



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

ÁREA DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES

**RESUMEN EN CASTELLANO DEL
TRABAJO FIN DE MÁSTER N° 201906**

VISIBILITY AREAS FOR PHYSICAL AND VIRTUAL TRANSMITTERS IN MULTIPATH ASSISTED POSITIONING

**D. JAIME SUÁREZ GARCÍA
TUTOR: D. JESÚS ALBERTO LÓPEZ FERNÁNDEZ
SUPERVISOR: D. MARKUS ULMSCHNEIDER**

FECHA: Julio de 2019

ACRÓNIMOS

AWGN	<i>additive white Gaussian noise</i>
DLR	Centro Aeroespacial Alemán
GNSS	<i>global navigation satellite system</i>
IMU	<i>inertial measurement unit</i>
KEST	<i>Kalman enhanced super-resolution tracking</i>
RBPF	<i>Rao-Blackwellized particle filter</i>
SLAM	<i>simultaneous localization and mapping</i>
TFM	Trabajo Fin de Máster

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	1
2	Channel-SLAM	4
3	Información de Visibilidad	5
4	Evaluaciones y Resultados	9
5	Conclusiones	13
	Bibliografía	15



1.- INTRODUCCIÓN

El presente documento resume el trabajo desarrollado durante la realización del Trabajo Fin de Máster (TFM) e incluye las conclusiones más relevantes extraídas del mismo. Para un mayor detalle debe acudir a la memoria principal. Este TFM ha sido fruto de una estancia de 6 meses en el Centro Aeroespacial Alemán (DLR), concretamente en el grupo de investigación de Radio Transmisiones Móviles, dentro de la sede de Oberpfaffenhofen. La labor principal ha consistido en la mejora del algoritmo de posicionamiento Channel-SLAM, creado por el mencionado grupo de investigación, a través de la inclusión de las áreas de visibilidad de los transmisores. A continuación se incluye la motivación y los objetivos de este trabajo, así como la estructura del resto del documento.

El uso de la información de posicionamiento se ha generalizado en los últimos tiempos. Se ha encontrado utilidad a la misma en sectores tan variados como el del entretenimiento, industrial, de marketing, sanitario, o de seguridad, entre otros. En exteriores, la tarea de posicionamiento se encuentra generalmente llevada a cabo a través de los sistemas de navegación global por satélite (GNSS). Sin embargo, el desempeño de estos sistemas se ve drásticamente reducido en interiores debido a la no existencia de línea de visión directa [1].

En este sentido, Channel-SLAM se presenta como una alternativa para llevar a cabo la tarea de posicionamiento en interiores mediante el aprovechamiento de la propagación multicamino [2], [3], [4]. Este método interpreta cada componente de señal recibida por el usuario, proveniente de transmisores terrestres y que ha podido sufrir multicamino, como si hubiese sido enviada por un transmisor en situación de visión directa. Así, la propagación multicamino incrementa el número de transmisores a través de los que Channel-SLAM estima la posición del usuario, incrementando a su vez la precisión en la estima de la posición. De hecho, gracias a este aprovechamiento de las componentes multicamino, la localización en interiores podría llevarse a cabo en un escenario con un único transmisor físico.

El conocimiento de la localización de los transmisores es esencial para obtener una correcta estima de la posición del usuario. Sin embargo, Channel-SLAM asume que esta información no se encuentra disponible de antemano. Es por ello que este método estima simultáneamente la localización de los distintos transmisores y del usuario; en la literatura, esta problemática es conocida como SLAM [5], por sus siglas en inglés (*simultaneous localization and mapping*). Así, cada usuario estima un mapa del entorno compuesto por la localización de los distintos transmisores que ha visto a lo largo de su trayectoria, además de estimar su propia localización.



En [6] se ha demostrado que la obtención de información sobre la localización de los transmisores mejora notablemente el desempeño de Channel-SLAM. En escenarios en los que la concurrencia de usuarios es alta, dicha información puede obtenerse si los usuarios intercambian los mapas que han estimado. Sin embargo, Channel-SLAM es un método de posicionamiento relativo: cada mapa de usuario se encuentra en un sistema de coordenadas local, distinto de los demás, a menos que se obtenga algún tipo de referencia absoluta a un sistema de coordenadas global. Por tanto, para que un usuario pueda hacer uso de la información del entorno estimada por otro usuario, debe calcular la traslación y rotación existente entre ambos mapas. Esta tarea, que también incluye la combinación de ambos mapas, se denomina emparejamiento de mapas [7].

