



UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA INFORMÁTICA

GRADO EN INGENIERÍA INFORMÁTICA

TECNOLOGÍA ESPECÍFICA DE
COMPUTACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño e implementación de un módulo de localización
para un vehículo autoguiado

Rafael Muñoz González

Febrero de 2019





UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA INFORMÁTICA

GRADO EN INGENIERÍA INFORMÁTICA

**TECNOLOGÍA ESPECÍFICA DE
COMPUTACIÓN**

TRABAJO FIN DE GRADO

**Diseño e implementación de un módulo de localización
para un vehículo autoguiado**

Autor: Rafael Muñoz González

Directores: Ismael García Varea
Cristina Romero González

Febrero de 2019

A mis padres, mi hermano y mis amigos, ya que gracias a ellos soy quien soy y son a ellos hacia los que me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento.

Declaración de Autoría

Yo, Rafael Muñoz González con DNI 06287234T , declaro que soy el único autor del trabajo de fin de grado titulado “Diseño e implementación de un módulo de localización para un vehículo autoguiado” y que el citado trabajo no infringe las leyes en vigor sobre propiedad intelectual y que todo el material no original contenido en dicho trabajo está apropiadamente atribuido a sus legítimos autores.

Albacete, a 12 de Febrero de 2019

Fdo.: Rafael Muñoz González

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado recoge el desarrollo teórico de un conjunto de métodos de localización para su uso práctico en diferentes entornos con robots móviles. Este conjunto de métodos de localización incluye el Filtro de Kalman y el Filtro de Partículas. Además el trabajo se centrará en el desarrollo de un módulo de localización para vehículos auto-guiados, este módulo de localización estará basado en un Filtro de Partículas desarrollado específicamente por el autor mediante diferentes herramientas software como ROS y Gazebo. Debido a esto también se hace una introducción a estas herramientas que permiten la simulación y el control de robots.

Agradecimientos

Este Trabajo de Fin de Grado realizado en la Universidad de Castilla La-Mancha es un esfuerzo en el que participaron diversas personas, ya sea directamente o indirectamente, opinando, corrigiendo, animando y acompañando en momentos de frustración y de felicidad.

Por todo esto, me gustaría agradecer a mis tutores todo el tiempo invertido en que este proyecto saliese adelante, concretamente agradezco a Ismael García Varea por haberme animado a escoger este trabajo y mostrarme el mundo de la robótica y a Cristina Romero González por haber invertido tiempo en ayudarme y apoyarme en momentos difíciles para que el trabajo saliese bien.

Además también me gustaría agradecer la ayuda y conocimientos que me han aportado todos los profesores durante toda esta etapa de mi vida.

Por último agradezco a mi familia y amigos su apoyo incondicional en los momentos más difíciles.

Índice general

| | |
|--|-------------|
| ÍNDICE DE FIGURAS | XI |
| Lista de Figuras | XIII |
| ÍNDICE DE TABLAS Y ALGORITMOS | XIII |
| Lista de Tablas | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Motivación | 1 |
| 1.2. Objetivos | 2 |
| 1.3. Estructura de la memoria | 3 |
| 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DE LA CUESTIÓN | 5 |
| 2.1. Robótica. | 5 |
| 2.2. El problema de la localización | 6 |
| 2.3. Algoritmos de localización | 9 |
| 2.4. Matemática aplicada a la informática gráfica | 19 |
| 2.5. Herramientas Software utilizadas | 23 |
| 3. METODOLOGÍA Y DESARROLLO | 27 |
| 3.1. Introducción | 27 |
| 3.2. Metodología seguida para el desarrollo del trabajo | 27 |
| 3.3. Estudio previo | 30 |
| 3.4. Desarrollo del trabajo | 36 |
| 4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS | 47 |
| 4.1. Resultados obtenidos del error de la localización | 47 |
| 4.2. Tiempos de cada una de las fases del Filtro de Partículas | 57 |
| 4.3. Análisis de resultados | 59 |
| 5. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS | 61 |
| 5.1. Conclusiones | 61 |
| 5.2. Competencias cubiertas | 61 |

| | |
|-------------------------------|-----------|
| 5.3. Trabajo futuro | 62 |
| BIBLIOGRAFIA | 64 |
| CONTENIDO DEL CD | 65 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|-------|---|----|
| 1.1. | Pioneer 3-DX | 2 |
| 1.2. | Modelo en el entorno Gazebo de un robot Pioneer 3-DX | 2 |
| 2.1. | Localización al comienzo | 7 |
| 2.2. | Localización tras realizar medidas | 7 |
| 2.3. | Conjunto de estados posibles y probabilidades asociadas a cada estado en el instante inicial | 8 |
| 2.4. | Conjunto de estados posibles y probabilidades asociadas a cada estado tras realizar la primera observación | 8 |
| 2.5. | Conjunto de estados posibles y probabilidades asociadas a cada estado tras realizar el primer movimiento | 8 |
| 2.6. | Conjunto de estados posibles y probabilidades asociadas a cada estado tras realizar el primer movimiento y observar | 9 |
| 2.7. | Ejemplo de distribución Gaussiana | 10 |
| 2.8. | Proceso del algoritmo de Filtro de Partículas | 16 |
| 2.9. | Diagrama Resampling Wheel | 17 |
| 2.10. | Obtención de nuevas partículas en Resampling Wheel | 19 |
| 2.11. | Traslación en el espacio | 20 |
| 2.12. | Rotación en el espacio | 21 |
| 2.13. | Escalado en el espacio | 22 |
| 2.14. | Robot Pioneer 3DX en el entorno de simulación | 24 |
| 2.15. | Sistema de navegación de ROS | 25 |
| 2.16. | Sistema de navegación de ROS (fuente: [1]) | 25 |
| 3.1. | Circuito realizado para el estudio previo de los algoritmos de localización | 30 |
| 3.2. | Visualización en Rviz de la generación del mapa mediante SLAM | 31 |
| 3.3. | Mapa generado con la técnica de SLAM | 32 |
| 3.4. | Configuración en Rviz para mostrar elementos mientras el robot navega | 33 |
| 3.5. | Errores de localización basado en la odometría | 34 |
| 3.6. | Errores de localización en el método de Filtro de Partículas | 35 |
| 3.7. | Errores de localización en el método de Filtro de Kalman | 35 |

