead of replacing people, work collaboratively with them, making the most of the capacities of both to increase efficiency, to save time, materials and energy, and to improve the working conditions and the safety, which were limited by manual processes in the traditional industry.

In this context, the aim of this Thesis is to contribute to the identification of key technologies and methodologies for improving the performance of industrial robots and to provide them with the ability to work collaboratively with humans. For this purpose, in addition to studying existing applications in the state of the art, several methodologies are proposed for operator training, for the design and commissioning of robotic cells, and for monitoring the operation and the human-robot interaction. The proposed architecture, methods and interfaces are validated in representative case studies, which can be extended to multiple industries, especially to robot-reluctant ones.

**SR. PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE DOCTORADO
EN INFORMÁTICA**



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Departamento de Informática

Programa de Doctorado en Informática

**DISEÑO, MONITORIZACIÓN Y CONTROL DE
APLICACIONES COLABORATIVAS PERSONA-ROBOT
EN ENTORNOS INDUSTRIALES**

TESIS DOCTORAL POR

Luis Pérez Castaño

Septiembre 2020

Un robot no hará daño a un ser humano o, por inacción, permitirá que un ser humano sufra daño.

Isaac Asimov

Agradecimientos

Agradezco la orientación y la dedicación de mis directores de tesis, Rubén y Daniel. Sin su ayuda y sus sabios consejos no habría sido posible recorrer este camino que empezó en el Proyecto Fin de Carrera, siguió con un contrato de investigación y culmina ahora con la Tesis Doctoral. Por mi dedicación profesional, seguro que en el futuro seguiremos trabajando juntos en nuevos proyectos de investigación. Quiero agradecer también a mi familia y a mis compañeros de departamento en PRODINTEC/IDONIAL su insistencia y su apoyo para realizar esta tesis. Especialmente importante ha sido el impulso de Nuria para llegar a este punto. Muchas gracias a todos.

Resumen

En el contexto actual de la Industria 4.0, la automatización inteligente, incluyendo la robótica avanzada, es el principal factor para la mejora de la competitividad de la industria. Al igual que en las anteriores revoluciones industriales, la evolución de la tecnología supone un cambio de paradigma para la industria. Los sistemas ciber-físicos controlan la producción de fábricas altamente automatizadas, siendo una inteligencia artificial quien toma las decisiones y ejecuta acciones. Los robots son perfectos sustitutos de la mano de obra en ciertas tareas. Esta idea es precisamente la que ha permitido y limitado al mismo tiempo su implantación, que ha sido relativamente rápida en aquellas industrias con producto seriado y tareas repetitivas, como por ejemplo, la automovilística, y más lenta o no se ha llegado a producir en otras con producto de series muy cortas o piezas grandes y delicadas, como por ejemplo, la aeroespacial, donde se requiere mayor flexibilidad para resolver la complejidad técnica y económica para implantar un robot. En este caso, los robots precisan de tecnologías adicionales para mejorar sus prestaciones y para, en lugar de sustituir a las personas, trabajar colaborativamente con ellas. De esta forma, se aprovechan al máximo las capacidades de ambos para ganar eficiencia y ahorrar tiempos, materiales y energía y mejorar las condiciones de trabajo y seguridad, mejoras que en la industria tradicional estaban limitadas por los procesos manuales.

En este contexto, la motivación de esta Tesis Doctoral es contribuir a la identificación de las tecnologías clave y metodologías para la mejora de las prestaciones de los robots industriales y dotarlos de la capacidad de trabajar colaborativamente con las personas. Para ello, además de estudiar aplicaciones existentes en el estado del arte, se proponen varias metodologías para la formación de operarios, el diseño y la puesta en marcha de celdas robóticas y la monitorización y

VI

el control del funcionamiento y la interacción persona-robot. La arquitectura, los métodos y las interfaces propuestas se validan en casos de estudios representativos que puedan ser extrapolados a múltiples industrias, especialmente, en aquellas más reacias al uso de robots.

Abstract

In the current context of Industry 4.0, intelligent automation, including advanced robotics, is the main factor for improving the competitiveness of the industry. As in previous industrial revolutions, the evolution of technology represents a paradigm shift for industry. Cyber-physical systems control the production of highly automated factories, where an artificial intelligence makes decisions and triggers actions. Robots are perfect substitutes for manual workforce for certain tasks. This is what has permitted and at the same time limited their implementation, which has been relatively fast in those industries with serial products and repetitive tasks, such as the automotive, and slower or non-existent in others with short series production or large and delicate parts, such as aerospace, where greater flexibility is required to solve the technical and economic complexity to install a robot. In this case, robots require additional technologies to improve their performance and, instead of replacing people, work collaboratively with them, making the most of the capacities of both to increase efficiency, to save time, materials and energy, and to improve the working conditions and the safety, which were limited by manual processes in the traditional industry.

In this context, the aim of this Thesis is to contribute to the identification of key technologies and methodologies for improving the performance of industrial robots and to provide them with the ability to work collaboratively with humans. For this purpose, in addition to studying existing applications in the state of the art, several methodologies are proposed for operator training, for the design and commissioning of robotic cells, and for monitoring the operation and the human-robot interaction. The proposed architecture, methods and interfaces are validated in representative case studies, which can be extended to multiple industries, especially to robot-reluctant ones.

Índice general

Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XIII
1. Introducción	1
1.1. Motivación y objetivos	9
1.2. Contexto	11
1.3. Publicaciones	13
2. Desarrollo y discusión	17
2.1. Guiado de robots	18
2.2. Interfaz persona-robot	22
2.3. Colaboración simbiótica	28
2.4. Diseño y puesta en marcha	40
3. Conclusiones	51
3.1. Trabajo futuro	54
4. Trabajos publicados	55
4.1. Artículos y factor de impacto	56
4.1.1. Robot Guidance Using Machine Vision Techni- ques in Industrial Environments: A Comparati- ve Review	56
4.1.2. Industrial robot control and operator training using virtual reality interfaces	57
4.1.3. Symbiotic human-robot collaborative approach for increased productivity and enhanced safety in the aerospace manufacturing industry	58

4.1.4. Digital Twin and Virtual Reality Based Methodology for Multi-Robot Manufacturing Cell Commissioning	59
--	----

Bibliografía	61
---------------------	-----------

Índice de figuras

1.1. Evolución del suministro anual de robots industriales. Fuente: <i>IFR World Robotics 2020</i> [1].	4
2.1. Arquitectura para la conexión de la interfaz de realidad virtual con el robot [2].	26
2.2. Proceso para crear el entorno inmersivo y la interfaz de realidad virtual [2].	27
2.3. Arquitectura de subsistemas [3].	31
2.4. Proceso de ensamblaje [3].	32
2.5. Vista general de la celda simulada [3].	35
2.6. Vista general de la celda real con HMI en primer plano [3].	36
2.7. Arquitectura y componentes [3].	37
2.8. Metodología de diseño basada en el gemelo digital [4]. .	42
2.9. Arquitectura para la integración del gemelo digital [4].	44
2.10. Componentes y arquitectura [4].	45
2.11. Diagrama de flujo del proceso [4].	46
2.12. Distribución en planta [4].	46
2.13. Vista general de la celda virtual [4].	47
2.14. Vista general de la celda real [4].	48
4.1. Citas. Fuente: <i>Google Académico</i>	55

Índice de tablas

2.1. Comparativa de las técnicas de visión en términos de precisión, rango, peso, seguridad, tiempo de procesamiento e influencias del entorno [5].	21
2.2. Aplicaciones de visión artificial para el guiado de robots [5].	23
2.3. Comparativa entre los simuladores de los fabricantes, los simuladores comerciales con realidad virtual y la propuesta de gemelo digital con realidad virtual [4]. . .	49

Capítulo 1

Introducción

A lo largo de la historia, la evolución de la industria está ligada a la evolución de la tecnología, mejorando las condiciones de trabajo y la productividad. La introducción de nueva tecnología en las fábricas ha originado las distintas revoluciones industriales. Con la Primera Revolución Industrial a finales del siglo XVIII, se introdujo la máquina de vapor y, desde entonces, las fábricas han experimentado grandes cambios en los sistemas de producción [6]. La Segunda Revolución Industrial, a principios del siglo XX, introdujo la producción en masa basada en la división del trabajo y la energía eléctrica [7]. La Tercera Revolución Industrial, a principios de los años 70 del siglo pasado introdujo la robótica, la electrónica y las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) para la automatización de la producción [8].

Hoy en día, estamos inmersos en la Cuarta Revolución Industrial, conocida como la “Industria 4.0” basada en los sistemas de producción ciber-físicos (CPPS, *Cyber-Physical Production Systems*), la automatización inteligente, el intercambio de datos y las nuevas tecnologías de fabricación [9]. Esta nueva industria se caracteriza por ser:

- Automatizada: incrementa la velocidad de los procesos, la calidad de los productos y la seguridad en las instalaciones.
- Conectada: equipos interconectados para el análisis de datos y el intercambio de información.
- Flexible: fabricación adaptable a las variaciones de la demanda y los cambios en la producción.

- Inteligente: fabricación que asiste al trabajador en la planificación y la realización de sus tareas.
- Social: las personas son el centro de la actividad y concentran el mayor valor dentro de las fábricas.
- Sostenible: uso racional de los recursos y la tecnología contribuyendo a la sostenibilidad del negocio y del medioambiente.

El aumento de la capacidad de almacenamiento y procesamiento de datos así como el desarrollo de nuevas tecnologías y la aparición de nuevos modelos de negocio han potenciado la expansión de la Industria 4.0. A nivel europeo, se estima que el potencial económico de digitalización de la industria ronda los 375-415 mil millones de euros al año hasta 2025 y 120 mil millones de euros adicionales de VAB (Valor Agregado Bruto) en España [10]. Para este cambio de paradigma se hacen imprescindibles habilitadores como los sistemas de producción ciber-físicos, la robótica colaborativa y la computación visual, que engloba un conjunto de tecnologías, como la visión artificial, la realidad virtual o la realidad aumentada, entre otras, orientadas a la adquisición, gestión, análisis y síntesis de datos e información visual.

La Comisión Europea se ha marcado como objetivo de su programa H2020 alcanzar el liderazgo en tecnologías industriales. Prueba de ello es el programa de impulso a la investigación e innovación “Factories of the Future” (Fábricas del Futuro) [11]. Para lograrlo es importante automatizar procesos y reducir las tasas de accidentes, mejoras que en la industria tradicional estaban limitadas por los procesos manuales. La automatización de procesos, la computación visual y los robots inteligentes conducirán a la industria moderna a la eficiencia, dando lugar a un rápido incremento de la productividad, un ahorro de energía y materiales, flexibilidad de los procesos productivos, escalabilidad en costes y funcionalidad así como una mejora de las condiciones de trabajo y la seguridad [12]. En consecuencia, la Comisión Europea ha identificado la robótica como una de las claves por su importancia para la economía europea [13].

El primer caso de uso de la robótica industrial tiene su origen en 1956 en Estados Unidos, incorporándose en el mercado europeo en 1973 [14]. Desde 2010, la demanda de robots industriales ha aumentado considerablemente debido a la continua tendencia hacia la automatización y las continuas innovaciones técnicas en los robots industriales.

Hace ahora diez años, la robótica industrial ya se postulaba como una tecnología rentable, pero su penetración era muy mejorable, de forma que se estima que sólo estaba presente en un 40 % de las empresas y su presencia en la PYME era extremadamente reducida [15]. El Informe Mundial de Robótica, publicado anualmente por la Federación Internacional de Robótica (IFR, *International Federation of Robotics*) [1], estimaba en 2017 que, hasta 2020, se instalarían en fábricas de todo el mundo más de 1,7 millones de nuevos robots industriales. Esto supone un crecimiento alrededor del 14 % previsto entre 2018 y 2020. En 2018, las instalaciones de robots industriales en todo el mundo aumentaron un 6 % superando las 420 mil unidades, por un valor de 16.500 millones de dólares (sin software ni periféricos). En avance del informe de 2020, se estima que en 2019 las instalaciones no han superado el récord de 2018, pero se mantienen por encima de las 380 mil unidades (Figura 1.1). Esta tendencia al alza viene respaldada por ciclos de negocio más rápidos y la necesidad de automatización flexible debido a la disminución del ciclo de vida y al aumento en la variedad de los productos.

Un robot industrial combina diferentes tecnologías que permiten la ejecución de tareas según unos requisitos de precisión, tiempo, seguridad, etc. La calidad del proceso y del producto resultante son puntos clave. Los robots industriales están diseñados para realizar operaciones de forma rápida y repetitiva [16], por lo que son sustitutos perfectos del trabajo manual. Según la IFR, sus principales aplicaciones son: manejo de maquinaria (paletizado, empaquetado, carga y descarga...), soldadura, aplicación de sustancias (pintado, laqueado, pegado, sellado...), procesamiento de materiales (corte, mecanizado...), ensamblaje y desensamble y otras. Sin embargo, hay muchas industrias que son reacias a la implantación de soluciones robóticas porque perciben sus tareas y procesos como muy complejos para ser totalmente automatizados [17]. Para algunas aplicaciones industriales, particularmente aquellas que conllevan fabricación de piezas grandes o específicas y que no se fabrican en serie, como en el sector aeronáutico, en el sector naval, o en el sector de la construcción, las soluciones robóticas estándar no son, en general, económicas y tienen escasa flexibilidad, siendo necesario un robot específico [18, 19].

Por otra parte, la seguridad ha limitado tradicionalmente el uso de los robots, manteniéndose separados de las personas. Los robots industriales están enfocados a automatizar procesos de fabricación de

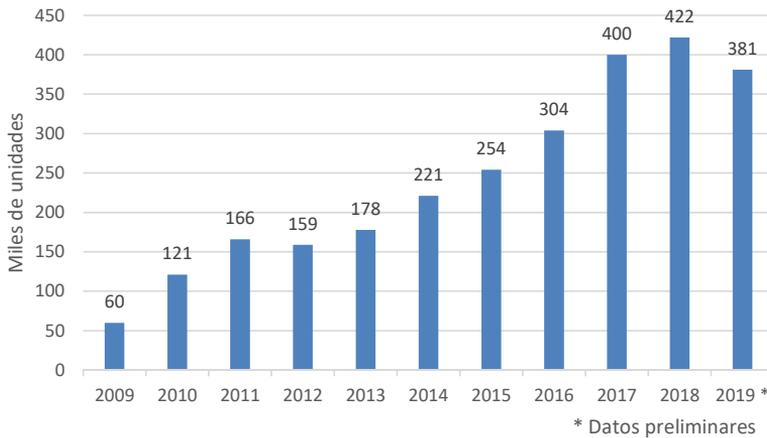


Figura 1.1: Evolución del suministro anual de robots industriales. Fuente: *IFR World Robotics 2020* [1].

tareas repetitivas donde no es necesaria la interacción humana. Existe una gran variedad en cuanto a cargas máximas y precisiones, permitiendo abarcar el manejo de grandes y elevadas cargas. La protección de las personas alrededor de un robot se lleva a cabo, normalmente, mediante la utilización de barreras físicas o sensores certificados para realizar una parada controlada del robot cuando una persona entra en la zona designada como área de seguridad. Sin embargo, estos sistemas requieren una amplia zona alrededor del espacio de trabajo del robot, es decir, dentro de aquellas zonas que el robot puede llegar a alcanzar no puede haber personas.

La industria europea requiere de un nuevo tipo de robots que sean capaces de realizar sus tareas con exactitud garantizando la seguridad de las personas, enfrentándose a retos como:

- La falta de capacidad de adaptación: los cambios dinámicos en las plantas industriales requieren una monitorización en tiempo real y un control adaptativo por medio de sensores inteligentes, como por ejemplo sistemas de visión artificial, que permitan una

planificación inmediata de tareas/movimientos.

- La falta de flexibilidad: la complejidad y el dinamismo de los entornos actuales de fabricación (equipos y procesos) requieren de interacciones humano-robot que respondan a las particularidades de cada uno de ellos.
- La falta de integración: el mercado global obliga a acelerar el *time-to-market* por medio de la integración de los planificadores y los controladores del robot utilizando comandos cada vez más sencillos que simplifiquen la fabricación.

Conscientes de esta situación, dos de las principales líneas de investigación dentro del campo de la fabricación avanzada para la Comisión Europea, son:

- Fabricación centrada en los trabajadores, mejorando las condiciones de trabajo y creando sistemas productivos automáticos y semiautomáticos donde las personas tendrán que contar con un mayor nivel de formación para interactuar y compartir tareas con sistemas inteligentes.
- Sistemas de fabricación inteligentes, reconfigurables y capaces de fabricar lotes pequeños de piezas diferentes.

Todos estos nuevos retos implican el desarrollo de soluciones robóticas que permitan la mejora de la productividad de la Industria 4.0 garantizando la seguridad de los trabajadores. Para ello, se requieren nuevos sistemas de control más flexibles y fáciles de programar, que permitan a los robots trabajar en condiciones de seguridad de forma colaborativa con los operarios. En este escenario común donde personas y robots comparten el espacio de trabajo, los controles y los algoritmos de movimiento tradicionales son insuficientes [20], por lo que se necesitan nuevas estrategias para garantizar la seguridad y mantener el máximo nivel de productividad del robot. La combinación eficiente de la potencia y la repetitividad de los robots con la flexibilidad de las personas permite procesos de fabricación inteligentes con gran potencial frente a las operaciones manuales tradicionales. Los robots aportan sus ventajas realizando tareas en las que la persona no aporta valor, proporcionando una solución más eficiente en coste, mientras que los operarios realizan tareas que requieren flexibilidad. El trabajo

colaborativo persona-robot resuelve el problema de la complejidad de automatización total de ciertas operaciones en multitud de industrias, donde el conocimiento humano y sus capacidades son irremplazables.

A diferencia de los robots industriales, los robots colaborativos (*cobots*) están diseñados para trabajar conjuntamente con una persona de forma segura y compartiendo el mismo espacio de trabajo. Debido a su ubicación cerca de humanos, los *cobots* suelen estar diseñados con un alcance y carga máxima similar a la de un humano [21]. El objetivo es asistir a un operador en determinadas tareas que pueden ser peligrosas, tediosas y/o extenuantes. Este tipo de robots se pueden adaptar fácilmente a un entorno de producción cambiante gracias a su flexibilidad y su facilidad de programación [22].