Los métodos de emparejamiento desarrollados hasta la fecha tan sólo hacen uso de la posición relativa de los transmisores, pues es la única información contenida en los mapas de usuario. En ciertas ocasiones, dependiendo de la geometría del escenario, pueden aparecer simetrías en las posiciones de los transmisores, que crean ambigüedades a la hora de establecer asociaciones entre los transmisores de ambos mapas. Esto a su vez deriva en una obtención de unos parámetros de transformación erróneos, y en la generación de un mapa combinado con información falsa. Dicha información errónea puede provocar el mal funcionamiento de Channel-SLAM y, además, puede ser compartida con otros usuarios, produciéndose una propagación de los errores.

Por esta razón, la motivación de este TFM reside en incrementar la robustez de los métodos de emparejamiento a través de la estimación, inclusión y utilización de información adicional en Channel-SLAM. En particular, se pretenden utilizar las áreas en las que los distintos transmisores son visibles, para así poder diferenciarlos y evitar las ambigüedades que derivan en mapas erróneos. Una mejora en la robustez de los métodos de emparejamiento implica, inherentemente, una mejora en el desempeño de Channel-SLAM en entornos multi-usuario.

Para llevar a cabo dicha labor, se establecen varias tareas a realizar. En primer lugar, se debe desarrollar una forma apropiada de estimar y almacenar la información de visibilidad de los distintos transmisores durante la operación del algoritmo. En segundo lugar, se debe crear una forma de utilizar dicha información en los métodos de emparejamiento. Por último, las tareas anteriores deben ser implementadas en un software de simulación para evaluar de forma experimental las mejoras introducidas sobre los métodos de emparejamiento. También será necesario implementar una versión simplificada del algoritmo Channel-SLAM sobre el que sustentar los nuevos conceptos desarrollados, así como métodos de emparejamiento clásicos, basados en la posición relativa entre transmisores.

Se debe resaltar que nunca antes se ha tratado de incorporar información adicional en Channel-SLAM para tratar de resolver el mencionado problema de ambigüedad, lo que convierte al trabajo desarrollado en original.



Por otro lado, aunque el trabajo propuesto se ha orientado en la mejora de Channel-SLAM, se puede extrapolar a otros métodos de posicionamiento también basados en la utilización de determinados puntos de referencia que sólo son visibles en ciertas partes del escenario.

Para concluir esta introducción, a continuación se describe la estructura del resto del documento. Se utiliza una sección distinta para tratar de resumir los contenidos más relevantes de los distintos capítulos del TFM. Así, en la Sección 2 se introduce el algoritmo Channel-SLAM, al mismo tiempo que se indican ciertos detalles sobre la implementación que se ha llevado a cabo del mismo. El trabajo teórico desarrollado se encuentra resumido en la Sección 3, mientras que las principales evaluaciones realizadas mediante simulaciones se incorporan en la Sección 4 junto a los resultados obtenidos. Finalmente, las conclusiones extraídas y las líneas futuras se incluyen en la Sección 5.



2.- CHANNEL-SLAM

Channel-SLAM es un método de posicionamiento diseñado para operar en entornos multicamino. Este método interpreta que toda componente de señal recibida por el usuario ha sido emitida por un transmisor en situación de línea de visión directa. Así, la interacción de las señales generadas por un transmisor físico con el entorno crea transmisores virtuales, que son utilizados por el algoritmo. Además, Channel-SLAM no necesita ningún tipo de conocimiento a priori de su entorno para llevar a cabo la tarea de localización.

Este método se encuentra compuesto por dos grandes etapas. La primera de ellas es la etapa de estimación de parámetros, que se encarga de estimar los parámetros de cada componente de señal recibida por el usuario, y de monitorizar o rastrear dichas componentes a lo largo del tiempo. Se basa en la utilización del denominado estimador KEST (*Kalman enhanced super-resolution tracking*) detallado en [8].