| | |
|---|----|
| 3.8. Entorno simulado en Gazebo | 37 |
| 3.9. Nube de puntos obtenida al realizar un mapeo con rtabmap | 38 |
| 3.10. Nube de puntos obtenida recortando la nube de puntos obtenida mediante mapeo. | 39 |
| 3.11. Nube de puntos obtenida por el sensor | 40 |
| 3.12. Imagen obtenida desde arriba proyectando la nube de puntos del sensor sobre el plano z | 40 |
| 3.13. Zona de interés seleccionada de la imagen | 41 |
| 3.14. Función exponencial decreciente, $f(x) = 3^{1/(x/100)}$ | 42 |
| 3.15. Porcentaje de datos en la distribución normal | 44 |
| 3.16. Partículas tras ser inicializadas | 44 |
| 3.17. Mejor partícula del conjunto y posición real | 46 |
| 3.18. Esquema del Filtro de Partículas | 46 |
| | |
| 4.1. Evolución del conjunto de partículas | 48 |
| 4.2. Error en la orientación en un escenario perfecto | 49 |
| 4.3. Error en la posición en un escenario perfecto | 49 |
| 4.4. Error de la odometría en la orientación | 50 |
| 4.5. Error de la odometría en la posición | 50 |
| 4.6. Error de la localización en la orientación | 51 |
| 4.7. Error de la localización en la posición | 51 |
| 4.8. Visualización de la información de los elementos del Filtro de Partículas en la última iteración | 52 |
| 4.9. Entorno gazebo con obstáculos | 52 |
| 4.10. Comparación de las imágenes obtenidas en un entorno con occlusiones . | 53 |
| 4.11. Corrección de ambigüedad | 53 |
| 4.12. Errores medios en la orientación del conjunto de partículas | 54 |
| 4.13. Errores medios en la posición del conjunto de partículas | 54 |
| 4.14. Errores de localización en la orientación | 55 |
| 4.15. Errores de localización en la posición | 55 |
| 4.16. Error de odometría en la orientación | 56 |
| 4.17. Error de odometría en la posición | 56 |
| 4.18. Error de la localización en la orientación | 57 |
| 4.19. Error de la localización en la posición | 57 |
| 4.20. Tiempos medios de cada una de las fases del Filtro de Partículas . . . | 58 |

ÍNDICE DE TABLAS Y ALGORITMOS

| | |
|--|----|
| 2.1. Filtro de Kalman | 12 |
| 2.2. Filtro de Partículas | 15 |
| 2.3. Algoritmo Resampling Wheel | 18 |
| 3.1. Filtro de Partículas | 43 |
| 4.1. Tiempos medios de cada una de las fases del algoritmo | 58 |

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La robótica autónoma es el tema en el cual se inspira este proyecto debido al auge que esta teniendo estos últimos años. Este auge es debido a las grandes innovaciones, la gran cantidad de dinero invertido y las posibilidades que ofrece al mundo. Por ello introduciremos la importancia y la aplicación de la robótica en el panorama actual.

La robótica es el arte de percibir y manipular el mundo real a través de dispositivos controlados por ordenador, robots. Los robots son capaces de obtener información del entorno a través de sensores y ejecutar acciones con actuadores^[2].

1.1. Motivación

La robótica tiene muchas aplicaciones, entre ellas se encuentran, el uso de robots industriales para realizar tareas repetitivas, el uso de robots con fines educativos y de entretenimiento, la utilización de robots para ayudar a personas en su día a día, robots utilizados en el campo de la medicina, etc. El presente Trabajo de Fin de Grado tratará sobre la robótica y se centrará en el problema de la localización, para ello se utilizará una cámara, un mapa del entorno y se conseguirá que el robot sea capaz de conocer su posición con un mínimo margen de error.

Para resolver el problema de la localización se utilizarán paquetes y nodos que son generados por código en C++ utilizando el framework ROS ^[3], el cual provee de librerías y herramientas para ayudar a crear aplicaciones para robots, permitiéndonos la abstracción del hardware, la comunicación por mensajes y herramientas de visualización.

Además, para simular el comportamiento del robot, validar y evaluar el comportamiento del modelo sin necesidad de utilizar el robot real en un entorno de verdad, se

utilizará el entorno de simulación llamado Gazebo[4], donde se importará un modelo del robot Pioneer 3-DX que es el robot que nos facilita la universidad para realizar el trabajo de fin de grado (Véanse figuras 1.1 y 1.2).



Figura 1.1: Pioneer 3-DX

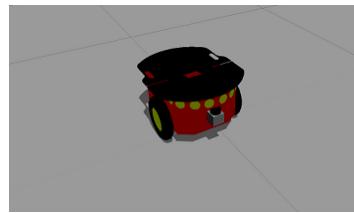


Figura 1.2: Modelo en el entorno Gazebo de un robot Pioneer 3-DX

1.1.1. Finalidad del Trabajo de Fin de Grado

El presente Trabajo de Fin de Grado se centrará en el estudio de algoritmos de localización [5] y en el desarrollo de un algoritmo de localización que cometa el mínimo error posible para poder utilizarlo en un vehículo autónomo. Además se estudiarán conceptos de navegación y de visión artificial y reconocimiento de patrones, útiles para el desarrollo del algoritmo de localización.

Para la localización se estudiará y desarrollará un método de localización basado en Filtros de Partículas [6], debido a que de igual forma que el Filtro de Kalman [7] los dos métodos permiten conocer el estado de un sistema dinámico cuando tenemos un modelo bayesiano. La ventaja de usar el Filtro de Partículas reside en la sencillez para desarrollarlo y que ofrece una solución multimodal, permitiendo tener varios estados con la misma probabilidad.

En cuanto a la visión artificial, utilizando una cámara podremos conocer las líneas de la carretera que utilizaremos para conocer la posición de nuestro robot mediante técnicas de visión artificial utilizando histogramas. Además, la navegación nos permitirá mover el robot por el entorno.

1.2. Objetivos

El objetivo de este TFG es el estudio y desarrollo de un algoritmo de localización para su posterior integración en el paquete de navegación que se proporciona en ROS.

Para la implementación del algoritmo se utilizará la técnica de filtros de partículas y como información de entrada la proporcionada por un sistema de visión, en concreto

una cámara Asus Xtion Pro Live.