La filosofía “Lean Manufacturing” es un conjunto de métodos y principios para organizar y controlar la producción independientemente de la tecnología para reducir el tiempo de entrega, minimizando los costes y maximizando la calidad [23]. La integración de las tecnologías de automatización con *Lean Manufacturing* se denomina “Lean Automation” [24]. El concepto de la robótica colaborativa data de 1999 [25], pero ha ido ganando fuerza gracias a la incorporación de tecnologías periféricas al robot, tanto para la seguridad como para la incorporación de nuevas capacidades y funcionalidades. Los avances en la colaboración persona-robot son uno de los aspectos principales de la Industria 4.0 [26, 27]. Las mejoras en las tecnologías de seguridad están permitiendo incorporar robots industriales a aplicaciones colaborativas, lo que conlleva poder alcanzar velocidades, precisiones y cargas máximas mayores que las que proporcionan la mayoría de los cobots. Para ello hay que tener en consideración el estándar ISO/TS 15066:2016 [28], donde se establecen las fuerzas, potencia y velocidad máxima permitida, los sistemas de seguridad (cortinas, escáneres, cámaras, sensores...), además de los criterios de diseño del robot y las herramientas [29].

Las técnicas de computación visual como la visión artificial, la realidad virtual y la realidad aumentada, combinadas con la robótica tienen un enorme potencial de impacto no sólo en la industria, sino también en diversas áreas de aplicación como la medicina, la agricultura, o la construcción, entre otras. Actualmente los sistemas de visión son ampliamente utilizados en la industria, principalmente para inspección de procesos y controles de calidad [30]. En los últimos tiempos se ha incrementado su uso en aplicaciones relativas a la mejora de la seguri-

dad de los trabajadores en el entorno industrial y al guiado de robots, integrándose ambas aplicaciones en una sola para el guiado de robots colaborativos [31]. El campo de la visión 3D para la interacción segura entre personas y robots está ganando cada vez más atención. Los trabajos recientes se han centrado en la adquisición de datos relativos a personas y otros obstáculos alrededor dentro del área de trabajo del robot y en el diseño adecuado de las zonas de seguridad virtuales, para la detección y prevención temprana de posibles colisiones. Inicialmente, se empleaban sistemas estáticos con marcas en el suelo que definían las zonas de seguridad. Sin embargo, dada la necesidad de una seguridad dinámica en función de la posición del robot o de los obstáculos, las investigaciones y los desarrollos se han reorientado a captar dichas posiciones para determinar si se va a producir la colisión y, por tanto, evitarla [32].

Por otra parte, los robots industriales son capaces de moverse a una posición repetidamente con un error menor de 0.1 mm, aunque su exactitud absoluta puede ser de varios milímetros debido a tolerancias, excentricidades, elasticidades, desgastes, cargas, temperatura o imprecisión de los modelos matemáticos de transformación [16, 33]. En la industria de la automoción, el requisito de precisión para las operaciones como la soldadura por puntos es del orden de 1 mm. La industria aeroespacial es un desafío para la robótica ya que sus requisitos en este sentido son al menos entre de diez y veinte veces mayores [34]. Dado que los robots convencionales no son capaces de lograr esta precisión es necesario utilizar métodos ópticos de calibración, como los *laser tracker*, la fotogrametría o los sistemas de visión con múltiples cámaras de alta resolución, que permitan corregir los movimientos del robot a partir de la detección de la posición espacial de la punta de la herramienta [35–37]. La combinación de un sistema de medición con un robot es una solución óptima ya que utiliza la capacidad del robot para un movimiento preciso y supera las deficiencias de exactitud. Además, las piezas de trabajo pueden estar colocadas ligeramente diferentes de lo que espera el robot, por lo que se hace necesario corregir la posición de la herramienta o incluso del resto de elementos del propio robot. Este punto es especialmente importante en los robots móviles.

Otra de las herramientas clave para la interacción persona-robot es la interfaz de usuario (HMI, *Human-Machine Interface*). Robots y operarios tienen que intercambiar instrucciones antes y durante el trabajo colaborativo [38]. Desde 1999, se vislumbran grandes resulta-

dos de la conjunción entre la robótica y la realidad virtual [39]. A las tradicionales consolas para programar y comandar el robot, se añaden nuevas interfaces como la realidad virtual y la realidad aumentada, que mediante gráficos tridimensionales generados por ordenador, permiten crear una experiencia inmersiva con multitud de aplicaciones en el campo de la interacción persona-robot. Por ejemplo, la realidad aumentada permite a los operarios disponer de información adicional relativa a su seguridad, instrucciones, órdenes de trabajo, asistencia remota... simplemente portando unas gafas que se convierten en una interfaz mejorada.

Antes de enfrentarse al trabajo con un robot, ya sea en modo colaborativo o no, los operarios deberían someterse a un proceso de entrenamiento para aprender a manejar el robot y, especialmente, para conocer los riesgos y saber actuar con seguridad. Como muchas compañías, no pueden permitirse dedicar un robot a estas tareas de aprendizaje, los simuladores son una alternativa asequible para la formación [40], por lo que la realidad virtual puede utilizarse como herramienta para desarrollar estos simuladores, proporcionando una experiencia totalmente inmersiva en la que reproducir situaciones reales con un coste mucho menor y sin riesgos. Por otra parte, una vez generado el entorno inmersivo virtual, éste puede ser utilizado para otros propósitos distintos a la formación, como el diseño de la celda robótica y el proceso productivo, la simulación de programas, el control remoto, la visualización de eventos, etc. convirtiendo este entorno virtual en un gemelo digital que reproduzca fielmente la realidad no sólo desde el punto de vista de la visualización, sino también del comportamiento del robot y del resto de elementos de la celda. Uno de los nuevos paradigmas en la Industria 4.0 es conseguir una conexión permanente y retroalimentada entre el mundo digital y el real como clave de la eficiencia y competitividad. El gemelo digital, como modelo virtual, reproduce digitalmente el comportamiento y rendimiento de un proceso o producto lo que permite predecir fallos y situaciones anómalas, consiguiendo procesos y productos avanzados.

El concepto de gemelo digital surge inicialmente en la NASA para replicar físicamente los vehículos espaciales, de tal forma que, si hay que hacer una reparación sobre el vehículo que está en el espacio, los ingenieros puedan asistir a los astronautas con el que está en tierra [41]. Esta idea de gemelo físico evolucionó al virtual rápidamente para probar los diseños antes de su construcción y, posteriormente,

replicar en el modelo virtual lo que estaba sucediendo en el real, conectando ambos mundos mediante sensores. Por analogía, esta idea se ha extendido a día de hoy a los procesos de fabricación (y a los productos), para la toma de decisiones en tiempo real y es de aplicación directa al desarrollo, monitorización y control de aplicaciones colaborativas persona-robot [42, 43]. La realidad virtual facilita a las personas la visualización y la interacción con el gemelo digital [44].

En esta introducción se ha presentado la importancia de la robótica para la mejora de la productividad y la seguridad en los entornos de fabricación industrial, resaltando la importancia de la integración de tecnologías periféricas para proporcionar de forma eficiente a los robots industriales nuevas capacidades que permitan la colaboración sin barreras y segura con las personas. Los nuevos sistemas de seguridad basados en visión artificial y sensores así como a los nuevos interfaces persona-máquina, permiten que los robots puedan trabajar sin barreras físicas colaborativamente con los operarios y de forma sincronizada con otros robots. La incorporación de estas tecnologías en el proceso productivo puede suponer un impacto muy positivo en la cadena de valor de las organizaciones, con el consiguiente aumento de productividad en las mismas. Todas ellas serán abordadas y analizadas dentro de los objetivos de esta tesis. Además, se han identificado líneas futuras que den continuidad a este trabajo de investigación.

Esta tesis se presenta como un compendio de publicaciones organizada como sigue: resultados obtenidos y contribuciones aportadas en el Capítulo 2, conclusiones y trabajo futuro en el Capítulo 3 y, finalmente, en el Capítulo 4 se muestran los artículos que forman el compendio de publicaciones y la información sobre su impacto.

1.1. Motivación y objetivos

La industria actual necesita nuevos sistemas de automatización inteligente para la mejora de productividad y la seguridad. En muchos sectores, todavía a día de hoy, se mantienen multitud de tareas manuales debido a la dificultad técnica y económica de instalar un robot. La combinación del conocimiento humano y sus capacidades con las de los robots permite la implantación de nuevas soluciones de automatización que hasta ahora no se habían podido abordar. En el contexto actual de la Industria 4.0, uno de cuyos pilares es la automatización inteligente,

la motivación de la presente Tesis Doctoral es contribuir a la identificación de métodos y tecnologías para facilitar la implantación de soluciones robóticas para la automatización colaborativa de procesos de fabricación para mejorar la productividad y la seguridad, optimizando los procesos, repartiendo de forma eficiente las tareas entre las personas y las máquinas (robots), ahorrando materiales y energía y mejorando la seguridad y las condiciones de trabajo en las fábricas. Para ello, se propondrá, desarrollará y validará una metodología de diseño y puesta en marcha de celdas robóticas colaborativas dotadas de tecnologías auxiliares para permitir la interacción sin barreras físicas entre personas y robots para la automatización de procesos.

Para conseguir este objetivo general, se han definido los siguientes objetivos específicos:

1. Recopilar antecedentes, analizar el estado del arte y estudiar de tecnologías y soluciones técnicas existentes en términos de precisión, complejidad de implementación, coste, etc.
2. Seleccionar las tecnologías clave para el diseño y la implementación del proceso colaborativo.
3. Proponer una metodología para el diseño, la implementación y la puesta en marcha de celdas robóticas basadas en procesos colaborativos que permitan el control y el trabajo en condiciones seguras, definiendo los requisitos y los componentes necesarios para la arquitectura.
4. Diseñar una arquitectura modular que integre todos los elementos necesarios para el funcionamiento y control de la celda colaborativa.
5. Diseñar una interfaz que permita la interacción y comunicación entre los operarios y los robots.
6. Realizar la validación de las propuestas anteriores en demostradores con operaciones reales con personas y robots trabajando de forma colaborativa.

1.2. Contexto

Las actividades de investigación que han dado lugar a esta Tesis Doctoral se han desarrollado en el Centro Tecnológico Fundación PRO-DINTEC y el Centro Tecnológico Fundación IDONIAL, este último resultado de la fusión en enero de 2018 entre PRODINTEC y el Centro Tecnológico Fundación ITMA. En este contexto y financiados parcialmente por diversos organismos a través de distintas convocatorias regionales, nacionales y europeas, se ha participado en los proyectos de investigación que se mencionan a continuación:

- VALERI (*Validation of advanced, collaborative robotics for industrial applications*):
 - Entidad financiadora: Comisión Europea.
 - Programa: FP7.
 - Referencia: 314774.
 - Plazo de ejecución: 2012-2015.
- SYMBIO-TIC (*Symbiotic human-robot collaborative assembly: technologies, innovations and competitiveness*):
 - Entidad financiadora: Comisión Europea.
 - Programa: H2020.
 - Referencia: 637107.
 - Plazo de ejecución: 2015-2019.
- Fábrica 2020 (*Desarrollo y validación de nuevas aplicaciones basadas en la integración de tecnologías de realidad aumentada y realidad virtual al proceso industrial*):
 - Entidad financiadora: Gobierno del Principado de Asturias.
 - Programa: Programa Asturias 2016.
 - Referencia: IDI/2016/000237.
 - Plazo de ejecución: 2016-2017.
- OARCO (*Desarrollo de celda multipropósito para nuevos procesos aeronáuticos basada en sistemas de control robóticos*):

- Entidad financiadora: Gobierno del Principado de Asturias.
 - Programa: Programa Asturias 2016.
 - Referencia: IDI/2016/000238.
 - Plazo de ejecución: 2016-2017.
- Robots 4.0 (*Desarrollo de aplicaciones robóticas para la mejora de la productividad y la seguridad en la Industria 4.0*):
 - Entidad financiadora: Gobierno del Principado de Asturias.
 - Programa: Programa Asturias 2018.
 - Referencia: IDI/2018/000063.
 - Plazo de ejecución: 2018-2020.
- AgriBot (*Demostrador tecnológico para la evaluación de la viabilidad de implantación de soluciones 4.0 en la agricultura de precisión*):
 - Entidad financiadora: Gobierno del Principado de Asturias.
 - Programa: Programa Asturias 2018.
 - Referencia: IDI/2018/000058.
 - Plazo de ejecución: 2018-2020.
- SIAS (*Desarrollo de un sistema inteligente autónomo de señalización y apoyo de operaciones de mantenimiento y conservación de infraestructuras en carretera*):
 - Entidad financiadora: CDTI-FEDER.
 - Programa: Programa operativo pluri-regional de crecimiento inteligente.
 - Referencia: IDI-20170659.
 - Plazo de ejecución: 2017-2019.
- STEWART (*Sorting system for demolition waste based on advanced robotics*):
 - Entidad financiadora: CDTI.
 - Programa: Manunet 2017.

- Referencia: EXP-00108807/SERA-20181014.
- Plazo de ejecución: 2018-2020.
- MIRAGED (*Posicionamiento estratégico en modelos virtuales y gemelos digitales para una Industria 4.0*):
 - Entidad financiadora: CDTI.
 - Programa: Cervera Centros Tecnológicos 2019.
 - Referencia: CER-20191001.
 - Plazo de ejecución: 2020-2022.

1.3. Publicaciones

Como se ha mencionado ya, esta tesis se presenta como compendio de publicaciones en revistas indexadas en el JCR (*Journal Citation Reports*). Se incluyen también otras publicaciones y diversas ponencias presentadas en jornadas técnicas, como complemento a la actividad de investigación. A continuación se muestra la lista de todas estas publicaciones:

Artículos JCR (compendio de publicaciones de la tesis):

1. **SENSORS2016**: Pérez, L., Rodríguez, Í., Rodríguez, N., Usamentiaga, R. & García, D.F. *Robot Guidance Using Machine Vision Techniques in Industrial Environments: A Comparative Review*. Sensors 2016, 16, 335.
DOI: [10.3390/s16030335](https://doi.org/10.3390/s16030335).
2. **CII2019**: Pérez, L., Diez, E., Usamentiaga, R. & García, D.F. *Industrial robot control and operator training using virtual reality interfaces*. Computers in Industry 2019, 109, 114-120.
DOI: [10.1016/j.compind.2019.05.001](https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.05.001).
3. **IJAMT2020**: Pérez, L., Rodríguez-Jiménez, S., Rodríguez, N., Usamentiaga, R., García, D.F. & Wang, L. *Symbiotic human-robot collaborative approach for increased productivity and enhanced safety in the aerospace manufacturing industry*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2020, 106, 851-863.
DOI: [10.1007/s00170-019-04638-6](https://doi.org/10.1007/s00170-019-04638-6).

4. **AS2020**: Pérez, L., Rodríguez-Jiménez, S., Rodríguez, N., Usamentiaga, R. & García, D.F. *Digital Twin and Virtual Reality Based Methodology for Multi-Robot Manufacturing Cell Commissioning*. Applied Sciences 2020, 10, 3633.
DOI: [10.3390/app10103633](https://doi.org/10.3390/app10103633).

Congreso internacional:

- **ROSE2014**: Zhou, K., Ebenhofer, G., Eitzinger, C., Zimmermann, U., Navarro, J., Pérez, L., Fernández M.A., Walter, C. & Saenz, J. *Mobile manipulator is coming to aerospace manufacturing industry*. 2014 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE) Proceedings, Timisoara, 2014, pp. 94-99.
DOI: [10.1109/ROSE.2014.6952990](https://doi.org/10.1109/ROSE.2014.6952990).

Otras publicaciones:

- **MANTENIMIENTO2016**: Pérez, L. *Robótica colaborativa: tecnologías para una interacción persona-máquina segura*. Mantenimiento, Asociación Española de Mantenimiento, nº 296, 2016.
- **INTEREMPRESAS2017**: Pérez, L. *Robots 4.0*. Automatización, Interempresas.net, 2017.
URL: <http://www.interempresas.net/Robotica/Articulos/187678-Robots-40.html>

Otras jornadas:

- **PRODINTEC2015**: Pérez, L. *Robótica colaborativa en la Industria 4.0: proyecto VALERI*. Nuevos modelos de producción: la Industria 4.0 en Asturias, Fundación PRODINTEC, Gijón, 13 de noviembre de 2015.
- **AEM2016**: Pérez, L. *Robótica colaborativa: tecnologías para una interacción persona-máquina segura*. 6ª Jornada técnica sobre Seguridad en operaciones de Mantenimiento, Asociación Española de Mantenimiento, Madrid, 8 de junio de 2016.
- **IAPRL2016**: Pérez, L. *Interacción persona-máquina en la nueva industria: robótica colaborativa*. Uso de nuevas tecnologías en PRL: Drones y Robots colaborativos, Instituto Asturiano de Prevención de Riesgos Laborales, Oviedo, 14 de septiembre de 2016.

- **PRODINTEC2017:** Pérez, L. *Desafíos y oportunidades de la digitalización industrial*. iAsturias 4.0, Fundación PRODINTEC, Gijón, 24 de enero de 2017.
- **GRE2017:** Pérez, L. *Robotics for the Factory of the Future*. Global Robot Expo 2017, Madrid, 3 de febrero de 2017.
- **FRATER2017:** Pérez, L. *Robots 4.0 e interacción persona-máquina*. Trabajo y Prevención 4.0, Fraternidad-Muprespa, Madrid, 24 de marzo de 2017.
- **OSALAN2017:** Pérez, L. *Interacción persona-máquina en la nueva industria: robótica colaborativa*. Retos de futuro en materia de PRL, Instituto Vasco de Seguridad y Salud Laborales y Universidad del País Vasco, San Sebastián, 20 de julio de 2017.
- **ERGONOMÍA2017:** Pérez, L. *Industria y nuevas tecnologías*. 7º Congreso Internacional de Ergonomía y Psicología Aplicada, Avilés, 10 de noviembre de 2017.
- **SERESCO2017A:** Pérez, L. y Diez, E. *Realidad virtual y realidad aumentada*. Máster en Industria 4.0, Seresco y Universidad de Oviedo, Gijón, diciembre de 2017.
- **SERESCO2017B:** Pérez, L. *Robótica colaborativa: introducción y aplicaciones industriales*. Máster en Industria 4.0, Seresco y Universidad de Oviedo, Gijón, diciembre de 2017.
- **FEMETAL2018:** Pérez, L., Rodríguez-Jiménez, S. y Rodríguez, N. *Robótica y visión artificial aplicadas a la industria*. Seminarios TIC, FEMETAL, Gijón, 15 de mayo de 2018.

