

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Desarrollo de sistema de localización de robots en interiores

Autor: Andrés Gallego Fernández

Tutor: Jose María Maestre Torreblanca

Tutor: Ángel Rodríguez Castaño

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Desarrollo de sistema de localización de robots en interiores

Autor:

Andrés Gallego Fernández

Tutor:

Jose María Maestre Torreblanca

Profesor Titular

Tutor:

Ángel Rodríguez Castaño

Profesor Titular

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Grado: Desarrollo de sistema de localización de robots en interiores

Autor: Andrés Gallego Fernández

Tutores: Jose María Maestre Torreblanca, Ángel Rodríguez Castaño

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

A mis padres y hermana

A ti, abuela

A María

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis tutores Pepe, por ofrecerme y ayudarme con los primeros pasos de un proyecto que se ajustaba perfectamente a mis expectativas y, sobre todo Ángel, por su implicación y su buena disposición cada vez que he necesitado su ayuda durante estos meses de trabajo.

Me gustaría también dar las gracias a mi familia, en concreto a mis padres y mi hermana, que han vivido de cerca estos años tan duros y con los que he compartido tristezas y alegrías. Gracias por apoyarme en cada decisión que he tomado y por tenderme la mano siempre que lo he necesitado.

No puedo olvidarme de mis amigos, aquellos que han conseguido sacarme una sonrisa en los días malos y con los que he vivido momentos inolvidables durante esta etapa. No nombro a nadie en particular, ellos saben quienes son. Sin su apoyo, llegar hasta aquí no habría sido posible.

Por último y más importante, deseo agradecerlo a esa persona que lleva siendo mi compañera de viaje desde el instituto, mi mejor amiga, la que mejor me entiende, a ti María. Ella sabe mejor que nadie lo que han sido estos años de carrera. Por eso eso y mucho más, gracias de corazón.

*Andrés Gallego Fernández
Sevilla, 2023*

Resumen

En el presente documento se lleva a cabo el estudio de diferentes técnicas para la estimación de la posición de dispositivos en zonas interiores y la puesta en marcha de un sistema concreto de localización.

El sistema en cuestión es Starter Set Super-MP-3D, del fabricante Marvelmind Robotics, un conjunto de balizas y módem que emplea tecnologías de triangulación por ultrasonidos para obtener la localización de un dispositivo móvil dentro de un área determinada.

La finalidad de este proyecto es analizar el funcionamiento y la precisión de dicho sistema para poder llevar a cabo en un futuro su implementación en aplicaciones reales. A lo largo de esta memoria se analizará la puesta a punto del sistema, los aspectos que afectan a su funcionamiento, la precisión de los resultados y la solidez de estos.

Por último, se proponen posibles mejoras para su implementación en aplicaciones diferentes a las que se han desarrollado en este trabajo.

Abstract

This paper studies different techniques for the estimation of the position of indoor devices and the implementation of a specific localization system.

The system in question is Starter Set Super-MP-3D, from the manufacturer Marvelmind Robotics, a set of beacons and modem that uses ultrasound technologies to obtain the location of a mobile device within a given area.

The purpose of this project is to analyze the performance and accuracy of this system in order to be able to implement it in real applications in the future. Throughout this report we will examine the development of the system, the aspects that affect its performance, and the accuracy of the results and their soundness.

Finally, possible improvements for its implementation in applications other than those developed in this work will be proposed.

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
1 Introducción	1
1.1 Objetivos y alcance	1
1.2 Estructura de la memoria	1
2 Estado del arte	3
2.1 Técnicas con marcadores	4
2.1.1 Sistemas de localización por radiofrecuencia	4
2.1.2 Sistemas de localización por ultrasonidos	5
2.1.3 Sistemas de localización por infrarrojos	6
2.1.4 ViCom	7
2.2 Técnicas visuales	7
2.2.1 Visión artificial	7
2.2.2 SLAM	8
V-SLAM	10
RO-SLAM	11
Hector SLAM	11
RTAB-Map	11
ORB-SLAM	12
RGB-SLAM	12
LSD-SLAM	13
2.2.3 Odometría visual	13
Odometría visual estéreo	13
Odometría visual monocular	14
SVO	14
2.2.4 OptiTrack	14
3 Sistema Starter Set Super-MP-3D	17
3.1 Características principales	17
3.2 Arquitecturas del sistema	19
3.2.1 Arquitectura no inversa (NIA)	19
3.2.2 Arquitectura inversa (IA)	20
3.2.3 Arquitectura NIA-Multifrecuencia (MF-NIA)	20

4	Puesta en marcha	21
4.1	Alimentación y carga de batería	21
4.2	Inicialización del sistema	22
4.3	Colocación de las balizas	22
4.4	Despertar de las balizas y creación del mapa	26
4.5	Simulaciones preliminares	26
4.5.1	Distancias absolutas a la baliza móvil	26
	Posición estática 1	27
	Posición estática 2	28
4.5.2	Coordenadas de la baliza móvil	30
	Cálculo de desplazamientos	30
	Comparación de coordenadas	32
5	Experimentos reales	35
5.1	Caso 1: Origen de coordenadas en Dashboard definido automáticamente	35
5.1.1	Desplazamientos en línea recta	36
	Distancia entre posiciones del Hedgehog y baliza 4	37
	Desplazamiento relativo entre posiciones del Hedgehog	38
5.1.2	Desplazamientos en cuadrado	39
	Distancia entre posiciones del Hedgehog y posición auxiliar	40
	Desplazamiento relativo entre posiciones del Hedgehog	40
5.2	Caso 2: Origen de coordenadas en Dashboard definido en la baliza 4	41
5.2.1	Desplazamientos en línea recta	42
	Distancia entre posiciones del Hedgehog y baliza 4	42
	Desplazamiento relativo entre posiciones del Hedgehog	42
5.2.2	Desplazamientos en cuadrado	43
	Distancia entre posiciones del Hedgehog y posición auxiliar	43
	Desplazamiento relativo entre posiciones del Hedgehog	44
5.3	Repetición de experimentos	44
5.3.1	Desplazamientos en línea recta	45
	Distancia entre posiciones del Hedgehog y baliza 4	45
	Desplazamiento relativo entre posiciones del Hedgehog	46
5.3.2	Desplazamientos en cuadrado	46
	Distancia entre posiciones del Hedgehog y posición auxiliar	47
	Desplazamiento relativo entre posiciones del Hedgehog	47
6	Conclusiones y desarrollos futuros	49
6.1	Conclusiones	49
6.2	Desarrollos futuros	51
	<i>Índice de Figuras</i>	53
	<i>Índice de Tablas</i>	55
	<i>Bibliografía</i>	57

1 Introducción

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es el ya conocido método que permite identificar la posición de cualquier objeto o persona a lo largo y ancho de todo el planeta. Este sistema tiene su utilidad para zonas exteriores, sin embargo, pierde exactitud o deja de ser útil cuando se trabaja en áreas interiores donde la señal GPS entre el emisor y receptor es débil o inexistente [1]. Es en este punto donde toman fuerza los Sistemas de Posiciones Local (LPS).

La localización de robots en interiores se ha convertido en un campo muy estudiado en los últimos años, dada su utilidad, precisión y costes reducidos al realizar todo tipo de tareas en la industria. En la actualidad, se siguen investigando y desarrollando nuevas técnicas que buscan optimizar la navegación y localización propia de los robots en áreas interiores, con el fin de mejorar su autonomía.

Uno de los objetivos más importantes en el estudio de los sistemas LPS es obtener la posición con la mayor precisión, es decir, que la diferencia entre la posición leída por nuestro robot y su posición real sea la menor posible. Para ello, existen diferentes técnicas tanto de comunicación de datos (Bluetooth, WiFi, etc.), como de detección de objetos y localización en el entorno (ultrasonidos, infrarrojos, láser...) [2]. Este proyecto plantea una visión general de las tecnologías involucradas en los sistemas LPS y evalúa la precisión de una solución basada en triangulación de señales de ultrasonidos.

1.1 Objetivos y alcance

El objeto del presente trabajo es analizar distintas técnicas de localización de robots en interiores, así como la implementación de una de ellas para llevar a cabo una serie de simulaciones en un espacio de trabajo real.

Para este segundo apartado, se utilizará el Starter Set Super-MP-3D, un sistema basado en balizas de ultrasonidos móviles y estacionarias. El objetivo fundamental consiste en llevar a cabo un estudio sobre la estimación de la posición de un dispositivo móvil dentro de un área de trabajo específica, así como validar aspectos del sistema como la precisión en la medición.

1.2 Estructura de la memoria

La memoria de este Trabajo de Fin de Grado está estructurado en las siguientes partes:

- El capítulo 1 describe los objetivos, el alcance y la estructura de la memoria.
- En el capítulo 2 se presenta el estado del arte de las diferentes tecnologías y metodologías que se pueden encontrar hoy en día en el campo de los sistemas LPS. Se realiza una breve

explicación de las diferentes características de cada uno de los métodos, además de exponer las ventajas e inconvenientes que presentan cada uno.

- En el capítulo 3 se describen las características del sistema de localización por ultrasonidos que se va a implantar y analizar. Se trata del sistema Starter Set Super-MP-3D de MarvelMind Robotics, que emplea técnicas de triangulación mediante balizas de ultrasonidos para la localización en interiores.
- El capítulo 4 describe la puesta en funcionamiento y configuración de los dispositivos que componen el sistema de localización.
- El capítulo 5 se dedica a la evaluación de las prestaciones del sistema, llevando a cabo una serie de experimentos de campo para comprobar la precisión y robustez del sistema, así como los aspectos del entorno de trabajo que pueden afectar a su funcionamiento.
- Por último, el capítulo 6 recoge las conclusiones y posibles mejoras futuras.

2 Estado del arte

En este capítulo se realizará un estudio de las distintas alternativas que se pueden encontrar a la hora de desarrollar un sistema de localización en interiores. Existen en la actualidad una amplia gama de sensores, así como distintas metodologías que los implementan para determinar la posición de los robots.

Una posible clasificación de estas técnicas podría ser la que se explica a continuación, la cual depende de la forma en que se obtienen las medidas [3]:

- Medidas relativas u odometría: partiendo de una posición conocida, este tipo de métodos calculan la posición y orientación del robot a partir de la información captada por sensores incorporados en este (acelerómetros, encoders). Estas técnicas requieren ajustes continuos dado que acumulan errores al tratarse de una estimación incremental.
- Medidas absolutas o localización global: estos métodos determinan la posición absoluta del robot a partir de la instalación de balizas en distintos puntos conocidos de su entorno. Dependiendo de la señal que se utilice (infrarrojos, radio, ultrasonido, láser), de los sensores y del número de balizas, se alcanzarán distintos niveles de precisión.

Antes de comentar las distintas técnicas de localización, es preciso definir algunas características comunes a todas ellas:

- Posiciones absolutas y relativas: los sistemas de posicionamiento absoluto utilizan un mismo sistema de referencia que es compartido por todo lo que se encuentre en el entorno. Los sistemas relativos utilizan un sistema de coordenadas propio.
- Precisión y exactitud: definen la capacidad de un sistema de realizar una estimación con un mayor o menor error. Estas dos características deben mantenerse constante en un mismo sistema.
- Área de localización: zona que puede abordar el dispositivo.
- Limitaciones: aspectos que restringen el funcionamiento del sistema.

Entre las tecnologías de posicionamiento más utilizadas, caracterizadas por la ausencia de cableado, destacan las siguientes:

- Bluetooth: bajo consumo, alto nivel de seguridad y reducido coste de mantenimiento.
- WIFI: mayor disponibilidad de todas las tecnologías, reducido coste de instalación pero con mayor consumo que tecnologías como el Bluetooth.
- Navegación inercial: el robot cuenta con una serie de sensores de movimiento, tales como giroscopios y acelerómetros. Es necesaria una localización inicial, así como una corrección continua que disminuya el error acumulativo que se genera.

- Ultrasonidos: caracterizados por su alto nivel de precisión.
- Infrarrojos: la luz infrarroja, al no atravesar objetos ni paredes, dota al sistema de una mayor precisión que los ultrasonidos o las ondas RF.
- LI-Fi: utiliza iluminación LED que puede ser modulada y luego es capturada con una cámara para estimar la posición con gran precisión.
- Ondas de radiofrecuencia: tecnología altamente extendida y que se caracteriza por abarcar una gran área de trabajo.

También existen otras alternativas como el SLAM, Vicom y Optitrack que se explicarán con más detalle más adelante.

Un inconveniente presente en todos los sistemas de comunicación inalámbricos es la saturación del espacio radioeléctrico al transmitir la información, por lo que pueden aparecer interferencias en los mensajes transmitidos. Una posible solución para este problema es la Radio Cognitiva [4], un método que realiza un estudio constante de los canales disponibles para la transmisión y que selecciona dinámicamente aquellos menos saturados, aliviando la banda de comunicación inalámbrica.

A continuación, se desarrollarán distintas técnicas posibles con las que se podría llevar a cabo el presente proyecto, analizando también sus ventajas e inconvenientes. Estas se dividirán en dos grandes grupos: métodos que utilizan marcadores y métodos que utilizan técnicas visuales.

2.1 Técnicas con marcadores

2.1.1 Sistemas de localización por radiofrecuencia

Los sistemas de localización por radiofrecuencia (RF) cuentan con dos importantes ventajas a la hora de localizar dispositivos en interiores:

La primera de ellas es que, al tratarse de ondas RF, estas pueden atravesar con más facilidad obstáculos y muros en zonas cerradas. Al contrario que ocurre con ondas infrarrojas o de ultrasonidos, con este tipo de ondas se puede abarcar un espacio mayor. Además, las ondas de radiofrecuencia no necesitan calibraciones o unas condiciones de iluminación específicas para un funcionamiento óptimo, como si ocurre en el caso de técnicas visuales.

La segunda ventaja es la gran cantidad de dispositivos que trabajan hoy en día con ondas RF (ordenadores, móviles, balizas), facilitando de este modo la implementación y el desarrollo de este tipo de proyectos.

Por otro lado, una gran desventaja que presentan estos sistemas es la gran velocidad de propagación de las señales RF, que afecta a la precisión de estimación del rango. Además, aparecen efectos como la reflexión, difracción y atenuación de las ondas debido a los obstáculos de las zonas interiores, los cuales afectan negativamente a su propagación.

Todo esto hace necesario la implementación de métodos estadísticos que mejoren el comportamiento del sistema [1].

Para llevar a cabo esta metodología existen varios sistemas de comunicación de datos, entre los que destacan los ya conocidos WLAN y Bluetooth y nuevas alternativas como los sistemas Zigbee y UWB.

El sistema Zigbee se utiliza en redes de sensores inalámbricos debido a su bajo consumo, mientras que, la radio de banda ultra-ancha (UWB) está diseñada concretamente para el posicionamiento de dispositivos. Es muy precisa, pero necesita cableado para conectar los sensores y tiene un elevado coste.

Por último, se encuentra la identificación por radiofrecuencia (RFID), una buena opción debido a su bajo coste y facilidad de mantenimiento. En esta tecnología, el sistema de comunicación de datos

se basa en el envío periódico o por petición de señales de radiofrecuencia por parte de un emisor (baliza), cada una de ellas con un código de identificación particular. Posteriormente, un lector (receptor) decodifica dichas señales (además de medir la intensidad de la onda RF), las identifica y las asocia al marcador que previamente había enviado la señal, haciendo posible la localización del dispositivo en un área determinada. El rango de transmisión de los marcadores puede ir desde uno hasta decenas de metros [1].

Entre las técnicas de estimación de la posición basándose en RF se pueden encontrar:

- Cálculo del baricentro de todos los marcadores fijos que han captado la posición del dispositivo.
- Comparación entre los valores de la intensidad de onda capturados en tiempo real desde una localización desconocida y datos previamente obtenidos en la calibración del sistema y almacenados en una base de datos. Esto permitirá obtener la posición más probable en la que se encuentre el móvil.
- Métodos bayesianos que configuran con técnicas probabilísticas la imprecisión siempre presente en sistemas sensoriales [1].

2.1.2 Sistemas de localización por ultrasonidos

El funcionamiento de la localización por ultrasonidos consiste en emitir señales acústicas de frecuencia superior a los 20 KHz (frecuencia máxima audible por el oído humano aproximadamente) y cuantificar la diferencia entre los tiempos de emisión y llegada, pudiendo realizar de este modo una estimación de la distancia a la que se encuentra el objeto que los ha reflejado [2].

Como en el apartado anterior, se pueden utilizar diferentes metodologías para hallar la posición del dispositivo, entre las que destacan:

- Basadas en triangulación: conociendo una serie de ángulos y distancias a distintos marcadores o balizas repartidos por el entorno, se puede calcular la localización del robot a partir de triángulos. Una variante de este método es la trilateración, la cual se explicará más adelante y está presente en sistemas como el GPS. Existen distintas técnicas de triangulación dependiendo del tratamiento de la señal: tiempo de llegada, diferencia de tiempo de llegada, basado en la fase de la señal recibida y basado en el ángulo de llegada [5] [2].
- Basadas en el análisis del escenario (fingerprint): se realiza una comparación entre medidas que se han obtenido anteriormente y las que se están recopilando en tiempo real.
- Técnicas de proximidad: se centran en medir la intensidad de las ondas emitidas por las distintas balizas. Para ello es necesario una gran red de sensores que sean capaces de medir la potencia. A mayor intensidad, más cercanía entre receptor y emisor [2]. La posición determinada es una posición simbólica relativa a una estación base, gracias a la conectividad existente entre los distintos dispositivos [5].

Una vez calculadas las distancias mediante ultrasonidos, se suelen utilizar ondas RF para la comunicación de los datos obtenidos y poder estimar la posición del robot con alguno de los métodos anteriormente explicados.

Cabe destacar que las técnicas de posicionamiento anteriores no son únicas para los sistemas de ultrasonidos, sino que están generalizadas para muchas de las señales mencionadas.

Entre las ventajas de los sensores que utilizan la tecnología de ultrasonidos se encuentran la no dependencia de las condiciones de luminosidad en el área de trabajo, el amplio campo de visión que pueden manejar y la capacidad de detectar superficies translúcidas o transparentes como plásticos y cristales. Además, son instrumentos fiables y no tienen un coste elevado.

Por el contrario, son dispositivos lentos, si los comparamos con otros sensores que utilizan ondas de luz como los infrarrojos o el LiDAR, se interfieren con relativa facilidad unos con otros y están diseñados para trabajar en distancias cortas.

2.1.3 Sistemas de localización por infrarrojos

Los sistemas de localización por infrarrojos se caracterizan por tener una gran exactitud a la hora de determinar la posición de robots en interiores, alcanzando precisiones de centímetros, superando a otras técnicas como las que utilizan ultrasonidos, cámaras u ondas de radiofrecuencia [4].

Una posible implementación de este sistema consiste en ubicar una serie de sensores infrarrojos repartidos por el área de trabajo y un único emisor. El método para estimar la posición del robot a partir de las señales obtenidas podría ser el anteriormente comentado del ángulo de llegada (AOA).

Este método mide el ángulo de incidencia de la onda de infrarrojo y la distancia existente entre receptor y emisor. Para identificar el móvil en el espacio cartesiano tridimensional, se debe descomponer el ángulo de llegada (θ) en dos componentes para obtener las coordenadas X e Y, mientras que la coordenada Z se consigue a partir de la altura preestablecida del móvil al suelo [4].