La segunda etapa se encarga de llevar a cabo la estimación simultánea de la posición del usuario y de los transmisores, tanto físicos como virtuales. Para ello, hace uso de las estimas de ángulos y tiempos de llegada de cada componente de señal obtenidos en la primera etapa. En particular, una variante del filtro de partículas [9], denominada *Rao-Blackwellized particle filter* (RBPF), es utilizada para llevar a cabo esta etapa. A grandes rasgos, el estimador RBPF descompone la problemática de SLAM en múltiples sub-problemas de localización, y emplea filtros de partículas para resolver cada uno de ellos. La derivación completa de este estimador se detalla en [10].

La implementación llevada a cabo de Channel-SLAM se corresponde, en realidad, con la implementación de su segunda etapa: estimación de la posición del usuario y de los transmisores. Como entradas, se toman los valores reales de los distintos ángulos y tiempos de llegada de todas las componentes de señal recibidas por el usuario, a los que se les incorpora ruido aditivo Gaussiano de media cero (*additive white Gaussian noise*, AWGN). Además, se asume que información proveniente de una unidad inercial de medida (IMU) se encuentra disponible. De nuevo, se añade ruido AWGN a los valores reales de velocidad y orientación del usuario para emular la información proveniente de la IMU.

La utilización de información de movimiento y orientación del usuario en Channel-SLAM no modifica, en absoluto, sus principios de funcionamiento. La única diferencia es que, para un mismo número de partículas utilizado en los distintos filtros de partículas, la precisión en la estima de la posición mejora. Desde otro punto de vista, se trata de una forma de reducir el coste computacional de las simulaciones llevadas a cabo, sin mayores consecuencias en el trabajo desarrollado.

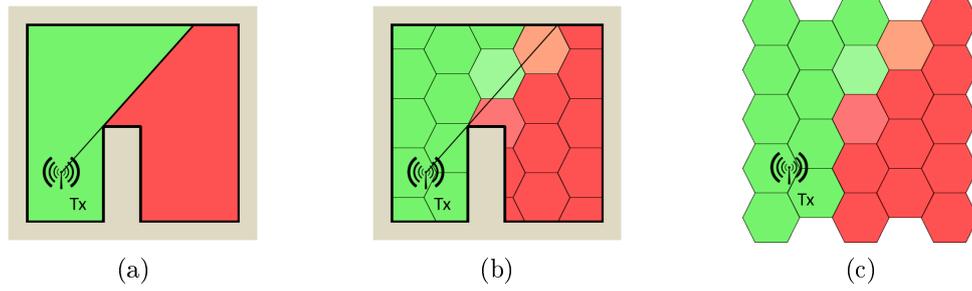


Figura 3.2.- Áreas de visibilidad del transmisor Tx. Las líneas negras representan paredes, mientras que los colores representan la probabilidad de que el transmisor Tx sea visible, yendo desde el verde/visible hasta el rojo/no visible.

Se debe resaltar que ningún usuario posee información inicial sobre el escenario, por lo que los mapas de Channel-SLAM se encuentran vacíos en un comienzo. Conforme pasa el tiempo, el usuario estima la posición de los transmisores, e incorpora la información de visibilidad de los mismos a los hexágonos que va atravesando.

Como se ha indicado en la Sección 2, el estimador RBPF descompone la problemática SLAM en múltiples sub-problemas, y utiliza filtros de partículas para resolverlos. En concreto, las partículas utilizadas para rastrear al usuario, denominadas partículas de usuario, estiman independientemente su entorno: cada una de ellas crea su propio mapa formado por las estimas de posición de los distintos transmisores. En el caso de la estimación de las áreas de visibilidad sucede algo similar: cada partícula de usuario crea su propio mapa hexagonal con la información de visibilidad de los transmisores. Periódicamente, las estimas de todas las partículas de usuario relativas tanto a la posición como a las áreas de visibilidad de los transmisores se fusionan para dar lugar a un único mapa de usuario.

Para estimar las áreas de visibilidad, cada hexágono del mapa de cada partícula de usuario almacena dos contadores por transmisor. Estos contadores, $V_Y^{<i,h,j>}$ y $V_N^{<i,h,j>}$, representan el número de veces que el transmisor j ha sido visto y no visto, respectivamente, mientras la partícula de usuario i se encontraba en el hexágono h .