Capítulo 2

Desarrollo y discusión

Desde sus primeras aplicaciones en la industria, la robótica ha ido evolucionando para mejorar las prestaciones de los robots y la seguridad de su entorno de operación. Tradicionalmente, los robots trabajaban en las fábricas separados de las personas y, cuando no era posible automatizar totalmente la tarea, ésta se hacía de forma manual. Hoy en día, la incorporación de tecnologías periféricas permiten mejorar sus prestaciones y funcionalidades para desarrollar aplicaciones para automatizar total o parcialmente tareas complejas, de tal forma que operarios y robots pueden compartir espacios de trabajo si es necesario, incrementando la productividad y garantizando la seguridad incluso en aquellas industrias históricamente intensivas en mano de obra. Esas tecnologías son, por tanto, claves para la evolución de la robótica y su estudio es la base de esta tesis.

Los robots son perfectos sustitutos de la mano de obra para tareas generales y repetitivas, pero esta sustitución no inmediata ni es sencilla en la mayoría de los casos [3]. En este punto, además de seleccionar el robot, es necesario determinar qué otros componentes y tecnologías habría que considerar para cumplir con los requisitos y conseguir las funcionalidades buscadas.

En este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos. En primer lugar, en la sección 2.1 se muestran las conclusiones del estudio de las técnicas de visión artificial para el guiado de robots. A continuación, en la sección 2.2 se presenta una interfaz persona-robot inmersiva mediante realidad virtual. En la sección 2.3 se demuestra el potencial de la colaboración persona-robot para la semiautomatización de procesos tradicionalmente manuales. Finalmente, en la sección 2.4

se presentan los resultados relacionados con la metodología propuesta para el diseño y la puesta en marcha de celdas multi-robóticas basada en el gemelo digital.

2.1. Guiado de robots

Una de las principales tecnologías que mejoran las prestaciones de los robots y que permiten su trabajo en colaboración con las personas es la visión artificial. Los sistemas de visión son ampliamente utilizados en la industria para la inspección y el control de calidad [30]. Recientemente, su uso se ha ampliado al control de la seguridad de los trabajadores y al guiado de robots [31]. Los robots necesitan la visión artificial para identificar y posicionar las piezas con las que tienen que trabajar, para moverse por el espacio de trabajo evitando obstáculos, para trabajar colaborativamente con personas, para corregir su posición, etc. La tarea de proporcionar ojos a una máquina es todo un reto debido a la complejidad de los entornos industriales, con superficies sin texturas, brillos, condiciones de iluminación no controladas, personas y objetos en continuo movimiento, oclusiones, etc. [45]. Por tanto, una visión 3D del entorno del robot es fundamental para su movimiento autónomo y la realización de las tareas programadas en este entorno tan cambiante.

Dado un punto de la escena, su punto correspondiente en la imagen se puede obtener mediante modelos matemáticos [46]. Es el problema directo o también llamado calibración. Sin embargo, dado un punto en la imagen, no es posible obtener directamente su punto correspondiente en la escena, ya que es una relación uno a varios y no uno a uno, es decir, el problema inverso no está completamente definido [47]. En términos algebraicos, la proyección de un punto 3D en una imagen no es una aplicación inyectiva. Diferentes puntos se proyectan sobre el mismo pixel. Lo que se obtiene al resolver el problema inverso es una recta formada por todos los puntos que se proyectan sobre ese pixel (recta de proyección). Las diferentes técnicas de visión surgen de las distintas formas de resolver este problema. Las técnicas pasivas utilizan múltiples cámaras para buscar en las imágenes el mismo punto y calcular la intersección de las rectas de proyección, mientras que las técnicas activas proyectan un patrón sobre la escena para luego calcular la profundidad en función del tiempo de retorno, de la deformación

o mediante trigonometría. De ahí que con cada técnica varíe la calidad de los resultados y, en función del caso, una resulte más adecuada que el resto. Además, según el objetivo a visualizar, las aplicaciones serán relativas a la escena (detección de obstáculos y personas, localización de piezas...) o al objeto (posicionamiento, inspección...).

La primera contribución de la presente tesis es una revisión y clasificación de las técnicas de visión artificial para el guiado de robots en entornos industriales [5]. En la literatura existen otras comparaciones aunque más orientadas a propósitos comerciales [48], centradas en una única técnica [49] o enfocadas al *software* y los algoritmos [50,51].

Según el objetivo final de la aplicación y del tipo de robot, es necesario considerar diferentes factores para seleccionar la técnica de visión más adecuada:

- Precisión de la nube de puntos y resolución. Están fundamentalmente determinados por el hardware (sensor) y el software (extracción, registro, segmentación, comparación, etc.) y relacionados con el tamaño del objeto y el propósito de la aplicación.
- Rango del sensor. La distancia de trabajo está determinada por la accesibilidad del robot, el tamaño del sensor y las configuraciones del entorno.
- Peso ligero. El robot tiene una capacidad de carga máxima para garantizar su dinámica que deberá tenerse en cuenta si el sensor se monta sobre el robot.
- Problemas de seguridad. El robot podrá trabajar en estrecha colaboración con personas, por lo tanto, los sensores deben evitar el uso de láseres peligrosos de alta potencia para minimizar cualquier riesgo.
- Tiempo de procesamiento. El tiempo de procesamiento puede ser crucial para determinar si un sistema es adecuado para una determinada aplicación, especialmente en lo que respecta a mover robots con restricciones de seguridad, es decir, disponibilidad para detectar y evitar colisiones con personas y obstáculos. Algunas técnicas requieren que el objeto y la cámara permanezcan estáticos para la captura, por lo que no son aplicables para escenarios en movimiento.

- Entorno de escaneo. Las condiciones de iluminación, las vibraciones, los movimientos de la cámara, etc. pueden alterar la calidad de la nube de puntos 3D en algunas técnicas. Es necesario evitar estas interferencias.
- Integración de hardware y software con otros sistemas. La cámara será controlada automáticamente por la propia unidad de control central del robot o por una fuente externa. Los desarrollos están orientados hacia la integración y, hoy en día, la mayoría de los sistemas de visión comerciales actuales también están preparados para conectarse a un robot y controlarse mediante software externo desarrollado con las librerías de la cámara (SDK, *Software Development Kit*).
- Presupuesto. Fuera de los temas técnicos también se debe considerar el presupuesto para una implementación real, siendo necesario un equilibrio entre el coste y el rendimiento, ya que la mayoría de las características anteriores se pueden lograr o mejorar incrementando el dinero invertido.

La Tabla 2.1 muestra una comparativa de las técnicas de visión en términos de precisión (“Prec.” en la tabla), rango, peso, seguridad (“Seg.”), tiempo de procesamiento (“T. proc.”) e influencias del entorno (“Ent.”). La visión estéreo, la luz estructurada y la triangulación láser, proporcionan una precisión aceptable bajo ciertas condiciones para la mayoría de las aplicaciones. Excepto para la luz blanca estructurada, las técnicas activas, que son las que proyectan patrones, necesitan estar cerca del objeto debido a que su distancia de trabajo es corta. Hoy en día, existen sensores comerciales ligeros preparados para ser montados en los robots. Los sensores de luz blanca estructurada suelen ser, en general, los más grandes. Todas las técnicas son seguras para las personas, con la excepción de los láseres de alta potencia. En términos de procesamiento, la fotogrametría requiere procesar una gran cantidad de imágenes para obtener una nube de puntos 3D y la luz estructurada requiere que el objeto y cámara permanezcan estáticos durante el proceso de captura. El tiempo de vuelo y la luz azul estructurada no sufren en general la influencia de las condiciones ambientales de iluminación.

En cuanto a ventajas y desventajas de las técnicas de visión para el guiado de robots, la fotogrametría se usa principalmente en aplicacio-

	Prec.	Rango	Peso	Seg.	T. proc.	Ent.
V. estéreo	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Fotogram.	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Pr. texturas	✓	✗	✓	✓	✗	✗
T. vuelo	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Luz blanca	✓	✓	✗	✓	✗	✗
Luz azul	✓	✗	✓	✓	✗	✓
Luz codificada	✗	✗	✓	✓	✓	✗
Láser	✓	✓	✓	✗	✓	✗

Tabla 2.1: Comparativa de las técnicas de visión en términos de precisión, rango, peso, seguridad, tiempo de procesamiento e influencias del entorno [5].

nes estáticas debido a su precisión, pero precisa de las marcas físicas, como etiquetas adhesivas o puntos láser, que están muy influenciadas por el brillo y la iluminación en entornos industriales. Se pueden evitar las marcas usando seguimiento de características, pero la densidad de la nube de puntos será baja si las superficies no tienen textura. De hecho, las superficies de baja textura o sin textura también son un inconveniente para las técnicas de visión estéreo con cámaras 2D convencionales y es necesario proyectar una luz de alto contraste para crear una textura artificial y resaltar puntos, características, etc. (visión estéreo con proyección de texturas). Otras técnicas de visión activa en 3D, como la luz codificada y el tiempo de vuelo, tienen una precisión teórica baja y no son válidas para ciertas aplicaciones donde la nube de puntos se compara con un modelo CAD para la localización precisa de piezas, porque las superficies planas se representan con una curvatura bastante significativa. Se pueden usar para la identificación de piezas o para el seguimiento de personas y objetos, aunque se deben tener en cuenta estos problemas de precisión. Las técnicas láser se usan comúnmente en aplicaciones de escaneado donde la captura no es una instantánea única, pero puede ser peligrosa para las personas ya que algunas clases de láseres (alta potencia) no son seguras para los ojos de las personas. Finalmente, la luz estructurada proporciona precisión, aunque a veces está influenciada por la luz ambiental y puede presentar problemas para crear el modelo 3D de superficies de ciertos colores. Su principal desventaja es que la mayoría de los

sensores comerciales son bastante grandes para ser transportados por un robot. Los esfuerzos de investigación y desarrollo se concentran en miniaturizar sensores o en separar el proyector y el sensor para que sólo uno esté a bordo del robot. En este sentido, la nueva evolución de esta técnica llamada luz LED azul estructurada proporciona precisión con un sensor más pequeño.

La Tabla 2.2 resume las referencias analizadas agrupadas en las relacionadas con la escena, detección de personas (“Personas” en la tabla) y reconstrucción del entorno y navegación (“Naveg.”), y las relacionadas con el objeto, reconstrucción del objeto e inspección (“Inspección.”), manipulación del objeto (“Manip.”) y posicionamiento del robot (“Posición”). Según el estudio realizado, las principales aplicaciones de visión estéreo en robótica están en el campo de las tareas relacionadas con los objetos para la estimación del posicionamiento y la calibración del robot, ya que pueden requerir marcas, la cámara y el objeto deben permanecer estáticos y se necesita procesar una cantidad importante de información. El tiempo de vuelo, que no requiere que el objeto y la cámara permanezcan estáticos, se utiliza principalmente para la reconstrucción del entorno y del objeto, la navegación y la detección de personas y obstáculos. La aplicación principal de la luz codificada es la detección de personas, aunque no está certificada para entornos industriales. Los sensores basados en láser se utilizan especialmente para la navegación, pero también para tareas relacionadas con objetos.

En conclusión, cada aplicación tendrá sus requisitos y, en función del entorno, se seleccionará la técnica más adecuada, incluyendo el tipo de sensor, la óptica, la necesidad de iluminación adicional o los algoritmos de procesamiento, entre otros aspectos a considerar.

2.2. Interfaz persona-robot

Además de dotar de visión a los robots, para permitir la interacción con las personas es necesaria una interfaz entre ambos para el intercambio de órdenes y comandos, la visualización de avisos e información, la simulación de acciones y el entrenamiento en condiciones de seguridad. Tradicionalmente, esta interfaz era la consola del robot, la cual no está especialmente pensada para la interacción colaborativa y, por tanto, únicamente permite enviar comandos al robot y visua-

	Personas	Navig.	Inspec.	Manip.	Posición
V. estéreo y Fotogram.			[52]		[33-35, 37, 53-58]
Pr. texturas				[59-61]	
T. vuelo	[49]	[62-70]	[71-74]	[75-77]	
Luz estruct.					[19, 78, 79]
Luz cod.	[32, 45, 80, 81]				
Láser		[82-90]	[91]	[92]	[86]

Tabla 2.2: Aplicaciones de visión artificial para el guiado de robots [5].

lizar cierta información condicionada a lo dispuesto por el fabricante con escasas opciones de personalización. En este sentido, la utilización de pantallas táctiles y *tablets* ya supuso un primer avance, que se vio culminado con las aplicaciones en robótica de la realidad virtual [93] y la realidad aumentada [94].

La primera consiste en la generación mediante gráficos por computador de un entorno ficticio e inmersivo con apariencia real [95], mien-

tras que en la segunda se superponen elementos ficticios también generados por ordenador sobre el mundo real [96]. La realidad virtual, como simulador inmersivo, permite simular y validar diseños, programas, etc. antes de su implementación real, comprobando las distintas posiciones, analizando posibles singularidades, verificando la accesibilidad, estudiando las posibles colisiones, etc. Por otra parte, permite la formación de operarios en entornos peligrosos, como en los que trabajan los robots sin barreras físicas junto a las personas, sin correr los riesgos reales, pero siendo plenamente conscientes de ellos. La segunda contribución de la presente tesis analiza precisamente la utilización de la realidad virtual como interfaz persona-robot para formación, simulación y control [2], proponiendo una arquitectura y una metodología de creación del entorno virtual y demostrando que la realidad virtual se puede integrar como interfaz persona-robot utilizando tecnología comercial de consumo y *hardware* y *software* para el control de robots industriales. Con todo ello, un operario puede realizar un entrenamiento en un entorno virtual pero totalmente inmersivo e interactivo. Además, los programas y las trayectorias del robot pueden ser probadas, y el robot controlado, evitando riesgos y mejorando la seguridad. La innovación de la propuesta reside precisamente en la integración en una sola aplicación segura y de coste asequible del entrenamiento, la simulación y el control.

Una de las principales limitaciones de los robots es la dificultad de programación [97]. Los lenguajes de programación dependen de cada fabricante y el mismo punto (posición y orientación) se puede alcanzar mediante distintas combinaciones de los ejes, lo que permite mayor accesibilidad y flexibilidad, pero complica la programación [98]. Por tanto, simplificar la programación es una prioridad para que todo tipo de usuarios pueda interactuar con ellos, facilitando así su implantación en la industria.

La programación por demostración puede reducir la complejidad incurrida en la programación de algunas tareas del robot y es de especial interés en las aplicaciones colaborativas, abarcando áreas de investigación generales como la interacción persona-robot, el aprendizaje automático, o la visión artificial, entre otras [99]. Enseñar a un robot con métodos de programación en línea requiere mucho tiempo y procedimientos de prueba y error, ocupando toda la celda de trabajo, incluido el robot. Los gráficos por computador tradicionales para simulación y programación fuera de línea de los robots, ofrecen el

potencial de superar estas limitaciones, pero en una pantalla y sin entorno inmersivo. La realidad virtual permite controlar un robot en un entorno virtual, permitiendo al programador una experiencia inmersiva donde cualquier ángulo o singularidad, que podría no ser visible en el escenario real, se puede simular y comprobar. Trabajar en un entorno virtual disminuye el tiempo, evita la ocupación de la celda y mejora la seguridad general al evitar la ejecución incorrecta tareas aprendidas [100, 101].

Respecto a la operación a distancia o teleoperación de robots, los métodos más tradicionales basados en la utilización de teclados o *joysticks* han evolucionado hacia el reconocimiento de gestos [102] y la experiencia inmersiva con realidad virtual, especialmente interesante para entornos peligrosos [103, 104].

La conciencia del entorno inmediato depende de los datos recogidos por los sistemas sensoriales de las personas, cuyas entradas se combinan y procesan según el modelo del mundo previamente existente. La realidad virtual reemplaza las percepciones de la escena real por otras generadas por computador que describen una escena 3D y animaciones de objetos dentro de la escena, incluidos los cambios provocados por la intervención del usuario. El usuario necesita sentir una experiencia totalmente inmersiva y auténtica en la aplicación de realidad virtual [105, 106], para lo que es necesario considerar tres factores clave: 1. Las latencias entre las acciones y las respuestas, 2. La calidad de la reconstrucción 3D y 3. El comportamiento realista de todos los elementos del entorno virtual. El objetivo es transmitir al usuario la sensación de presencia, es decir, la ilusión de estar allí y la sensación de que los eventos realmente están sucediendo, aunque se sepa en realidad que todo es un mundo virtual [107].

La Figura 2.1 muestra la arquitectura propuesta para la conexión entre la interfaz virtual y el robot real. El robot real y el virtual son controlados desde el mismo controlador, el cual está conectado con el ordenador de realidad virtual, con una base de datos para almacenar los movimientos y poder recuperarlos más tarde y con sensores externos para proporcionar información adicional sobre la celda para temas de seguridad o posicionamiento del robot real.