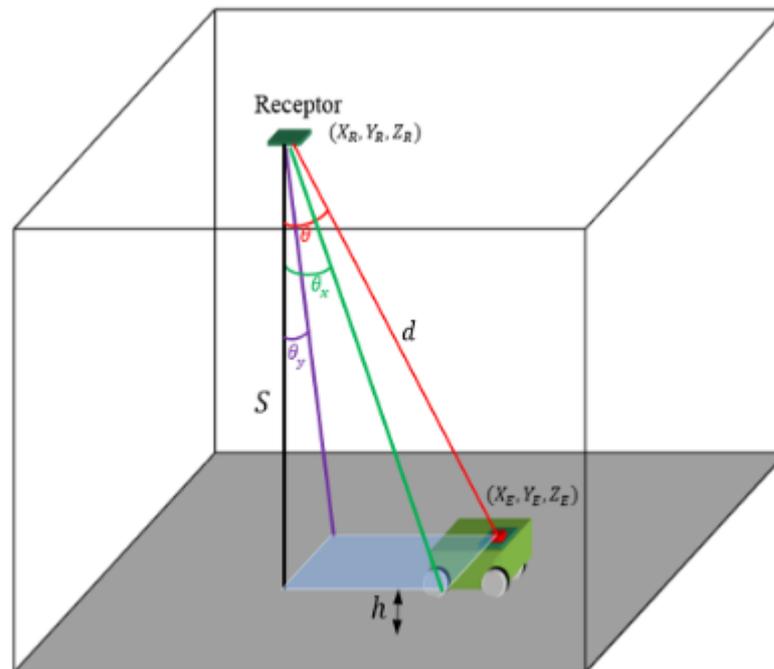


Figura 2.1 Posicionamiento de dispositivo móvil mediante el método AoA.

Sin embargo, la técnica AOA presenta dos grandes dificultades: por un lado, el sistema receptor-emisor no es ideal, por lo que es necesario llevar a cabo un método de calibración para mejorar la precisión de los valores medidos. Por otro lado, existen una serie de factores externos que afectan negativamente a la medida, tales como la temperatura, ruidos y tolerancias de los distintos componentes del sistema. Es necesaria también una calibración eléctrica.

La calibración eléctrica tiene como fin eliminar o, en su defecto, disminuir considerablemente tanto los ruidos sistemáticos (gran fuente de error), como los errores aleatorios (no se pueden predecir).

El objetivo de la calibración geométrica consiste en reducir las distorsiones tangenciales y radiales del ángulo de llegada, para obtener una mayor precisión de este y mejorar la localización del robot [4].

Aparte de la buena precisión de estos dispositivos, otras de las ventajas de los sensores infrarrojos son su gran velocidad de respuesta, lo que permite utilizarlos en aplicaciones de tiempo real, y su bajo consumo, lo cual los hace adecuados para dispositivos con baterías y restricciones de energía. Entre las desventajas, se pueden encontrar la influencia ambiental, dado que una luz solar intensa o

una fuente de calor cercana puede distorsionar las medidas tomadas por el sensor, reduciendo su precisión; y la incapacidad de detectar objetos o superficies transparentes (al contrario que ocurría con la tecnología de ultrasonidos).

2.1.4 ViCom

En los últimos años, ha crecido el interés por un nuevo sistema de comunicación basado en vibraciones físicas entre dispositivos. Esta metodología puede aplicarse tanto a tecnologías device-to-device (D2D), donde la comunicación se realiza entre un único emisor y un receptor, como a tecnologías multi-to-single (M2S), donde existen varios emisores y un único receptor.

El interés de implementar esta nueva metodología se centra en este segundo grupo, ya que la transmisión D2D solo permite el intercambio de información a un único dispositivo al mismo tiempo, por lo que pueden aparecer largos tiempos de espera. La solución a este problema consiste en llevar una comunicación concurrente entre distintos dispositivos con el mismo receptor (tecnología M2S), de forma que pueden reducirse o eliminarse esos tiempos de demora. Además, esta transmisión multicanal simultánea permite obtener una mayor eficiencia de la red de comunicación.

El mayor reto al que se enfrentan los sistemas M2S es que, al ser una transmisión de varias señales en paralelo, estas suelen acoplarse entre ellas obteniendo señales complejas e impredecibles, haciendo muy difícil obtener la señal original. Evidentemente, cuanto mayor sea el número de emisores, más difícil será distinguir las señales originales. Para intentar resolver este inconveniente se propone ViCom.

ViCom es un método que utiliza vibraciones físicas para llevar a cabo la transmisión en sistemas M2S. Está formado por motores de vibración y acelerómetros, que hacen su función como transmisores y receptores, respectivamente [6]. Las señales vibratorias son emitidas desde diferentes dispositivos y recibidas por un acelerómetro. Un inconveniente de estas señales vibratorias es que sus frecuencias acopladas provocan el efecto de aliasing debido a perturbaciones no lineales.

La tecnología ViCom incorpora un algoritmo DTDA (Decomposition Transformation Diagonal Algorithm) que minimiza el efecto de dichas perturbaciones y mejora la obtención de las señales originales. A grandes rasgos, este algoritmo se basa primeramente en descomponer la señal afectada con aliasing para crear una nueva y, posteriormente, separar las señales originales mediante un proceso de desacoplamiento. Para ello, se hace uso de la diagonalización conjunta de una matriz de orden cuatro sobre las señales desacopladas que permite obtener con precisión las señales originales [6].

2.2 Técnicas visuales

2.2.1 Visión artificial

La visión artificial es una tecnología basada en la captura de imágenes digitales, su procesamiento y análisis para obtener una información determinada. Estos sistemas tienen como referencia la visión humana, por lo que es necesario tener buenos algoritmos que hagan la función de cerebro y sean capaces de realizar un buen estudio de la imagen [5].

Como cabe esperar, esta metodología tiene un tiempo de respuesta mayor que otras técnicas como los ultrasonidos, debido al coste computacional requerido. Por otra parte, la ventaja de estos sistemas es que son capaces de identificar con gran facilidad los distintos elementos que se pueden encontrar en la zona de trabajo. Entre las principales aplicaciones de la visión artificial en el campo de la localización de robots en interiores destacan la identificación de objetos, el establecimiento de las relaciones existentes entre ellos y su posicionamiento en el espacio [5].

A continuación, se explicarán los elementos principales de un sistema de visión artificial:

- Imagen digital: elemento clave que contiene la información. Dependiendo del método para extraer dicha información podemos diferenciar entre imagen vectorial (descrita por fórmulas y puede redimensionarse sin perder calidad) e imagen basada en mapa de bits (descrita mediante píxeles, los cuales tienen la información de cada punto de la imagen).
- Procesamiento de imágenes: se suprime de la imagen la información que no sea relevante y se obtienen los datos necesarios para poder distinguir los distintos objetos.
- Reconocimiento de objetos: interpretación de los parámetros obtenidos en el procesamiento de imágenes. Es un proceso de elevado coste computacional que consiste en comparar el modelo adquirido en tiempo real con un modelo anterior. Existen distintas técnicas de reconocimiento: basadas en marcas de referencia o en puntos de interés.
- Descriptor de características: elemento utilizado en el reconocimiento de objetos que se encarga de buscar las coincidencias entre las imágenes digitales tomadas y las analizadas anteriormente.
- Tracking: consiste en hallar correspondencia de puntos entre dos frames consecutivos. Pueden utilizarse dos técnicas: teniendo en cuenta un objeto de referencia (tracking se realiza comparando una posición de referencia predeterminada y la actual del robot) o la posición inicial del objeto (tracking se realiza obteniendo posiciones relativas a la posición inicial del móvil).
- Flujo óptico: referido a los movimientos de los patrones de intensidad en el plano de la imagen provocados por el movimiento de objetos, es decir, un cambio de objetos en el área de trabajo modifica directamente el flujo óptico.
- Cámaras: elemento fundamental en esta metodología y encargados de la captura y almacenaje de la imagen para su posterior procesamiento.
- Visión estereoscópica: técnica para obtener la profundidad o las tres dimensiones en las imágenes capturadas, utilizando perspectivas, tamaños relativos o sombras [5].

Una posible aplicación de la visión artificial podría ser un sistema formado por una cámara monocular y una unidad de medición inercial (IMU), también conocido como VINS-Mono (Monocular visual-inertial system) [7]. En la actualidad se están utilizando con asiduidad este tipo de cámaras debido a su pequeño tamaño, bajo coste y sencillo hardware. Para compensar la ausencia de escala métrica en este sistema de visión, así como pérdidas visuales debidas a cambios en la iluminación o desenfocados por movimiento, se incorpora una IMU, pudiendo de este modo obtener tanto las coordenadas cartesianas como los ángulos de pitch y roll. Además, este dispositivo mejora el rendimiento del tracking.

Como se comentó anteriormente, gracias a su reducido tamaño y peso y a su bajo consumo, este sistema es muy útil para dispositivos que necesiten una percepción propia y del espacio que les rodea. Sin embargo, los sistemas VINS son altamente no lineales y necesitan una ardua inicialización debido a que no existe una relación directa entre la imagen detectada y el sistema métrico. Todo esto conlleva que la puesta en marcha tiene que ser desde una posición previamente conocida y al principio el movimiento debe ser lento, limitando mucho su uso en la práctica [7].

2.2.2 SLAM

En los últimos años se han realizado muchos estudios sobre la metodología SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Esta técnica consiste en desarrollar un mapa del entorno desconocido donde se encuentra el robot al mismo tiempo que se estima su localización relativa en dicho mapa.

La técnica SLAM destaca en sistemas de los cuales no se tiene información del entorno donde se va a realizar la tarea, al contrario que las técnicas anteriores, donde se conoce de antemano el

área de navegación del robot o hay colocados una serie de marcadores que sirven como referencia. Conseguir unos buenos resultados con este tipo de técnicas ayudaría a mejorar la autonomía de los robots en espacios interiores.

A continuación, se desarrollarán los sensores más utilizados en el desarrollo del SLAM. Es fundamental escoger el sensor correcto para obtener la mayor información posible del entorno de trabajo y así construir un mapa correcto de este.

- Sensores láser: presentan una gran precisión, son muy rápidos y necesitan poco procesamiento. Sin embargo, su precio es muy elevado y dependen mucho tanto de la superficie donde se utilice (bajo el agua tienen muy poco alcance) [8] como de las condiciones de luz.
- Sensores de ultrasonidos: mejoran los resultados obtenidos en superficies como el agua y son más baratos que los sensores láser, pero presentan una menor precisión. Se utilizan más como sensores de proximidad para evitar obstáculos que para la creación de mapas [9].
- Visión: una de las opciones más utilizadas es el uso de cámaras (cámaras monoculares o estéreo) debido a que con ellas se pueden observar e identificar los distintos objetos que se encuentran en el entorno. Son muy útiles gracias a la gran cantidad de información que facilitan y su reducido coste, tamaño y consumo. Sin embargo, necesitan algoritmos o la implementación de otros sensores para poder estimar la profundidad, además de tener un elevado coste computacional y depender de las condiciones lumínicas de la zona de trabajo [9].
- Sensores LiDAR (Light Detection and Rangigng) o range sensor: este tipo de sensores estiman con una elevada precisión la posición del robot a través de las medidas de distancia entre este y diferentes marcadores cuya posición y orientación relativa son conocidas. Los sensores LiDAR obtienen las medidas de distancia haciendo incidir un láser con una orientación específica sobre los marcadores y analizando la luz reflejada [9]. Estos sensores pueden ser 3D o 2D (este segundo es más limitado para sistemas con seis grados de libertad), obtienen una alta densidad de información del entorno y sus mayores inconvenientes son su elevado peso y el alto coste computacional que requieren.



Figura 2.2 Construcción de un mapa utilizando sensores LiDAR.

- **Sensores Range-only:** estos sensores solo pueden medir la distancia entre el sensor y el marcador usando el reflejo del láser, sin tener información de la orientación relativa como era el caso de los sensores LiDAR. Para compensar este inconveniente, se suelen incluir sensores sónico o antenas de RF direccionadas para obtener la orientación. Los sensores Range-only se caracterizan por su pequeño tamaño y ligereza [9].

Existen diferentes métodos de implementar la tecnología SLAM. Antes de exponerlos se definirá el término “landmark”, clave en el desarrollo de estos métodos, así como los tipos de mapas que se pueden desarrollar.

Los landmarks son puntos clave de la zona de trabajo, fácilmente reconocidos por el robot desde cualquier posición y ángulo, que tienen como objetivo servir de apoyo al dispositivo para localizarse en el área de navegación. Estos puntos deben ser únicos, de un tamaño, forma y color específicos y estacionarios para que puedan ser identificados rápidamente por el algoritmo [8].

Se debe tratar de evitar problemas como la asociación errónea durante el recorrido de un landmark con otro visualizado anteriormente o la no identificación de un punto como landmark que anteriormente sí se había reconocido como tal.

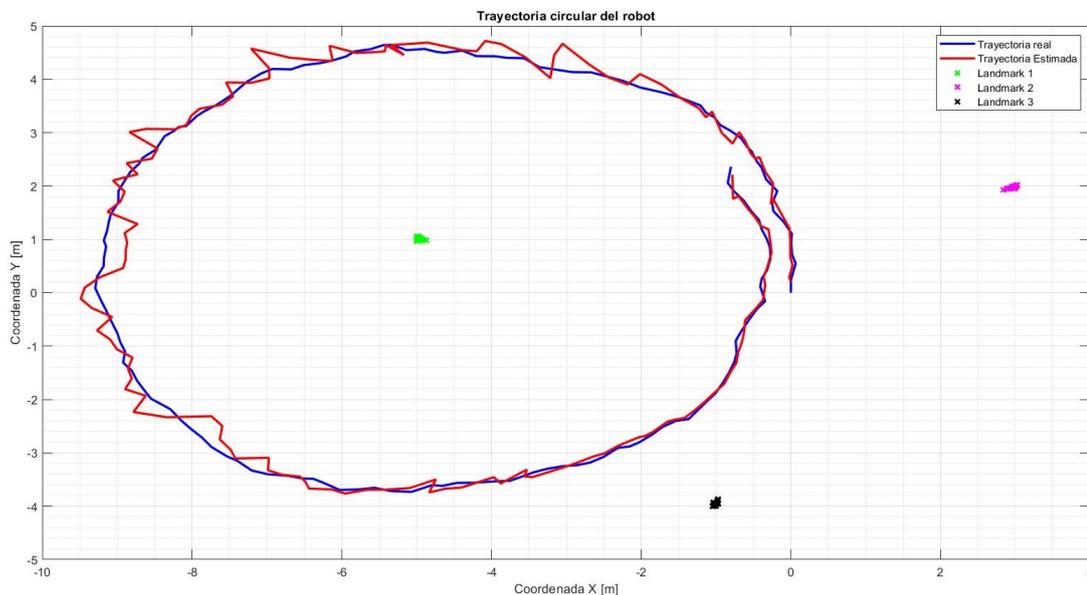


Figura 2.3 Ejemplo de simulación de una trayectoria circular utilizando metodología SLAM con 3 Landmarks.

Una posible clasificación de los mapas que se pueden desarrollar es la de mapas topológicos y métricos. Los mapas topológicos se centran en las características cualitativas del entorno, ofreciendo información de localizaciones específicas de este, pero no sobre distancias entre ellas o sus posiciones relativas. Por el contrario, los mapas métricos se centran en este último ámbito, presentando información geométrica de la zona.

A su vez, los mapas métricos se pueden dividir en mapas de cuadrícula (Grid maps), donde el área se divide en celdas del mismo tamaño que representan espacios libres u ocupados donde el robot se puede o no mover; y en mapas basados en landmarks, donde cada landmark simboliza un punto único del espacio con las características que se explicaron anteriormente.

V-SLAM

La técnica Visual-SLAM (V-SLAM) se basa en la implementación de cámaras monoculares o estéreo que capturan y procesan la información de las landmarks esparcidas por el entorno, para poder desarrollar un mapa métrico y determinar su posición.

Como se comentaba anteriormente, un problema bastante común de las técnicas que utilizan mapas basados en landmarks es la asociación de datos. Es fundamental que el sistema sea capaz de reconocer si se ha pasado anteriormente por el mismo landmark. Este tipo de algoritmos es capaz de detectar los bucles cerrados (loop closure: capacidad de identificar que un vehículo ha vuelto a una posición visitada previamente [10]) y, de este modo, mejorar el mapa que se está desarrollando simultáneamente.

Como se comentó anteriormente, al implementar métodos visuales, se obtiene más información sobre el terreno en el que se trabaja, pero el coste computacional es mayor.

RO-SLAM

Range-only SLAM (RO-SLAM) es un SLAM métrico cuyo objetivo es crear un mapa de landmarks a la vez que trata de localizar al robot en ese mapa haciendo uso de sensores de rango. Los landmarks de este sistema consisten en una serie de medidas de sensores de rango dispuestos en el entorno de trabajo.

Esta metodología trabaja con menos información que otras técnicas como el V-SLAM, pero se pueden conseguir estimaciones continuas sin que exista visión directa entre emisor y receptor si se implementa con sensores de rango específicos, como los basados en ondas RF. Esto los hace muy útiles en terrenos donde no existan condiciones óptimas de visión.

Por otra parte, el problema de la asociación de datos de V-SLAM desaparece en este método, puesto que las ondas RF o de ultrasonidos que se utilizan están codificadas de forma que cada medida calculada pertenece a un único marcador del terreno [9].

Hector SLAM

Se trata de una aplicación de la técnica SLAM de código abierto en 2D, que utiliza sensores láser tipo LiDAR para realizar un barrido láser de la zona de trabajo, crear una nube de puntos donde poder identificar distintos objetos y estimar la localización [8].

Este sistema se caracteriza por estimar la posición del robot de forma rápida y con gran exactitud, debido a la alta tasa de refresco y la precisión de los sensores LiDAR. Pese a ser una técnica 2D, tiene muchas aplicaciones en sistemas 3D.

RTAB-Map

La metodología RTAB-Map (Real-Time Appearance-Based Mapping) es una técnica de SLAM centrada en eliminar o, en su defecto, disminuir el problema ya mencionado de la aparición de bucles cerrados. Como se explicó anteriormente, la detección de estos bucles indicará si la observación del dispositivo móvil en tiempo real se trata una localización previa o nueva. De este modo, se van comparando constantemente las posiciones actuales y anteriores y, en el caso de no haber coincidencia, añadir la nueva localización a la base de datos.

El problema aparece cuando el espacio a recorrer o el tiempo de la tarea son demasiado extensos y el robot deba guardar demasiadas localizaciones en dicha base de datos, aumentando de esta forma el tiempo de cálculo. Se alcanzará un punto en el que comiencen a aparecer retrasos debido a que el tiempo de cálculo supera al de adquisición de imágenes, afectando negativamente a la creación simultánea del mapa.

La solución que plantea este método es limitar el número de posiciones que conforman una detección de bucle cerrado y, de este modo, crear un mapa y localizar al robot en él, independientemente de la zona de trabajo o el tiempo necesario para recorrerla. Para ello, se realizará una división de la memoria:

- Memoria de trabajo del robot (Working Memory, WM): contiene las localizaciones visitadas recientemente y con mayor frecuencia. Además, se encarga de detectar los bucles cerrados.
- Memoria a largo plazo (Long Term Memory, LTM): contiene el resto de las localizaciones. Aquí no se detectan bucles cerrados.