Finalmente, la información de visibilidad relativa al transmisor j contenida en el hexágono h del mapa de usuario se obtiene por medio de las sumas ponderadas

$$W_Y^{<h,j>} = \sum_{i=1}^{N_{p,u}} w_k^{<i>} V_Y^{<i,h,j>} \quad (3.1)$$

y

$$W_N^{<h,j>} = \sum_{i=1}^{N_{p,u}} w_k^{<i>} V_N^{<i,h,j>}, \quad (3.2)$$

donde $N_{p,u}$ es el número de partículas de usuario, y $w_k^{<i>}$ es el peso de la i -ésima partícula de usuario en el instante de tiempo k en el que se realiza la fusión de los mapas de las partículas de usuario. Dado que los mapas de las partículas se encuentran referidos al mismo sistema de coordenadas local, su combinación no presenta complicaciones.



Una vez resumido el proceso de estimación y almacenamiento de información de visibilidad desarrollado, se describe a continuación la métrica de visibilidad creada. Esta métrica se ha elaborado para poder comparar la información de visibilidad de dos mapas, con vistas a ser utilizada en el proceso de emparejamiento de mapas.

Assumiendo que los parámetros de transformación entre los mapas de usuario y a priori ya han sido calculados y las asociaciones entre transmisores de ambos mapas establecidas, la métrica de visibilidad se obtiene siguiendo tres simples pasos. En primer lugar, se contabiliza el número de hexágonos comunes a ambos mapas $N_{\text{hex},\text{common}}$. A continuación, se contabiliza el número de hexágonos comunes en los que la información de visibilidad es diferente $N_{\text{hex},\text{marked}}$ y, finalmente, se calcula el ratio

$$V_{\text{ratio}} = \frac{N_{\text{hex},\text{marked}}}{N_{\text{hex},\text{common}}}. \quad (3.3)$$

A través del ratio creado se puede determinar si la posición relativa entre ambos mapas es correcta en términos de información de visibilidad de los transmisores. Sin embargo, se hace necesario crear una forma de determinar cuándo la información de dos hexágonos es diferente para llevar a cabo el segundo paso del cálculo de la métrica.

Para ello, se utilizan los dos contadores ponderados mostrados en las Ecuaciones (3.1) y (3.2) para crear el estimador de visibilidad del transmisor j en el hexágono h

$$H_{\text{ratio}}^{<h,j>} = \frac{W_Y^{<h,j>} + \frac{\alpha^{<h,j>}}{2}}{W_Y^{<h,j>} + W_N^{<h,j>} + \alpha^{<h,j>}}, \quad (3.4)$$

cuyo valor oscila entre 0 (no visible) y 1 (visible), y donde

$$\alpha^{<h,j>} = \frac{1}{W_Y^{<h,j>} + W_N^{<h,j>}}. \quad (3.5)$$

El parámetro $\alpha^{<h,j>}$ ha sido incluido en la Ecuación (3.4) para considerar la fiabilidad de la información del mapa otorgada por los contadores ponderados $W_Y^{<h,j>}$ y $W_N^{<h,j>}$, que a su vez proviene de los pesos de las partículas. Así, si un hexágono contiene valores altos de dichos contadores, el parámetro alfa se convierte en despreciable, al considerarse que la información estimada es fiable. Por el contrario, si un hexágono contiene valores bajos de los mismos, los «términos alfa» hacen que el ratio se aproxime a 0.5 al existir mayor incertidumbre en la estima de la información de visibilidad.

Este estimador posibilita la ejecución del segundo paso de la métrica de visibilidad. Se considera que la información de visibilidad del hexágono común h de los mapas de usuario y a priori es similar si y sólo si

$$\left| H_{\text{ratio},\text{u}}^{<h,j>} - H_{\text{ratio},\text{p}}^{<h,j>} \right| < H_{\text{threshold}}, \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, N_{\text{TX}}\}, \quad (3.6)$$

siendo $|\cdot|$ la función valor absoluto, $H_{\text{ratio},\text{u}}^{<h,j>}$ y $H_{\text{ratio},\text{p}}^{<h,j>}$ los estimadores de visibilidad del transmisor j en el hexágono h de los mapas de usuario y a priori, respectivamente, $H_{\text{threshold}}$ un determinado umbral, y N_{TX} el número de transmisores asociados.