Para reducir las latencias, manejar grandes volúmenes de datos y permitir la interacción en tiempo real, se requiere a su vez de un ordenador de altas prestaciones para la ejecución de la aplicación de realidad virtual [108, 109], además del uso de técnicas de computación

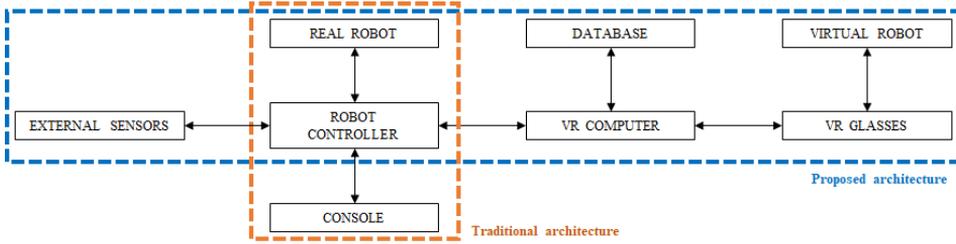


Figura 2.1: Arquitectura para la conexión de la interfaz de realidad virtual con el robot [2].

visual y algoritmos para mejorar el proceso de renderizado como, por ejemplo, la reducción del número de polígonos. El controlador del robot implementa con un sistema operativo de tiempo real los modelos matemáticos que gobiernan los movimientos, envía las instrucciones a los motores y asegura que son eficientes y seguros. Como los movimientos son visualizados en la realidad virtual también deben implementarse para el robot virtual.

Para conseguir una reconstrucción 3D de alta calidad y un comportamiento realista de los elementos se ha propuesto una metodología de creación del entorno virtual y de la interfaz de realidad virtual, basada en el escaneado y modelado preciso del entorno incluyendo paredes, objetos, herramientas, máquinas, paneles, tuberías, lámparas, etc. Al tratarse de un entorno industrial, se debe considerar hasta el más mínimo detalle para replicar el escenario y conseguir el efecto inmersivo (texturas, colores y efectos lumínicos). La Figura 2.2 ilustra el proceso:

1. Escanear el escenario real. Utilizando un escáner 3D de alta resolución se obtiene una nube de puntos densa.
2. Procesar la nube de puntos 3D y aplicar filtros. La nube de puntos obtenida se procesa para reducir el ruido y el número de puntos, garantizando una densidad constante de puntos para facilitar el siguiente paso.
3. Modelar la nube de puntos y renderizar el entorno virtual. La nube de puntos se modela para crear la reconstrucción 3D con las dimensiones reales del entorno y el efecto inmersivo para el usuario.

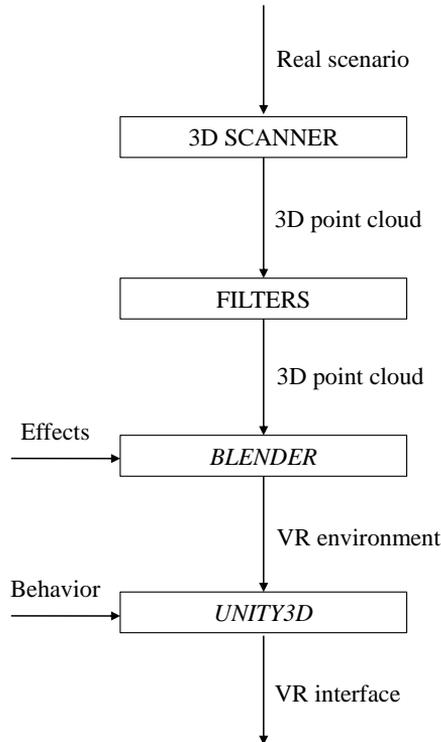


Figura 2.2: Proceso para crear el entorno inmersivo y la interfaz de realidad virtual [2].

4. Implementar el comportamiento de los elementos y la interacción humana. La escena virtual se completa con la configuración del comportamiento físico de los elementos (animaciones, eventos, acciones, etc. para que los elementos virtuales actúen de manera similar a los reales). Finalmente se pueden añadir textos y botones o mandos virtuales para la interfaz de control del robot.

Los resultados muestran que la experiencia inmersiva incrementa la eficiencia del entrenamiento y los procesos de simulación y que la solución es efectiva en coste y abordable para todo tipo de compañías. En la cuarta contribución de la presente tesis se utiliza esta propuesta como parte una metodología que incluye también el diseño y la puesta en marcha real de celdas robóticas además del entrenamiento, la simulación y el control [4].

2.3. Colaboración simbiótica

En la tercera contribución se plantea hacer colaborativo un robot industrial no concebido originalmente para este fin a partir de la aplicación de las tecnologías y metodologías previamente analizadas, entre las que se encuentran la visión artificial, la simulación, la interfaz persona-robot, etc. [3]. Para ello, se analiza y diseña un proceso colaborativo para la semiautomatización de tareas hasta ahora manuales y de difícil automatización total, tomando como caso de uso el ensamblaje de piezas en la industria aeroespacial.

La industria de la fabricación aeroespacial ha sido tradicionalmente manual y reacia a los robots. Una de las tareas más repetitivas es el ensamblaje de piezas y sus distintos componentes. Para este proceso, se requiere de un trabajo manual intensivo sobre piezas delicadas y con herramientas muy específicas y precisas [17, 18]. Aunque existen algunas aplicaciones de robots para el desbarbado de componentes [110], taladrado de fibra de carbono [111], perforación de estructuras de titanio [112] o aplicaciones de metrología sin contacto en el montaje de paneles de fuselaje [18], entre otros, los robots no se utilizan de forma masiva en contraste, por ejemplo, con la industria del automóvil.

Para resolver el reto de aplicar soluciones robóticas en la industria aeroespacial, se trabaja fundamentalmente en tres direcciones:

1. Incrementar la precisión del posicionamiento de los robots. Para mejorar el posicionamiento, un sistema metrológico de alta precisión controla los movimientos corrigiendo posición y orientación durante las operaciones de ensamblado. Esta técnica, denominada “Measurement Assisted Assembly”, es un concepto clave para la modernización de la industria aeroespacial [113]. También se aplican métodos de calibración [114, 115].
2. La colaboración persona-robot. La colaboración eficiente entre personas y robots puede permitir una semiautomatización de las tareas complejas, donde la automatización total mediante un robot aislado no es posible [116]. La introducción de la colaboración persona-robot en los procesos de ensamblaje actuales ahorrará costes, debido principalmente a la reducción de herramientas específicas y tiempo, con aplicaciones como los procesos de equipamiento [117], el taladrado y el sellado de juntas [118] o el remachado [119], entre otras. Algunas de estas actividades

resultan poco ergonómicas para los operarios, por lo que el robot es fundamental para mejorar las condiciones de trabajo.

3. Los robots móviles para trabajos en múltiples estaciones. A diferencia de los robots estacionarios, los robots móviles pueden ser utilizados en tareas similares en múltiples estaciones, incrementando su productividad [19]. En esta línea entrarían también las aplicaciones con humanoides [120].

En general, una celda robótica se compone de una estructura mecánica (el robot físico), la electrónica, el controlador de la celda, incluyendo la interfaz persona-robot (HMI), que es normalmente una consola, y otros periféricos. Comparadas con las celdas robóticas tradicionales, una celda colaborativa incluye más factores humanos a considerar: seguridad, distribución optimizada de tareas e interacción humano-robot/control adaptativo [121].

Con el objetivo de lograr tolerancias ajustadas en los procesos de ensamblaje aeroespacial, el enfoque propuesto usa una celda robótica para interacciones persona-robot con un robot industrial para colaborar con un operador en las tareas. Además del robot y el sistema de control, se necesitan otros componentes para proporcionar precisión y permitir una colaboración persona-robot segura y eficiente:

- Bancada simplificada donde están fijados el robot y la mesa de operaciones de manera rígida. El robot tiene suficiente espacio para moverse libremente alrededor y sobre la mesa. La herramienta es capaz de mantener pesos, inercias y las fuerzas del robot sin una deformación apreciable. La mesa es universal para todas las referencias en vez de tener una mesa para cada referencia.
- Sensores metrológicos externos para mejorar la precisión del robot. Los movimientos del robot tienen altas desviaciones en el posicionamiento y baja repetitividad en los movimientos de la trayectoria. Por medio de la integración de un sistema metrológico, los movimientos del robot pueden fijarse logrando más precisión en el posicionamiento. Otro punto importante es que, usando un sistema metrológico, la pieza principal puede alojarse sin ninguna precisión en el banco de trabajo. El sistema metrológico posee la capacidad de saber dónde está el robot durante todo el proceso.

- Funcionalidades de seguridad para la colaboración entre personas y robots en un mismo espacio y sin protección física. La seguridad y las zonas de advertencia se definen por medio de escáneres y cámaras para evitar colisiones y hacer posible la colaboración. Si hay riesgo de colisión, el robot automáticamente hace los movimientos necesarios para evitarla, reducir la velocidad o pararse [32]. El área de seguridad se divide en “Zona de reducción de velocidad” y “Zona de parada”. Si la persona accede a la primera, el robot reduce su movimiento hasta el 50 % de su velocidad original y, si entra en la segunda, el robot se detiene. Como no hay barreras, las funcionalidades de seguridad deben estar directamente conectadas al robot y al sistema de control.
- Interacción persona-robot mediante el intercambio de información. El operario necesita saber las operaciones y acciones a realizar y el sistema tiene que capturar el resultado de dichas acciones. En este caso, el robot ayuda al trabajador proporcionando información técnica y el trabajador controla el robot sin importar su experiencia o capacidades por medio de una pantalla táctil. La comunicación de alto nivel permitirá que usuarios no expertos sean capaces de coordinar sus comportamientos con los del robot.

Estos componentes se estructuran y conectan según la arquitectura presentada en la Figura 2.3. Todo el hardware se categoriza en cinco subsistemas y se distribuye en ordenadores dedicados a ello para asegurar una carga balanceada:

- Sistema de control. La celda se gestiona por medio del sistema de control. Su diseño es flexible, en el sentido de que puede incorporar una estación de trabajo así como un PLC para tratar las señales y eventos.
- Robot y controlador. El robot se controla y se comanda desde el controlador, que es el núcleo de los sistemas de control. Todas las señales, eventos, órdenes, funcionalidades de seguridad, etc. se procesan desde el controlador del robot.
- Sistema de seguridad. Su función es evitar la colisión entre las personas y el robot. Se compone de sensores que monitorizan el

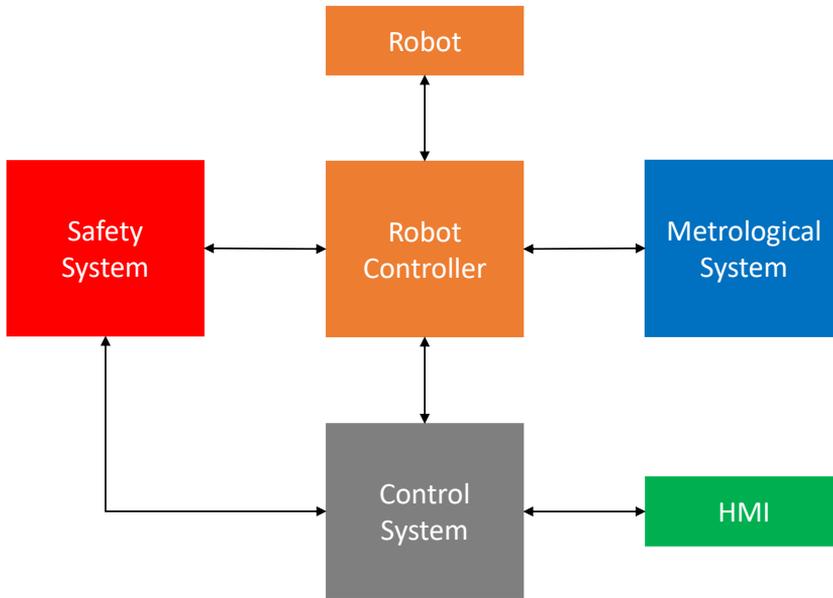


Figura 2.3: Arquitectura de subsistemas [3].

área de trabajo. Si éstos reportar cualquier potencial colisión, el control obtiene la señal de alerta para evitar a la persona, reducir la velocidad o parar.

- **HMI.** Durante la operación, los usuarios interaccionarán con el sistema usando el HMI para recibir instrucciones de trabajo y alertas.
- **Sistema metrológico.** De cara a verificar los requisitos de precisión del proceso de fabricación, es necesario incorporar un sistema metrológico conectado al controlador para incrementar la precisión del posicionamiento.

El proceso de ensamblaje en la fabricación aeroespacial consiste en el alineamiento entre componentes estructurales, sujetándolos entre sí y comprobando si están posicionados correctamente. De cara a diseñar la celda robótica y sus parámetros operativos, es necesario convertir las tareas industriales manuales en una solución robotizada: analizar las

tareas ejecutadas por las personas, extraer las capacidades operativas y transferirlas a las operaciones robotizadas [121]. En los procesos colaborativos, una cuestión esencial es el criterio para asignar las tareas entre las personas y los robots [122]. Para optimizar la eficiencia del trabajo, el robot hará las tareas repetitivas y precisas, mientras que la persona proporcionará la flexibilidad. El trabajador ejecuta operaciones manuales que son difíciles de programar mientras que el robot hace la pieza final de la operación, donde se requiere precisión.

El enfoque colaborativo se ha diseñado para reproducir el ensamblaje del proceso tradicional logrando un manejo seguro y un posicionamiento preciso del proceso de ensamblaje. Un buen plan del proceso de ensamblaje puede incrementar la eficiencia y calidad así como reducir los costes y tiempos de todo el proceso de fabricación. La asignación de tareas a trabajadores y robots se ha definido considerando las características de la tarea y las capacidades particulares de las personas y los robots, conforme a tres pasos en la toma de decisión: adecuación de recursos, disponibilidad de recursos y tiempo de operación mínimo. Así, el robot ejecutará operaciones de alta precisión (posicionamiento) mientras que el operario lleva a cabo otras operaciones que requieren flexibilidad (sujeción). En vez de limitarse mutuamente, personas y robots combinan sus fuerzas de forma complementaria. El proceso de ensamblaje paso a paso es el siguiente (Figura 2.4):

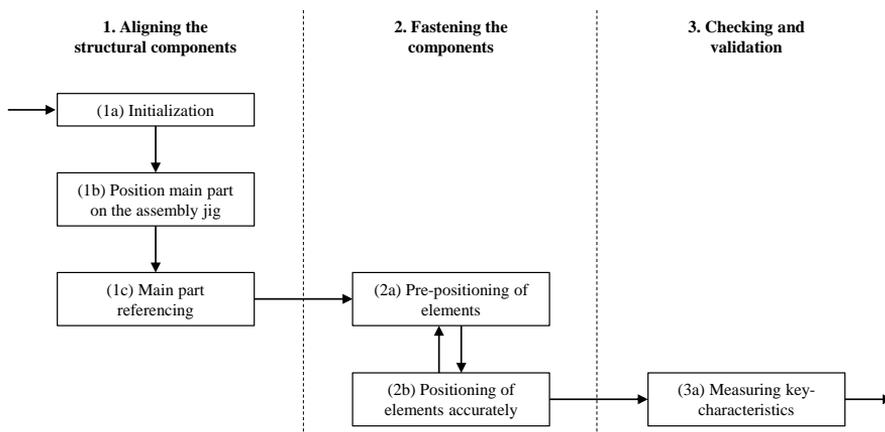


Figura 2.4: Proceso de ensamblaje [3].

1. Alineamiento de componentes estructurales. El operario posicio-

nará la pieza principal en la bancada y determina su posición usando un sistema metrológico:

- a) Inicio. Se lanza un nuevo proceso de ensamblaje desde el sistema de control tras identificar al operario.
 - b) Posicionamiento de la pieza principal en la mesa de ensamblaje. El operario coge una pieza y la pone en la bancada.
 - c) Referenciando la pieza principal. El sistema metrológico determina la posición de la pieza principal.
2. Sujeción de los componentes. Tras referenciar la pieza, el operario, asistido por el robot, ensamblará otros elementos en la pieza principal con elevada precisión, verificando la precisión del resultado:
- a) Pre-posicionamiento de los elementos. El operador ensambla cada elemento sin precisión y sin apretar los tornillos firmemente.
 - b) Posicionamiento de los elementos de manera precisa. La herramienta del robot se aproxima a un elemento y, posteriormente, el operario aprieta bien los tornillos. El robot, el software metrológico y el operario se coordinarán gracias al sistema de control. Las operaciones (2a) y (2b) se repiten para cada uno de los elementos.
3. Comprobación del correcto posicionamiento de los elementos. Verificación de la precisión del resultado:
- a) Medición de las características clave. La pieza ensamblada se escanea y el software metrológico automáticamente procesa las medidas adquiridas. Cuando el escaneo se acaba, se genera un informe automáticamente.

Consecuentemente, el operario trabaja con el robot de manera colaborativa para ensamblar las diferentes partes en un ambiente que combina un sistema de control, un robot industrial y un sistema metrológico de alta precisión.

El enfoque propuesto se ha aplicado al proceso de ensamblaje actual para la fabricación de costillas en la industria aeroespacial. De manera similar a la definición anatómica, la costilla es un elemento

que forma parte de la estructura de un ala de un avión. Está compuesta por polímero de fibra de carbono reforzada e incluye otra serie de piezas longitudinales y transversales que son remachadas al perímetro de la costilla.

El proceso de ensamblaje se lleva a cabo actualmente de manera manual. Las costillas se posicionan en mesas de ensamblaje verticales, con agujeros, utillajes y plantillas para cumplir los requisitos de diseño. Estas mesas son caras y necesitan una instalación y mantenimiento realizado por dispositivos de medición. La mayoría de ellas no pueden ser reutilizadas para otros productos o para una evolución de los mismos productos, en cuyo caso deben ser modificadas o remplazadas. El proceso global de ensamblaje está compuesto por los siguientes pasos:

1. Posicionar la costilla en la mesa.
2. Pre-posicionar las plantillas de perforación y las piezas.
3. Instalar los dispositivos de posicionamiento.
4. Posicionar las piezas.
5. Perforar las piezas.
6. Desbarbar, limpiar y ribetear las piezas.
7. Medir las características clave.

Este proceso de ensamblaje presenta varias limitaciones que permiten a los robots convertirse en una solución adecuada para dichas operaciones. Una limitación es la falta de flexibilidad y la necesidad de usar herramientas especiales y caras. Cada producto necesita una mesa específica y de alto coste y, además, estas mesas no pueden usarse a menudo para la evolución de uno o varios productos. Además, como todo proceso manual, las operaciones son caras, consumen mucho tiempo y requieren de trabajadores altamente cualificados.