El resultado será un componente de localización para poder ser utilizado en la plataforma ROS.

Para el desarrollo del algoritmo de localización se ha realizado previamente el estudio de:

- Robótica móvil, para conocer el panorama actual del campo de la robótica, como ha ido evolucionando con el tiempo y sus últimas aplicaciones.
- Localización clásica, la cual incluye la localización por el método del Filtro de Kalman [7] y el Filtro de Partículas[6] .
- Localización respecto a la información visual, que se centra en usar la cámara y obtener las líneas de la carretera para saber la localización de nuestro vehículo.
- Navegación local, que se centra en el estudio de las velocidades lineales y angulares.
- Mapeo de entornos en 3D utilizando diferentes sensores como lasers, cámaras estéreo y cámaras de profundidad.
- Matemática aplicada para la informática gráfica, para realizar transformaciones a los diferentes objetos en un entorno 3D.
- Métodos de comparación y registrado de imágenes.
- Librerías para implementar el componente de ROS, como los tutoriales básicos, TF, OpenCV y PCL.
- Librería para implementar paralelismo como OpenMP.
- Hardware Pioneer 3DX.
- Comunicación entre otros módulos del sistema.

1.3. Estructura de la memoria

La presente memoria del Trabajo de Fin de grado se desarrolla presentando los contenidos teóricos y posteriormente su puesta en práctica, resultando en la siguiente estructura:

- **Capítulo 1: Introducción:** En este capítulo se da un primer acercamiento a la robótica, se describe la motivación y los objetivos del Trabajo de Fin de Grado.

- **Capítulo 2: Antecedentes y Estado de la cuestión:** Capítulo donde se da una explicación del panorama actual en este ámbito, se presentan diferentes métodos de localización junto con su respectivas bases teóricas. Además, se incluye un apartado sobre el estado actual de los métodos de comparación de imágenes, la matemática aplicada a la informática gráfica y las herramientas utilizadas.
- **Capítulo 3: Metodología y Desarrollo** En este capítulo se describe la metodología seguida en el proyecto y el desarrollo del mismo.
- **Capítulo 4: Experimentos y resultados:** En este capítulo se muestran y explican los diferentes experimentos realizados con ROS en el entorno de simulación Gazebo junto con una conclusión y reflexión para analizar posibles mejoras.
- **Capítulo 5: Conclusiones y propuestas:** Capítulo donde se desarrolla una reflexión final sobre el presente Trabajo de Fin de Grado, se habla sobre la efectividad de la propuesta realizada y de trabajos futuros con respecto a este trabajo.
- **Bibliografía** Aparecen los documentos, artículos y páginas web de donde se ha obtenido la información.
- **Contenido del CD** Proporciona información de los archivos incluidos en el CD.

Capítulo 2

ANTECEDENTES Y ESTADO DE LA CUESTIÓN

2.1. Robótica.

La robótica es un área de estudio relativamente nueva, pues, a pesar de sus numerosas aplicaciones y aunque hayan pasado más de 50 años desde que surgió, todavía no ha dado el salto definitivo, pues existen varios inconvenientes o problemas que impiden dicho salto. Entre los más importantes estan:

1. El robot debe conocer el entorno para actuar sobre él.
2. El robot debe saber su posición para poder moverse o realizar acciones con precisión.
3. La navegación, ya que se necesita de un planificador para realizar movimientos desde un punto inicial a uno final minimizando el tiempo empleado y evitando obstáculos.

En el campo de la robótica se distinguen distintos tipos de robots [8]:

- **Robot industrial o manipulador:** Son artilugios mecánicos y electrónicos destinados a realizar de forma automática determinados procesos de fabricación o manipulación. Se utilizan principalmente en la fabricación industrial.
- **Androïdes o humanoides:** Intentan reproducir total o parcialmente la forma y el comportamiento del ser humano.
- **Zoomórficos:** Reproducen con mayor o menor grado de realismo, los sistemas de locomoción de diversos seres vivos.

- **Robot móviles:** Están provistos de algún tipo de mecanismo que les permite desplazarse de lugar autónomamente, como pueden ser patas, ruedas u orugas y reciben la información del entorno con sus propios sensores.

El presente TFG se centrará en los robots de tipo móviles, los cuales pueden moverse por cualquier medio utilizando su propia energía. Las aplicaciones de estos robots suelen ser:

- **El desplazamiento de dichos robots por zonas donde existe la incapacidad o gran dificultad de desplazamiento por parte de las personas.** Por ejemplo robots espaciales que pueden sobrevivir sin aire ni agua o robots de investigación en los océanos ya que la presión no permite a los seres humanos descender más de 100 metros de profundidad.
- **La realización de tareas rutinarias en entornos, donde la eficiencia y la movilidad de estas máquinas reemplazan directamente la presencia humana.** Por ejemplo la agricultura o el transporte de materiales en fábricas.
- **Asistencia personal, rehabilitación y entretenimiento.** Por ejemplo una silla de ruedas con sensores e inteligencia computacional.

Además de estas aplicaciones, en estos tiempos están comenzando a aparecer los coches autónomos, que entrarían dentro de la clase de aplicaciones sobre la realización de tareas rutinarias.

Para el desarrollo de este tipo de aplicaciones necesitamos conocer, como bien se dijo anteriormente, la posición del robot obtenida mediante un algoritmo de localización a partir de la información proporcionada por sus sensores.

2.2. El problema de la localización

El problema que se quiere resolver en este trabajo de fin de grado es el de estimar la posición de un robot definida en un entorno en dos dimensiones como la tripleta (x, y, θ) , donde x e y son las coordenadas de la posición del robot en el sitio de referencia del mundo, y θ define la orientación del mismo.

Por lo tanto, el problema a abordar es el de la localización, que consiste en la capacidad de una máquina para localizarse a sí misma en el espacio.

Esta localización no puede estar basada en la posición dada por un GPS, pues, en uno civil la cantidad de error que comete está entre 3 y 15 metros.

Este error para algunas tareas sería admisible, pero en el caso de un coche autónomo es algo impensable, necesitamos un error mucho menor para que sea un sistema seguro. Por esto, se debe utilizar un método de localización basado en algoritmos probabilísticos que permiten tener un error mínimo, conocido el mapa del espacio, y un sensor que nos permita realizar medidas para distinguir una posición de otra.