Una vez creada la métrica de visibilidad, y tras analizar varias alternativas, se llega a la conclusión de que la mejor forma de utilizar la información de visibilidad en el emparejamiento de mapas consiste en la inclusión de una etapa de comprobación en la parte final de los métodos clásicos, basados en la utilización posición relativa de los transmisores. El método genérico de emparejamiento de mapas, con la aplicación de esta etapa de comprobación que hace uso de la métrica de visibilidad, consistiría en:

1. Creación una lista de parámetros de transformación obtenidos a través de un método clásico de emparejamiento. La lista debe ordenarse según el propio criterio del método utilizado.
2. Transformación del mapa a priori, incluyendo tanto la posición de los transmisores como el mapa de visibilidad hexagonal, utilizando los primeros parámetros de rotación y traslación de la lista anterior.
3. Cálculo de la métrica de visibilidad, y comparación del ratio V_{ratio} con un determinado umbral de visibilidad $V_{threshold}$. Si el ratio se encuentra por encima del umbral, la solución se descarta y se vuelve al paso 2, utilizando en este caso los siguientes parámetros de la lista. Si el ratio se encuentra por debajo del umbral, se considera que se ha encontrado una solución.
4. Combinación de los mapas. Tanto las estimas de posición como los mapas de visibilidad de los transmisores son combinados.

La etapa de comprobación basada en la información de visibilidad desarrollada es compatible con cualquier método de emparejamiento clásico, que debe ser utilizado en el paso 1. Lógicamente, la utilización de distintos métodos basados en la posición relativa de los transmisores lleva a la obtención de soluciones diferentes, pues siguen criterios diferentes.

A pesar de haberse incluido en distintos pasos por ser, conceptualmente, labores diferentes, las tareas 3 y 4 se realizan simultáneamente, pues en ambos casos es necesario recorrer los mapas hexagonales de usuario y a priori. En caso de que la solución se considere no fiable, el mapa combinado obtenido en dicha iteración es descartado.

En la combinación del paso 4, los hexágonos no comunes de los mapas de usuario y a priori simplemente son añadidos al mapa de visibilidad combinado. En el caso de los hexágonos comunes, la información de visibilidad del hexágono h relativa al transmisor asociado j se procesa de la forma

$$W_{Y,c}^{<h,j>} = W_{Y,u}^{<h,j>} + W_{Y,p}^{<h,j>}, \quad (3.7)$$

$$W_{N,c}^{<h,j>} = W_{N,u}^{<h,j>} + W_{N,p}^{<h,j>}, \quad (3.8)$$

donde los subíndices c, u y p hacen referencia a los mapas combinado, de usuario y a priori, respectivamente. Así, la fiabilidad en la información de visibilidad de los mapas combinados se ve incrementada.



4.- EVALUACIONES Y RESULTADOS

Para llevar a cabo la evaluación del desempeño de los métodos de emparejamiento con etapa de comprobación se hace necesario crear un escenario, predefinir diversos trayectos de usuario, y realizar una simulación de Channel-SLAM sobre cada trayecto, obteniendo múltiples mapas que combinar. Con el objetivo de mostrar las ventajas que la inclusión de la información de visibilidad puede aportar, se ha creado un escenario casi simétrico, donde la interacción de las señales emitidas por un único transmisor físico con el entorno provoca simetrías en la posición de los diversos transmisores virtuales generados. Además, se han creado 14 trayectorias de usuario diferentes.

Para la obtención de mapas se hace uso de la implementación de Channel-SLAM descrita en la Sección 2, tras haber incorporado la estimación de los mapas de visibilidad de la Sección 3. Se ha configurado el método para que genere simultáneamente tres mapas de usuario, con idéntica estima de posición de los transmisores, pero distinto tamaño de hexágono en la construcción del mapa de visibilidad; en concreto, se utilizan hexágonos de lado 2, 1 y 0.5 metros. Tras llevar a cabo las simulaciones de Channel-SLAM sobre los trayectos, y tras crear un mapa ideal del escenario, se tiene un total de 15 mapas por tamaño de hexágono para evaluar los métodos de emparejamiento.