Para evitar estas limitaciones del proceso actual, se propone un proceso de ensamblaje basado en una colaboración simbiótica persona-robot, incluyendo nuevos elementos: mesa universal para todas las piezas, verificación por medio de visión artificial en vez de manual, funcionalidades de seguridad e interacción persona-robot para el posicionamiento de las piezas. La bancada universal ha sido diseñada y

fabricada para evitar deformaciones (menores de 0.1 mm) debido a inercias y fuerzas del robot. La mesa es universal para todas las referencias de piezas. El sensor metrológico es un *vision tracker*. Según los requisitos, el proceso de validación actual tiene una precisión por debajo de 0.1 mm.

Las zonas de seguridad y de precaución se definen por medio de un escáner láser. Además, un sistema de seguridad basado en visión artificial evitará colisiones detectando la posición de la persona y el robot. Si hay riesgo de colisión, el robot evita automáticamente a la persona, su velocidad se reduce o se para según lo descrito anteriormente. En la Figura 2.5 se muestra la simulación para validar el diseño de la celda robótica realizada mediante el *software* de simulación del propio fabricante del robot. La Figura 2.6 muestra la instalación real completa con la *tablet* donde el sistema y el robot proporcionan información a la persona sobre las tareas y desde la cual el operario puede confirmar las instrucciones.

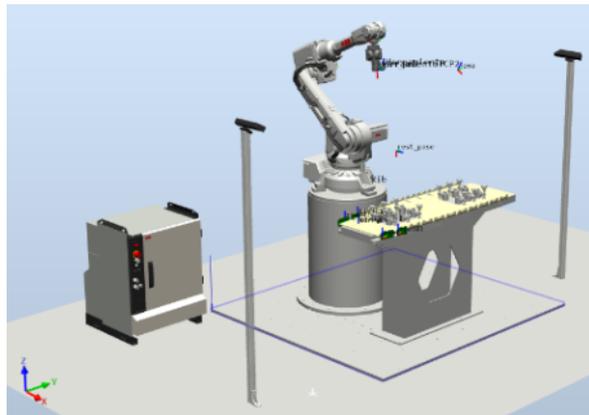


Figura 2.5: Vista general de la celda simulada [3].

La Figura 2.7 muestra la arquitectura particularizada para este caso de uso.

Cuando un operario se registra se inicia una tarea de ensamblaje. El operador recoge una costilla y la pone en el banco de trabajo. Una vez se posiciona, el operario usa la herramienta de medida para escanearla y determinar su posición. Después de que la costilla sea referenciada, el operario ensambla las cuatro piezas en la costilla en un orden predeterminado. El ensamblaje de cada pieza se divide en dos pasos. En el primer paso, el operador ensambla la pieza y la sujeta con

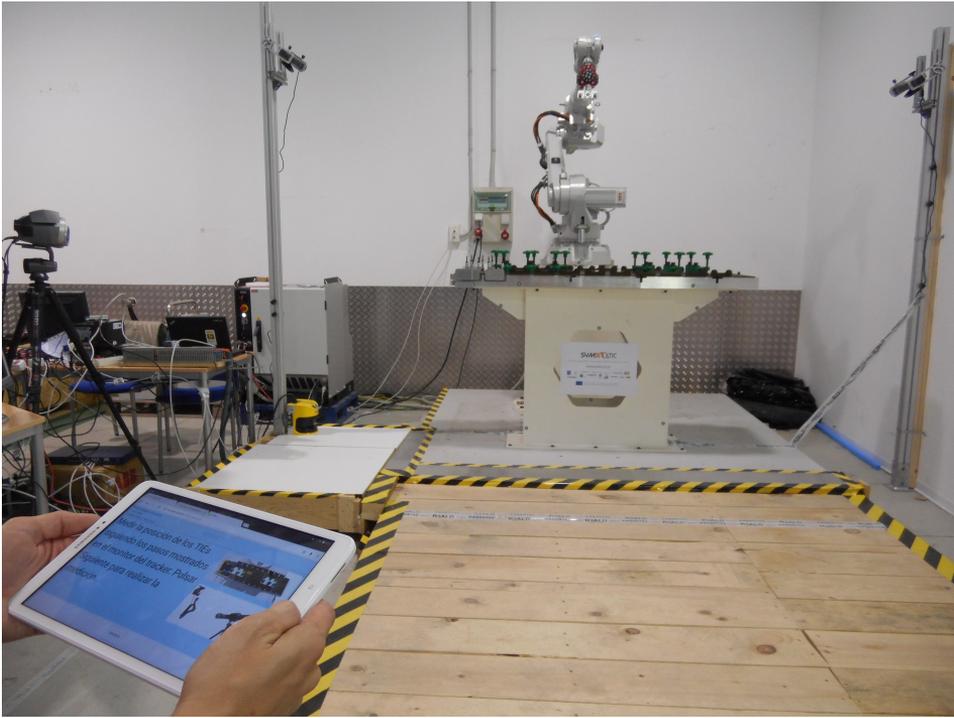


Figura 2.6: Vista general de la celda real con HMI en primer plano [3].

otros elementos adicionales de manera holgada. En el segundo paso, la herramienta del robot aproxima las piezas a una posición precisa con ayuda del sistema de *tracking*, el operario empuja la pieza contra la herramienta del robot hasta que haya contacto entre los dos puntos y las aprieta bien con los elementos adicionales. Finalmente, el operario escanea las características clave del ensamblaje y se genera un informe de medidas de manera automática.

La colaboración persona-robot implica que las personas trabajan de forma colaborativa con robots sin barreras en una instalación dinámica, cambiante e imprevisible, donde ambos deberían aprender el uno del otro y responder automáticamente a los cambios. En esta situación, la seguridad no debería limitarse a riesgos mecánicos tales como colisiones. Los riesgos psicosociales, tales como el miedo, inseguridad o estrés, también deben considerarse. Además, teniendo en cuenta la usabilidad, se puede usar un robot para lograr objetivos específicos con efectividad, eficiencia y satisfacción. Por lo tanto, cuando una persona está trabajando con un robot, es necesario que sienta confianza,

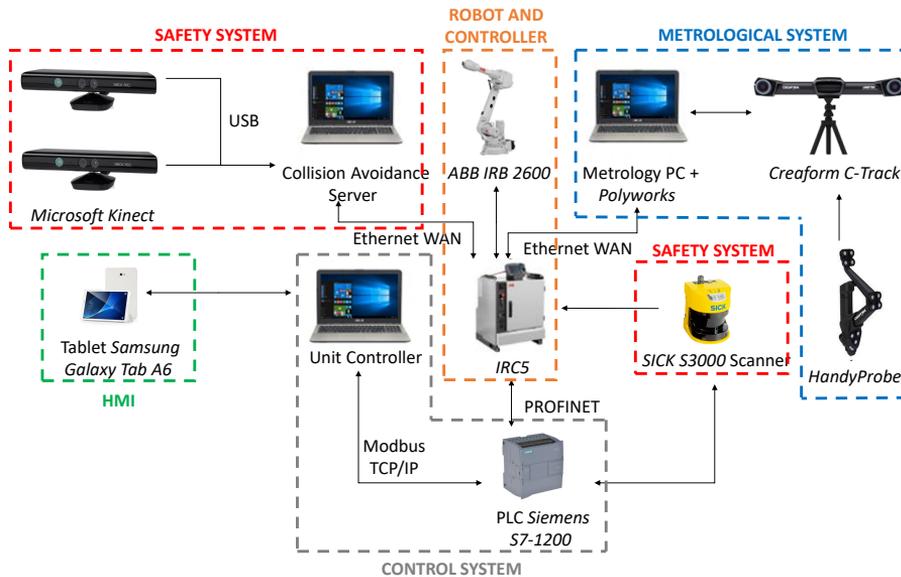


Figura 2.7: Arquitectura y componentes [3].

no perciba retrasos, pueda entender las instrucciones, adopte posturas ergonómicas, etc. Así, la usabilidad y seguridad son factores relacionados con la experiencia subjetiva de los operarios y para su confort en el trabajo. Con el objetivo de estudiar el proceso de ensamblaje propuesto en términos de usabilidad y seguridad, y para descubrir qué aspectos de la interacción se podrían mejorar, se han realizado una serie de pruebas.

En las pruebas han participado dos tipos de operarios: principiantes y expertos. Para los principiantes, el proceso de ensamblaje se muestra en una *tablet* detallando las operaciones con textos, figuras y animaciones 3D. Para los expertos, el proceso se muestra en una *tablet* indicando los pasos de ensamblaje simplificados con textos y figuras únicamente. Los expertos se pueden acercar el banco cuando el robot se mueve. Todos los participantes fueron informados previamente sobre los riesgos y todos ellos recibieron algunas indicaciones de seguridad obligatorias. No hubo accidentes durante la evaluación.

Doce personas de ambos perfiles participaron en la validación y pruebas (seis de cada tipo). Se usó un cuestionario para evaluar la experiencia de los usuarios a través de sus respuestas:

1. ¿Has sentido confianza?

2. ¿Has percibido retrasos en la reacción del sistema?
3. ¿Son útiles las funcionalidades del robot?
4. ¿Has entendido las instrucciones fácilmente?
5. ¿Son tus posturas más ergonómicas?
6. ¿Cuál es tu satisfacción global?

De acuerdo a las cinco respuestas posibles, muy insatisfecho (0 puntos), insatisfecho (2,5), OK (5), satisfecho (7,5) y muy satisfecho (10), las notas son altas en general, aunque es reseñable que los expertos se sienten más confiados (9,1/10) que los principiantes (8,89/10). Como los expertos están más habituados al proceso, también entienden las instrucciones mejor y sus posturas son más ergonómicas. Algunos de ellos consideran que el robot debería incluir más funcionalidades en el futuro. En conclusión, los participantes destacan que el robot les asista en el proceso de ensamblaje evitando los utillajes y simplificando el proceso. Además, consideran que la interfaz es intuitiva y la seguridad está garantizada.

El proceso de ensamblaje actual basado en trabajos manuales se ha comparado con el propuesto basado en un robot industrial trabajando de manera colaborativa con personas. El análisis se clasifica de acuerdo a los siguientes elementos y características: utillaje, perforación, fijación, medida de la precisión y colaboración persona-robot:

1. Utillaje. El proceso actual necesita una herramienta para cada referencia de pieza. Con la solución propuesta, sólo se necesita una mesa horizontal para todas las referencias.
2. Perforación / taladrado. El proceso actual requiere una perforación manual basada en plantillas. Esto es válido aunque menos preciso que la perforación automática. La solución futura podría incluir perforación automática.
3. Fijación. El proceso actual se basa en una herramienta compleja y cara que permite situar los dispositivos de manera correcta. En este caso, el error es elevado. La solución propuesta presenta un sistema de seguimiento de visión de 6 grados de libertad para reducir el error de posicionamiento.

4. Medida de la precisión. El nuevo proceso incluye un sensor *tracker* comercial para incrementar la precisión de la medida durante el proceso de ensamblaje.
5. Colaboración persona-robot. El proceso actual no incluye ningún tipo de colaboración persona-robot (no hay automatización). El enfoque propuesto incluye dicha colaboración para tareas de posicionamiento y medición.

Todas las aplicaciones identificadas se caracterizan por su adaptabilidad, flexibilidad e integración vertical. Además, se ha realizado un análisis comparativo para cuantificar la eficiencia del proceso colaborativo comparado con el proceso actual, midiendo tiempos y costes de cada proceso. Los resultados muestran que ambos (tiempo y costes) se reducen significativamente en el proceso colaborativo: se ahorran 15 minutos en el posicionamiento de la herramienta (33%), 10 en posicionamiento y fijación (50%) y 50 en medir las características clave (83%). Los tiempos de taladrado, desensamblaje, desbarbado y limpieza, retirada de los elementos de ensamblaje y ribeteado, son los mismos ya que estos procesos continúan siendo manuales. Todo el proceso ahorra un 25% de tiempo comparado con el proceso manual actual.

Además de este ahorro en tiempos, la reducción de utillajes y herramientas también implica un proceso más efectivo en coste. El proceso manual actual necesita una herramienta para cada referencia de costilla. El nuevo proceso sólo necesita una herramienta única común para todas las piezas. Aunque hacen falta otros elementos tales como el robot o el *tracker*, que no son necesarios para el proceso manual, el proceso colaborativo completo ahorra en torno al 30% de los costes no recurrentes.

Los resultados muestran que el enfoque colaborativo incrementa la productividad y mejora la seguridad de los procesos de ensamblaje de fabricación aeronáutica. La potencia y la repetitividad de los robots se combina de manera eficiente con la flexibilidad de las personas, dando como resultado una reducción del trabajo manual, de las herramientas específicas y del tiempo. El enfoque propuesto demuestra que la introducción de la robótica en las industrias tradicionalmente manuales es viable, efectiva en coste y segura. Las tareas complejas pueden ser semiautomatizadas con la arquitectura modular definida para colaboración persona-robot y, por tanto, es posible extender estos resultados

para mejorar los procesos de fabricación a otras industrias que son reticentes al uso de robots.

2.4. Diseño y puesta en marcha

A raíz de los casos analizados, la automatización de un proceso de fabricación industrial plantea varias cuestiones previas:

- ¿Cuáles son los costes en términos económicos, de tiempo, de seguridad, etc. de proceso manual?
- ¿Es viable técnicamente el uso de robots para las tareas?
- ¿Existen soluciones comerciales o es necesario un desarrollo a medida?
- ¿El robot estará aislado o trabajará colaborativamente con los operarios?
- ¿Qué tecnologías adicionales harían falta?
- ¿Cuáles son los costes del nuevo proceso automatizado total o parcialmente?
- ¿Es el nuevo proceso efectivo en coste?
- ¿Se reducen los riesgos y, por tanto, mejora la seguridad?

Antes de diseñar el nuevo proceso con robots es necesario responder a estas cuestiones mediante un análisis exhaustivo y una comparación con el proceso manual. El objetivo de la cuarta y última contribución de esta tesis es proporcionar una metodología para realizar este análisis y sistematizar el proceso de diseño y puesta en marcha de una celda multi-robótica [4].

Hasta no hace mucho tiempo, la información de un objeto o proceso era inseparable de la parte física [123]. La digitalización y la inteligencia artificial permiten la desmaterialización y la coexistencia de una fábrica real y de su gemelo digital [124], donde los procesos son simulados, monitorizados e incluso controlados, ya que estos modelos no son sólo descriptivos y pueden ser procesables y experimentables, comportándose como espejos el uno del otro [125, 126]. Para ello, se

hace necesaria una conexión entre ambos mundos mediante sensores, PLCs, controladores, etc. [127] y un sistema de visualización del gemelo digital e interacción con las personas, como por ejemplo, la realidad virtual [44] o la realidad aumentada [128].

Como equipos y como parte de los procesos de fabricación, los robots pueden tener su gemelo digital. El reto radica en su integración en el gemelo digital del proceso o de la celda completa, especialmente cuando hay robots de distintos fabricantes que realizan trabajo colaborativo con los operarios. Los primeros desarrollos en este sentido, estaban orientados a la simulación pero sin conexión entre los mundos, actuando como herramientas aisladas de cada fabricante, por lo que no era posible combinar distintos robots y tampoco se simplificaba el problema de la complejidad de programación. Hasta ahora existían pocas opciones multi-robot. Algunas, por ejemplo, son herramientas de simulación basadas en ROS (*Robot Operating System*) [129].

Recientemente, estos simuladores han evolucionado incluyendo nuevas funcionalidades, como la visualización con realidad virtual o la colaboración persona-robot [130–132]. Estas herramientas se utilizan también para la puesta en marcha virtual de celdas robóticas, lo que implica crear un gemelo digital para testear y verificar el modelo en un entorno virtual simulado. También se combina ROS con realidad virtual para crear interfaces [133]. Respecto a la combinación robots y gemelos digitales, existen ya distintas aplicaciones para adaptar el comportamiento del robot en tareas de ensamblaje de la industria del automóvil [134], como soporte a la colaboración persona-máquina/persona-robot [135, 136], para el reparto de tareas [43], para mantenimiento predictivo de robots [137] o para la monitorización de la celda robótica [42, 138], entre otras. Las aplicaciones que combinan las tecnologías del gemelo digital y la realidad virtual buscan conseguir un comportamiento realista para presentar diferentes métodos de programación y control de los robots [139, 140], confirmando que esta combinación facilita la interacción con las personas en términos de trabajo colaborativo, telecontrol y programación.

Por tanto, para realizar el diseño de una automatización con robots, se propone una metodología en cascada con lazos de realimentación basada en la construcción del gemelo digital del proceso para poder estudiar distintas configuraciones del *layout* (localización física de los elementos), la adecuación de los robots y otros componentes, etc. Este modelo servirá para el diseño y la implementación, así como para la

formación y la monitorización tras la puesta en marcha de la instalación real. Para facilitar la visualización del gemelo digital, se propone el uso de una interfaz inmersiva de realidad virtual. La metodología se estructura en los siguientes pasos (Figura 2.8):

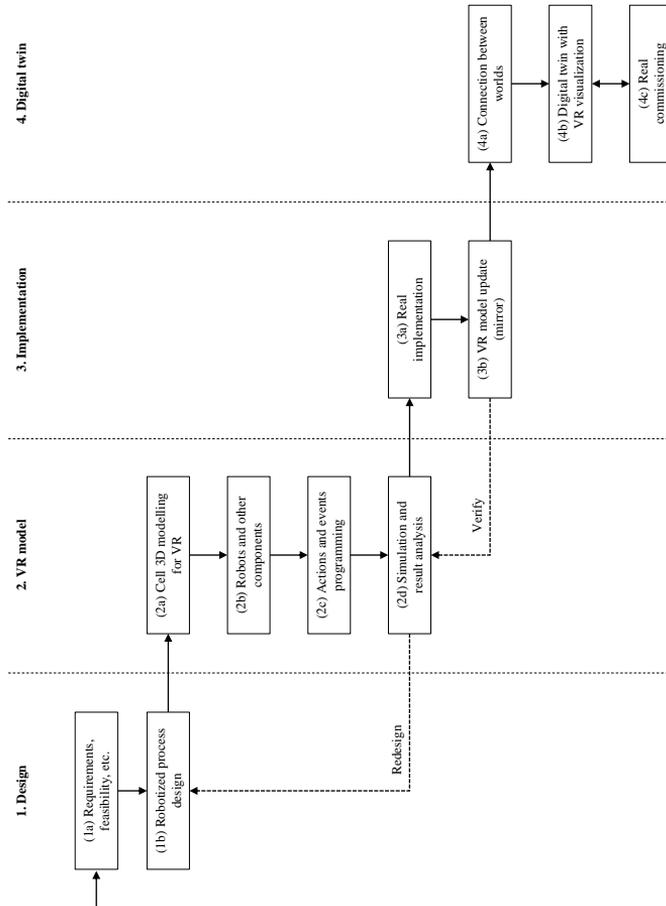


Figura 2.8: Metodología de diseño basada en el gemelo digital [4].