Utilizando un algoritmo de localización, el sistema es capaz de conocer su posición en el espacio a través de medidas que van reduciendo la incertidumbre asociada a la estimación de la posición actual del robot.

Estas medidas son tomadas cuando el robot se mueve, es decir, al comienzo el robot no sabrá cual es su localización y tendremos una distribución de probabilidad sobre la posición del robot con todos los estados igual de posibles (figura 2.1), pero después de realizar medidas, algunos estados aumentarán su probabilidad y otros la decrementarán (figura 2.2).

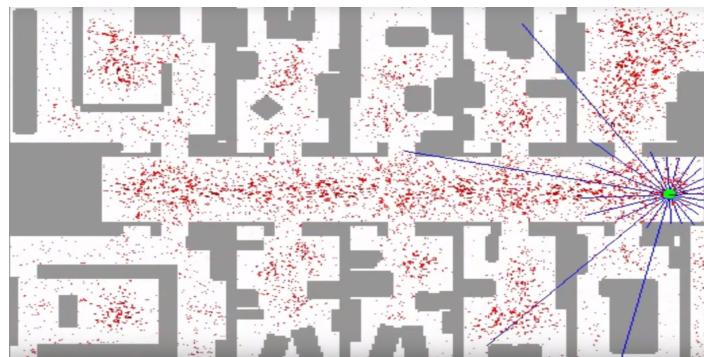


Figura 2.1: Localización al comienzo

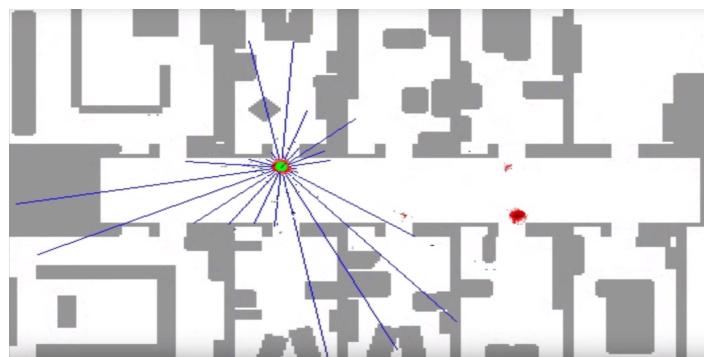


Figura 2.2: Localización tras realizar medidas

Veamos un ejemplo de funcionamiento del método de localización de Markov en un mundo con una sola dimensión: Un robot que no conoce su posición en el espacio (estado), pero en este se sabe que existen 3 puertas (figura 2.3). Al comienzo, la distribución de probabilidad es uniforme, la creencia (bel) de que el robot esté en cualquiera de los estados es $p_i = 1/n$.

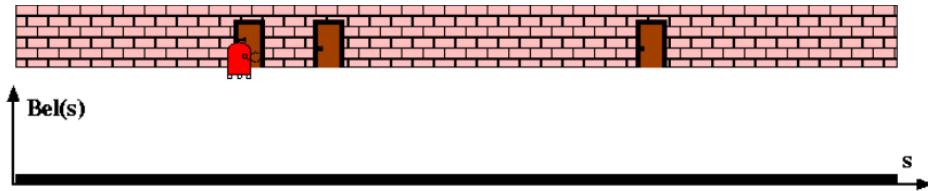


Figura 2.3: Conjunto de estados posibles y probabilidades asociadas a cada estado en el instante inicial

Posteriormente, el robot realiza la primera observación y el robot detecta que está localizado en una posición donde hay una puerta. Debido a eso, la distribución de probabilidad cambia, incrementándose en los estados con puerta y decrementándose en los estados sin puerta (figura 2.4).

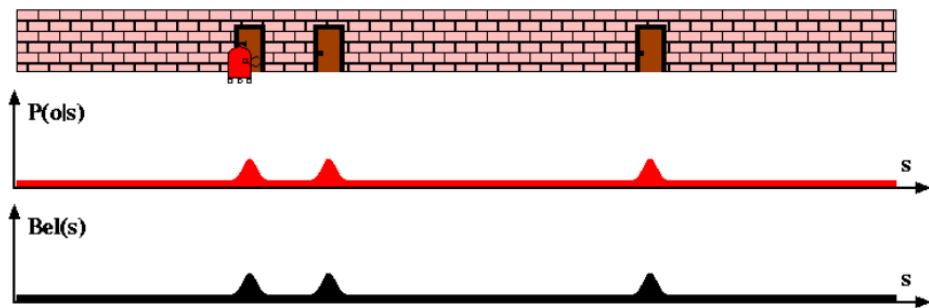


Figura 2.4: Conjunto de estados posibles y probabilidades asociadas a cada estado tras realizar la primera observación

A continuación, el robot cambia su estado realizando un movimiento en su posición, aplicando este movimiento a su creencia de estado (figura 2.5). Después, el robot realizaría una observación aumentando la creencia de la localización más probable según esas medidas (figura 2.6).

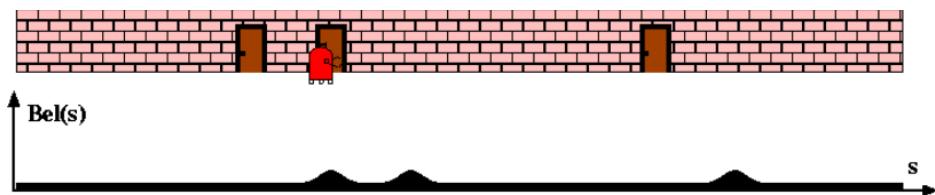


Figura 2.5: Conjunto de estados posibles y probabilidades asociadas a cada estado tras realizar el primer movimiento

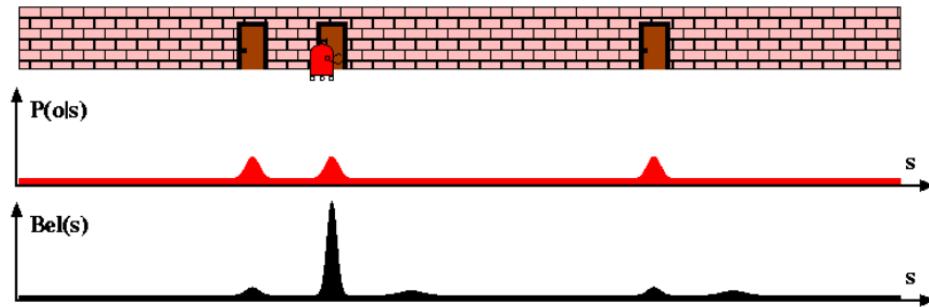


Figura 2.6: Conjunto de estados posibles y probabilidades asociadas a cada estado tras realizar el primer movimiento y observar

En el ejemplo, se obtiene como conclusión que, realizando medidas, la localización irá mejorando.