- Memoria sensorial (Sensory Memory, SM): analiza la imagen captada por el sistema de percepción y obtiene las características necesarias para detectar un posible bucle cerrado. Crea una nueva localización y la envía a la memoria a corto plazo.
- Memoria a corto plazo (Short-term memory, STM): se van actualizando las nuevas observaciones que llegan desde SM y se buscan similitudes entre dos imágenes consecutivas

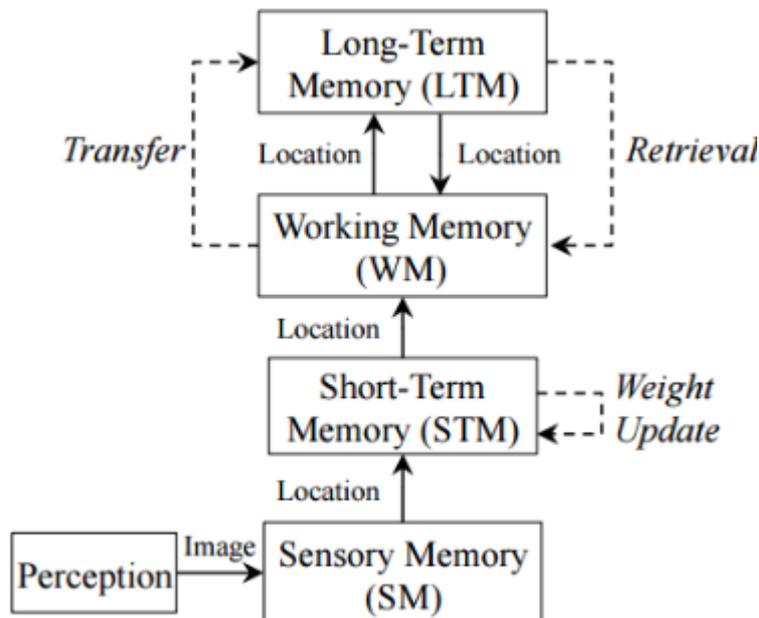


Figura 2.4 Tratamiento de memoria en RTAB-Map.

ORB-SLAM

ORB-SLAM es una metodología de SLAM monocular fundamentada en la detección de puntos específicos (features) que sirven para llevar a cabo las tareas principales de seguimiento, construcción del mapa, detección de bucles cerrados y localización, todo ello simultáneamente y en tiempo real. Estos puntos clave, también llamados “keyframes”, son escogidos estratégicamente y no variarán a menos que cambie el área de trabajo.

Una de las ideas fundamentales de este método es el “Bundle Adjustment (BA)”, una técnica de percepción que obtiene estimaciones de la localización muy precisas y una buena reconstrucción geométrica.

La técnica ORB-SLAM se caracteriza por desarrollar sistemas eficientes y sencillos, gracias a utilizar los mismos keyframes para realizar todas las tareas de SLAM. Además, esto hace que la comparación entre la localización actual y las localizaciones anteriormente visitadas sean independientes de cambios sustanciales en el ángulo de visión o en la iluminación del entorno. Se puede desarrollar tanto en espacios pequeños como de gran tamaño.

Al tratarse de un método de visión, a pesar de obtener soluciones precisas, el coste computacional puede llegar a ser elevado, aunque en la actualidad se está trabajando para disminuir este problema.

RGB-SLAM

El algoritmo RGB-D SLAM fue de los primeros en aparecer durante el estudio de la metodología SLAM y se caracteriza por utilizar imágenes a color y con profundidad captadas por las cámaras RGB-D.

Se trata de una técnica robusta y fiable que obtiene la información necesaria de los landmarks y features repartidos por el entorno, la compara con los datos anteriormente guardados y busca las coincidencias existentes. Una vez encontradas, se implementan los algoritmos RANSAC e ICP [8]

para realizar una transformación relativa entre los pares de imágenes y, por último, se desarrolla el mapa global.

LSD-SLAM

La técnica LSD-SLAM (Large-Scale Direct Monocular SLAM) utiliza toda la información de las imágenes capturadas para llevar a cabo la creación del mapa y la localización del robot. En este método ya no se comparan características previamente observadas y, al tomar la información directamente de la imagen, se pueden obtener más datos sobre la geometría y el área de trabajo. Dicha geometría se obtiene a partir del filtrado en escala de grises de las imágenes.

El LSD-SLAM permite crear mapas de gran tamaño. Sin embargo, como ocurre en otros métodos visuales y se acentúa más si cabe en esta técnica al utilizar toda la información de la imagen, el coste computacional toma valores muy elevados. Además, la ejecución es bastante lenta y pueden aparecer retrasos durante esta.

2.2.3 Odometría visual

En este apartado se retomará el concepto de odometría que se mencionó al inicio de este capítulo y se desarrollará con más detalle la técnica de la odometría visual.

La odometría es el estudio de la estimación de la posición de vehículos con ruedas durante la navegación. Para realizar esta estimación se usa información sobre la rotación de las ruedas para estimar cambios en la posición a lo largo del tiempo.

La odometría basa su funcionamiento en la utilización de sensores de distinto tipo para estimar la posición relativa del robot móvil respecto a la posición inicial de la que partió. Cuanta más información capten estos sensores, más exacta será la estimación de la localización del robot.

Una de las técnicas más utilizadas en este ámbito es la odometría visual, la cual utiliza sistemas de visión para adquirir la información del entorno. Esta metodología está muy relacionada con las técnicas de SLAM del apartado anterior, resolviendo parte del problema que aparece en estas [11].

Las distintas técnicas de odometría visual se pueden clasificar en las que utilizan más de una cámara, también llamadas visión estereó, y las que utilizan una única cámara, conocidas como visión monocular.



Figura 2.5 Construcción de un mapa utilizando odometría visual.

Odometría visual estereó

En estos sistemas, el cálculo de las medidas del entorno en el que trabaja el dispositivo es más sencillo gracias a contar con más de una cámara de las que se conoce la posición relativa entre

ellas. Dado que se tiene la capacidad de observar un mismo punto desde diferentes perspectivas, se pueden calcular magnitudes como la profundidad, clave para estimar la posición de un robot. El procedimiento es el siguiente: se captan los puntos de interés de la imagen y se desarrolla una estructura tridimensional del entorno. A continuación, se realiza el tracking de esos puntos de interés durante una secuencia de imágenes y, por último, se estima el movimiento del robot.

Odometría visual monocular

Estos sistemas, al tener una única cámara, necesitan compensar esa falta de información adicional de la visión estéreo con otro tipo de sensores para, de este modo, obtener las medidas necesarias del área de trabajo. También existen otras alternativas a la incorporación sensores, como podrían ser la restricción de algún movimiento o el conocimiento previo de las características de objetos del entorno.

La información obtenida para la creación de la estructura tridimensional del espacio es, en este caso, bidimensional. Debido a esto, en vez de medidas absolutas se utilizan mediciones relativas: todos los movimientos se calculan a partir de un movimiento de referencia.

A su vez, entre las técnicas de odometría visual monocular, se puede diferenciar entre las que utilizan la intensidad de todos los píxeles de la imagen como información (técnicas globales); las que utilizan keyframes fáciles de identificar (técnicas basadas en características); y las que utilizan una mezcla de las dos metodologías anteriores (técnicas híbridas) [11].

Como se ha mencionado anteriormente, ambos métodos han cogido fuerza en los últimos años gracias a la capacidad de obtener mucha información de las imágenes, pero se ven muy perjudicados por su baja velocidad computacional. Además, al tratarse de métodos directos, están limitados por la falta de garantías y optimización [12]. Por el contrario, esa carencia es compensada en métodos basados en marcadores preestablecidos. Una posible alternativa puede ser un sistema de odometría visual semidirecto, una solución que combina ambas técnicas.

SVO

Los sistemas SVO (Semidirect Visual Odometry) utilizan, por un lado, métodos directos para realizar el tracking de los píxeles de mayor interés de la imagen y, por otro, métodos de marcadores preestablecidos (feature based) para optimizar la creación de la estructura geométrica y el movimiento [12].

Todo esto, añadido a algoritmos que calculen la profundidad del entorno, aumentan el rendimiento de este tipo de sistemas, haciéndolos más eficientes en zonas donde las texturas captadas por cámara sean de baja calidad. Además, estos algoritmos se pueden utilizar tanto para el caso monocular como para el multicámara.

Los tres aspectos fundamentales para obtener la mayor precisión posible son: contar con una buena distribución de marcadores a lo largo del plano, realizar un buen tracking minimizando el efecto de deriva (drift) y tener una buena asociación de datos para no tener problemas a la hora de comparar los marcadores antiguos con los nuevos.

El método SVO se caracteriza por eliminar o reducir los efectos negativos de ambos métodos. Por un lado, reduce en gran medida el tiempo computacional que requieren los métodos de marcadores preestablecidos, ya que las características extraídas pertenecen a frames claves, no hay que analizar la imagen entera. Por otro lado, una vez hecho esto se utilizan métodos directos para llevar a cabo el tracking frame a frame con una precisión de subpíxeles. Al tener que manejar una información más reducida, aunque siga dependiendo de una buena inicialización, el coste computacional disminuye [12].

2.2.4 OptiTrack

Una técnica que compite directamente con la tecnología ViCom es OptiTrack. Se trata de un sistema de localización 3D óptico que utiliza una serie de cámaras infrarrojas para capturar la información

de marcadores reflectantes esparcidos por el medio [13]. Este sistema es uno de los más avanzados en el ámbito de la captura de imágenes en movimiento dada su capacidad de convertir información 2D capturada por cada cámara en datos 3D relacionando dichas cámaras.



Figura 2.6 Sistema y cámaras OptiTrack.

El funcionamiento es similar a otras técnicas anteriormente comentadas. Tras recibir la luz reflejada desde los distintos marcadores, las cámaras recogen la información de estos en forma de imágenes en escala de grises y obtienen la posición 2D de cada uno ellos. Dado que cada marcador puede ser capturado al menos por 2 cámaras al mismo tiempo, se puede determinar fácilmente el punto del espacio en el que se encuentra. Todo este procedimiento requiere principalmente una calibración del sistema, adquisición de datos y procesamiento de estos. La función principal de la calibración del sistema es obtener las posiciones relativas entre las cámaras en el espacio de trabajo y respecto al sistema de coordenadas del mundo, un aspecto que afecta considerablemente a la precisión en la recolección de información [14].

Un aspecto clave en este tipo de sistemas es la calibración de las cámaras. Una buena calibración permitirá que la precisión de las medidas tomadas sea mayor y, por lo tanto, dotará de mayor estabilidad al sistema. La bondad de la calibración se puede medir a partir del error medio: este error refleja las relaciones numéricas que existen entre las coordenadas de nuestro sistema y las del espacio de trabajo donde se opera.

OptiTrack es una solución atractiva por contar con una gran capacidad de procesamiento y obtener unas estimaciones de la posición extremadamente precisas y de confianza, del orden de los milímetros. Por ejemplo, un único sistema OptiTrack de captura de movimiento puede rastrear los 6 grados de libertad de uno o varios objetos en el área de trabajo [15].

Entre las desventajas de los sistemas OptiTrack destacan la necesidad de trabajar con ordenadores y conexión a Internet potentes, su elevado precio comparado con otras tecnologías y que se trata de un sistema cerrado, es decir, necesita marcadores y un sistema de iluminación privados [16].

3 Sistema Starter Set Super-MP-3D

En este capítulo se explicará con detenimiento el conjunto de dispositivos con el que se va a trabajar, repasando toda la información relevante proporcionada por el fabricante de cada elemento que compone el sistema [17], así como las distintas disposiciones o arquitecturas que se pueden utilizar a la hora de la instalación.



Figura 3.1 Sistema Starter Set Super-MP-3D.

3.1 Características principales

El sistema se denomina Starter Set Super MP-3D y está formado por un conjunto de balizas y un router/modem fabricado por Marvelmind Robotics. Se trata de un set diseñado para aplicaciones de posicionamiento y navegación interior que alcanza una precisión de ± 2 centímetros. Utiliza señales de ultrasonidos y de radiofrecuencia para llevar a cabo las distintas mediciones y la comunicación entre elementos, respectivamente.

En primer lugar, se explican los distintos elementos que componen el sistema:

- **Cuatro balizas “Super-Beacon” estacionarias:** dispositivos que se instalarán de forma permanente siguiendo una arquitectura determinada y que utilizan diferentes frecuencias de ultrasonidos para comunicarse con el resto de las balizas. La comunicación con el router/modem es inalámbrica vía banda ISM (en Estados Unidos) o banda SRD (en la Unión

Europea). La disposición y orientación de estas balizas deben ser tales que se obtenga la máxima cobertura posible.

- **Baliza “Super-Beacon” móvil:** baliza similar a la estacionaria pero que trabaja con una frecuencia diferente y puede desplazarse por el entorno de trabajo. Se debe colocar en posición horizontal y no cubrir sus sensores con nada que pueda reducir la intensidad de la señal ultrasónica, con el fin de obtener una cobertura óptima.
- **Modem HW v5.1:** controlador principal de nuestro sistema que puede manejar hasta 250 balizas al mismo tiempo. Debe estar siempre alimentado cuando se esté trabajando y sus funciones principales son arrancar el sistema, monitorearlo e interactuar con el entorno de trabajo (Dashboard). Para la comunicación y sincronización se utiliza la banda de radio ISM. Puede ser colocado en cualquier parte siempre que se encuentre dentro de la zona de cobertura establecida por el resto de balizas.



(a) Super-Beacon.



(b) Modem HW v5.1.

Figura 3.2 Balizas y Modem.

Las “Super-Beacon” se caracterizan por ser balizas que pueden transmitir en varias frecuencias de ultrasonidos (desde 19 hasta 45 kHz) y en distintas bandas de radiofrecuencia (868 MHz y 433 MHz), pudiendo además funcionar en modo estacionario o móvil. Son dispositivos dualsense, es decir, son capaces tanto de recibir como de transmitir pulsos de ultrasonidos y pueden medir distancias de hasta 50 metros, idealmente, y de aproximadamente 30 metros en la práctica. Están compuestas por antenas de 50 milímetros y conforman un sistema de IMU 6D (Unidad de Medidas Inerciales) compuesto por un giróscopo 3D y un acelerómetro 3D.

El sistema de navegación está basado en una interfaz de radio en una banda de frecuencia de licencia libre (868 MHz) que conecta a todas las balizas ultrasónicas estacionarias. Por su parte, para la localización de la baliza móvil se utiliza la metodología del tiempo de vuelo (TOF) y la trilateración.

El tiempo de vuelo consiste en calcular la distancia entre un emisor y un receptor a partir de conocer la velocidad de propagación de una onda, en este caso de ultrasonidos, y de medir el tiempo que tarda desde que dicha onda se envía hasta que se recibe.

Por otro lado, la trilateración se utiliza para determinar la posición de un objeto determinado a partir de conocer las localizaciones de dos o más puntos de referencia y las distancias de estos a dicho objeto.

Además de la trilateración, se puede utilizar un enfoque distinto basado en el área de cobertura. Dado que cada baliza puede transmitir y recibir ondas de ultrasonidos a distinta frecuencia, se pueden crear diferentes áreas de cobertura colocando cada baliza estática en posiciones específicas.

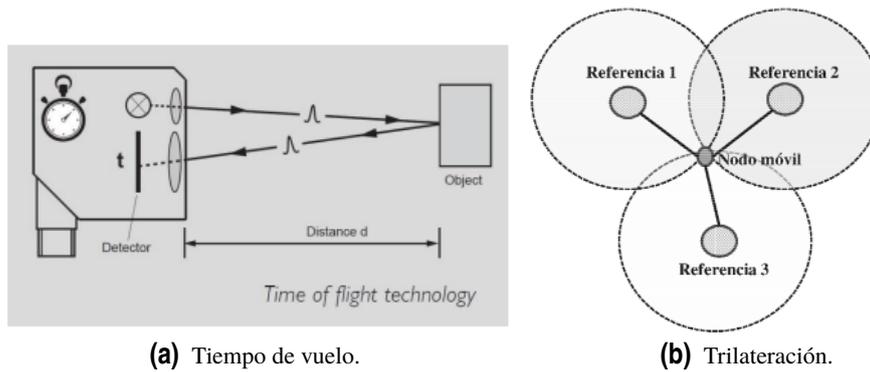


Figura 3.3 Tecnologías del sistema SSS-MP-3D.

A partir del eco de ultrasonido reflejado en la baliza móvil, se puede determinar en qué área de cobertura se encuentra y determinar su posición.

Entre las principales ventajas de este sistema destacan la no necesidad de una calibración manual previa ni conocer exactamente la localización de las balizas ya que el sistema crea el mapa automáticamente. Además, dado que las balizas contienen dispositivos IMU, se obtiene un sensor “ultrasonidos+IMU” que permite una tasa de actualización mucho mayor (se pueden alcanzar más de 100 Hz).

Por otro lado, este sistema resalta por encima de otros debido a su precisión a la hora de estimar la posición incluso antes de añadir filtros, obteniendo resultados 10 veces más precisos que los sistemas de radiofrecuencia de banda ultra-ancha (UWB) y 100 veces mayor que los sistemas basados en Bluetooth Low Energy (BLE).

Antes de continuar con las diferentes arquitecturas con las que se puede trabajar, se explica a continuación la clave y el principal desafío que se presenta para que todo este sistema funcione.

Al igual que ocurre con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), si se desea llevar a cabo un seguimiento 3D es estrictamente necesaria una línea de visión sin obstáculos entre la baliza móvil que se desea rastrear y 3 o más balizas estacionarias de manera simultánea. En caso de realizar un seguimiento 2D, bastaría con 2 balizas estacionarias.

3.2 Arquitecturas del sistema

En este apartado se analizarán las tres posibles arquitecturas que se pueden utilizar a la hora de configurar las diferentes balizas y el modem. En base al objetivo que se persiga, se escogerá una u otra.

3.2.1 Arquitectura no inversa (NIA)

Esta arquitectura está formada por:

- 2 o más balizas estacionarias recibiendo señales de ultrasonidos.
- 1 baliza móvil transmitiendo señales de ultrasonidos.
- 1 router/modem central.

Las balizas estacionarias, como se comentó anteriormente, pueden trabajar con cualquier frecuencia ultrasónica. Estas son colocadas en zonas altas de paredes y techos y, midiendo la distancia a otras balizas vecinas (hasta 30 metros), crean submapas automáticamente. Una vez construidos, estas balizas funcionan únicamente como receptores. Se conectan con el router a través de la banda de radio anteriormente mencionada.

Por su parte, la baliza móvil se puede instalar en un robot o dron a través de una comunicación vía UART, SPI, I2C o USB. La actualización de la localización de esta baliza la lleva a cabo el router, con una frecuencia de hasta 25 Hz.

Por último, el modem se puede conectar al robot a través de un USB o UART virtual para llevar a cabo las actualizaciones de la posición. Es capaz de soportar hasta 250 balizas y 250 submapas.

Los submapas son pequeños mapas o celdas creados por conjuntos de balizas en zonas separadas. Una vez se obtengan todos, se puede construir un mapa mucho mayor del entorno a partir de combinar todas las celdas creadas, abarcando áreas de centenares de metros cuadrados. En el caso de estudio de este proyecto, el sistema se limitará únicamente a cuatro balizas estacionarias, una baliza móvil y el modem HW v5.1, por lo que se podrá reconstruir un único submapa 3D.

3.2.2 Arquitectura inversa (IA)

Esta arquitectura está formada por:

- 2 o más balizas estacionaras transmitiendo en distintas frecuencias de ultrasonidos.
- 1 baliza móvil recibiendo distintas frecuencias de ultrasonidos.
- 1 router/modem central.

La diferencia con la arquitectura anterior es que, en este caso, son las balizas estacionarias las que transmiten las señales ultrasónicas mientras que es la baliza móvil la que las recibe. Además, las balizas estacionarias que pertenecen al mismo submapa, deben transmitir en diferentes frecuencias ultrasónicas, por ejemplo, una a 19 KHz y otra a 25 KHz.

La baliza móvil recibe cualquier frecuencia y se encarga de actualizar la localización a bordo, no la recibe desde el router.

Por último, el objetivo del modem en esta arquitectura es el de sincronizar las balizas que componen el sistema con una frecuencia de hasta 25 Hz. En este caso, no calcula la posición de la baliza móvil.

Esta arquitectura no se recomienda para aplicaciones con drones, dado que la baliza móvil es la que recibe los pulsos de ultrasonidos y el rango se ve limitado hasta los 5 metros.