1. Diseño:

- a) Requisitos, viabilidad, etc. Análisis de los requisitos del nuevo proceso y estudio de costes, soluciones técnicas, número y tipo de robots, etc.
- b) Diseño del proceso robotizado. Diseño y selección del flujo-grama, los componentes, la distribución en planta, etc.

2. Modelo virtual:

- a) Modelado 3D de la celda para realidad virtual. Reconstrucción 3D y modelado del entorno para crear una experiencia inmersiva en realidad virtual.
- b) Robots y otros componentes. Inclusión de los elementos de la celda en el modelo virtual.
- c) Programación de acciones y eventos (lógicas). Para la experiencia inmersiva, las acciones y los eventos deben suceder como en el mundo real.
- d) Simulación y análisis de resultados. El proceso diseñado se simula y estudia en el entorno virtual para verificar si el resultado cumple con los requisitos de partida (puesta en marcha virtual). Si es necesario algún rediseño, se volverá al punto (1b).

3. Implementación:

- a) Implementación real. Una vez que el proceso y la solución basada en la automatización mediante robots han sido testeadas virtualmente, es el momento de la implementación real.
- b) Actualización del modelo virtual (espejo). Si durante la implementación se produce algún cambio en el diseño original, es necesario actualizar el modelo virtual para mantener el espejo y repetir la simulación volviendo al punto (2d).

4. Gemelo digital:

- a) Conexión entre mundos. Instalación de sensores para la comunicación de datos en tiempo real entre el mundo real y el virtual para crear el gemelo digital.
- b) Gemelo digital con visualización mediante realidad virtual. Visualización de las acciones y eventos reales en el gemelo digital y formación de los operarios.
- c) Puesta en marcha real. Funcionamiento real del nuevo proceso de fabricación sincronizado con su gemelo digital.

El objetivo realizar un diseño eficiente y seleccionar las tecnologías necesarias adecuadas para poder realizar una validación previa a la adquisición e implantación. De esta manera, se podrán detectar errores o deficiencias en el diseño durante la puesta en marcha virtual y corregirlos, evitando costes innecesarios y problemas futuros. Además, después de la implementación real, el gemelo digital puede utilizarse para el entrenamiento de los operarios, para monitorizar la celda en tiempo real y para simular futuros cambios.

A la arquitectura habitual de una celda robótica ya descrita, es necesario añadir la arquitectura para el gemelo digital, incluyendo sensores y la visualización mediante realidad virtual, según se muestra en la Figura 2.9. La principal ventaja de esta arquitectura sigue siendo su modularidad, ya que cada subsistema se puede desarrollar de forma independiente, así como la posibilidad de integrar robots de distintos fabricantes. Además, si se requiriesen nuevas funcionalidades, se podrían añadir nuevos módulos. El resultado es una herramienta novedosa e inteligente para el diseño, la simulación y la puesta en marcha (formación, monitorización, etc.) de celdas robóticas. Estas etapas se hacían tradicionalmente por separado mediante diferentes aplicaciones, por lo que mediante la aproximación propuesta se optimiza el proceso de diseño y puesta en marcha de la automatización y se incrementa la eficiencia.

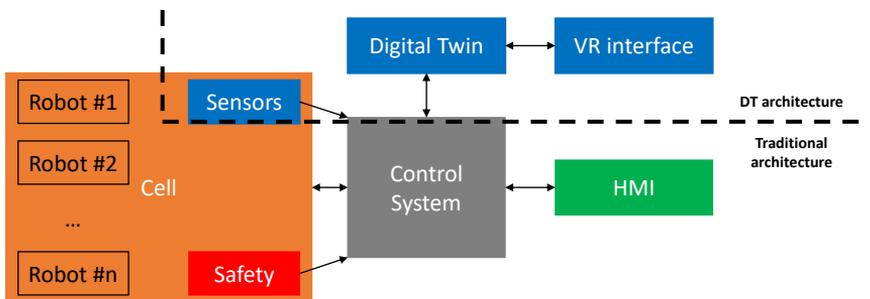


Figura 2.9: Arquitectura para la integración del gemelo digital [4].

En los procesos de fabricación, una buena etapa de ensamblaje puede aumentar la eficiencia y la calidad y disminuir el coste y el tiempo [141], por lo que el diseño de estos procesos es crítico para lograr una implementación exitosa. Por esta razón, el enfoque propuesto se ha aplicado al diseño, la implementación y la operación de un proceso

de fabricación de ensamblaje a nivel de laboratorio, donde personas y robots trabajan en colaboración. Este caso es muy representativo para diferentes industrias manufactureras, en donde el producto final es el resultado de la integración de varias partes. Por lo tanto, es muy probable encontrar aplicaciones potenciales para la creación de líneas de producción flexibles y fácilmente reconfigurables.

El objetivo del proceso es la clasificación de distintas piezas fabricadas, el ensamblado, la inspección y la expedición de lotes. El operario prepara los lotes en bandejas siguiendo las instrucciones y ensambla las piezas que se encuentran en distintos contenedores. Para mejorar la productividad, dos robots asisten a los operarios de forma colaborativa y un sistema de visión inspecciona si las piezas y los lotes son correctos. Siguiendo la metodología se han definido los requisitos, los robots y el resto de elementos (Figura 2.10), el diagrama de flujo (Figura 2.11) y el *layout* (Figura 2.12).

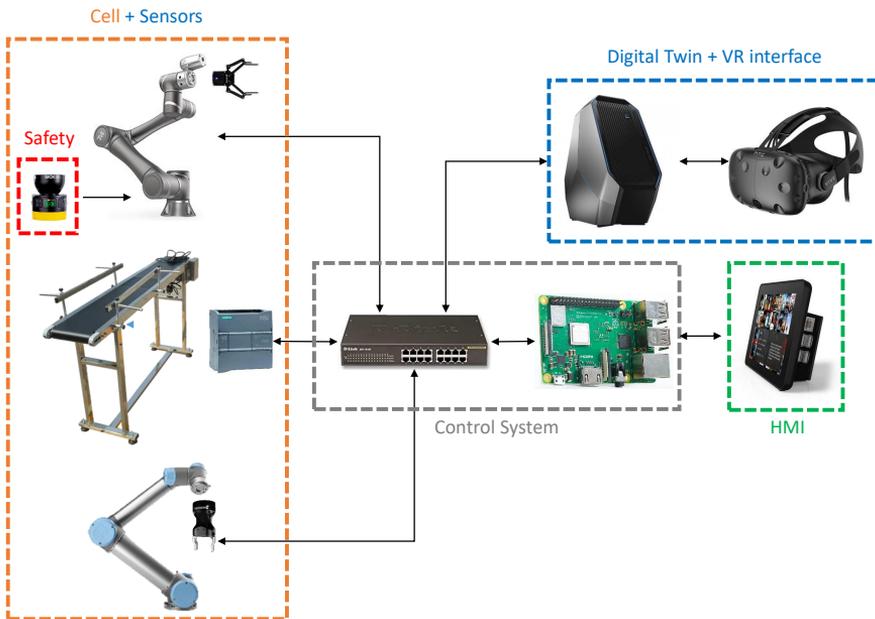


Figura 2.10: Componentes y arquitectura [4].

El siguiente paso es modelar el escenario en realidad virtual según la sistemática propuesta en la segunda contribución de la presente tesis y descrita en la Figura 2.2 [2], incluyendo los elementos del proceso

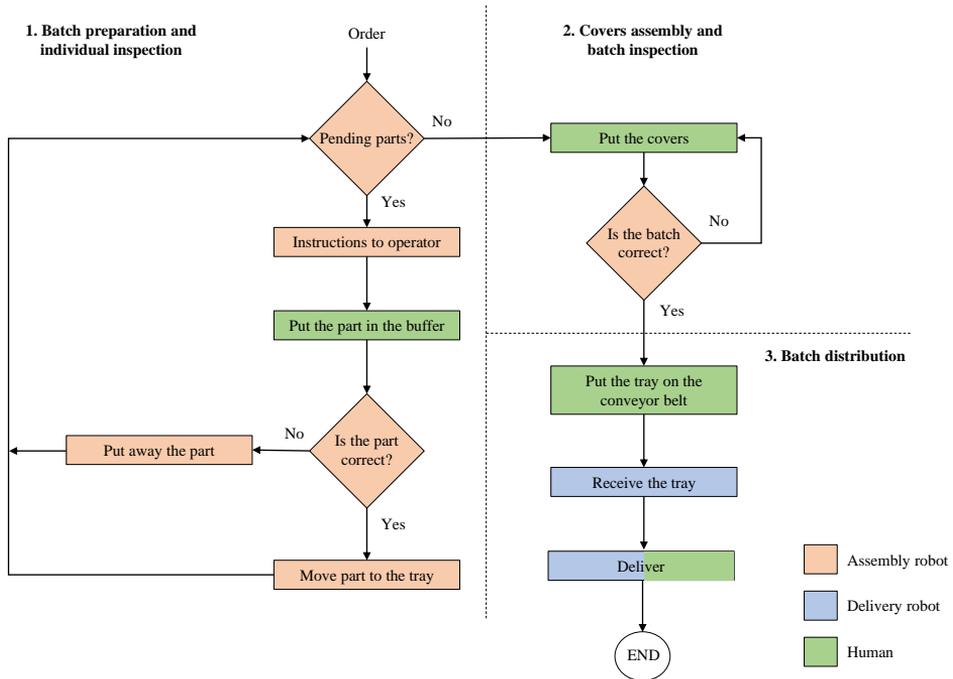


Figura 2.11: Diagrama de flujo del proceso [4].

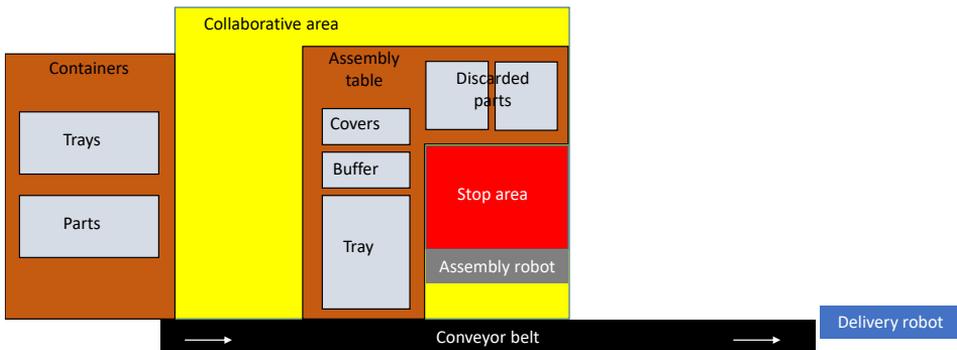


Figura 2.12: Distribución en planta [4].

para visualizarlo y validarlo. El resultado se muestra en la Figura 2.13. La versatilidad de este escenario virtual permite definir diferentes modelos de trabajo con distinta ubicación de los elementos, distintos comportamientos, distinto reparto de tareas entre operarios y robots, etc. para realizar la validación comparando los modelos en términos de eficiencia y optimización, reducción de movimientos y posibilidad

de ampliaciones futuras:



Figura 2.13: Vista general de la celda virtual [4].

1. Eficiencia y optimización:

- Detección temprana y no subjetiva de defectos en las piezas para evitar desperdicio de tiempo y materiales.
- Realización de tareas en paralelo y sin esperas.
- Los operarios no realizan tareas repetitivas.
- Utilización de *buffers* para evitar cuellos de botella.
- Descarte automático de piezas defectuosas.
- Gestión flexible de las piezas pendientes para evitar confusiones.

2. Reducción de movimientos:

- Los elementos de trabajo y las piezas están al alcance de la mano para evitar desplazamientos innecesarios.
- La cinta transportadora evita la necesidad de una plataforma móvil más cara y compleja.

3. Posibilidad de ampliaciones futuras:

- Se pueden añadir nuevos puestos en paralelo al actual.
- Utilización de realidad aumentada como HMI en lugar de la pantalla.

Esta validación es la puesta en marcha virtual y, tras ella, llega la implementación real (Figura 2.14). Nótese el realismo conseguido en la reconstrucción virtual para lograr el efecto inmersivo en el usuario. El entorno virtual es completamente exacto al real e incluye los mínimos detalles para transmitir al usuario la sensación de presencia (dimensiones, texturas, colores, efectos de iluminación, etc.).



Figura 2.14: Vista general de la celda real [4].

Finalmente, el proceso real se conecta con el virtual para crear el gemelo digital y dotarlo de información en tiempo real.

La Tabla 2.3 muestra la comparación entre las herramientas de simulación de los fabricantes de robots, las herramientas comerciales con realidad virtual y la propuesta del gemelo digital con realidad virtual en términos de bajo coste de adquisición (“Baja inversión” en la tabla),

integración de robots de distintos fabricantes (“Multi-robot”), orientado a la colaboración persona-robot (“Colab. persona-robot”), efecto inmersivo y realidad virtual (“Inmersivo”), personalización del entorno (“Personalización”), usabilidad para formación y entrenamiento de operarios (“Formación”) y versatilidad para incluir nuevas funcionalidades (“Versatilidad”). En la escala 1-3, “1” significa el peor o no soportado y “3”, el mejor. La mayoría de las compañías no pueden permitirse disponer de una herramienta de simulación específica para cada tipo de robot cuando están estudiando el uso de robots en sus procesos de fabricación. La metodología propuesta basada en el gemelo digital es totalmente abordable ya que únicamente requiere del sistema de realidad virtual como componente adicional, el cual es un producto de consumo, por lo que tiene un coste asumible. Aunque esta metodología puede extenderse a la automatización de cualquier proceso de fabricación, el inconveniente que presenta es que se requiere de un desarrollador experto para la creación del gemelo digital y la personalización del entorno para lograr el efecto inmersivo en la realidad virtual. No obstante, este hecho proporciona gran versatilidad para añadir nuevas características y funcionalidades según las necesidades de la compañía.

	Fabricantes	Sim.+RV	DT+RV
Baja inversión	2	1	3
Multi-robot	1	3	3
Colab. persona-robot	1	1	3
Inmersivo	1	3	3
Personalización	1	2	3
Formación	1	2	3
Versatilidad	1	2	3

Tabla 2.3: Comparativa entre los simuladores de los fabricantes, los simuladores comerciales con realidad virtual y la propuesta de gemelo digital con realidad virtual [4].

Las máquinas y la automatización han sido determinantes desde la primera revolución industrial. La evolución de la industria ha estado unida a la evolución de la tecnología. También han cambiado los robots y sus tareas desde que tuvieron lugar las primeras automatizaciones. Los fabricantes de muchas industrias han usado ampliamente robots

para los diferentes tipos de tareas, pero algunas industrias son reacias al uso de robots por razones técnicas y económicas. En la revolución actual de la Industria 4.0, los robots son cada vez más autónomos, flexibles y cooperativos, trabajando de manera segura con las personas y aprendiendo de ellas. Gracias a la integración de tecnologías periféricas, los robots han evolucionado para incluir nuevas utilidades y realizar tareas más complejas.

Actualmente, las industrias tradicionalmente reacias al uso de robots, como la fabricación aeroespacial, pueden introducir la colaboración persona-robot para incrementar la productividad, ahorrar en materiales y energía y mejorar las condiciones de trabajo de los operarios. Los robots son el elemento clave del presente y futuro de la industria manufacturera.

Capítulo 3

Conclusiones

En el desarrollo de esta Tesis Doctoral se ha identificado tecnologías y diseñado metodologías para facilitar la implantación de soluciones robóticas para la automatización de procesos de fabricación, proponiendo y validando una metodología de diseño y puesta en marcha de celdas robóticas colaborativas dotadas de tecnologías auxiliares para permitir la interacción sin barreras físicas entre personas y robots. Para alcanzar este objetivo, a largo del Plan de Investigación, se han presentado cuatro contribuciones, que van planteando soluciones y respuestas a dichos objetivos. De los resultados de las contribuciones se concluye que gracias a la conjunción de la robótica con otras tecnologías es posible la automatización de tareas complejas en industrias tradicionalmente manuales y reacias al uso de robots para mejorar la productividad y la seguridad, siendo posible su extensión a otras industrias con un grado de automatización mayor. De forma esquematizada, los principales resultados se mencionan a continuación, incluyendo la referencia a la publicación que los desarrolla en detalle:

- Se ha llevado a cabo un estudio exhaustivo de distintas aplicaciones de visión artificial 3D para el guiado de robots en entornos industriales. El propósito de esta clasificación y revisión es proporcionar una recopilación del estado del arte y de las técnicas existentes para conocer los antecedentes, así como las ventajas e inconvenientes de cada una según el contexto de aplicación [SENSORS2016].
- Se ha demostrado que la visión artificial es una de las tecnologías clave para incrementar las prestaciones de los robots y para per-

mitir su interacción con las personas en la industria. Según los requisitos de la aplicación y del tipo de robot, se deben considerar los siguientes aspectos para seleccionar la técnica más adecuada: precisión, resolución, rango, peso, seguridad, tiempo de procesamiento, condiciones del entorno, integración con otros sistemas y presupuesto [SENSORS2016].