Se utilizan dos métodos de emparejamiento para evaluar la mejora del desempeño de los mismos con la inclusión de la etapa de comprobación desarrollada. El primero de ellos, denominado en este documento «método estándar», es extraído de [7] y se basa en encontrar la asociación de NT transmisores de ambos mapas a través de la distancia relativa entre los mismos. Empleando dicha asociación, el método estima la traslación y rotación existente entre mapas y busca el resto de asociaciones entre transmisores. El segundo método es el «método de rotación», cuyo nombre proviene de su funcionamiento interno. Este método ha sido concebido por el autor del presente documento, y trata de obtener los parámetros de transformación para los que se tiene el mayor número de asociaciones entre los transmisores de ambos mapas. Estos dos métodos, con y sin la inclusión de la etapa de comprobación que hace uso de la información de visibilidad, también han sido implementados.

Utilizando los 15 mapas generados como mapas de usuario y a priori, se pueden llevar a cabo 105 combinaciones diferentes por tamaño de hexágono y por método de emparejamiento. En particular, se han realizado simulaciones empleando el método estándar con $NT = 2, 3$ y 4 transmisores, y el método de rotación, todos ellos sin y con etapa de comprobación. Tras definir un criterio de éxito, se utiliza la tasa de éxito, es decir, el número de combinaciones correctas sobre el número de combinaciones totales, para evaluar el desempeño de cada método en las distintas situaciones.



En la Tabla 4.1 se muestra el número de combinaciones exitosas, fallidas y totales, junto a la tasa de éxito, para todos los métodos implementados, correspondientes a la utilización de los mapas de 1 metro de lado de hexágono. Como era de esperar, el desempeño de los métodos que sólo utilizan la posición relativa de los transmisores es muy pobre debido a la multitud de simetrías en las posiciones de los transmisores. Sin embargo, la inclusión de la etapa de comprobación que hace uso de la información de visibilidad permite mejorar dicho desempeño notablemente. En los métodos de rotación y estándar con $NT = 2$ transmisores, la tasa de éxito se ve duplicada, mientras que en el caso del método estándar con $NT = 3$, se ve triplicada. Por último, la tasa de éxito del método estándar con $NT = 4$ pasa del 34.04 al 84.04 % con la inclusión de la etapa de comprobación. Estos resultados prueban que la estimación de los mapas de visibilidad y la utilización de los mismos consigue incrementar la robustez de los métodos clásicos de emparejamiento, alcanzando el objetivo principal de este TFM.

Método de emparejamiento	Exitoso	Fallido	Total	Tasa de éxito
Rotación	19	86	105	18.10 %
Rotación + Etapa de comprobación	40	65	105	38.10 %
Estándar, $NT = 2$	31	74	105	29.52 %
Estándar, $NT = 2$ + Etapa de comprobación	61	44	105	58.10 %
Estándar, $NT = 3$	27	75	102	26.47 %
Estándar, $NT = 3$ + Etapa de comprobación	80	22	102	78.43 %
Estándar, $NT = 4$	32	62	94	34.04 %
Estándar, $NT = 4$ + Etapa de comprobación	79	15	94	84.04 %

Tabla 4.1.- Resultados del desempeño de distintos métodos de emparejamiento obtenidos mediante simulación, empleando los mapas de visibilidad con 1 metro de lado de hexágono. Los resultados relativos a los métodos con etapa de comprobación se han resaltado en azul.

En la Tabla 4.2 se comparan las tasas de éxito obtenidas para el método estándar con etapa de comprobación y distintas configuraciones, al utilizar mapas de distinto tamaño de hexágono. Los resultados obtenidos muestran, para todas las configuraciones, que una disminución del tamaño del hexágono de los mapas de visibilidad permite resolver un mayor número de ambigüedades y, por ende, incrementar la robustez de los métodos de emparejamiento. Esto es debido a que con un tamaño de hexágono menor, la información de visibilidad contenida en los mapas es más precisa.

Comparando los resultados de las Tablas 4.1 y 4.2 se obtiene que incluso el uso de hexágonos de 2 metros de lado en la estima de la información de visibilidad puede mejorar notablemente la robustez de los métodos de emparejamiento. Un hexágono de 2 metros de lado posee un área de 10,39 metros cuadrados, que implica que la información de visibilidad no pueda ser estimada con precisión. A pesar de ello, se consiguen grandes mejoras en la tasa de éxito; por ejemplo, en el método estándar con $NT = 4$ se pasa del 34.04 al 77.66 % de éxito con la inclusión de la etapa de comprobación.