Para la localización de los robots se suelen utilizar los filtros bayesianos, que pueden ser paramétricos o no paramétricos.

Los paramétricos son aquellos que representan la creencia del estado con una media μ y una varianza σ que forman una distribución de probabilidad con forma de campana de Gauss en torno a una solución. En este grupo encontramos los Filtros de Kalman.

Por otro lado, los no paramétricos son aquellos filtros que representan la solución con un número finito de valores, y en el caso de que pudiese haber infinitos valores adoptarían la perfección la curva de probabilidad de la solución, permitiendo resolver tanto problemas lineales como no lineales. En este grupo encontramos la Localización de Markov y el Filtro de Partículas.

2.3. Algoritmos de localización

2.3.1. Filtro de Kalman

Introducción al Filtro de Kalman

El Filtro de Kalman es posiblemente la implementación más conocida de los filtros basados en filtros bayesianos debido a la simplicidad y eficiencia en el momento de filtrar y predecir estados. Este método fue inventado por Swerling (1958) y Kalman (1960).

Características del Filtro de Kalman

El Filtro de Kalman es un conjunto de ecuaciones matemáticas que implementan un estimador óptimo del tipo predictor-corrector.

El Filtro de Kalman tiene varias características que diferencian este método de localización al anteriormente descrito en el ejemplo (Localización de Markov) que convertía el espacio continuo en regiones discretas.

Entre estas diferencias se encuentra que es un filtro paramétrico debido al uso de una distribución normal para representar los posibles estados del espacio, de forma que el espacio se representa con una función continua.

Esta forma de representar el espacio utiliza dos variables, una media μ_t , y una matriz de co-varianza Σ_t que representa el ancho de la distribución normal tal y como podemos ver en la figura 2.7.

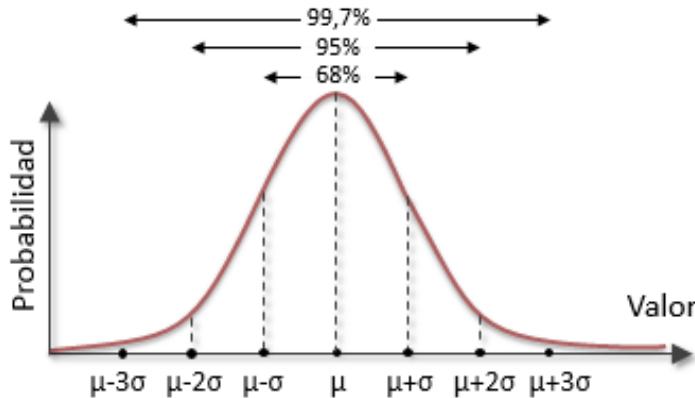


Figura 2.7: Ejemplo de distribución Gaussiana

La función de la distribución normal univariada para representar la creencia de estado es la mostrada en la ecuación (2.1):

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}\right] \quad (2.1)$$

Para la localización es preferible obtener una distribución normal con la menor co-varianza posible, pues esto significaría que el estado que concuerda con la media μ tendrá mayor probabilidad de ser el estado correcto donde se localiza el robot.

Pasos en el algoritmo de Filtro de Kalman

Este algoritmo de localización tiene dos pasos claramente definidos:

- **Predicción:** Es el primer paso del algoritmo. En esta etapa el filtro se encarga de anticipar eventos, es decir, el filtro consigue conocer el estado x_t a través del x_{t-1}

(ambos estados están representados con un vector de tamaño igual al número de estados posibles) y con las entradas de control μ_t (representadas en un vector de tamaño igual al número de entradas posibles). Además tenemos que añadir error, ϵ_t , a nuestro sistema para dar la indeterminación producida por la transición de estados (vector del mismo tamaño que el vector de estados, media nula y una matriz de co-varianza R_t). De esta forma la función de transición de estados que representa $p(x_t|x_{t-1}, u_t)$ sería la mostrada en la ecuación (2.2):

$$x_t = A_t x_{t-1} + B_t \mu_t + \epsilon_t \quad (2.2)$$

Donde A_t es una matriz cuadrada con el mismo tamaño que el vector de estados, $n \cdot n$. Dicha matriz une el estado en el instante $t - 1$ con el instante t sin entradas de control. Por otro lado, B_t es una matriz de tamaño $n \cdot m$, la cual une el estado con las entradas de control.

- **Actualización:** En este paso se corrigen los errores para obtener la mejor estimación de estado del sistema. Esta corrección se realiza contrastando la creencia que se obtiene sobre el estado anterior con la información que nos dan los sensores.

De esta manera, el filtro predice las medidas de los sensores que se obtendrían en la posición obtenida en el anterior paso z'_t (vector con un tamaño igual al número de medidas de los sensores) a través del estado x_t que el filtro cree como correcto y después lo compara con el vector real de medidas z_t , consiguiendo una creencia del estado actual con alta fiabilidad.

La función que representaría $p(z_t|x_t)$ es la ecuación (2.3):

$$z_t = C_t x_t + \delta_t \quad (2.3)$$

Donde C_t es la matriz con tamaño $k \cdot n$ donde los modelos de sensores son representados.

Además, se debe añadir un error δ_t para simular el ruido que pueden tener los sensores. Este ruido es un vector aleatorio gaussiano del mismo tamaño que el vector de medidas, media nula y matriz de co-varianza Q_t .

Algoritmo del Filtro de Kalman

El algoritmo del Filtro de Kalman da como salida una distribución normal con media μ_t y varianza Σ_t que representa la localización.

En el algoritmo 2.1 se puede ver como se implementa el Filtro de Kalman:

- Desde la linea 2 a la 6 se implementa la fase de predicción que determina la predicción de la media, $\bar{\mu}_t$, y predicción de la varianza, $\bar{\Sigma}_t$.
- De la linea 7 a la 13 se implementa la actualización, donde se utilizan las medidas z_t y la ganancia de Kalman K_t para determinar el estado μ_t y su varianza Σ_t .