3.2.3 Arquitectura NIA-Multifrecuencia (MF-NIA)

Esta arquitectura está formada por:

- 2 o más balizas estacionaras recibiendo señales de ultrasonidos.
- 1 baliza móvil transmitiendo en distintas frecuencias de ultrasonidos.
- 1 router/modem central.

Esta arquitectura es una modificación de la NIA, en la que la baliza móvil transmite pulsos ultrasónicos en diferentes frecuencias entre 19 KHz hasta 45 KHz. De nuevo, es el router el que se encarga de estimar la posición de esta baliza y envía actualizaciones con una frecuencia de hasta 25 Hz. Por su parte, las balizas estacionarias trabajan a cualquier frecuencia.

Este tipo de arquitectura alcanza su máximo potencial en aplicaciones donde se utilizan una gran cantidad de balizas, por ejemplo en la localización de dispositivos en plantas industriales o grandes almacenes. En este tipo de instalaciones se suele trabajar con más de 8 balizas móviles y sus balizas estacionarias asociadas, creando subsistemas individuales, por lo que se requiere un ratio de actualización muy elevado. Cada subsistema se encarga de modelar un submapa que, al fusionarlo con otros, recrean el mapa completo de dicha instalación.

En el caso de este proyecto, al trabajar con un único sistema de cuatro balizas estacionarias y una móvil, se implementará la arquitectura no inversa (NIA).

4 Puesta en marcha

A lo largo de este capítulo se realizará una explicación sobre la puesta en marcha del sistema SSS-MP-3D. Se enumerarán los distintos pasos que se deben seguir para poner en funcionamiento el conjunto de dispositivos y se presentará una pequeña demostración de los resultados obtenidos.

En este caso, la arquitectura que se va a desarrollar es la No inversa (NIA). Es importante este detalle dado que la configuración del firmware de cada baliza y del modem dependen de la arquitectura que se vaya a utilizar.

4.1 Alimentación y carga de batería

En primer lugar, y como suele ser habitual, se lleva a cabo la carga de la batería de los elementos que componen el sistema. Las balizas "Super Beacon" pueden alimentarse de forma interna, con una batería LiPo de 1000 mAh, o externamente a través de una entrada micro USB. En este trabajo se ha optado por la segunda opción por comodidad y reducción de costes.

Para realizar la carga de la batería, cada baliza dispone de dos interruptores DIP que deben colocarse en las posiciones que se muestran a continuación:

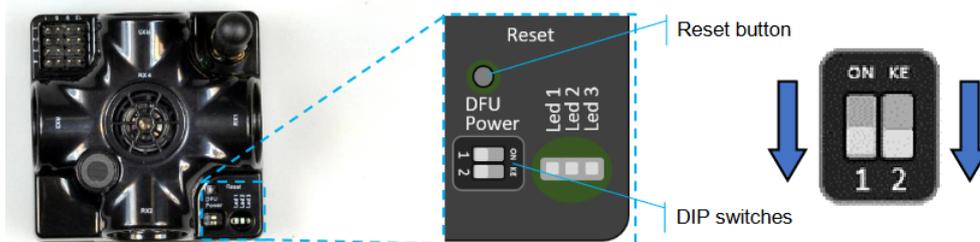


Figura 4.1 Posiciones de los interruptores DIP para la carga de batería de la baliza.

Durante la carga, se encenderá el led rojo que se encuentra a la derecha de los interruptores DIP. Cuando la batería se encuentre completamente cargada, este led se apagará y la baliza estará lista para su uso. Cabe destacar que esta disposición de interruptores también sirve para apagar las balizas cuando no se están alimentando.

Por su parte, el módem no tiene batería, por lo que se alimenta directamente vía micro USB al computador con el que se va a trabajar. Un led rojo informará sobre su actividad siempre que esté conectado.

Es muy importante que, siempre que se esté trabajando con el sistema, el módem HW v5.1 esté alimentado y activado ya que, de lo contrario, las balizas se apagarán automáticamente si no logran contactar con él pasado un minuto aproximadamente.

4.2 Inicialización del sistema

Una vez que todas las balizas estén cargadas, el siguiente paso consiste en inicializar y enlazar todo el sistema. Para ello, se utilizará un software específico suministrado por el fabricante, en el que se incluye la aplicación Dashboard.

Dashboard es un programa que servirá como centro de control de todo el sistema, donde se realizarán todos los ajustes de los diferentes dispositivos y se podrán observar con detalle las configuraciones de las balizas que se lleven a cabo.

Para configurar cada una de las "Super Beacons" se conectarán vía USB al ordenador para que sean reconocidas por la aplicación Dashboard. Anteriormente a la conexión, se deben colocar los interruptores DIP de la siguiente manera:

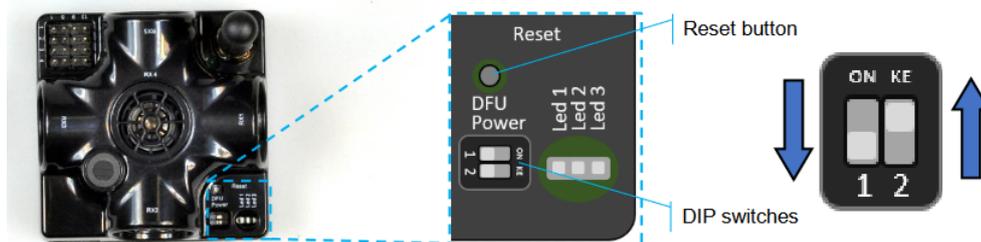


Figura 4.2 Posiciones de los interruptores DIP para la inicialización de la baliza.

Una vez conectada, el led verde de la baliza comenzará a parpadear indefinidamente, informando de que está encendida. Esta disposición de los interruptores se mantendrá siempre que se desee trabajar con el sistema.

Cabe destacar la diferencia entre encender las balizas y despertarlas o dormir las. Si la baliza está despierta, el dispositivo está encendido y transmitiendo frecuencias, mientras que, si la baliza se encuentra dormida, la baliza está encendida y en reposo, sin transmitir.

Posteriormente, desde la aplicación Dashboard del ordenador, se debe actualizar el Firmware de las balizas y del módem a la versión más reciente y establecer la arquitectura que se va a utilizar (en este caso NIA). Por otro lado, una de las 5 "Super Beacons" del sistema debe programarse como baliza móvil (conocida en el software como Hedge o Hedgehog), siendo el resto estacionarias. Además, se deben establecer los ajustes por defecto para todos los dispositivos.

Estos pasos son sumamente importantes para que todos los elementos trabajen con la misma configuración y se lleve a cabo una buena conexión entre balizas y módem, puesto que, si cada una trabaja con diferentes versiones de software o ajustes, será imposible la comunicación dentro del sistema.

Otro elemento importante a destacar es la frecuencia con la que trabaja cada baliza, la cual viene indicada en la etiqueta de cada una de las balizas. No debe modificarse dicho valor preestablecido dado que, si se cambia este parámetro, se fuerza a la baliza a transmitir en una frecuencia para la cual no ha sido diseñada, obteniendo resultados muy deficientes y fallos en la estimación de la posición de la baliza móvil.

4.3 Colocación de las balizas

Después de configurar las balizas y el módem, se puede continuar con la disposición de las balizas y la creación del área de trabajo. Como se comentaba en apartados anteriores, las balizas estacionarias se deben colocar en techos o en zonas altas de las paredes, buscando la mejor orientación para poder

obtener la mejor cobertura posible. El módem se mantendrá conectado al ordenador durante toda la operación y la baliza móvil se irá desplazando horizontalmente dentro del área de trabajo.

En este apartado, conviene profundizar en términos como submapas, mapas y zonas de servicio y "handover".

Como se explicó en el apartado de las arquitecturas del sistema, en este proyecto se trabajará únicamente con cuatro balizas estacionarias. A partir de esta limitación, se pueden crear 3 tipos de submapas diferentes:

- **Submapa 1D:** utilizando una única baliza estacionaria y la baliza móvil, se puede recrear un submapa de una única dimensión. De esta forma, es posible construir un mapa a partir de 4 submapas de este tipo. Sin embargo, la precisión que se obtiene es muy deficiente, dado que el Hedgehog únicamente puede moverse en una dirección, como se puede observar en la siguiente imagen:

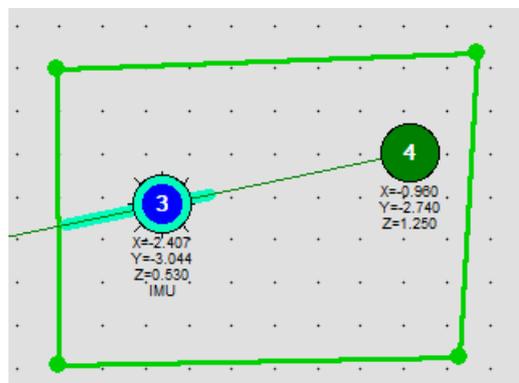


Figura 4.3 Submapa unidimensional con una baliza estacionaria y la baliza Hedgehog.

- **Submapa 2D:** utilizando dos balizas estacionarias, aparte de la baliza móvil, se puede obtener un submapa de dos dimensiones. Como se puede observar en la siguiente imagen, se mejora la precisión de la trayectoria trazada por la baliza móvil, además de que esta se desarrolla en el plano X-Y.

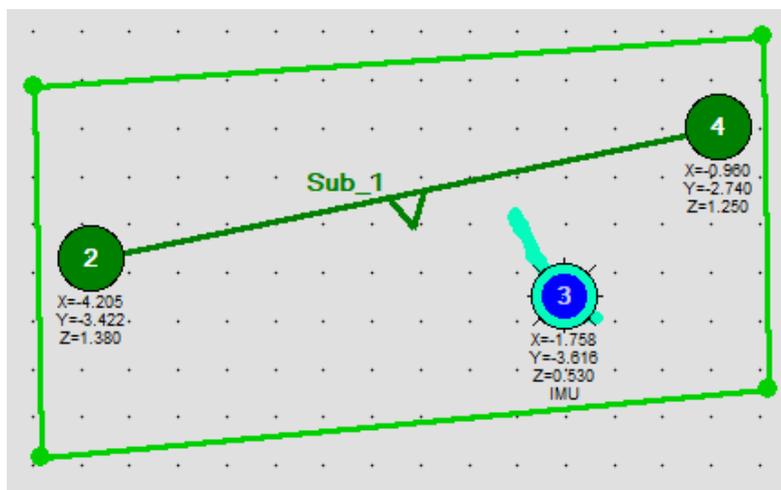


Figura 4.4 Submapa bidimensional único a partir de 2 balizas estacionarias y el Hedgehog.

Por otra parte, se puede construir un mapa a partir de dos submapas de este tipo. Esta opción es útil para abarcar zonas más grandes, por ejemplo una habitación más un pasillo, evitando limitar la estimación de la posición del dispositivo a un único habitáculo.

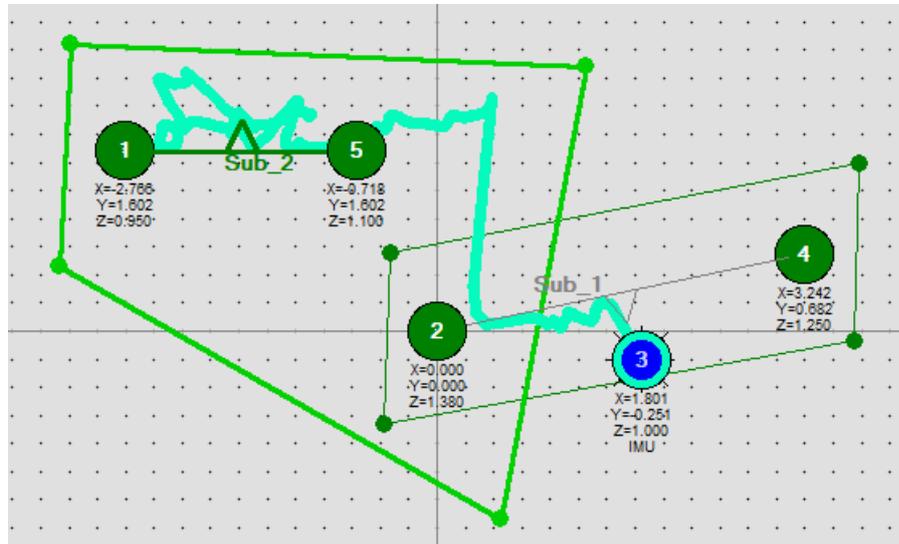


Figura 4.5 Mapa formado por dos submapas bidimensional a partir de 4 balizas estacionarias y el Hedgehog.

- **Submapa 3D:** utilizando tres balizas estacionarias se puede obtener un submapa con la posición 3D de la baliza móvil. Es recomendable incluir una cuarta "Super Beacon" estacionaria para reforzar las estimaciones. Pese a la limitación de tener que centrarse en una ubicación concreta, esta es la única opción con la que se pueden obtener las tres coordenadas de posicionamiento y la mejor estimación posible de la posición del Hedgehog.

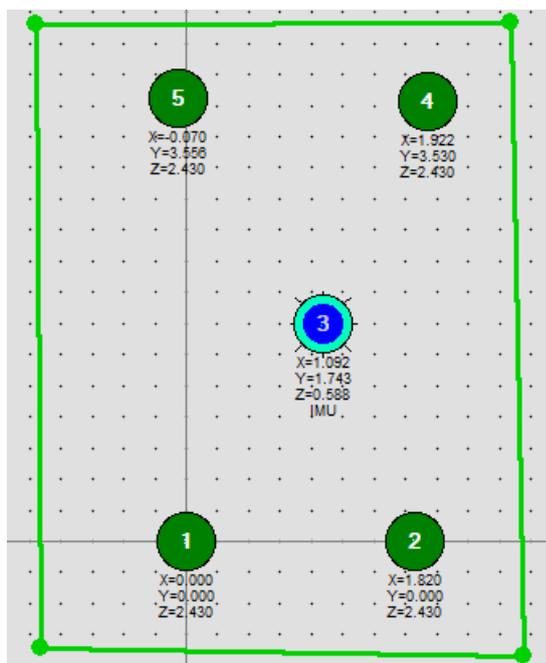


Figura 4.6 Submapa tridimensional a partir de 4 balizas estacionarias y el Hedgehog.

En los tres tipos de submapas, hay que indicar a que altura se han colocado las balizas estacionarias. Además, en los casos unidimensional y bidimensional también es necesario indicar la altura del Hedgehog.

Una vez colocadas las balizas, desde la aplicación Dashboard se pueden establecer la zona de servicio y la zona de traspaso o "handover":

La zona de servicio es el área en el que un submapa determinado puede transmitir. Dicha zona se configura desde el Dashboard y sirve para mejorar el seguimiento de la baliza móvil cuando va atravesando distintos submapas.

Cuando dos zonas de servicio de dos submapas diferentes se solapan, se crea la zona de handover. Este área suaviza la transferencia de información entre una zona de servicio y otra. Dependiendo de la frecuencia de actualización y la velocidad con la que se desplace la baliza móvil, esta zona tendrá un tamaño u otro.

Se muestran a continuación un ejemplo de las zonas de de servicio (recuadros en verde) de dos submapas diferentes y de la zona de Handover común (en morado):

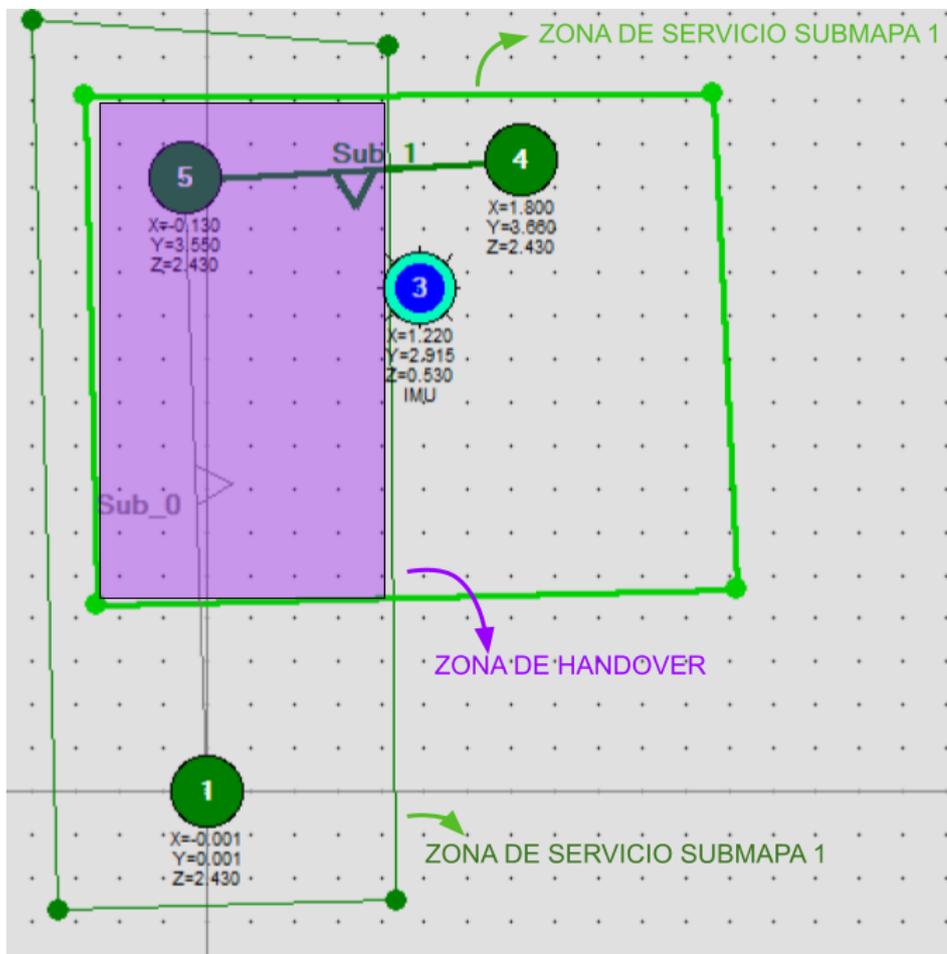


Figura 4.7 Ejemplo de zonas de servicio y Handover.

En el caso que se trata en este trabajo, dado que se trabajará con la posición 3D de la baliza móvil, se utilizará un mapa formado por un único submapa 3D, por lo que no se definirá una zona de Handover.

4.4 Despertar de las balizas y creación del mapa

Una vez dispuestas todas las balizas estacionarias por el espacio de trabajo, a través de la aplicación Dashboard se van despertando una a una. Cuando todas estén en funcionamiento y el programa informe de que las medidas son correctas, se puede congelar el submapa para, posteriormente, despertar a la baliza móvil o "Hedgehog".