Configuración		Resultados			
NT	Lado de los hexágonos	Exitoso	Fallido	Total	Tasa de éxito
2	2 m	52	53	105	49.52 %
3	2 m	72	30	102	70.59 %
4	2 m	73	21	94	77.66 %
2	1 m	61	44	105	58.10 %
3	1 m	80	22	102	78.43 %
4	1 m	79	15	94	84.04 %
2	0.5 m	65	40	105	61.90 %
3	0.5 m	82	20	102	80.39 %
4	0.5 m	80	14	94	85.11 %

Tabla 4.2.- Resultados del desempeño del método estándar de emparejamiento con etapa de comprobación obtenidos mediante simulación. Se han utilizado los mapas de visibilidad de 2, 1 y 0.5 metros de lado de hexágono.

Por último, se ha llevado a cabo un estudio de la complejidad computacional de la etapa de comprobación. En concreto, se estima una cota superior del comportamiento asintótico de la etapa a través de la notación «O Grande» \mathcal{O} .

Como ya se ha descrito en la Sección 3, la realización de la etapa de comprobación requiere recorrer los mapas hexagonales de usuario y a priori. También se deben realizar una serie de operaciones en base al número de correspondencias entre transmisores, pero se asume dicho número constante en el presente estudio. Así, la complejidad de la etapa de comprobación queda acotada por $\mathcal{O}(N_{\text{hex,u}} \cdot N_{\text{hex,p}})$, siendo $N_{\text{hex,u}}$ y $N_{\text{hex,p}}$ el número de hexágonos de los mapas de usuario y a priori, respectivamente. Esta cota también incluye la combinación de los mapas que, tal y como ya ha sido mencionado en apartados previos, se lleva a cabo de forma simultánea.

Sin embargo, si la etapa de comprobación rechaza la solución inicial propuesta por el método de emparejamiento clásico, el mapa a priori debe transformarse de nuevo, y la métrica de visibilidad debe volver a calcularse. Por tanto, la transformación del mapa a priori debe incluirse como parte del coste de computacional de la etapa. Así, la complejidad de una ejecución de la etapa de comprobación, incluyendo la transformación del mapa a priori y la combinación de los mapas, resulta $\mathcal{O}(N_{\text{hex,u}} \cdot N_{\text{hex,p}} + N_{\text{hex,p}}^2)$.

Por último, se debe tener en cuenta el número de veces que la etapa se va a ejecutar, el cual varía dependiendo de los mapas a combinar, y del método utilizado. No es posible determinar de antemano cuántas veces se va a llevar a cabo, pero se ha demostrado por medio de resultados de simulación (véase la memoria principal) que la lista de parámetros de transformación evaluados puede ser acotada a un valor N_{list} sin que exista deterioro en el desempeño del método. De esta forma, la complejidad de la etapa de comprobación se encuentra acotado por $\mathcal{O}(N_{\text{list}}(N_{\text{hex,u}} \cdot N_{\text{hex,p}} + N_{\text{hex,p}}^2))$.



El comportamiento de la etapa de comprobación obtenido de forma teórica ha sido contrastado a través de los tiempos de simulación obtenidos para valores muy grandes de las entradas.

El número de hexágonos de un mapa se encuentra relacionado con el tamaño de hexágono utilizado: el empleo de un menor tamaño de hexágono implica la necesidad de utilizar un mayor número de hexágonos para cubrir una determinada área. Así, el comportamiento asintótico obtenido de la etapa de comprobación, junto a las tasas de éxito mostradas en la Tabla 4.2, confirma que existe una relación de compromiso entre el desempeño del método y su complejidad computacional, controlada por el tamaño del hexágono.



5.- CONCLUSIONES

En el presente TFM se ha desarrollado una forma de estimar y almacenar las áreas de visibilidad de los transmisores, que ha sido incorporada al algoritmo Channel-SLAM. Además, se ha creado una métrica que permite comparar mapas por medio de la información de visibilidad que almacenan. Haciendo uso de esta métrica, se ha desarrollado una etapa de comprobación cuyo objetivo es incrementar la robustez de los métodos de emparejamiento clásicos basados en la posición de los transmisores. La etapa desarrollada es compatible con todo método de emparejamiento clásico.