Tabla 2.1: Filtro de Kalman

| | |
|----|---|
| 1 | Algoritmo del Filtro de Kalman ($\mu_{t-1}, \Sigma_{t-1}, u_t, z_t$): |
| 2 | Etapa de predicción |
| 3 | Proyección del estado hacia delante |
| 4 | $\bar{\mu}_t = A_t \mu_{t-1} + B_t u_t$ |
| 5 | Proyección de la covarianza hacia delante |
| 6 | $\bar{\Sigma}_t = A_t \Sigma_{t-1} A_t^T + R_t$ |
| 7 | Etapa de actualización |
| 8 | Calculo de la ganancia de Kalman |
| 9 | $K_t = \bar{\Sigma}_t C_t^T (C_t \bar{\Sigma}_t C_t^T + Q_t)^{-1}$ |
| 10 | Actualización del estado con las medidas |
| 11 | $\mu_t = \bar{\mu}_t + K_t (z_t - C_t \bar{\mu}_t)$ |
| 12 | Actualización de la covarianza |
| 13 | $\Sigma_t = (I - K_t C_t) \bar{\Sigma}_t$ |
| 14 | return μ_t, Σ_t |

2.3.2. Filtro de Partículas

Introducción al Filtro de Partículas

El Filtro de Partículas es un método para estimar el estado (posición) de un sistema que cambia a lo largo del tiempo. El Filtro de Partículas utiliza un conjunto de muestras (partículas) y valores (pesos) asociados a cada una de esas muestras, siendo estas partículas los posibles estados del sistema que pueden ser representados como puntos en el espacio de estados del sistema.

El Filtro de Partículas es una técnica muy usada para resolver problemas de localización en un espacio de estados.

El inicio del Filtro de Partículas surge en 1993, cuando N. Gordon, D. Salmond y A. Smith desarrollaron el Filtro Bootstrap para implementar filtros bayesianos a través del método de Monte Carlo. [6].

El Filtro de Partículas ha sido aplicado a una gran cantidad de campos, entre los que se destacan la economía, el proceso de señales, el tracking, la neurociencia, las redes, la bioquímica, etc.

El Filtro de Partículas es un filtro no paramétrico, estos son aquellos filtros que representan la solución con un número finito de valores, y en el caso de que pudiese haber infinitos valores adoptaría a la perfección la curva de probabilidad de la solución, permitiendo resolver tanto problemas basados en una distribución normal (unimodales) como los que no (multimodales).

Debido a esto, la utilidad del Filtro de Partículas surge en problemas que no siguen una distribución normal. Por ello, en un entorno donde varios estados alejados pueden tener la misma probabilidad, como en el caso de una carretera, se usa el Filtro de Partículas en vez del Filtro de Kalman, pues el Filtro de Kalman no permite estados con la misma probabilidad.

Características del Filtro de Partículas

El Filtro de Partículas estima una distribución de probabilidad de la creencia de que el robot se encuentre localizado en cada una de las posiciones. Esta distribución está basada en los pesos de un conjunto de partículas calculados al realizar observaciones del entorno, y como se dijo anteriormente, si el conjunto de partículas fuese infinito obtendríamos una distribución de probabilidad que adoptaría perfectamente la curva de probabilidad de la solución.

El Filtro de Partículas tiene las siguientes características:

- Funciona con sistemas multi-modales, independientemente de la linealidad y del ruido debido a la gran cantidad de partículas usadas en el filtro.
- Es costoso computacionalmente, siendo necesario un número infinito de partículas para representar exactamente un sistema.
- Usar un número razonable de partículas permite encontrar una solución con un error mínimo.
- Se debe encontrar una relación entre el coste y la precisión del algoritmo.

Etapas del Filtro de Partículas

- **Inicialización:** Se elige aleatoriamente un conjunto de partículas, donde cada una de ellas representa un posible estado del sistema. El conjunto de partículas puede también ser creado mediante algún tipo de información a priori (posición aproximada).
- **Actualización de pesos:** Se asigna pesos a cada partícula en función de la similitud del estado asociado a la partícula con respecto a un estado de referencia.
- **Estimación:** Se crea un nuevo conjunto de partículas utilizando métodos de “Resampling” probabilísticos, de forma que aquellas partículas que mejor se ajusten a las medidas (partículas de mayor peso) darán lugar a nuevas partículas con mayor probabilidad, consiguiendo el conjunto de partículas que es probablemente el más correcto. Como ejemplo de método de “Resampling” encontramos “Resampling Wheel” [9] que es el método de “Resampling” más fácil de implementar o “KLD-Sampling” [10] que se utiliza en el Filtro de Partículas que proporciona ROS por defecto.
- **Predicción:** Se modifica el estado de las partículas basándose en la estimación del estado en el siguiente instante de tiempo. Posteriormente se realiza una leve modificación al estado de cada una de ellas introduciendo algún tipo de ruido aditivo que aporte variabilidad al conjunto de partículas. Al terminar esta etapa de predicción se obtiene un nuevo conjunto de partículas al que se le vuelve a aplicar la etapa de actualización, repitiéndose este bucle hasta que termine la secuencia de datos, caso en el cual se volvería a la etapa de inicialización.

Algoritmo del Filtro de Partículas

Una vez definidas las etapas del algoritmo se pasará a explicar el algoritmo en su totalidad.