Una vez que se estime correctamente la posición de cada "Super Beacon" estacionaria al Hedgehog y así lo indique el programa, se podrá congelar el mapa general del área de trabajo y llevar a cabo el recorrido que se desee con la baliza móvil. Este desplazamiento se irá guardando en el Dashboard, tal y como se muestra en color celeste en la siguiente figura:

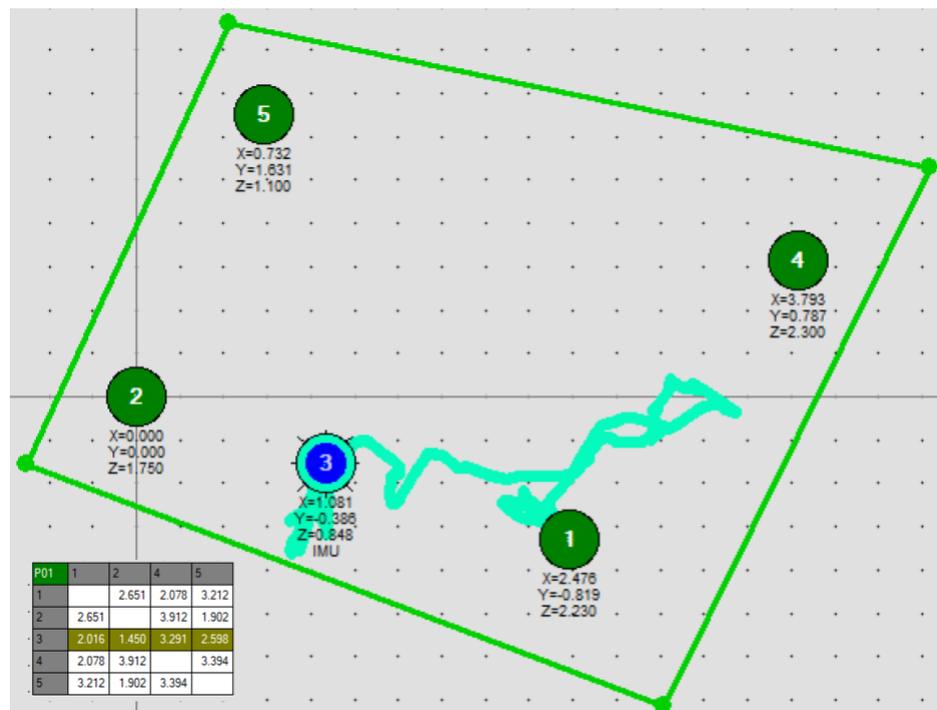


Figura 4.8 Ejemplo de la trayectoria del Hedgehog en un mapa tridimensional, junto con la tabla de distancias entre balizas.

4.5 Simulaciones preliminares

Antes de comenzar con los experimentos reales, se van a llevar a cabo una serie de comprobaciones para validar la estimación de la posición del Hedgehog por parte del sistema SSS-MP-3D. Para ello, se trabajará en un entorno relativamente pequeño como es el salón de un piso, y se realizarán una serie de experimentos en estático.

4.5.1 Distancias absolutas a la baliza móvil

La metodología del experimento es la siguiente: se dispondrán las balizas estacionarias en las cuatro esquinas principales del habitáculo, formando un área de trabajo rectangular aproximadamente. Posteriormente, se colocará la baliza móvil en dos posiciones estáticas distintas dentro de esa zona y se calcularán las distancias reales que existen entre cada una de las balizas estacionarias y el Hedgehog.

Por su parte, el sistema generará un archivo donde se guardan estas mismas distancias, calculadas durante un periodo establecido de 2 minutos. A partir de dicho archivo, se puede calcular la media de los distintos valores adquiridos y su desviación estándar.

Por último, se compararán las medidas reales y las medidas calculadas por el sistema y se validará la precisión de este.

A continuación, se muestra un plano del entorno donde se han desarrollado las simulaciones y una tabla donde se representan las distancias que existen entre las balizas estacionarias, tanto medidas en el mundo real como calculadas por el sistema, y el error entre ambos resultados:

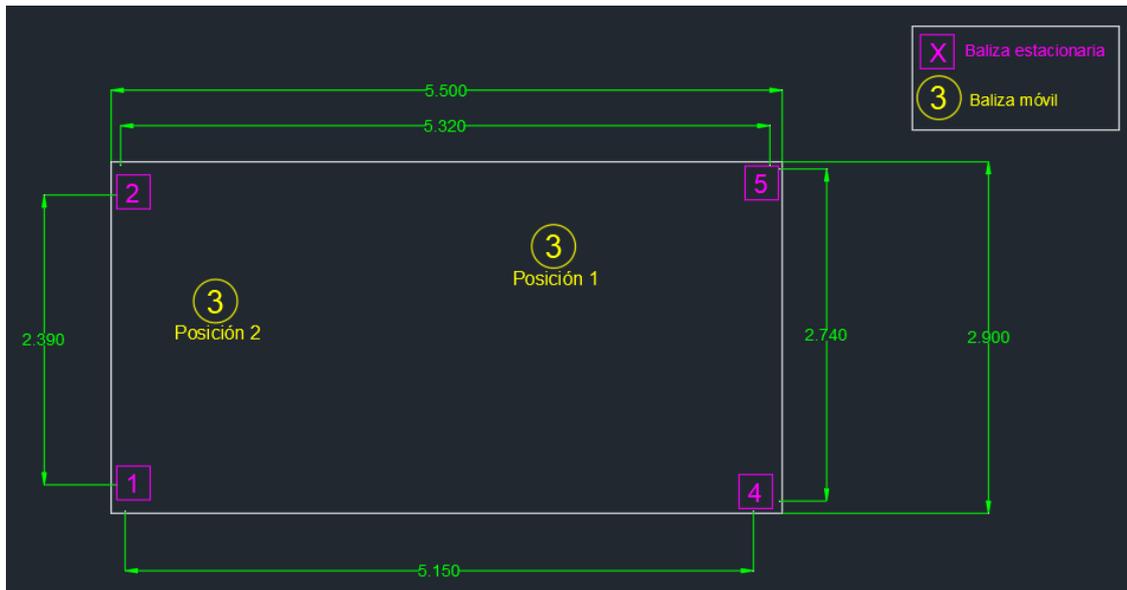


Figura 4.9 Disposición 1 de las balizas en el entorno de trabajo.

Tabla 4.1 Distancias reales y calculadas entre balizas estacionarias .

Balizas estacionarias	Distancia real [m]	Distancia calculada [m]	Error de medición [cm]
1 - 2	2.390	2.332	5.80
2 - 5	5.320	5.322	0.20
5 - 4	2.740	2.737	0.30
4 - 1	5.150	5.104	4.60

Como se puede comprobar en la tabla 4.1, la precisión del sistema al calcular las distancias entre las balizas estacionarias 2, 5 y 4, es milimétrica. Sin embargo, debido a diversos obstáculos en la línea de visión entre las balizas 1, 2 y 4, la precisión empeora considerablemente, alcanzando errores de casi 6 centímetros. Posteriormente se discute como influye el entorno en la precisión del sistema.

Posición estática 1

En esta primera simulación, se coloca la baliza móvil (representada con el número 3 redondeado en el plano de la figura 4.9) fija en la posición 1, cercana a las balizas estacionarias 4 y 5.

Al contrario que ocurre con las distancias entre balizas estacionarias, las cuales son fijadas automáticamente por el sistema cuando se crea el submapa, las mediciones que tienen en cuenta a la baliza móvil se actualizan continuamente. Debido a esto, para obtener el valor de la distancia

calculada por el sistema, se ha realizado una media aritmética de los 845 valores que se han obtenido en un intervalo de 2 minutos.

En las siguientes tablas, se muestran las distancias de cada baliza estacionaria al Hedgehog, junto con las desviaciones estándar asociadas a cada una, así como el error que existe entre los valores medidos en la realidad y los calculados por el sistema.

Tabla 4.2 Distancias reales y calculadas entre balizas estacionarias y Hedgehog.

Balizas estacionarias	Distancia real a 3	Distancia calculada a 3	Error de medición
	[m]	[m]	[cm]
1	4.350	4.279	7.1
2	3.910	3.895	1.5
4	3.120	3.047	7.3
5	2.065	2.021	4.4

Tabla 4.3 Distancias calculadas entre balizas estacionarias y Hedgehog y sus desviaciones estándar.

Balizas estacionarias	Distancia calculada a 3	Desviación estándar
	[m]	[cm]
1	4.279	1.727
2	3.895	0.713
4	3.047	0.375
5	2.021	0.337

Como se puede comprobar, el error en la medición de las distancias de la baliza móvil aumenta considerablemente, llegando en algunos casos a valores por encima de los 7 centímetros de error. Como se comentaba anteriormente, esta pérdida de precisión se debe a los distintos elementos que se encuentran en el entorno de trabajo que pueden interferir tanto en el rango de visión de las balizas como en la propagación de las ondas de ultrasonidos.

Por su parte, la desviación estándar presenta unos valores del orden de los milímetros, es decir, no hay una gran dispersión de los datos individuales calculados respecto a sus medias. Esto es sinónimo de que el sistema presenta una buena repetibilidad y una baja incertidumbre en los datos calculados, lo cual es imprescindible si se desea obtener una buena precisión.

Posición estática 2

En la segunda simulación, se instalará el Hedgehog en la posición 2, más cercano a las balizas estacionarias 1 y 2. Se repite el proceso explicado en el apartado anterior con la nueva disposición para obtener las distancias entre balizas, las cuales se muestran a continuación:

Tabla 4.4 Distancias reales y calculadas entre balizas estacionarias y Hedgehog en la posición 2.

Balizas estacionarias	Distancia real a 3	Distancia calculada a 3	Error de medición
	[m]	[m]	[cm]
1	2.140	2.061	7.9
2	1.860	1.780	8.0
4	4.835	4.723	11.2
5	4.645	4.580	6.5

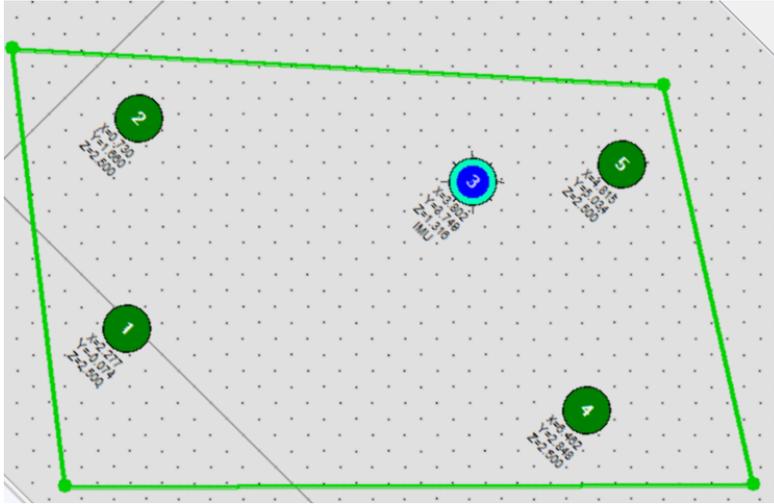


Figura 4.10 Disposición de las balizas estacionarias y el Hedgehog en la simulación 1.

Tabla 4.5 Distancias calculadas entre balizas estacionarias y Hedgehog y sus desviaciones estándar en la posición 2.

Balizas estacionarias	Distancia calculada a 3	Desviación estándar
		[cm]
1	2.061	0.556
2	1.780	0.369
4	4.723	0.496
5	4.580	0.397

En este caso, se puede observar que en líneas generales la estimación de la posición es peor, ya que aumenta el error de todas las distancias al Hedgehog calculadas.

Sin embargo, se puede advertir una ligera disminución en la dispersión de los datos, reduciendo un poco más la incertidumbre a la hora de estimar la posición.

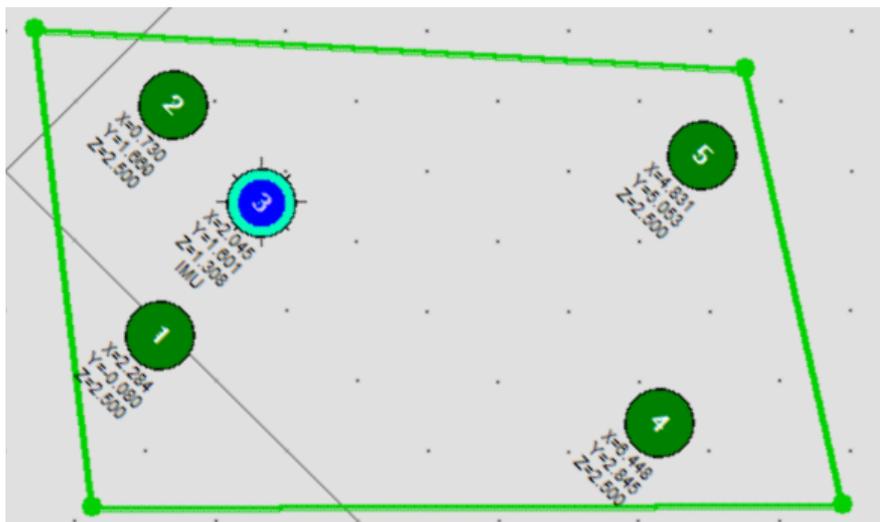


Figura 4.11 Disposición de las balizas estacionarias y el Hedgehog en la simulación 2.

4.5.2 Coordenadas de la baliza móvil

Cálculo de desplazamientos

En el siguiente experimento, manteniendo la disposición de las balizas estacionarias del apartado anterior, se colocará el Hedgehog en cuatro posiciones distintas de las cuales se conocen las distancias entre ellas en la realidad, por ejemplo, formando un rectángulo. El sistema calculará las coordenadas X e Y de la baliza móvil en cada una de esas cuatro posiciones y, posteriormente, se calculará matemáticamente la distancia entre ellas para poder compararlas con las medidas reales.

Para calcular las coordenadas del Hedgehog se seguirá una metodología similar a la del experimento anterior. Este se colocará estáticamente en uno de los vértices del rectángulo, el sistema calculará las coordenadas correspondientes a ese punto durante un intervalo de 2 minutos y se llevará a cabo una media de todos los valores obtenidos. Este proceso se repetirá para los tres vértices restantes.

Se ha observado con el experimento del apartado anterior, que existe un error a la hora de obtener las distancias entre la baliza móvil y las estacionarias. El objetivo de este test es comprobar si este se trata de un error intrínseco de los cálculos realizados por el sistema (error de offset). Dicho de otro modo, se desea verificar si este error se repite para las distintas medidas calculadas por el sistema dado que, en caso afirmativo, se debe tener en cuenta para los experimentos de campo.

Esta prueba no se basa en calcular distancias directamente desde las balizas, sino en estudiar los desplazamientos. Si se comete siempre el mismo error al calcular las coordenadas de la baliza móvil en una posición y otra, el desplazamiento real entre dos puntos debe ser similar a la diferencia entre las coordenadas de dichos puntos teniendo en cuenta ese offset.

A continuación, se muestra un plano de la disposición utilizada:

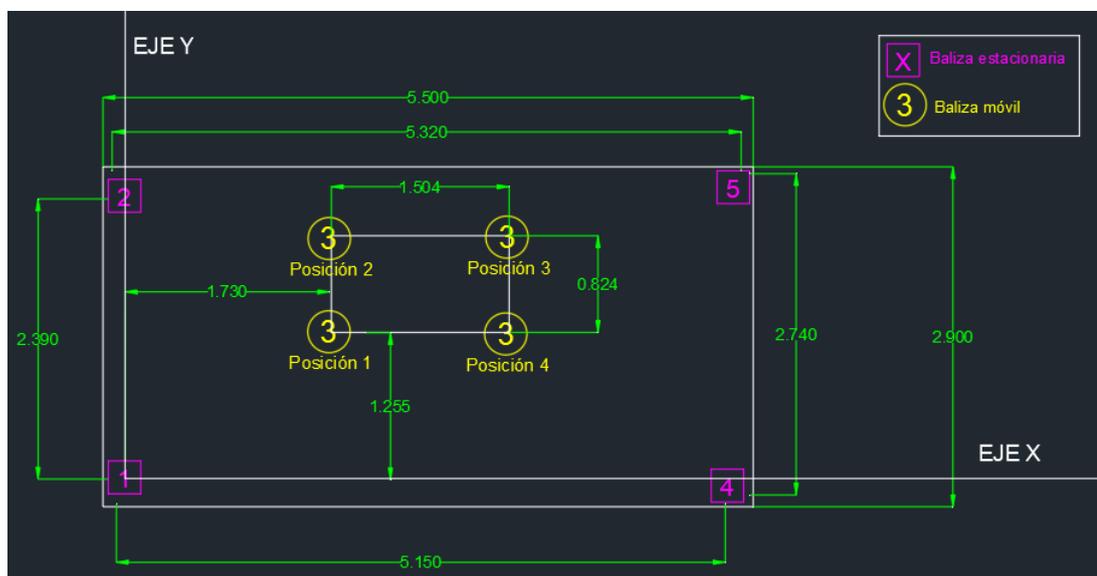


Figura 4.12 Disposición 2 de las balizas en el entorno de trabajo.

En la siguiente tabla se expresan las medias aritméticas de las coordenadas calculadas de las distintas posiciones que ha tomado la baliza móvil.

Cabe destacar que se ha escogido como sistema de referencia para estas coordenadas el que utiliza la aplicación de Dashboard y, como origen, la baliza estacionaria 1, tal como se muestra en la figura 4.13.

Tabla 4.6 Media aritmética de las coordenadas del Hedgehog.

Posición del Hedgehog	Coordenada X [m]	Coordenada Y [m]	Coordenada Z [m]
1	-2.095	0.018	0.951
2	-2.592	0.633	0.981
3	-3.741	-0.252	0.941
4	-3.293	-0.873	0.900

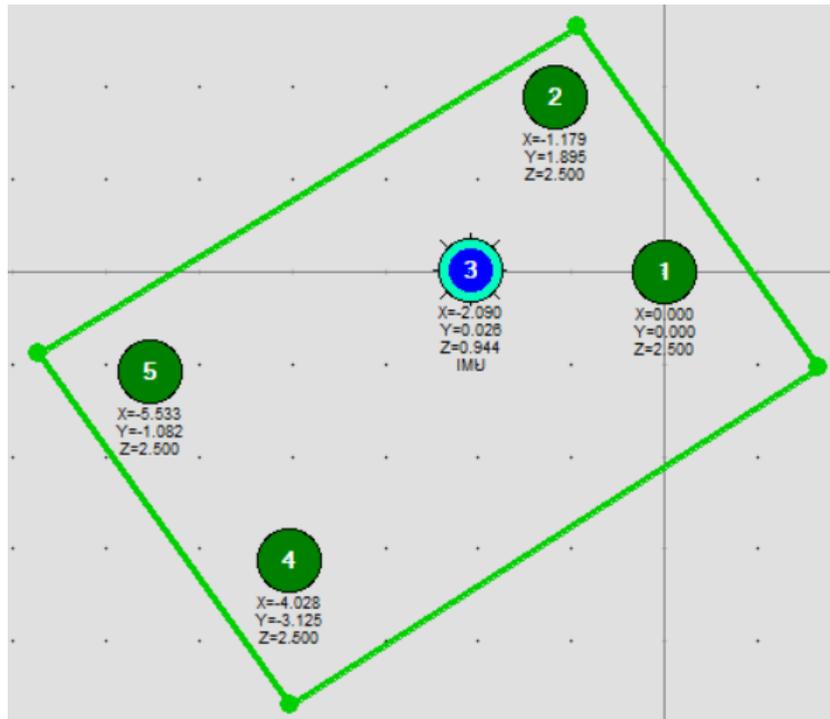


Figura 4.13 Sistema de referencia de la aplicación Dashboard.

Una vez halladas las coordenadas de cada posición de la baliza móvil, se calcula la distancia euclídea (**d**) entre ellas y se compara con el desplazamiento que ha tenido lugar en el mundo real, el cual es conocido y se indica en la figura 4.12.

$$d = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2} \tag{4.1}$$

Tabla 4.7 Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog.

Desplazamientos del Hedgehog	Distancia euclídea [m]	Desplazamiento real [m]	Error [cm]
1 - 2	0.791	0.824	3.3
2 - 3	1.450	1.504	5.4
3 - 4	0.766	0.824	5.8
4 - 1	1.493	1.504	1.1

En la tabla 4.7 se puede comprobar que existe un error entre el desplazamiento real del Hedgehog entre los 4 vértices del rectángulo y el calculado, el cual, en general, es menor que el obtenido en el

cálculo de las distancias entre las balizas estacionarias y la baliza móvil de los apartados anteriores.

Sin embargo, únicamente con esta prueba no se puede discernir con claridad que exista un error de offset.