Los resultados obtenidos por medio de simulaciones demuestran que la etapa de comprobación creada, basada en la utilización de las áreas de visibilidad, permite resolver ambigüedades producidas por simetrías en las posiciones de los transmisores y mejorar el desempeño de los métodos de emparejamiento clásicos. Este era el objetivo principal del TFM.

Adicionalmente, se ha verificado a través de resultados de simulación que, para los tamaños de hexágono utilizados, un tamaño menor permite resolver un mayor número de ambigüedades, e incrementar en mayor medida la robustez de los métodos clásicos. A pesar de ello, incluso la utilización de hexágonos de gran tamaño, que no son capaces de estimar con precisión la información de visibilidad del escenario, permite mejorar el desempeño de los métodos de emparejamiento clásicos de forma considerable.

Por otro lado, se ha obtenido de forma experimental que la lista de parámetros analizada en los métodos de emparejamiento con etapa de comprobación puede ser acotada a un valor máximo sin que exista deterioro en el desempeño del método.

Respecto a la complejidad computacional de la etapa de comprobación, se ha determinado teóricamente, y contrastado por medio de resultados de simulación, que crece linealmente con el tamaño de la lista, el número de hexágonos del mapa a priori, y la suma del número de hexágonos de los mapas de usuario y a priori. Este comportamiento, junto a las tasas de éxito obtenidas al emplear mapas de distinto tamaño de hexágono, es muestra de que el propio tamaño del hexágono controla una relación de compromiso entre el desempeño del método de emparejamiento con etapa de comprobación y su complejidad computacional.

Aunque la estimación y almacenamiento de las áreas de visibilidad de los transmisores, la métrica desarrollada, y la etapa de comprobación se han concebido para ser utilizados en Channel-SLAM, pueden ser extrapolados a otros métodos de posicionamiento también basados en puntos de referencia sólo visibles en ciertas partes del escenario.



Finalmente, dejando de lado los métodos de emparejamiento de mapas, el trabajo realizado también ha abierto nuevas direcciones de investigación. Por ejemplo, la estimación de las áreas de visibilidad desarrollada puede utilizarse, junto a la estima de la posición de los transmisores y al número de veces que los usuario visitan los distintos hexágonos, en la reconstrucción de la geometría del escenario.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Dedes, G. y A. G. Dempster: *Indoor GPS Positioning - Challenges and Opportunities*. En *IEEE 62nd Vehicular Technology Conference Fall*, volumen 1, páginas 412–415, Septiembre 2005.
- [2] Gentner, C. y T. Jost: *Indoor Positioning using Time Difference of Arrival between Multipath Components*. En *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, páginas 1–10, Octubre 2013.
- [3] Gentner, C., B. Ma, M. Ulmschneider, T. Jost y A. Dammann: *Simultaneous Localization and Mapping in Multipath Environments*. En *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, páginas 807–815, Abril 2016.
- [4] Gentner, C., T. Jost, W. Wang, S. Zhang, A. Dammann y U. Fiebig: *Multipath Assisted Positioning with Simultaneous Localization and Mapping*. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(9):6104–6117, Septiembre 2016, ISSN 1536-1276.
- [5] Durrant-Whyte, H. y T. Bailey: *Simultaneous Localization and Mapping: Part I*. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 13(2):99–110, Junio 2006, ISSN 1070-9932.
- [6] Ulmschneider, M. y C. Gentner: *Improving Maps of Physical and Virtual Radio Transmitters*. En *ION GNSS+*, páginas 3367–3373, Septiembre 2018.
- [7] Ulmschneider, M., D. C. Luz y C. Gentner: *Exchanging Transmitter Maps in Multipath Assisted Positioning*. En *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, páginas 1020–1025, Abril 2018.
- [8] Jost, T., W. Wang, U. Fiebig y F. Pérez-Fontán: *Detection and Tracking of Mobile Propagation Channel Paths*. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60:4875–4883, Octubre 2012.
- [9] Gordon, N. J., D. J. Salmond y A. F. M. Smith: *Novel Approach to Nonlinear/Non-Gaussian Bayesian State Estimation*. *Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F*, 140:107–113, Mayo 1993.
- [10] Ulmschneider, M., C. Gentner, T. Jost y A. Dammann: *Rao-Blackwellized Gaussian Sum Particle Filtering for Multipath Assisted Positioning*. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, Abril 2018.