Tabla 2.2: Filtro de Partículas

| | |
|----|---|
| 1 | Algoritmo de Filtro de Partículas(X_{t-1}, u_t, z_t): |
| 2 | $\bar{X}_t = X_t = Random$ |
| 3 | for m = 1 to M do: |
| 4 | sample $x_t^{[m]}$ $p(x_t u_t, x_{t-1}^{[m]})$ |
| 5 | $w_t^{[m]} = p(z_t x_t^{[m]})$ |
| 6 | $\bar{X}_t = \bar{X}_t + (x_t^{[m]}, w_t^{[m]})$ |
| 7 | end for |
| 8 | for m=1 to M do: |
| 9 | draw i with probability $\alpha \cdot w_t^{[i]}$ |
| 10 | add $x_t^{[i]}$ to X_t |
| 11 | end for |
| 12 | return X_t |

Para la comprensión del algoritmo se realizará un análisis de la implementación basándonos en el algoritmo 2.2:

- En la línea 2, se inicializa el conjunto de partículas del siguiente instante de tiempo y el conjunto de partículas predicho del siguiente instante a un conjunto generado aleatoriamente.
- En la línea 4, las partículas evolucionan en una fase de predicción, es decir, para cada una de las partículas del conjunto de partículas del instante anterior X_{t-1} el filtro predice el estado de dicha partícula en el siguiente instante utilizando las entradas del sistema (velocidad, posición, etc).
- En la línea 5 se asigna el peso a cada partícula a través de una función inversamente proporcional al error cometido entre las medidas realizadas por sensores y las medidas predichas. Además se debe tener en cuenta la normalización de los pesos para conseguir una distribución de probabilidad. Para ello utilizaremos una constante de normalización a la cual llamaremos α .
- En la línea 6, el estado y el peso es añadido al conjunto de partículas predicho en el próximo instante.
- Surge un problema, después de un cierto número de pasos del algoritmo sólo un pequeño número de partículas tienen pesos no despreciables, lo cual se debe entrar en una fase de “Resampling” para solucionarlo. En la línea 9, se realizará un método de “Resampling” que obtendrá un conjunto de partículas cercanas a aquellas con mayor peso para obtener una solución más precisa. Además, en la

fase de predicción del algoritmo se añadirá ruido por lo que no tendremos las mismas partículas en nuestro conjunto.

En la figura 2.8 se puede ver el proceso de trabajo del algoritmo de Filtro de Partículas de una forma gráfica.

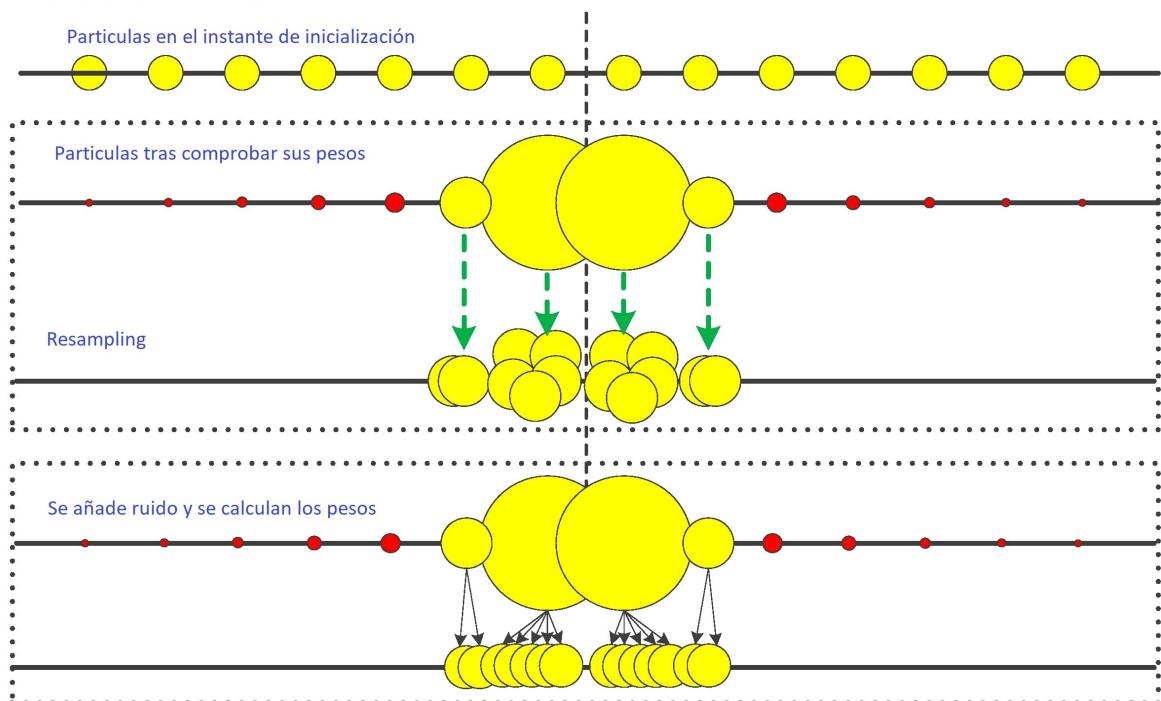


Figura 2.8: Proceso del algoritmo de Filtro de Partículas

Resampling Wheel

El método de “Resampling” más fácil de entender es “Resampling Wheel” [9], pudiendo resumir su funcionamiento en la imagen 2.9.

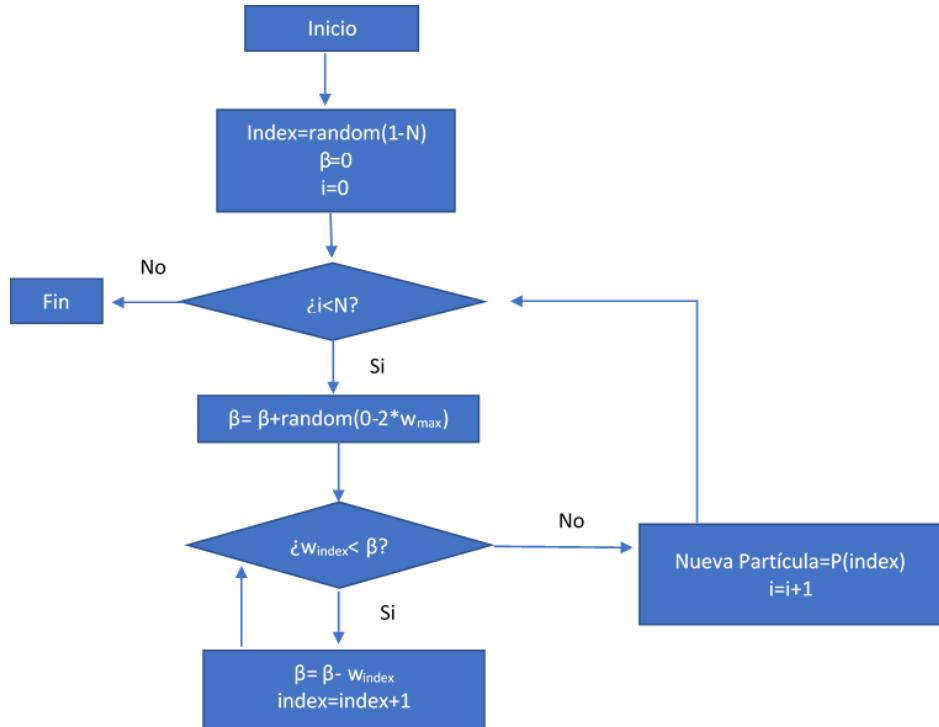


Figura 2.9: Diagrama Resampling Wheel

Este método coloca todas las partículas con sus respectivos pesos en una ruleta. Posteriormente se genera un número aleatorio para usarlo como índice en la ruleta.