Comparación de coordenadas

En este segundo test, se compararán directamente las coordenadas de la baliza móvil en la posición 1 del mapa 4.12, calculadas por el sistema y medidas directamente en el mundo real, tomando como origen la baliza estacionaria 1.

Como se puede observar en el plano de la figura 4.12 (mundo real) y en el mapa creado por la aplicación de Dashboard en la figura 4.13 (mundo creado por la aplicación), pese a que ambos tengan su origen en la baliza estacionaria 1, sus sistemas de referencia son diferentes. Más concretamente, uno está rotado un ángulo (θ) respecto al otro.

Por tanto, para poder comparar las coordenadas entre ellos, es necesario trabajar en el mismo sistema de referencia. A continuación, se muestra una imagen donde se representan ambos sistemas para facilitar la comprensión:

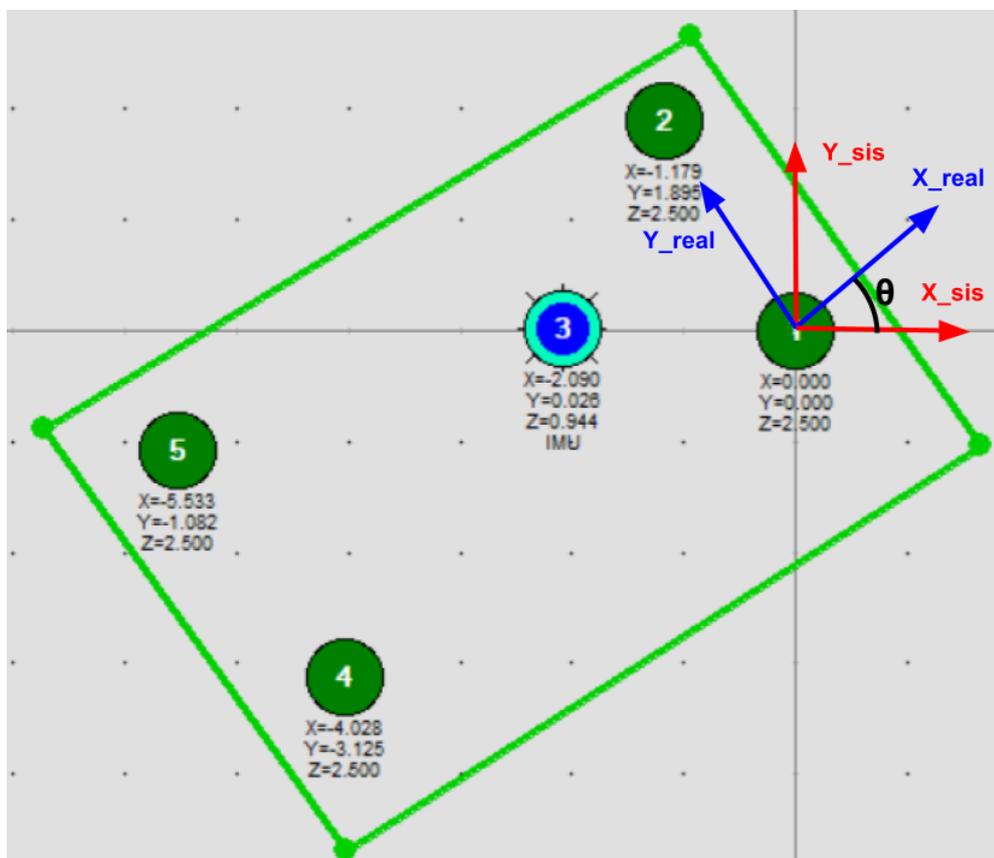


Figura 4.14 Sistemas de referencia de la aplicación y real.

En color azul se representa el sistema de referencia del mundo real, rotado un ángulo (θ) respecto al sistema de referencia de Dashboard, representado en rojo.

Lo primero de todo es obtener dicho ángulo utilizando la ecuación del coseno, la proyección sobre el eje Y de la baliza estacionaria 2 y la distancia entre dicha baliza y el origen de coordenadas.

$$Y_{\text{sist}} = 1.895 \quad m \quad (4.2)$$

$$D_{1-2} = \sqrt{(-1.179)^2 + (1.895)^2} = 2.232 \text{ m} \quad (4.3)$$

$$\cos \theta = \frac{Y_{\text{sist}}}{D_{1-2}} \rightarrow \theta = 31.90^\circ \quad (4.4)$$

Una vez obtenido el ángulo (θ), para obtener las coordenadas del Hedgehog en el sistema de referencia real se aplican las siguientes ecuaciones:

$$\begin{cases} X_{\text{real}} = X_{\text{sist}} * \cos \theta + Y_{\text{sist}} * \text{sen } \theta \\ Y_{\text{real}} = Y_{\text{sist}} * \cos \theta - X_{\text{sist}} * \text{sen } \theta \end{cases} \quad (4.5)$$

Por último, una vez que todos los puntos trabajan en los mismos ejes cartesianos, se comparan en la siguiente tabla las coordenadas medidas en la realidad con las calculadas:

Tabla 4.8 Coordenadas del Hedgehog reales y calculadas por el sistema.

	Real	Calculada	Error [cm]
EJE X [m]	1.730	1.769	3.9
EJE Y [m]	1.255	1.122	13.3

De la tabla 4.8 se puede extraer que desde la primera operación, el cálculo de las coordenadas de un punto, el sistema presenta errores del orden de los 5-10 centímetros. Esto afecta negativamente a las posteriores estimaciones que se realicen, como la obtención de distancias entre balizas, ya que dicho error se va acumulando e incrementando poco a poco.

Una vez analizados los resultados obtenidos en los test preliminares, se llega a la conclusión de que no se ha podido identificar un error evidente que se repita en los diferentes casos ni las posibles causas de este. Se analizarán posibles repeticiones en los experimentos de campo finales en busca de nuevas conclusiones.

5 Experimentos reales

A raíz de los resultados obtenidos en los test preliminares del apartado anterior, el objeto de este capítulo es indagar en la posibilidad de reducir el error que comete el sistema a la hora de estimar tanto la posición de la baliza móvil respecto a las balizas estacionarias como las distancias que existen entre ellas.

Entre las posibles modificaciones que se pueden llevar a cabo para optimizar dichos resultados se ha escogido cambiar la disposición de las balizas estacionarias.

Se ha observado en las pruebas anteriores que no existe un patrón claro en el error a la hora de estimar las posiciones. Por lo general, de las cuatro mediciones que realizan las balizas estacionarias, ya sea distancia entre ellas y al Hedgehog o coordenadas, dos de ellas tienen un mayor error que el resto.

En los experimentos que se realizarán a continuación, se transformará la distribución rectangular de las balizas fijas y se colocarán formando un cuadrado.

La finalidad de esta modificación es comprobar si, con una disposición uniforme de las balizas fijas, se obtiene un error similar en cada una de ellas.

Se ha llegado a esta conclusión debido a que existen dispositivos que trabajan de manera similar a este en los que los distintos emisores, al estar cerca unos de otros, se solapan sus rangos de acción, obteniendo un error mayor que con emisores alejados entre sí.

Es posible que en el caso de este sistema ocurra un efecto similar, es decir, las balizas que se encuentran en los lados de menor longitud del rectángulo podrían estar aumentando el error de las medidas que realiza el sistema.

Por otra parte, esta distribución cuadrada se llevará a cabo en un área de trabajo diferente, como es la zona de los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería. De esta forma, pueden eliminarse posibles problemas relacionados con el excesivo rebote de las ondas de ultrasonidos con las distintas superficies de la zona de trabajo de los test preliminares (muebles, mesas, sillas...), así como obstáculos que puedan interferir en la línea de visión entre balizas.

En vista a los resultados de estas simulaciones, los cuales se explican más adelante, se procede a dividir este capítulo en dos apartados: en el primero de ellos, la aplicación Dashboard elegirá automáticamente el origen de coordenadas del sistema. En el segundo apartado, se establecerá en la aplicación que la baliza estacionaria 4 sea el origen del sistema de referencia.

Conviene señalar que el origen de coordenadas de la zona de trabajo en el mundo real se situará en la baliza estacionaria 4 para todos los casos de estudio, tal y como se muestra en la figura 5.1.

5.1 Caso 1: Origen de coordenadas en Dashboard definido automáticamente

En este apartado, al igual que en los test preliminares 4.5.2, se utilizarán las coordenadas de las balizas calculadas por el sistema para, posteriormente, trabajar con los desplazamientos.

Como se explicó anteriormente, es más útil observar las distancias relativas entre distintas posiciones de la baliza móvil que calcular las distancias absolutas que existen entre Hedgehog y puntos fijos.

Se realizarán dos pruebas: desplazamientos en línea recta y desplazamientos creando un cuadrado.

5.1.1 Desplazamientos en línea recta

En la siguiente imagen, se observa la nueva disposición de las balizas estacionarias explicada en la introducción de este capítulo, así como las distintas posiciones que tomará la baliza móvil 3 para este primer test.

En este caso, se tomará como origen de coordenadas la baliza 4 (en el mundo real, no en la aplicación Dashboard), y el Hedgehog se desplazará verticalmente cada 2.20 metros, tomando 5 posiciones distintas.

Antes de continuar, cabe destacar que la distribución de las balizas estacionarias no conforman un cuadrado perfecto como se explicaba al inicio del capítulo, pero es suficiente para comprobar si existe una mejoría del error. Además, se debe tener en cuenta que, al estar medidas manualmente con una cinta métrica, las distancias reales entre balizas fijas están sobredimensionadas en un orden de 2, 3 centímetros aproximadamente.

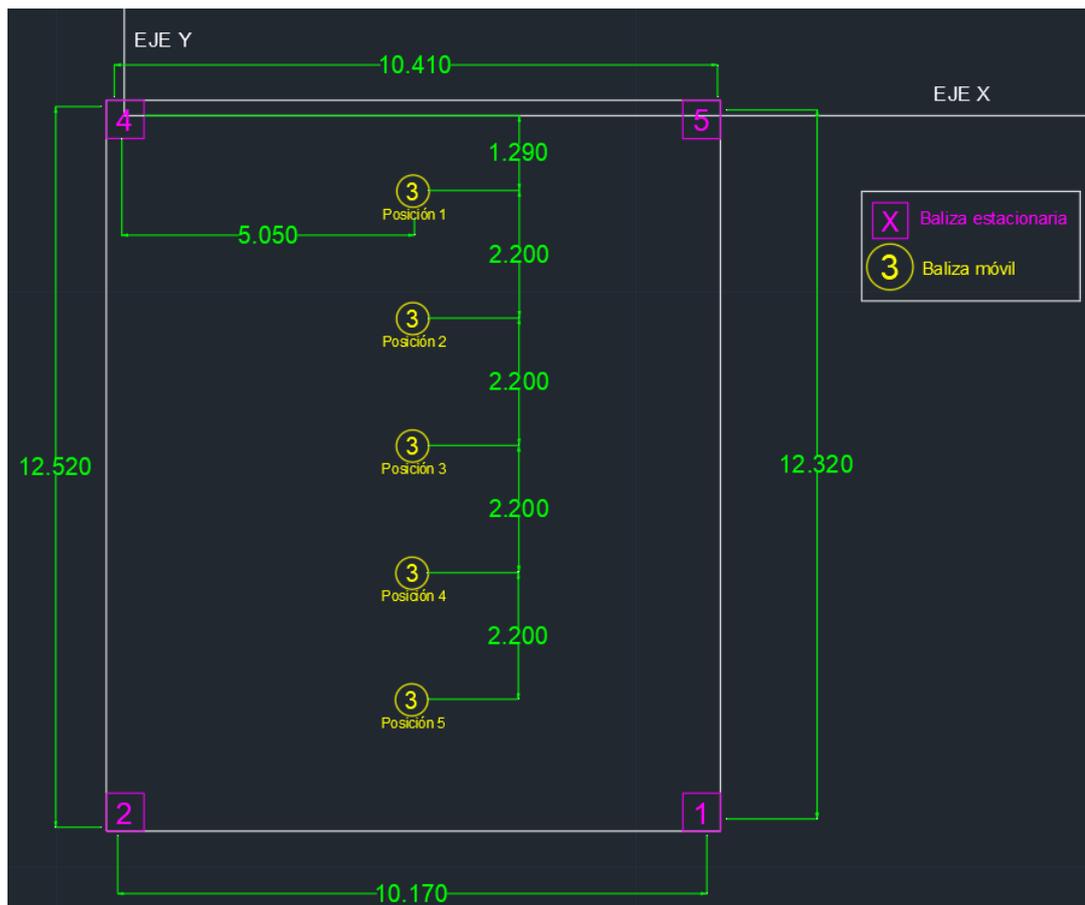


Figura 5.1 Disposición 1 de las balizas en el nuevo entorno de trabajo.

En la figura 5.2 se muestra una imagen de la nueva disposición en la aplicación de Dashboard, junto con la tabla de distancias entre balizas calculadas por el sistema.

Se puede observar que el origen definido automáticamente por el sistema no está centrado en ningún punto concreto. Esto no supone ningún problema dado que se trata simplemente de una traslación del sistema al completo, es decir, se mantienen las distancias relativas entre cada punto.

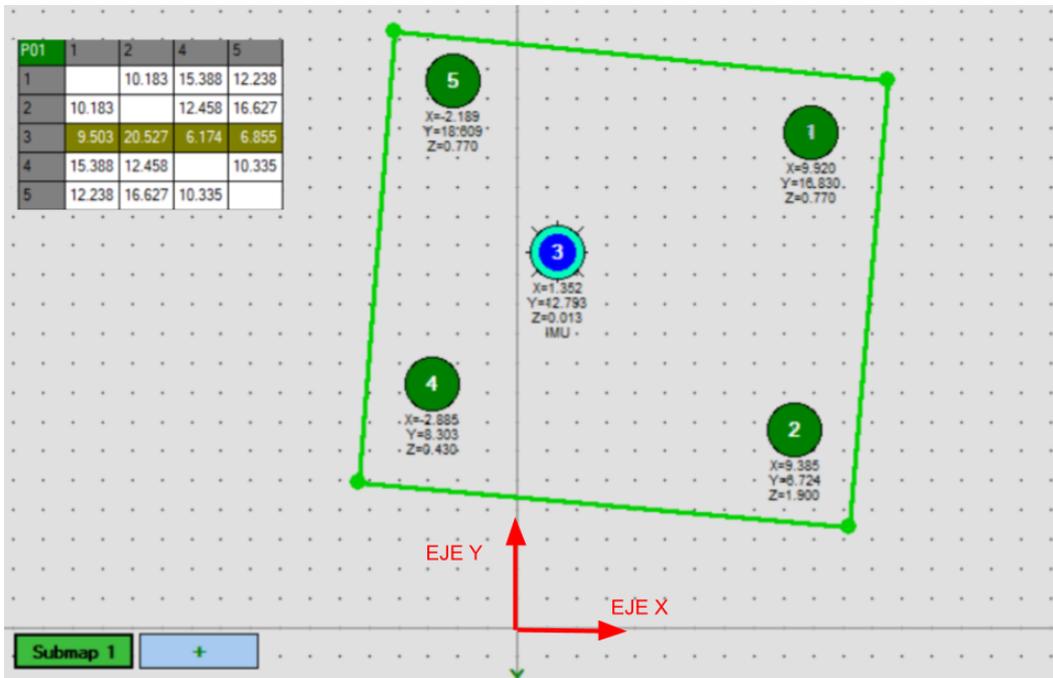


Figura 5.2 Disposición de las balizas en el nuevo entorno de trabajo según Dashboard.

Lo primero de todo será comprobar las diferencias existentes en el cálculo de las distancias entre balizas estacionarias:

Tabla 5.1 Distancias reales y calculadas entre balizas estacionarias.

Balizas estacionarias	Distancia real [m]	Distancia calculada [m]	Error de medición [cm]
1 - 2	10.170	10.183	1.3
2 - 4	12.520	12.458	6.2
4 - 5	10.410	10.335	7.5
5 - 1	12.320	12.352	3.2

Con la tabla 5.1 se puede comprobar que se realiza una muy buena estimación, teniendo en cuenta que la zona de trabajo actual (127 m² aproximadamente) es notablemente mayor que la de las pruebas preliminares (13 m² aproximadamente).

Además, considerando el factor de sobredimensionamiento mencionado, se obtiene un error más o menos uniforme en las cuatro distancias calculadas del orden de los 3 centímetros o inferior.

Una vez certificada la robustez de las balizas fijas, el siguiente paso consiste en estudiar las distintas posiciones que toma la baliza móvil. Para ello, se calculará por un lado la distancia de cada disposición del Hedgehog al origen del sistema (baliza 4) y, también, el desplazamiento relativo entre posiciones.

Distancia entre posiciones del Hedgehog y baliza 4

En este primer subapartado, se ha calculado la distancia en el mundo real a cada posición de la baliza 3 a partir de las coordenadas en el plano X-Y que se muestran en la figura 5.1.

La coordenada X de la baliza 3 será siempre 5.05 metros, mientras que la coordenada Y será -1.29 metros para el primer caso y se irá decrementando en 2.2 metros cada posición nueva que tome. Se trabajará en todo momento con valores absolutos.

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.2 Distancias reales y calculadas entre Hedgehog y baliza 4.

Posiciones baliza 3	Distancia real a 4	Distancia calculada a 4	Error de medición
	[m]	[m]	[cm]
1	5.210	5.207	0.3
2	6.139	6.174	3.5
3	7.608	7.563	4.5
4	9.368	9.306	6.2
5	11.283	11.219	6.4

De la tabla anterior se puede extraer que, por lo general, el orden del error es similar en las cinco posiciones calculadas, al contrario que ocurría en el primer área de trabajo, donde existían diferencias de errores que sobrepasaban los 10 centímetros.

Desplazamiento relativo entre posiciones del Hedgehog

En este segundo subapartado se estudiarán los desplazamientos relativos entre una posición y otra de la baliza móvil. En la realidad, esta traslación es de 2.2 metros en línea recta.

Para obtener el desplazamiento calculado por el sistema, se ha realizado el mismo procedimiento que en el apartado 4.5.2 en el que, en primer lugar, se obtienen las coordenadas de cada punto realizando una media aritmética y, posteriormente, se calcula la distancia euclídea entre ellos.

El estudio se centrará en el plano X-Y, dado que la baliza móvil está sobre el suelo y se supone que la coordenada Z tiene valor 0.

Tabla 5.3 Media aritmética de las coordenadas del Hedgehog.

Posición del Hedgehog	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z
	[m]	[m]	[m]
1	-0.768	13.384	-0.166
2	1.340	12.774	0.062
3	3.572	11.101	-2.287
4	5.544	12.055	-0.479
5	7.778	11.755	-0.101

A continuación, se muestra en la tabla las diferencias entre las distancias relativas

Tabla 5.4 Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog.

Desplazamientos del Hedgehog	Distancia euclídea	Desplazamiento real	Error
	[m]	[m]	[cm]
1 - 2	2.189	2.200	1.1
2 - 3	2.790	2.200	59
3 - 4	2.191	2.200	0.9
4 - 5	2.254	2.200	5.4

Como se puede observar en la tabla anterior, se obtiene una gran mejoría respecto a los primeros experimentos, con diferencias en la estimación que van de 1 a 5 centímetros. Además, presenta aproximadamente el mismo orden de error en tres de cuatro desplazamientos.

El gran error de 59 centímetros que aparece en el desplazamiento de la posición 2 a 3 se debe a la deficiente estimación que realiza el sistema de la coordenada Z de la baliza en la posición 3 (tabla 5.3).

El sistema detecta que la baliza se encuentra a más de 2 metros por debajo del nivel del suelo cuando realmente se encuentra sobre él. En el resto de posiciones no ocurre lo mismo puesto que la estimación de la coordenada Z se encuentra cercano a los 0 metros.