- Se ha demostrado que no hay una técnica o un sensor de visión universal para realizar diversas tareas, trabajar en diferentes circunstancias u operar sobre piezas muy distintas [SENSORS2016].
- Se ha mostrado que la realidad virtual es una herramienta con multitud de sinergias con la robótica y una de las claves para la interacción persona-robot mediante una interfaz inmersiva, permitiendo que los operarios que van a trabajar con un robot industrial, especialmente si lo van a hacer en modo colaborativo, realicen un entrenamiento y puedan validar programas antes de ejecutarlos [CII2019].
- Para conseguir el efecto inmersivo en realidad virtual, es necesario evitar las latencias entre acciones y respuestas y conseguir una reconstrucción 3D de alta calidad y un comportamiento realista de todos los elementos del entorno, para lo que se ha propuesto la creación de un entorno de realidad virtual totalmente inmersivo, seguro y de coste asequible que integra tecnologías comerciales originalmente pensadas para videojuegos y el control real de robots, combinando de forma eficiente en una aplicación el entrenamiento, la simulación y el control [CII2019].
- Se ha analizado el grado de implantación de soluciones robóticas en industrias tradicionalmente manuales, observando las dificultades técnicas y económicas y la necesidad de nuevas soluciones y tecnologías que permitan el aumento de la productividad [IJAMT2020].
- Se ha demostrado que la semiautomatización de procesos tradicionalmente manuales en industrias reacias al uso de robots es posible gracias a la colaboración simbiótica persona-robot, reduciendo tiempos, costes y riesgos y mejorando la productividad y la eficacia de los recursos, tal y como se ha validado con un

proceso de ensamblaje real de la industria aeronáutica. Además de tiempos y costes, se han evaluado el factor humano y la experiencia de usuario, considerando la usabilidad y la seguridad [IJAMT2020].

- Se han analizado herramientas de simulación y diseño de celdas robóticas existentes en el estado del arte [AS2020].
- Se ha propuesto una metodología para el diseño y la operación de celdas multi-robóticas (con robots de distintos tipos y fabricantes), combinando el gemelo digital y la realidad virtual en una arquitectura modular, que permite la simulación y la monitorización en tiempo real de la celda. El cumplimiento de los requisitos de la automatización se verifica en el gemelo digital con visualización inmersiva mediante realidad virtual, lo que permite la simulación del diseño y de posibles cambios para encontrar la solución óptima durante la puesta en marcha virtual. Una vez implementado en la realidad, la conexión con el gemelo digital permite la monitorización en tiempo real, la formación y la mejora continua [AS2020].
- Se ha validado la metodología teórica y su puesta en práctica con el banco de pruebas virtual, mediante el diseño, la implementación y la puesta en marcha de un proceso colaborativo de ensamblaje de componentes representativo de múltiples industrias. Los resultados muestran que la sistemática propuesta permite realizar de forma eficiente el diseño y la puesta en marcha real de procesos de fabricación con varios robots, incluyendo robots colaborativos [AS2020].

En la Industria 4.0, los robots se han convertido en uno de los elementos fundamentales para mejorar la competitividad de la industria. Dado que cada vez se requieren para realizar tareas más complejas, es necesario dotarlos de nuevas capacidades y funcionalidades, como la colaboración con las personas, lo que implica tomar decisiones en tiempo real y realizar acciones que afectan no sólo a la calidad de la operación, sino también a la seguridad de los operarios que comparten el espacio de trabajo. Por tanto, el futuro de la industria son los robots y el futuro de los robots pasa por la visión artificial, la senso-rización, la realidad virtual, la realidad aumentada, el gemelo digital,

la inteligencia artificial, etc. Como se ha puesto de manifiesto en esta tesis, los procesos inteligentes de fabricación requieren de la interacción entre las personas y los robots y entre el mundo físico y el virtual para mediante un trabajo de mejora continua poder alcanzar escalas y entornos a los que no se ha llegado en el pasado.

3.1. Trabajo futuro

Como ya se ha comentado, la evolución de la industria está ligada a la evolución de la tecnología, siendo los robots una de las claves para mejorar la competitividad de la industria. En las contribuciones de esta tesis se han analizado y propuesto soluciones para la integración de varias tecnologías con la robótica, que se podrán complementar con otras ya existentes, así como con las emergentes en un futuro inmediato, para seguir avanzando y mejorando la automatización de procesos de fabricación mediante robots inteligentes y con grandes capacidades que complementen a las de las personas. En este sentido, la tarea más inmediata para llevar a la industria todas las nuevas soluciones pasa por la certificación de las aplicaciones para el cumplimiento de las directivas y normativas de seguridad.

Por otra parte, los resultados se han validado sobre procesos de ensamblaje con robots, pero son perfectamente extensibles a otro tipo de procesos de fabricación, por lo que otra de las líneas de trabajo a futuro es la aplicación de las metodologías propuestas en la presente tesis a otros procesos que requieran robots avanzados para tareas complejas, como por ejemplo, soldadura, aplicación de sellante, taladrado de precisión, etc.

Capítulo 4

Trabajos publicados

En este capítulo se presentan las publicaciones que integran la tesis doctoral, incluyendo artículos publicados en revistas indexadas en el JCR.

La Figura 4.1 muestra las citas realizadas a las publicaciones según *Google Académico* a fecha 19 de septiembre de 2020: SENSORS2016 [5], CII2019 [2], IJAMT2020 [3] y AS2020 [4].

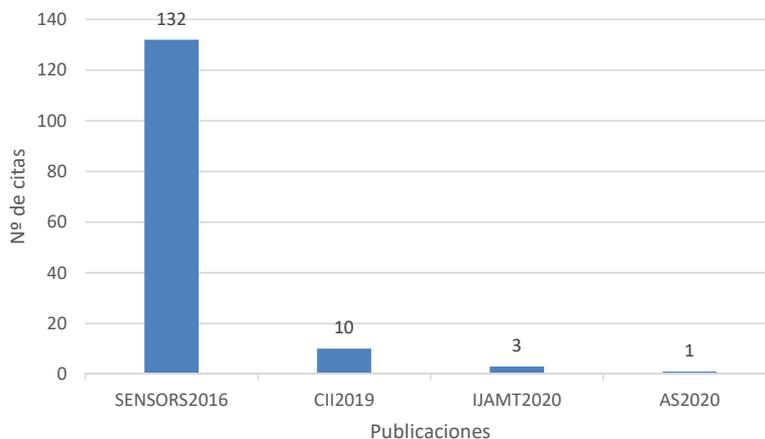


Figura 4.1: Citas. Fuente: *Google Académico*.

4.1. Artículos y factor de impacto

4.1.1. Robot Guidance Using Machine Vision Techniques in Industrial Environments: A Comparative Review

- Pérez, L., Rodríguez, Í., Rodríguez, N., Usamentiaga, R. & García, D.F. *Robot Guidance Using Machine Vision Techniques in Industrial Environments: A Comparative Review*. *Sensors* 2016, 16, 335.
- DOI: [10.3390/s16030335](https://doi.org/10.3390/s16030335).
- El índice de impacto de la revista *Sensors* (ISSN: 1424-8220) en 2016 fue 2,677 (Q1) y el índice de impacto a 5 años, 2,964.

4.1.2. Industrial robot control and operator training using virtual reality interfaces

- Pérez, L., Diez, E., Usamentiaga, R. & García, D.F. *Industrial robot control and operator training using virtual reality interfaces*. *Computers in Industry* 2019, 109, 114-120.
- DOI: [10.1016/j.compind.2019.05.001](https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.05.001).
- El índice de imparto de la revista *Computers in Industry* (ISSN: 0166-3615) en 2019 fue 3,954 (Q1) y el índice de impacto a 5 años, 4,059.

4.1.3. Symbiotic human-robot collaborative approach for increased productivity and enhanced safety in the aerospace manufacturing industry

- Pérez, L., Rodríguez-Jiménez, S., Rodríguez, N., Usamentiaga, R., García, D.F. & Wang, L. *Symbiotic human-robot collaborative approach for increased productivity and enhanced safety in the aerospace manufacturing industry*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2020, 106, 851–863.
- DOI: [10.1007/s00170-019-04638-6](https://doi.org/10.1007/s00170-019-04638-6).
- El índice de imparto de la revista *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (ISSN: 0268-3768) en 2019 fue 2,633 (Q2) y el índice de impacto a 5 años, 2,925.

4.1.4. Digital Twin and Virtual Reality Based Methodology for Multi-Robot Manufacturing Cell Commissioning

- Pérez, L., Rodríguez-Jiménez, S., Rodríguez, N., Usamentiaga, R. & García, D.F. *Digital Twin and Virtual Reality Based Methodology for Multi-Robot Manufacturing Cell Commissioning*. *Applied Sciences* 2020, 10, 3633.
- DOI: [10.3390/app10103633](https://doi.org/10.3390/app10103633).
- El índice de imparto de la revista *Applied Sciences* (ISSN: 2076-3417) en 2019 fue 2,474 (Q2) y el índice de impacto a 5 años, 2,458.

Bibliografía

- [1] International Federation of Robotics, “World robotics.” <https://ifr.org>. Accessed: 2020-09-05.
- [2] L. Pérez, E. Diez, R. Usamentiaga, and D. F. García, “Industrial robot control and operator training using virtual reality interfaces,” *Computers in Industry*, vol. 109, pp. 114–120, 2019.
- [3] L. Pérez, S. Rodríguez-Jiménez, N. Rodríguez, R. Usamentiaga, D. F. García, and L. Wang, “Symbiotic human–robot collaborative approach for increased productivity and enhanced safety in the aerospace manufacturing industry,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, no. 3-4, pp. 851–863, 2020.
- [4] L. Pérez, S. Rodríguez-Jiménez, N. Rodríguez, R. Usamentiaga, and D. F. García, “Digital twin and virtual reality based methodology for multi-robot manufacturing cell commissioning,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 10, p. 3633, 2020.
- [5] L. Pérez, Í. Rodríguez, N. Rodríguez, R. Usamentiaga, and D. F. García, “Robot guidance using machine vision techniques in industrial environments: A comparative review,” *Sensors*, vol. 16, no. 3, p. 335, 2016.
- [6] P. M. Deane and P. M. Deane, *The first industrial revolution*. Cambridge University Press, 1979.
- [7] G. K. Kanji, “Total quality management: the second industrial revolution,” *Total quality management*, vol. 1, no. 1, pp. 3–12, 1990.

- [8] J. Rifkin, *The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world*. Macmillan, 2011.
- [9] K. Henning, “Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0,” 2013.
- [10] J. Torres and I. Pastor, “Fabricación avanzada, más allá de la industria 4.0,” *Minsait Insights*, 2017.
- [11] European Comission, “Factories of the future.” http://www.ec.europa.eu/research/industrial_technologies/factories-of-the-future_en.html. Accessed: 2015-10-05.
- [12] European Factories of the Future Research Association, “Factories of the future: Multi-annual roadmap for the contractual ppp under horizon 2020,” *Publications office of the European Union*, 2013.
- [13] European Comission, “Robotics.” <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/robotics>. Accessed: 2017-12-15.
- [14] F. S. Martín, F. M. Rodríguez, J. S. Bayarri, J. P. Redorta, F. R. Escovar, S. E. Fernández, and H. V. Mavrich, “Historia de la robótica: de arquitas de tarento al robot da vinci (parte i),” *Actas Urológicas Españolas*, vol. 31, no. 2, pp. 69–76, 2007.
- [15] P. Clemente, “Los cobots y las plataformas inteligentes crecen en el mercado industrial.” *El Mundo*. Published: 2018-03-20.
- [16] J. Y. Zhang, C. Zhao, and D. W. Zhang, “Pose accuracy analysis of robot manipulators based on kinematics,” in *Advanced Materials Research*, vol. 201, pp. 1867–1872, Trans Tech Publ, 2011.
- [17] F. Krebs, L. Larsen, G. Braun, and W. Dudenhausen, “Design of a multifunctional cell for aerospace cfrp production,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 85, no. 1-4, pp. 17–24, 2016.
- [18] N. Jayaweera and P. Webb, “Metrology-assisted robotic processing of aerospace applications,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 23, no. 3, pp. 283–296, 2010.

- [19] K. Zhou, G. Ebenhofer, C. Eitzinger, U. Zimmermann, C. Walter, J. Saenz, L. Pérez, M. A. Fernández, and J. Navarro, “Mobile manipulator is coming to aerospace manufacturing industry,” in *2014 IEEE International Symposium on Robot and Sensors Environments (ROSE) Proceedings*, pp. 94–99, IEEE, 2014.
- [20] A. M. Zanchettin, N. M. Ceriani, P. Rocco, H. Ding, and B. Matthias, “Safety in human-robot collaborative manufacturing environments: Metrics and control,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 882–893, 2015.
- [21] J. E. Colgate, J. Edward, M. A. Peshkin, and W. Wannasuphopsit, “Cobots: Robots for collaboration with human operators,” 1996.
- [22] B. Matthias, S. Kock, H. Jerregard, M. Kallman, I. Lundberg, and R. Mellander, “Safety of collaborative industrial robots: Certification possibilities for a collaborative assembly robot concept,” in *2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, pp. 1–6, Ieee, 2011.
- [23] T. Ohno, *Toyota production system: beyond large-scale production*. crc Press, 1988.
- [24] D. Kolberg and D. Zühlke, “Lean automation enabled by industry 4.0 technologies,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 1870–1875, 2015.
- [25] A. Cherubini, R. Passama, A. Crosnier, A. Lasnier, and P. Fraisse, “Collaborative manufacturing with physical human–robot interaction,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 40, pp. 1–13, 2016.
- [26] M. A. K. Bahrin, M. F. Othman, N. H. N. Azli, and M. F. Talib, “Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic,” *Jurnal Teknologi*, vol. 78, no. 6-13, 2016.
- [27] B. Bayram and G. İnce, “Advances in robotics in the era of industry 4.0,” in *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*, pp. 187–200, Springer, 2018.

- [28] International Organization for Standardization, “Iso/ts 15066:2016 robots and robotic devices–collaborative robots.” <https://www.iso.org/standard/62996.html>. Accessed: 2020-09-05.
- [29] M. J. Rosenstrauch and J. Krüger, “Safe human-robot-collaboration-introduction and experiment using iso/ts 15066,” in *2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, pp. 740–744, IEEE, 2017.
- [30] R. Labudzki and S. Legutko, “Applications of machine vision,” *Manufact Ind Eng*, vol. 2, pp. 27–29, 2011.
- [31] C. Wöhler, *3D computer vision: efficient methods and applications*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [32] L. Wang, B. Schmidt, and A. Y. Nee, “Vision-guided active collision avoidance for human-robot collaborations,” *Manufacturing Letters*, vol. 1, no. 1, pp. 5–8, 2013.
- [33] J. Hefele and C. Brenner, “Robot pose correction using photogrammetric tracking,” in *Machine Vision and Three-Dimensional Imaging Systems for Inspection and Metrology*, vol. 4189, pp. 170–178, International Society for Optics and Photonics, 2001.
- [34] T. Clarke and X. Wang, “The control of a robot end-effector using photogrammetry,” *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 33, pp. 137–142, 2000.
- [35] B. Shirinzadeh, P. Teoh, Y. Tian, M. M. Dalvand, Y. Zhong, and H. Liaw, “Laser interferometry-based guidance methodology for high precision positioning of mechanisms and robots,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 26, no. 1, pp. 74–82, 2010.
- [36] T. Luhmann, “Precision potential of photogrammetric 6dof pose estimation with a single camera,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 64, no. 3, pp. 275–284, 2009.
- [37] B. Liu, F. Zhang, and X. Qu, “A method for improving the pose accuracy of a robot manipulator based on multi-sensor combined

- measurement and data fusion,” *Sensors*, vol. 15, no. 4, pp. 7933–7952, 2015.
- [38] C. Kardos, Z. Kemény, A. Kovács, B. E. Pataki, and J. Váncza, “Context-dependent multimodal communication in human-robot collaboration,” *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 15–20, 2018.
- [39] G. C. Burdea, “Invited review: the synergy between virtual reality and robotics,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 15, no. 3, pp. 400–410, 1999.
- [40] A. Moglia, V. Ferrari, L. Morelli, M. Ferrari, F. Mosca, and A. Cuschieri, “A systematic review of virtual reality simulators for robot-assisted surgery,” *European urology*, vol. 69, no. 6, pp. 1065–1080, 2016.
- [41] B. Schleich, N. Anwer, L. Mathieu, and S. Wartzack, “Shaping the digital twin for design and production engineering,” *CIRP Annals*, vol. 66, no. 1, pp. 141–144, 2017.
- [42] J. Vachálek, L. Bartalský, O. Rovný, D. Šišmišová, M. Morháč, and M. Lokšík, “The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept,” in *2017 21st international conference on process control (PC)*, pp. 258–262, IEEE, 2017.
- [43] A. Bilberg and A. A. Malik, “Digital twin driven human–robot collaborative assembly,” *CIRP Annals*, vol. 68, no. 1, pp. 499–502, 2019.
- [44] V. Havard, B. Jeanne, M. Lacomblez, and D. Baudry, “Digital twin and virtual reality: a co-simulation environment for design and assessment of industrial workstations,” *Production & Manufacturing Research*, vol. 7, no. 1, pp. 472–489, 2019.
- [45] T. Salmi, O. Väätäinen, T. Malm, J. Montonen, and I. Marstio, “Meeting new challenges and possibilities with modern robot safety technologies,” in *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*, pp. 183–188, Springer, 2014.
- [46] J. Salvi, X. Armangué, and J. Batlle, “A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation,” *Pattern recognition*, vol. 35, no. 7, pp. 1617–1635, 2002.