Como conclusión de este primer apartado de simulaciones, se puede extraer que se ha mejorado tanto la precisión de la estimación como su homogeneidad en las distintas posiciones calculadas.

El cambio a una distribución cuadrada de las balizas confirma la resolución de uno de los inconvenientes que aparecieron en los tests preliminares, en los que los pares de balizas más cercanos proporcionaban estimaciones con mayor grado de error.

5.1.2 Desplazamientos en cuadrado

En esta segunda simulación, se seguirá un procedimiento similar al del apartado anterior pero, en vez de realizar desplazamientos lineales en una única dirección, se llevarán a cabo 4 desplazamientos que recrean un cuadrado casi perfecto en el centro de la zona de trabajo, variando la posición tanto en el eje X como en el Y.

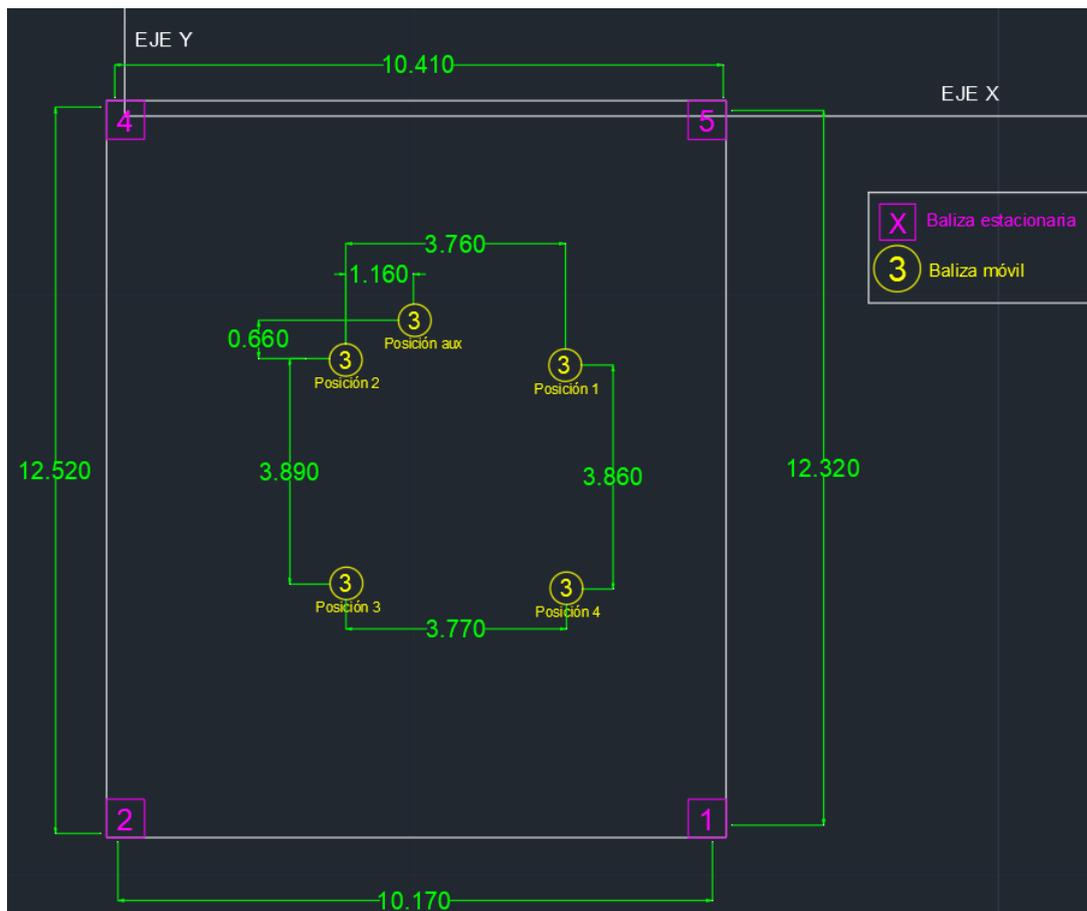


Figura 5.3 Disposición 2 de las balizas en el nuevo entorno de trabajo.

Las dimensiones del cuadrado real son conocidas y el origen de coordenadas en el espacio real se mantiene en la baliza estacionaria 4. Además, se va a utilizar como punto auxiliar de referencia la posición 2 del Hedgehog de la simulación anterior, para poder calcular posteriormente la distancia a los vértices del cuadrado. Todo lo anterior se muestra en el plano de la figura 5.3.

En esta simulación se va a estudiar la distancia entre la posición auxiliar y cada una de las posiciones de la baliza móvil, así como los desplazamientos relativos que se realizan.

Para ello, será necesario calcular de nuevo las coordenadas X, Y y Z de la baliza 3. Los resultados se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 5.5 Media aritmética de las coordenadas del Hedgehog.

Posición del Hedgehog	Coordenada X [m]	Coordenada Y [m]	Coordenada Z [m]
1	2.341	15.194	-0.049
2	1.786	11.568	0.118
3	5.585	10.846	-0.027
4	6.128	14.578	-0.089

Distancia entre posiciones del Hedgehog y posición auxiliar

Tabla 5.6 Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog y la posición auxiliar.

Posiciones del Hedgehog	Distancia calculada a <i>aux</i> [m]	Distancia real a <i>auxl</i> [m]	Error [cm]
1	2.619	2.682	6.3
2	1.286	1.335	4.9
3	4.662	4.696	3.4
4	5.117	5.193	7.6

Observando los resultados del error de la distancia entre la posición auxiliar y las posiciones de la baliza móvil y teniendo en cuenta un factor de sobredimensionamiento de unos 2 centímetros aproximadamente, se verifica la uniformidad ya mencionada anteriormente en la precisión de las diferentes medidas. Para los cuatro vértices distintos del cuadrado se consigue un error del orden de los 4 centímetros aproximadamente.

Desplazamiento relativo entre posiciones del Hedgehog

A continuación, haciendo uso de las coordenadas de cada punto, se calcula la distancia euclídea entre los distintos puntos que forman el cuadrado, es decir, los desplazamientos relativos a de la baliza móvil:

Tabla 5.7 Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog.

Desplazamientos del Hedgehog	Distancia euclídea [m]	Desplazamiento real [m]	Error [cm]
1 - 2	3.668	3.760	9.2
2 - 3	3.867	3.890	2.3
3 - 4	3.771	3.770	0.1
4 - 1	3.837	3.860	2.3

Como se puede comprobar en la tabla 5.7, salvo en el desplazamiento de la baliza móvil de la posición 1 a 2, el error en la estimación es muy reducido, obteniendo valores del orden de 2 centímetros o incluso de milímetros.

Esto confirma una vez más la mejora del funcionamiento del sistema con el cambio de distribución de las balizas. Utilizando esta nueva zona de trabajo, más amplia y con menos obstáculos entre balizas, y permitiendo a la aplicación del sistema escoger automáticamente el origen de coordenadas, se consigue un aumento considerable de la precisión. Asimismo, se homogeniza prácticamente el orden del error para los distintos puntos y distancias calculadas en cada caso, solucionando la disparidad de resultados que se obtenían en las pruebas preliminares.

5.2 Caso 2: Origen de coordenadas en Dashboard definido en la baliza 4

Como se explicó al inicio del capítulo, la siguiente simulación consistirá en repetir los experimentos del apartado anterior pero estableciendo en la aplicación Dashboard el origen del sistema de referencia en la baliza estacionaria 4, al igual que en el sistema real.

Los planos de la disposición de balizas de las figuras 5.1 y 5.3 se mantienen igual. Únicamente se modifica el mapa de la zona de trabajo en la aplicación Dashboard, tal y como se muestra en la siguiente figura:

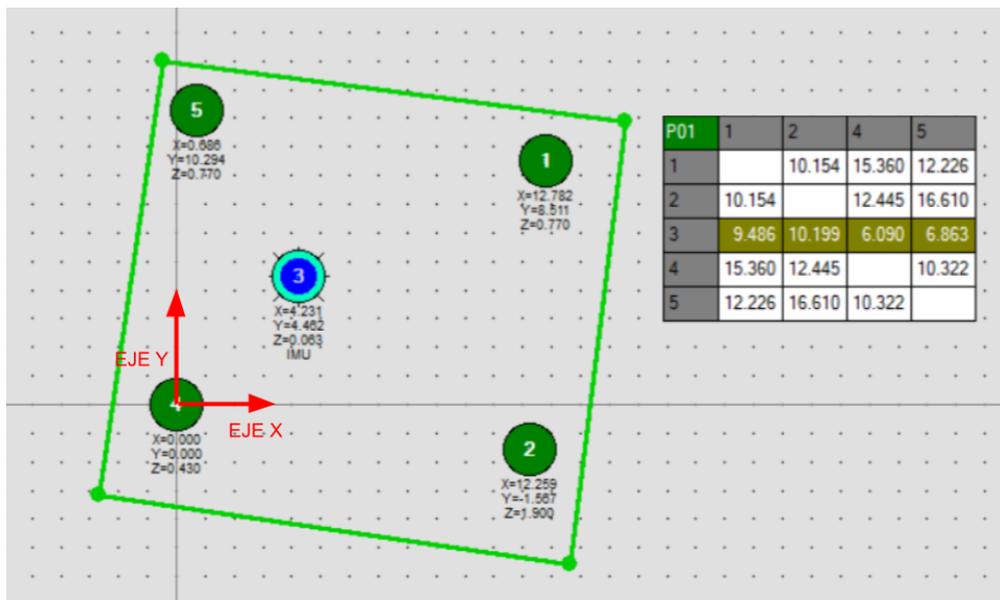


Figura 5.4 Disposición de las balizas en el nuevo entorno de trabajo según Dashboard.

Repitiendo el procedimiento anterior, lo primero será comparar las distancias entre balizas estacionarias:

Tabla 5.8 Distancias reales y calculadas entre balizas estacionarias.

Balizas estacionarias	Distancia real [m]	Distancia calculada [m]	Error de medición [cm]
1 - 2	10.170	10.154	1.6
2 - 4	12.520	12.445	7.5
4 - 5	10.410	10.322	8.8
5 - 1	12.320	12.226	9.4

A la vista de los resultados de la tabla 5.8, se obtienen valores del error un poco más elevados que en el mismo experimento del Caso 1. Pese a esto y teniendo en cuenta además el sobredimensionamiento ya comentado, se considera una buena estimación de las posiciones de las balizas estacionarias.

A continuación, se repiten los experimentos relacionados con los desplazamientos de la baliza móvil.

5.2.1 Desplazamientos en línea recta

Dado que los procedimientos ya se han explicado en el Caso 1, para que no resulte repetitivo se procederá directamente a la muestra de resultados y conclusiones de cada experimento.

Distancia entre posiciones del Hedgehog y baliza 4

En la tabla siguiente se muestra la distancia desde la baliza 4, origen de coordenadas en la realidad y ahora también en la aplicación Dashboard, hasta cada posición que toma el Hedgehog a lo largo del eje Y.

Tabla 5.9 Distancias reales y calculadas entre Hedgehog y baliza 4.

Posiciones baliza 3	Distancia real a 4 [m]	Distancia calculada a 4 [m]	Error de medición [cm]
1	5.210	5.185	2.5
2	6.139	6.090	4.9
3	7.608	7.560	4.8
4	9.368	9.278	9

De nuevo, el aumento del error es mínimo, por lo que se mantiene la precisión del sistema. Además, se puede comprobar que el orden del error se mantiene para los 4 casos.

Desplazamiento relativo entre posiciones del Hedgehog

En el segundo subapartado, se calcularán las coordenadas de las posiciones que tome la baliza 3 para hallar los desplazamientos relativos.

Cabe recordar que en esta prueba se desplaza el Hedgehog a lo largo del eje Y cada 2.2 metros. Lo primero de todo será obtener las coordenadas X, Y y Z:

Tabla 5.10 Media aritmética de las coordenadas del Hedgehog.

Posición del Hedgehog	Coordenada X [m]	Coordenada Y [m]	Coordenada Z [m]
1	3.000	3.384	-2.112
2	4.207	4.451	0.009
3	6.378	4.090	0.088
4	8.575	2.453	-2.141

A continuación, se muestra en la tabla las diferencias entre las distancias relativas:

En este caso, se puede observar en la tabla 5.11 que, pese a tener una precisión del 100% en el desplazamiento de la posición 2 a la 3, el error en el resto de traslaciones es de más de medio metro, un suceso inaceptable para un sistema de localización de interiores.

El motivo de esta gran imprecisión de nuevo se debe a los valores de la coordenada Z del Hedgehog en las posiciones 1 y 4 (tabla 5.10), donde el sistema sitúa a la baliza a más de 2 metros por debajo del suelo.

Tabla 5.11 Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog.

Desplazamientos del Hedgehog	Distancia euclídea [m]	Desplazamiento real [m]	Error [cm]
1 - 2	1.611	2.200	58.9
2 - 3	2.200	2.200	0.0
3 - 4	2.740	2.200	54

En resumen, en este primer apartado, al definir en la aplicación del sistema el origen de coordenadas en una de las balizas, el error ha aumentado.

El sistema con esta modificación del origen de coordenadas continúa calculando correctamente las distancias entre balizas estacionarias, sin embargo, la precisión con la que estima los movimientos del Hedgehog empeora enormemente. No se ha encontrado una explicación a este suceso.

Resulta de interés que, pese a realizar una estimación muy deficiente de la coordenada Z en dos de las cuatro posiciones que toma la baliza móvil, la distancia que calculada por sistema al origen de coordenadas mantiene una buena precisión, tal como se observa en la tabla 5.9.

5.2.2 Desplazamientos en cuadrado

A continuación, se repetirá la simulación donde los desplazamientos de la baliza móvil recrean un cuadrado en el centro del área de trabajo. Al igual que en el primer test, el plano real de la figura 5.3 se mantiene, modificando únicamente el origen del sistema en la aplicación Dashboard.

En primer lugar, se obtienen de nuevo las coordenadas X, Y y Z de la baliza 3:

Tabla 5.12 Media aritmética de las coordenadas del Hedgehog.

Posición del Hedgehog	Coordenada X [m]	Coordenada Y [m]	Coordenada Z [m]
1	5.224	6.886	0.064
2	4.650	3.245	0.213
3	8.531	1.295	-1.711
4	8.967	6.289	-0.135

Distancia entre posiciones del Hedgehog y posición auxiliar

A partir de los datos de los datos anteriores y conociendo las coordenadas reales de la posición auxiliar respecto a las diferentes posiciones del Hedgehog, se puede verificar el error de la distancia:

Tabla 5.13 Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog y la posición auxiliar.

Posiciones del Hedgehog	Distancia calculada a <i>aux</i> [m]	Distancia real a <i>aux</i> [m]	Error [cm]
1	2.639	2.682	4.3
2	1.285	1.335	5
3	5.353	4.696	65.7
4	5.103	5.193	9

Pese a tener un error inferior a los 10 centímetros en tres de las cuatro posiciones estudiadas, aparece de nuevo una inexactitud demasiado elevada en la posición 3 que sobrepasa los 60 centímetros.

Al igual que ha ocurrido en casos anteriores, este fallo está relacionado directamente con la coordenada Z de dicha posición, la cual se ha estimado en -1.7 metros (tabla 5.12).

Desplazamiento relativo entre posiciones del Hedgehog

Por último, se repetirá el estudio de los desplazamientos relativos entre vértices del cuadrado.

Tabla 5.14 Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog.

Desplazamientos del Hedgehog	Distancia euclídea [m]	Desplazamiento real [m]	Error [cm]
1 - 2	3.686	3.760	7.4
2 - 3	4.343	3.890	45.3
3 - 4	5.013	3.770	124.3
4 - 1	3.790	3.860	7

Comparando los resultados de la tabla 5.14 con los de la tabla 5.14, se observa un aumento inadmisibles del error.

De los cuatro desplazamientos que se han realizado, los dos que presentan mayor precisión son los que van de las posiciones 1 a 2 y 4 a 1. Precisamente, los puntos 1 y 4 son los que tienen un valor de la coordenada Z cercano al nivel del suelo, 0.064 y -0.135 metros respectivamente.

Por su parte, los desplazamientos que contienen valores de error entre 0.5 y 1.20 metros aproximadamente involucran a las posiciones 3 y 4 de la baliza móvil, las cuales presentan las peores estimaciones en el eje Z.

Con este apartado se llega a la conclusión de que, pese a obtener en los primeros experimentos precisiones similares a los del caso 1, por lo general, definir el origen del sistema de referencia en la aplicación Dashboard en una de las balizas no solo empeora el error, sino que además provoca que se pierda esa uniformidad del orden del error que se buscaba al cambiar la disposición de las balizas.

5.3 Repetición de experimentos

En vista de los deficientes resultados obtenidos en el Caso 2, este apartado se centra en realizar una segunda prueba bajo las mismas condiciones, para verificar si dichos errores persisten.

Tabla 5.15 Distancias reales y calculadas entre balizas estacionarias.

Balizas estacionarias	Distancia real [m]	Distancia calculada [m]	Error de medición [cm]
1 - 2	10.170	10.201	3.1
2 - 4	12.520	12.507	1.3
4 - 5	10.410	10.406	0.4
5 - 1	12.320	12.275	4.5

En esta simulación, la disposición de las balizas tanto en el entorno de trabajo real como en la aplicación Dashboard se mantiene igual que en el Caso 2. Se ha llevado a cabo un reset de todos los dispositivos que intervienen en el sistema, para evitar posibles errores derivados de una mala configuración interna de estos.

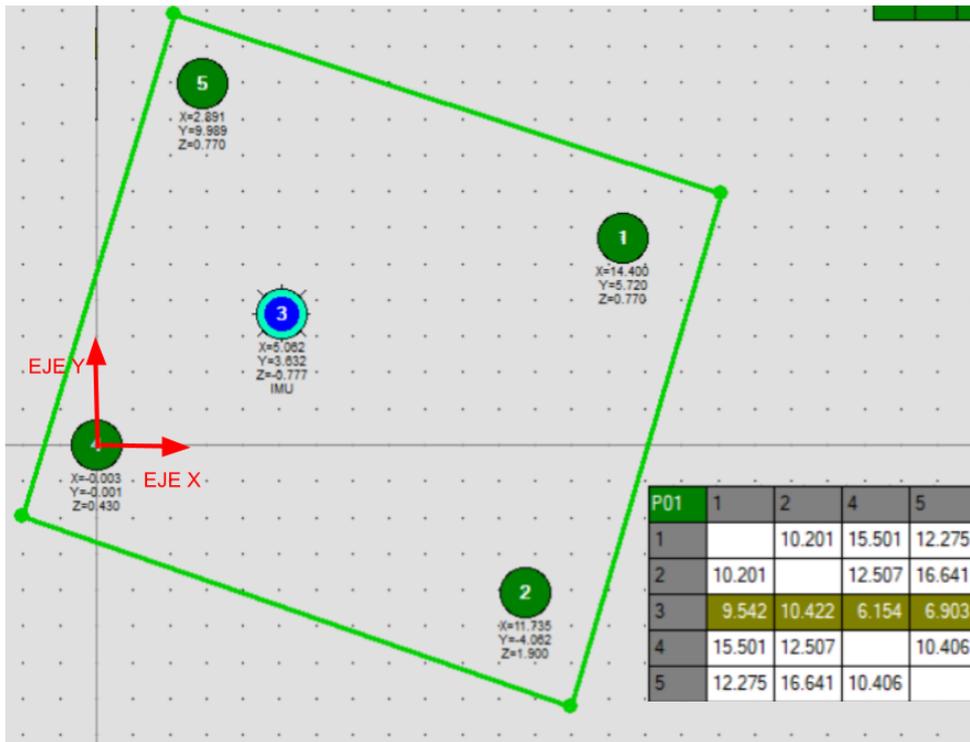


Figura 5.5 Disposición de las balizas en el nuevo entorno de trabajo según Dashboard.