- [47] R. Usamentiaga, J. Molleda, D. F. Garcia, L. Perez, and G. Vecino, “Real-time line scan extraction from infrared images using the wedge method in industrial environments,” *Journal of Electronic Imaging*, vol. 19, no. 4, p. 043017, 2010.
- [48] A. Wilson, “Choosing a 3d vision system for automated robotics applications,” *Vis. Syst. Des*, vol. 19, 2014.
- [49] S. Foix Salmerón, G. Alenyà Ribas, and C. Torras, “Exploitation of time-of-flight (tof) cameras,” 2010.
- [50] K. Hashimoto, “A review on vision-based control of robot manipulators,” *Advanced robotics: the international journal of the Robotics Society of Japan*, vol. 17, no. 10, pp. 969–991, 2003.
- [51] N. Lazaros, G. C. Sirakoulis, and A. Gasteratos, “Review of stereo vision algorithms: from software to hardware,” *International Journal of Optomechatronics*, vol. 2, no. 4, pp. 435–462, 2008.
- [52] K. Aamdal, “Single camera system for close range industrial photogrammetry,” *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 29, pp. 6–6, 1993.
- [53] H.-G. Maas, “Dynamic photogrammetric calibration of industrial robots,” in *Videometrics V*, vol. 3174, pp. 106–112, International Society for Optics and Photonics, 1997.
- [54] M. Vincze, J. Prenninger, and H. Gander, “A laser tracking system to measure position and orientation of robot end effectors under motion,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 13, no. 4, pp. 305–314, 1994.
- [55] C. Dumas, S. Caro, C. Mehdi, S. Garnier, and B. Furet, “Joint stiffness identification of industrial serial robots,” 2011.
- [56] W. Qu, H. Dong, and Y. Ke, “Pose accuracy compensation technology in robot-aided aircraft assembly drilling process,” *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, vol. 32, no. 10, pp. 1951–1960, 2011.
- [57] E. Leikas, “Robot guidance with a photogrammetric 3-d measuring system,” *Industrial Robot: An International Journal*, 1999.

- [58] J. Hefele and C. Brenner, “Real-time photogrammetric algorithms for robot calibration,” *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 34, no. 5, pp. 33–38, 2002.
- [59] IDS, “IDS case studies.” <https://en.ids-imaging.com/case-studies.html>. Accessed: 2015-07-30.
- [60] J. Carroll, “3d vision system assists in robotic bin picking,” *Vision Systems Design*, vol. 19, 2014.
- [61] J. Sturm, K. Konolige, C. Stachniss, and W. Burgard, “3d pose estimation, tracking and model learning of articulated objects from dense depth video using projected texture stereo,” in *RGB-D: Advanced Reasoning with Depth Cameras Workshop, RSS*, 2010.
- [62] J. W. Weingarten, G. Gruener, and R. Siegwart, “A state-of-the-art 3d sensor for robot navigation,” in *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566)*, vol. 3, pp. 2155–2160, IEEE, 2004.
- [63] S. May, B. Werner, H. Surmann, and K. Pervolz, “3d time-of-flight cameras for mobile robotics,” in *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 790–795, Ieee, 2006.
- [64] S. May, D. Droschel, D. Holz, C. Wiesen, S. Fuchs, *et al.*, “3d pose estimation and mapping with time-of-flight cameras,” in *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 3D Mapping workshop, Nice, France*, 2008.
- [65] G. M. Hegde and C. Ye, “Extraction of planar features from swissranger sr-3000 range images by a clustering method using normalized cuts,” in *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4034–4039, IEEE, 2009.
- [66] K. Ohno, T. Nomura, and S. Tadokoro, “Real-time robot trajectory estimation and 3d map construction using 3d camera,” in *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5279–5285, IEEE, 2006.

- [67] J. A. Stipes, J. G. Cole, and J. Humphreys, “4d scan registration with the sr-3000 lidar,” in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2988–2993, IEEE, 2008.
- [68] G. Arbeiter, J. Fischer, and A. Verl, “3-d-environment reconstruction for mobile robots using fast-slam and feature extraction,” in *ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)*, pp. 1–5, VDE, 2010.
- [69] K.-D. Kuhnert and M. Stommel, “Fusion of stereo-camera and pmd-camera data for real-time suited precise 3d environment reconstruction,” in *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4780–4785, IEEE, 2006.
- [70] C. Netramai, M. Oleksandr, C. Joochim, and H. Roth, “Motion estimation of a mobile robot using different types of 3d sensors,” in *Fourth International Conference on Autonomic and Autonomous Systems (ICAS'08)*, pp. 148–153, IEEE, 2008.
- [71] B. Dellen, G. Alenya, S. Foix, and C. Torras, “3d object reconstruction from swissranger sensor data using a spring-mass model,” 2009.
- [72] S. Foix, G. Alenya, J. Andrade-Cetto, and C. Torras, “Object modeling using a tof camera under an uncertainty reduction approach,” in *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1306–1312, IEEE, 2010.
- [73] S. Haddadin, M. Suppa, S. Fuchs, T. Bodenmüller, A. Albu-Schäffer, and G. Hirzinger, “Towards the robotic co-worker,” in *Robotics Research*, pp. 261–282, Springer, 2011.
- [74] S. Fuchs and S. May, “Calibration and registration for precise surface reconstruction with time-of-flight cameras,” *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications*, vol. 5, no. 3-4, pp. 274–284, 2008.
- [75] J. U. Kühnle, Z. Xue, M. Stotz, J. M. Zöllner, A. Verl, and R. Dillmann, “Grasping in depth maps of time-of-flight cameras,” in *2008 International Workshop on Robotic and Sensors Environments*, pp. 132–137, IEEE, 2008.

- [76] A. Saxena, L. L. Wong, and A. Y. Ng, “Learning grasp strategies with partial shape information.,” in *AAAI*, vol. 3, pp. 1491–1494, 2008.
- [77] A. Maldonado, U. Klank, and M. Beetz, “Robotic grasping of unmodeled objects using time-of-flight range data and finger torque information,” in *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2586–2591, IEEE, 2010.
- [78] J. Pages, C. Collewet, F. Chaumette, and J. Salvi, “A camera-projector system for robot positioning by visual servoing,” in *2006 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW’06)*, pp. 2–2, IEEE, 2006.
- [79] K. Claes and H. Bruyninckx, “Robot positioning using structured light patterns suitable for self calibration and 3d tracking,” in *Proceedings of the 2007 International Conference on Advanced Robotics, Jeju, Korea, Citeseer*, 2007.
- [80] S. Patra, B. Bhowmick, S. Banerjee, and P. Kalra, “High resolution point cloud generation from kinect and hd cameras using graph cut.,” *VISAPP (2)*, vol. 12, pp. 311–316, 2012.
- [81] L. Susperregi, B. Sierra, M. Castrillón, J. Lorenzo, J. M. Martínez-Otzeta, and E. Lazkano, “On the use of a low-cost thermal sensor to improve kinect people detection in a mobile robot,” *Sensors*, vol. 13, no. 11, pp. 14687–14713, 2013.
- [82] V. Nguyen, A. Martinelli, N. Tomatis, and R. Siegwart, “A comparison of line extraction algorithms using 2d laser rangefinder for indoor mobile robotics,” in *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1929–1934, IEEE, 2005.
- [83] G. A. Borges and M.-J. Aldon, “Line extraction in 2d range images for mobile robotics,” *Journal of intelligent and Robotic Systems*, vol. 40, no. 3, pp. 267–297, 2004.
- [84] J. E. Agapakis, J. M. Katz, J. M. Friedman, and G. N. Epstein, “Vision-aided robotic welding: an approach and a flexible implementation,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 9, no. 5, pp. 17–34, 1990.

- [85] A. F. Villán, R. G. Acevedo, E. A. Alvarez, A. C. López, D. F. García, R. U. Fernández, M. J. Meana, and J. M. G. Sánchez, “Low-cost system for weld tracking based on artificial vision,” *IEEE transactions on industry applications*, vol. 47, no. 3, pp. 1159–1167, 2011.
- [86] D. Khadraoui, G. Motyl, P. Martinet, J. Gallice, and F. Chaumette, “Visual servoing in robotics scheme using a camera/laser-stripe sensor,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 5, pp. 743–750, 1996.
- [87] N. Pears and P. Probert, “An optical range sensor for mobile robot guidance,” in *[1993] Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 659–664, IEEE, 1993.
- [88] T. Einsele, “Real-time self-localization in unknown indoor environment using a panorama laser range finder,” in *Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems. Innovative Robotics for Real-World Applications. IROS’97*, vol. 2, pp. 697–702, IEEE, 1997.
- [89] P. Jensfelt and H. Christensen, “Laser based position acquisition and tracking in an indoor environment,” in *International Symposium on Robotics and Automation-ISRA*, vol. 98, 1998.
- [90] L. Zhang and B. K. Ghosh, “Line segment based map building and localization using 2d laser rangefinder,” in *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065)*, vol. 3, pp. 2538–2543, IEEE, 2000.
- [91] F. Brosed, J. Santolaria, J. Aguilar, and D. Guillomía, “Laser triangulation sensor and six axes anthropomorphic robot manipulator modelling for the measurement of complex geometry products,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 28, no. 6, pp. 660–671, 2012.
- [92] Pro dintec, “Flexsort.” <http://www.prodintec.es/es/nosotros/actualidad/25-noticias/492->. Accessed: 2015-11-15.
- [93] J. O. Oyekan, W. Hutabarat, A. Tiwari, R. Grech, M. H. Aung, M. P. Mariani, L. López-Dávalos, T. Ricaud, S. Singh,

- and C. Dupuis, “The effectiveness of virtual environments in developing collaborative strategies between industrial robots and humans,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 55, pp. 41–54, 2019.
- [94] J. W. S. Chong, S. Ong, A. Y. Nee, and K. Youcef-Youmi, “Robot programming using augmented reality: An interactive method for planning collision-free paths,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 25, no. 3, pp. 689–701, 2009.
- [95] J. Steuer, “Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence,” *Journal of communication*, vol. 42, no. 4, pp. 73–93, 1992.
- [96] R. T. Azuma, “A survey of augmented reality,” *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 6, no. 4, pp. 355–385, 1997.
- [97] Z. Pan, J. Polden, N. Larkin, S. Van Duin, and J. Norrish, “Recent progress on programming methods for industrial robots,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 28, no. 2, pp. 87–94, 2012.
- [98] C. Gosselin, J. Angeles, *et al.*, “Singularity analysis of closed-loop kinematic chains.,” *IEEE transactions on robotics and automation*, vol. 6, no. 3, pp. 281–290, 1990.
- [99] A. Billard, S. Calinon, R. Dillmann, and S. Schaal, “Survey: Robot programming by demonstration,” *Handbook of robotics*, vol. 59, 2008.
- [100] J. Aleotti, S. Caselli, and M. Reggiani, “Leveraging on a virtual environment for robot programming by demonstration,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 47, no. 2-3, pp. 153–161, 2004.
- [101] H. J. Yap, Z. Taha, S. Z. M. Dawal, and S.-W. Chang, “Virtual reality based support system for layout planning and programming of an industrial robotic work cell,” *PLoS one*, vol. 9, no. 10, p. e109692, 2014.

- [102] L. Peppoloni, F. Brizzi, C. A. Avizzano, and E. Ruffaldi, “Immersive ros-integrated framework for robot teleoperation,” in *2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 177–178, IEEE, 2015.
- [103] J. I. Lipton, A. J. Fay, and D. Rus, “Baxter’s homunculus: Virtual reality spaces for teleoperation in manufacturing,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 179–186, 2017.
- [104] T. Rodehuts Kors, M. Schwarz, and S. Behnke, “Intuitive bimanual telemanipulation under communication restrictions by immersive 3d visualization and motion tracking,” in *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 276–283, IEEE, 2015.
- [105] M. Slater and M. V. Sanchez-Vives, “Enhancing our lives with immersive virtual reality,” *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 3, p. 74, 2016.
- [106] J. Guo, S. Guo, T. Tamiya, H. Hirata, and H. Ishihara, “A virtual reality-based method of decreasing transmission time of visual feedback for a tele-operative robotic catheter operating system,” *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 12, no. 1, pp. 32–45, 2016.
- [107] M. Slater, “Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 364, no. 1535, pp. 3549–3557, 2009.
- [108] J. Gregory, *Virtual reality*. Cherry Lake, 2017.
- [109] P. R. Desai, P. N. Desai, K. D. Ajmera, and K. Mehta, “A review paper on oculus rift-a virtual reality headset,” *arXiv preprint arXiv:1408.1173*, 2014.
- [110] F. Leali, M. Pellicciari, F. Pini, G. Berselli, and A. Vergnano, “An offline programming method for the robotic deburring of aerospace components,” in *International Workshop on Robotics in Smart Manufacturing*, pp. 1–13, Springer, 2013.

- [111] W. Zhu, W. Qu, L. Cao, D. Yang, and Y. Ke, “An off-line programming system for robotic drilling in aerospace manufacturing,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 68, no. 9-12, pp. 2535–2545, 2013.
- [112] S. Bi and J. Liang, “Robotic drilling system for titanium structures,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 54, no. 5-8, pp. 767–774, 2011.
- [113] A. Drouot, R. Zhao, L. Irving, D. Sanderson, and S. Ratchev, “Measurement assisted assembly for high accuracy aerospace manufacturing,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 393–398, 2018.
- [114] F. Leali, A. Vergnano, F. Pini, M. Pellicciari, and G. Berselli, “A workcell calibration method for enhancing accuracy in robot machining of aerospace parts,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 85, no. 1-4, pp. 47–55, 2016.
- [115] B. Mei, W. Zhu, K. Yuan, and Y. Ke, “Robot base frame calibration with a 2d vision system for mobile robotic drilling,” *The international journal of advanced manufacturing technology*, vol. 80, no. 9-12, pp. 1903–1917, 2015.
- [116] R. Wilcox, S. Nikolaidis, and J. Shah, “Optimization of temporal dynamics for adaptive human-robot interaction in assembly manufacturing,” *Robotics*, vol. 8, p. 441, 2013.
- [117] M. Walton, P. Webb, and M. Poad, “Applying a concept for robot-human cooperation to aerospace equipping processes,” tech. rep., SAE Technical Paper, 2011.
- [118] L. Muijs and M. Snijders, “Collaborative robot applications at gkn aerospace’s fokker business,” tech. rep., SAE Technical Paper, 2017.
- [119] R. Mueller, M. Vette, A. Geenen, and T. Masiak, “Improving working conditions in aircraft productions using human-robot-collaboration in a collaborative riveting process,” tech. rep., SAE Technical Paper, 2017.

- [120] A. Bolotnikova, K. Chappellet, A. Paolillo, A. Escande, G. Anbarjafari, A. Suarez-Roos, P. Rabaté, and A. Kheddar, “A circuit-breaker use-case operated by a humanoid in aircraft manufacturing,” in *2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pp. 15–22, IEEE, 2017.
- [121] J. Zhang and X. Fang, “Challenges and key technologies in robotic cell layout design and optimization,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 231, no. 15, pp. 2912–2924, 2017.
- [122] G. Bruno and D. Antonelli, “Dynamic task classification and assignment for the management of human-robot collaborative teams in workcells,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 98, no. 9-12, pp. 2415–2427, 2018.
- [123] M. Grieves and J. Vickers, “Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems,” in *Transdisciplinary perspectives on complex systems*, pp. 85–113, Springer, 2017.
- [124] S. Boschert and R. Rosen, “Digital twin—the simulation aspect,” in *Mechatronic futures*, pp. 59–74, Springer, 2016.
- [125] M. Schluse and J. Rossmann, “From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems,” in *2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, pp. 1–6, IEEE, 2016.
- [126] C. Cimino, E. Negri, and L. Fumagalli, “Review of digital twin applications in manufacturing,” *Computers in Industry*, vol. 113, p. 103130, 2019.
- [127] F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, and F. Sui, “Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 94, no. 9-12, pp. 3563–3576, 2018.
- [128] Z. Zhu, C. Liu, and X. Xu, “Visualisation of the digital twin data in manufacturing by using augmented reality,” *Procedia CIRP*, vol. 81, pp. 898–903, 2019.

- [129] Z. Yan, L. Fabresse, J. Laval, and N. Bouraqadi, “Building a ros-based testbed for realistic multi-robot simulation: Taking the exploration as an example,” *Robotics*, vol. 6, no. 3, p. 21, 2017.
- [130] Visual Components, “Visual components.” <https://www.visualcomponents.com>. Accessed: 2020-04-10.
- [131] Visual Components, “Engineer automated production systems using robotics and automation simulation.” <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/products/manufacturing-planning/robotics-automation-simulation.html>. Accessed: 2020-04-10.
- [132] RoboDK, “Simulate robot applications.” <https://robodk.com>. 2020.
- [133] J. J. Roldán, E. Peña-Tapia, D. Garzón-Ramos, J. de León, M. Garzón, J. del Cerro, and A. Barrientos, “Multi-robot systems, virtual reality and ros: developing a new generation of operator interfaces,” in *Robot Operating System (ROS)*, pp. 29–64, Springer, 2019.
- [134] N. Kousi, C. Gkournelos, S. Aivaliotis, C. Giannoulis, G. Michalos, and S. Makris, “Digital twin for adaptation of robots’ behavior in flexible robotic assembly lines,” *Procedia manufacturing*, vol. 28, pp. 121–126, 2019.
- [135] A. A. Malik and A. Bilberg, “Digital twins of human robot collaboration in a production setting,” *Procedia manufacturing*, vol. 17, pp. 278–285, 2018.
- [136] X. Ma, F. Tao, M. Zhang, T. Wang, and Y. Zuo, “Digital twin enhanced human-machine interaction in product lifecycle,” *Procedia CIRP*, vol. 83, pp. 789–793, 2019.
- [137] P. Aivaliotis, K. Georgoulis, Z. Arkouli, and S. Makris, “Methodology for enabling digital twin using advanced physics-based modelling in predictive maintenance,” *Procedia CIRP*, vol. 81, pp. 417–422, 2019.
- [138] C. Zhang, G. Zhou, J. He, Z. Li, and W. Cheng, “A data-and knowledge-driven framework for digital twin manufacturing cell,” *Procedia CIRP*, vol. 83, pp. 345–350, 2019.

- [139] A. Burghardt, D. Szybicki, P. Gierlak, K. Kurc, P. Pietruś, and R. Cygan, “Programming of industrial robots using virtual reality and digital twins,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 2, p. 486, 2020.
- [140] V. Kuts, T. Otto, T. Tähemaa, and Y. Bondarenko, “Digital twin based synchronised control and simulation of the industrial robotic cell using virtual reality,” *Journal of Machine Engineering*, vol. 19, 2019.
- [141] L. Wang, S. Keshavarzmanesh, H.-Y. Feng, and R. O. Buchal, “Assembly process planning and its future in collaborative manufacturing: a review,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 41, no. 1-2, p. 132, 2009.