Al restablecer el funcionamiento de las balizas y el módem, el área de trabajo de Dashboard se modifica mínimamente, tal y como se muestra en la imagen anterior y en la tabla 5.15, donde se analizan las distancias entre balizas estacionarias.

A la vista de los valores obtenidos en dicha tabla, los resultados son excelentes. En los dos casos anteriores se han obtenido buenas estimaciones de la distancia relativa entre balizas estacionarias pero, en esta ocasión, se ha conseguido la mejor precisión de todas, con valores del error por debajo de los 4 centímetros (teniendo en cuenta el sobredimensionamiento) en las cuatro mediciones.

Dado que de los distintos tipos de experimentos que se han realizado este no presentaba malos resultados en ninguno de los apartados anteriores, se proseguirá con el resto de pruebas para confirmar la posible mejora.

A continuación, se llevan a cabo los experimentos relacionados con los desplazamientos de la baliza móvil.

5.3.1 Desplazamientos en línea recta

En primer lugar, los desplazamientos en los que se modifica únicamente la coordenada Y de la baliza móvil 3.

Distancia entre posiciones del Hedgehog y baliza 4

En esta prueba se analiza la distancia entre el origen de coordenadas del sistema (baliza estacionaria 4) y la baliza 3 en distintas posiciones.

Al igual que ocurría con las distancias entre balizas estacionarias, en esta simulación se obtiene una mejora de la precisión, consiguiendo una reducción de unos 3 centímetros aproximadamente respecto a los mismos experimentos de los Casos 1 y 2.

Tabla 5.16 Distancias reales y calculadas entre Hedgehog y baliza 4.

Posiciones baliza 3	Distancia real a 4	Distancia calculada a 4	Error de medición
	[m]	[m]	[cm]
1	5.210	5.234	2.4
2	6.139	6.154	1.5
3	7.608	7.618	1
4	9.368	9.376	0.8

Desplazamiento relativo entre posiciones del Hedgehog

En este apartado, se calculan las coordenadas de las posiciones donde se ha situado la baliza móvil para poder analizar los desplazamientos relativos:

Tabla 5.17 Media aritmética de las coordenadas del Hedgehog.

Posición del Hedgehog	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z
	[m]	[m]	[m]
1	2.904	4.332	-0.247
2	5.053	3.538	-0.360
3	7.084	2.720	-0.236
4	9.163	1.933	-0.149

Se analizan las diferencias entre las distancias relativas en la siguiente tabla:

Tabla 5.18 Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog.

Desplazamientos del Hedgehog	Distancia euclídea	Desplazamiento real	Error
	[m]	[m]	[cm]
1 - 2	2.291	2.200	9.1
2 - 3	2.190	2.200	1
3 - 4	2.223	2.200	2.3

Se puede observar en la tabla 5.18 que se retoman los resultados coherentes que se obtuvieron en el Caso 1. Es importante recalcar que, pese a obtener en el primer desplazamiento un error entorno a los 9 centímetros, se han logrado reducir esas diferencias de más de medio metro que existían en el Caso 2.

Como conclusión de este primer set de experimentos, se puede resaltar la gran mejoría de todos los resultados respecto al Caso 2, no solo en la precisión, sino también en la homogeneidad de los valores obtenidos.

Esto se debe principalmente al cálculo que realiza el sistema de la coordenada Z del Hedgehog, tal como se indica en la tabla 5.17. Se puede comprobar que, a pesar de tener valores del orden de los 20 centímetros aproximadamente por debajo del suelo, esto se aleja mucho de los 2 metros que se obtenían en el apartado anterior.

5.3.2 Desplazamientos en cuadrado

Por último, se repetirán los experimentos para el desplazamiento de la baliza formando un cuadrado.

Como se ha explicado anteriormente, primero de todo se obtienen las coordenadas X, Y y Z del Hedgehog para poder calcular más adelante la distancia euclídea entre las distintas posiciones.

En la tabla 5.19 se exponen las coordenadas calculadas por el sistema:

Tabla 5.19 Media aritmética de las coordenadas del Hedgehog.

Posición del Hedgehog	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z
	[m]	[m]	[m]
1	6.576	5.678	-0.155
2	5.260	2.189	0.067
3	8.848	0.785	-0.162
4	10.181	4.335	-0.283

Distancia entre posiciones del Hedgehog y posición auxiliar

Una vez obtenidos los datos de las posiciones del Hedgehog, se calcula la distancia de cada una de ellas a la posición auxiliar.

Tabla 5.20 Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog y la posición auxiliar.

Posiciones del Hedgehog	Distancia calculada a aux	Distancia real a aux	Error
	[m]	[m]	[cm]
1	2.627	2.682	5.5
2	1.366	1.335	3.1
3	4.688	4.696	0.8
4	5.190	5.193	0.3

Al igual que sucedía con el set de experimentos del apartado anterior, se vuelve a obtener una gran mejora de la precisión, con valores del orden de 5 centímetros e incluso de milímetros.

Desplazamiento relativo entre posiciones del Hedgehog

Por último, se analizan las distancias entre los desplazamientos relativos del cuadrado.

Tabla 5.21 Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog.

Desplazamientos del Hedgehog	Distancia euclídea	Desplazamiento real	Error
	[m]	[m]	[cm]
1 - 2	3.729	3.760	3.1
2 - 3	3.853	3.890	3.7
3 - 4	3.792	3.770	2.2
4 - 1	3.847	3.860	1.3

Con los resultados de la tabla 5.21 se confirma definitivamente la gran mejora en términos de precisión que ha supuesto esta segunda prueba, repetición del Caso 2.

Además, en este último experimento en concreto, se ha logrado disminuir el error por debajo de los 4 centímetros para los 4 desplazamientos que se han realizado, obteniendo los resultados más precisos y uniformes de los tres casos que se han desempeñado.

6 Conclusiones y desarrollos futuros

6.1 Conclusiones

En esta sección se recogen las conclusiones deducidas a partir de todos los experimentos que se han llevado a cabo.

- En primer lugar se analizará la disposición de las balizas y el entorno. Después de comparar los test preliminares y de campo se ratifica la importancia de escoger el área de trabajo adecuada, del mismo modo que la colocación correcta de las balizas estacionarias.

El efecto de transformar la estructura rectangular de las pruebas preliminares a la configuración cuadrada de los experimentos de campo se ha visto reflejado en la obtención de órdenes de error más uniformes entre distintas posiciones de un mismo experimento. A la hora de localizar un dispositivo móvil en el interior de un recinto, no es práctico que se realice una muy buena estimación únicamente de la mitad de las posiciones que calcula el sistema puesto que, si se desea por ejemplo que un robot desarrolle un camino determinado, aparecerán errores a lo largo del trayecto, impidiendo que el dispositivo alcance su destino.

Dentro de una misma simulación es preferible obtener un error más parejo aunque incremente su valor a lo largo de las distintas posiciones que alcance la baliza móvil ya que, posteriormente, se puede implementar un filtro que lo reduzca y aumente la robustez del sistema.

- En lo relativo a la colocación de cada baliza estacionaria han existido diferencias entre los test preliminares y los experimentos reales. En el primer caso, se colocaron todas adheridas a la pared, es decir, con la base en posición vertical. En el segundo caso, todas las balizas se dispusieron sobre una superficie horizontal.

La ventaja de la primera disposición es que, al estar sobre paredes, las balizas podían alcanzar una altura mayor, además de disponer de un sensor que apunta en todo momento en la dirección vertical, es decir, en el eje Z. Sin embargo, al estar colocadas sobre esquinas, uno o dos de los cinco sensores de cada baliza siempre quedaba inutilizado, disminuyendo la fuerza de la señal ultrasónica.

Por su parte, la segunda distribución resolvía este problema en detrimento, a veces, del cálculo de la coordenada Z, puesto que ningún sensor del dispositivo apuntaba directamente al suelo.

- Centrando ahora el foco en los experimentos reales, se va a analizar la elección en la aplicación Dashboard del origen del sistema. Como se explicó en el Capítulo 5, el software del sistema SSS-MP-3D permite al usuario definir un origen de coordenadas en una baliza concreta si lo desea. En caso contrario, es el propio software el que se encarga de seleccionar un origen en función de la configuración predeterminada del sistema y su lógica de programación interna.

Después de realizar los experimentos de los Casos 1 y 2, apartados 5.1 y 5.2 respectivamente, a priori y de forma incoherente, parecía que definir una baliza estacionaria como origen de coordenadas del sistema suponía un gran incremento del error, llegando a obtener valores superiores a 50 centímetros e incluso superando el metro en alguna ocasión. Como se comentó en la introducción de este trabajo, esta inexactitud es inaceptable en aplicaciones relacionadas con la localización de dispositivos en interiores debido al gran número de problemas que esto puede acarrear.

Este problema derivaba principalmente del error que cometía el sistema al estimar la coordenada Z de la baliza móvil, la cual la situaba en muchas ocasiones un par de metros por debajo del nivel del suelo cuando, realmente, se encontraba sobre este.

Resulta llamativo que pese a presentar una gran diferencia con la coordenada Z real de la baliza móvil, el cálculo que llevaba a cabo el sistema para obtener la distancia de esta al origen de coordenadas (baliza 4) era correcto. Sin embargo, la estimación de los desplazamientos relativos era mucho más desfavorable.

Gracias a la repetición del Caso 2 en el apartado 5.3, se solventan las dudas generadas en dichos experimentos. En este apartado se demuestra no solo la incongruencia que significaba el aumento desproporcionado del error por el simple hecho de que el usuario definiese o no un origen de coordenadas, sino que además se pueden obtener mejores resultados incluso, tanto en precisión como en uniformidad.

Se verifica por tanto que el Caso 2 se trataba de una simulación defectuosa a la hora de estimar las posiciones entre balizas dado que, al repetir los experimentos bajo las mismas condiciones, se obtuvieron valores mucho más cercanos a la realidad. Además, estos valores se aproximan en varias ocasiones a la precisión indicada por el fabricante, la cual se estimaba en ± 2 centímetros en un rango de 30 metros.

6.2 Desarrollos futuros

En esta última sección se exponen algunas ideas que puedan optimizar el funcionamiento del sistema.

Tras analizar los resultados y obtener las conclusiones en la sección anterior, se evidencia claramente que la correcta colocación y distribución de las balizas son elementos cruciales y fundamentales para un buen funcionamiento del sistema.

Una posible mejora en este aspecto sería una instalación híbrida entre las dos zonas de trabajo que se han utilizado, en cuanto al posicionamiento de las balizas sobre una superficie se refiere. Es decir, como se explicaba en el capítulo anterior, en el primer área de trabajo las balizas se colocaron verticalmente, mientras que en la segunda zona se distribuyeron horizontalmente. Dado que ambas presentaban ventajas e inconvenientes, sería ideal llegar a un punto medio donde destaquen los puntos fuertes y se reduzcan los efectos negativos de ambos casos.

Para ello, las balizas podrían instalarse verticalmente adheridas a una barra o mástil y colocarlas por el entorno donde se desea trabajar. De esta forma, ninguno de los cinco sensores de cada baliza quedaría inhabilitado, además de poder medir sin problemas a lo largo de los tres ejes coordenados.

Otra posibilidad sería la instalación de las balizas directamente en el techo, siempre y cuando se garantice que se sitúan alejadas de esquinas y paredes que interfieran con los sensores de ultrasonidos. Sin embargo, esta opción depende mucho de las características de la zona de trabajo.

Situando el foco ahora en ensayos fuera del alcance de este proyecto se pueden llevar a cabo experimentos dinámicos. Gracias a que la aplicación Dashboard es capaz de guardar en tiempo real el recorrido que va efectuando el Hedgehog, se podría comprobar si dichos desplazamientos se corresponden con la realidad.

En el caso de tener otro set SSS-MP-3D, se podría poner en práctica todo lo relacionado con la creación de distintos submapas y zonas de servicio y Handover, tal y como se explicaba en el Capítulo 4. De esta forma, se podría eliminar la limitación de estimar la posición de la baliza móvil dentro de un única zona, pudiendo extender la localización de un robot móvil, por ejemplo, a lo largo de diferentes habitaciones y pasillos.

Índice de Figuras

2.1	Posicionamiento de dispositivo móvil mediante el método AoA	6
2.2	Construcción de un mapa utilizando sensores LiDAR	9
2.3	Ejemplo de simulación de una trayectoria circular utilizando metodología SLAM con 3 Landmarks	10
2.4	Tratamiento de memoria en RTAB-Map	12
2.5	Construcción de un mapa utilizando odometría visual	13
2.6	Sistema y cámaras OptiTrack	15
3.1	Sistema Starter Set Super-MP-3D	17
3.2	Balizas y Modem	18
3.3	Tecnologías del sistema SSS-MP-3D	19
4.1	Posiciones de los interruptores DIP para la carga de batería de la baliza	21
4.2	Posiciones de los interruptores DIP para la inicialización de la baliza	22
4.3	Submapa unidimensional con una baliza estacionaria y la baliza Hedgehog	23
4.4	Submapa bidimensional único a partir de 2 balizas estacionarias y el Hedgehog	23
4.5	Mapa formado por dos submapas bidimensional a partir de 4 balizas estacionarias y el Hedgehog	24
4.6	Submapa tridimensional a partir de 4 balizas estacionarias y el Hedgehog	24
4.7	Ejemplo de zonas de servicio y Handover	25
4.8	Ejemplo de la trayectoria del Hedgehog en un mapa tridimensional, junto con la tabla de distancias entre balizas	26
4.9	Disposición 1 de las balizas en el entorno de trabajo	27
4.10	Disposición de las balizas estacionarias y el Hedgehog en la simulación 1	29
4.11	Disposición de las balizas estacionarias y el Hedgehog en la simulación 2	29
4.12	Disposición 2 de las balizas en el entorno de trabajo	30
4.13	Sistema de referencia de la aplicación Dashboard	31
4.14	Sistemas de referencia de la aplicación y real	32
5.1	Disposición 1 de las balizas en el nuevo entorno de trabajo	36
5.2	Disposición de las balizas en el nuevo entorno de trabajo según Dashboard	37
5.3	Disposición 2 de las balizas en el nuevo entorno de trabajo	39
5.4	Disposición de las balizas en el nuevo entorno de trabajo según Dashboard	41
5.5	Disposición de las balizas en el nuevo entorno de trabajo según Dashboard	45

Índice de Tablas

4.1	Distancias reales y calculadas entre balizas estacionarias	27
4.2	Distancias reales y calculadas entre balizas estacionarias y Hedgehog	28
4.3	Distancias calculadas entre balizas estacionarias y Hedgehog y sus desviaciones estándar	28
4.4	Distancias reales y calculadas entre balizas estacionarias y Hedgehog en la posición 2	28
4.5	Distancias calculadas entre balizas estacionarias y Hedgehog y sus desviaciones estándar en la posición 2	29
4.6	Media aritmética de las coordenadas del Hedgehog	31
4.7	Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog	31
4.8	Coordenadas del Hedgehog reales y calculadas por el sistema	33
5.1	Distancias reales y calculadas entre balizas estacionarias	37
5.2	Distancias reales y calculadas entre Hedgehog y baliza 4	38
5.3	Media aritmética de las coordenadas del Hedgehog	38
5.4	Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog	38
5.5	Media aritmética de las coordenadas del Hedgehog	40
5.6	Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog y la posición auxiliar	40
5.7	Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog	40
5.8	Distancias reales y calculadas entre balizas estacionarias	41
5.9	Distancias reales y calculadas entre Hedgehog y baliza 4	42
5.10	Media aritmética de las coordenadas del Hedgehog	42
5.11	Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog	43
5.12	Media aritmética de las coordenadas del Hedgehog	43
5.13	Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog y la posición auxiliar	43
5.14	Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog	44
5.15	Distancias reales y calculadas entre balizas estacionarias	44
5.16	Distancias reales y calculadas entre Hedgehog y baliza 4	46
5.17	Media aritmética de las coordenadas del Hedgehog	46
5.18	Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog	46
5.19	Media aritmética de las coordenadas del Hedgehog	47
5.20	Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog y la posición auxiliar	47
5.21	Distancias reales y calculadas entre posiciones del Hedgehog	47

Bibliografía

- [1] Fernando Seco, Katerina Koutsou, Francisco Ramos, and Antonio R. Jiménez. Localización personal en entornos interiores con tecnología rfid. *Revista iberoamericana de automática e informática industrial*, 10:313–324, 2013.
- [2] Francisco Casas Reyes. Caracterización y puesta a punto de un sistema de radiobalizas para localización interior en robots de inspección trabajo fin de máster, 2022.
- [3] Sara Roos Hoefgeest Toribio, Álvaro Fernández García, Ignacio Álvarez García, and Rafael Corsino González de los Reyes. Localización de robots móviles en entornos industriales usando un anillo de cámaras. pages 849–858. Universidade da Coruna, 8 2019.
- [4] Felipe Espinosa Zapata, José Luis Lázaro Galilea, and Joaquín Olivares Bueno. Proyecto alcor: Contribuciones a la optimización del guiado remoto de robots en espacios inteligentes. 2018.
- [5] Alejandro Acosta Vellón, André Sales Mendes, Gabriel Villarrubia González, Juan F. De Paz, Juan Manuel Corchado Rodríguez, Fabio Andrés Yepes Vélez, Vivian Félix López Batista, María Navelonga Moreno García, Carlos J. Gomes, Ana Belén Gil González, Christian Bonal Martín, Daniela Elizabeth Sanjinés Flores, Henri Estuardo Castro León, María Angélica González Arrieta, Mehmet Ozturk, Ricardo Martínez Domínguez, María Belén Pérez Lancho, and Sara Rodríguez González. Avances en informática y automática. duodécimo workshop. 4 2019.
- [6] T. Xing, C. Wu, J. Wang, F. Shang, R. Li, and X. Chen. Vicom - a vibration-based multi-user concurrent communication system with commercial devices. *Computer Networks*, 194, 2021.
- [7] T. Qin, P. Li, and S. Shen. Vins-mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator. *IEEE Transactions on Robotics*, 34:1004–1020, 2018.
- [8] Patricia López Torres. Análisis de algoritmos para localización y mapeado simultáneo de objetos. 2016.
- [9] Felipe Ramón Fabresse. A multi-hypothesis approach for range-only simultaneous localization and mapping with aerial robots, 2017.
- [10] Kin Leong Ho and Paul Newman. Loop closure detection in slam by combining visual and spatial appearance. *Robotics and Autonomous Systems*, 54:740–749, 9 2006.
- [11] Ángel Manuel Lema Fulgencio. Sistema de odometría visual para localización monocular. 2019.

-
- [12] C. Forster, Z. Zhang, M. Gassner, M. Werlberger, and D. Scaramuzza. Svo: Semidirect visual odometry for monocular and multicamera systems. *IEEE Transactions on Robotics*, 33:249–265, 2017.
- [13] B. Carse, B. Meadows, R. Bowers, and P. Rowe. Affordable clinical gait analysis: An assessment of the marker tracking accuracy of a new low-cost optical 3d motion analysis system. *Physiotherapy (United Kingdom)*, 99:347–351, 2013.
- [14] Qing Chen, Yu Zhou, Yong Wang, Mao Mao Zhu, Lei Guo, and Chang Xu He. Research on stability and accuracy of the optitrack system based on mean error. volume 11884, pages 118841C–118841C–13. SPIE, 2021.
- [15] Joshua S. Furtado, Hugh H. T. Liu, Gilbert Lai, Herve Lacheray, and Jason Desouza-Coelho. Comparative analysis of optitrack motion capture systems, 2019.
- [16] Roberto Fernandez. Contributions to the design of high-performance digital systems using field programmable system-on-chip platforms.
- [17] Marvelmind indoor navigation system operating manual v2023-07-04.