Se coloca como inicio de la ruleta aquella partícula que tuvo el índice elegido aleatoriamente, posteriormente se debe girar la ruleta N veces, siendo N el número de partículas del conjunto de partículas, esto es debido a que debemos sustituir este conjunto por otro con el mismo número de partículas.

Este método de remplazo utiliza una función β que irá incrementando su valor con un número aleatorio entre el 0 y el doble del peso máximo de todas las partículas. Ese valor decidirá cual es la partícula que se mete en el nuevo conjunto teniendo en cuenta la partícula por la que se empieza en la ruleta y los pesos, de forma que si β es menor o igual que el peso de la partícula por la que se empieza en la ruleta se elige esa partícula, por el contrario, si la función β es mayor que el peso de la partícula se tomará el peso de diferencia y se comparará con la siguiente partícula comprobándose de nuevo si el peso de diferencia es mayor que el peso de la partícula siguiente.

De esta manera la función β selecciona nuevas partículas para el nuevo conjunto de partículas en el instante de tiempo t tal y como podemos ver en el algoritmo 2.3.

Tabla 2.3: Algoritmo Resampling Wheel

```

 $\beta = 0;$ 
Index=Random[1,N];
//Para cada partícula
For (i=0;i<N;i++){
     $\beta = \beta + Random(0, 2 \cdot w_{max});$ 
    While w[Index]<Beta{
         $\beta = \beta - w_t^{[Index]}$ 
        Index+=1;
    }
     $X_t^{[i]} = \bar{X}_t^{[Index]}$ 
}
Return  $X_t$ 

```

Ejemplo de funcionamiento de “Resample Wheel” (ver figura 2.10):

1. Se tienen 8 partículas en el sistema.
2. Se genera el número aleatorio 6 para establecer la posición de la ruleta.
3. Se calcula el peso máximo de todas las partículas, obteniendo como resultado el peso de la partícula 8.
4. Se calcula β como un valor aleatorio entre cero y el doble del peso máximo, obteniendo un peso equivalente al de la partícula 5.
5. Al comparar el peso de la partícula 6 con el valor de β , se obtiene que el valor β es mayor.
6. Se resta el peso de la partícula 6 a β y se suma uno a la posición de la ruleta.
7. Se compara si β es menor o igual que el peso de la partícula 7. El peso es menor, eligiéndose la partícula 7 para el conjunto.
8. Se vuelve al paso 4 hasta que el conjunto de partículas se llene.

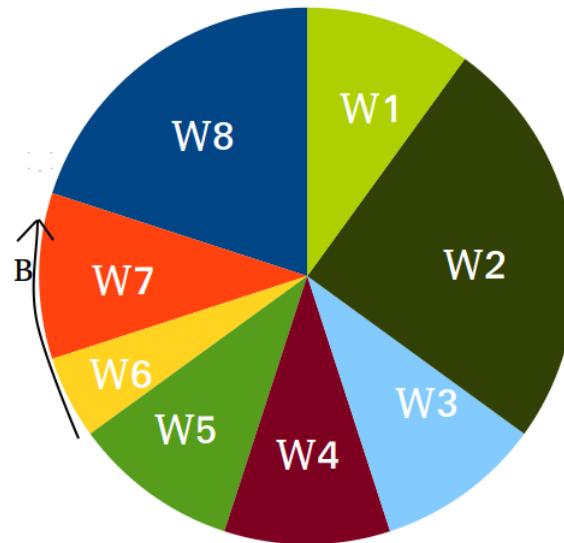


Figura 2.10: Obtención de nuevas partículas en Resampling Wheel

2.4. Matemática aplicada a la informática gráfica

2.4.1. Introducción

Puesto que en este trabajo se manejarán puntos en el espacio que serán modificados mediante traslaciones y rotaciones se explicarán las transformaciones geométricas en este apartado.

2.4.2. Transformaciones geométricas 3D

En este apartado se estudiarán los tres tipos de transformaciones geométricas en un espacio de 3 dimensiones.

Traslación

Comenzaremos explicando la traslación, la traslación consiste en la acción y efecto de mover un elemento en el espacio (figura 2.11).

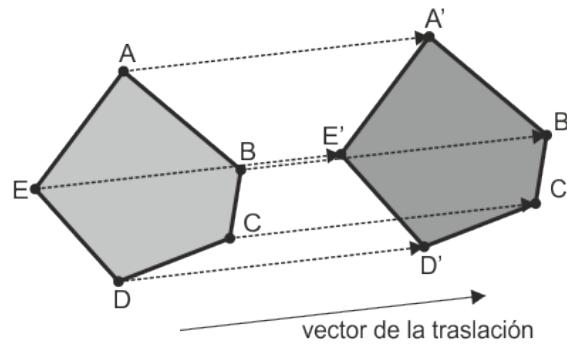


Figura 2.11: Traslación en el espacio

Para realizar esta traslación en un espacio en tres dimensiones es tan sencillo como aplicar las ecuaciones 2.4 donde (x, y, z) representan las coordenadas de un punto en el espacio en tres dimensiones, (x', y', z') la nueva posición del punto en el espacio y (tx, ty, tz) el vector de desplazamiento.

$$\begin{aligned} x' &= x + tx \\ y' &= y + ty \\ z' &= z + tz \end{aligned} \tag{2.4}$$

Esta traslación se puede expresar matricialmente como la matriz de traslación MT:

$$MT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & tx \\ 0 & 1 & 0 & ty \\ 0 & 0 & 1 & tz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Rotación

En cuanto a la transformación geométrica de rotación consiste en la acción y efecto de girar un elemento en el espacio con respecto a uno de los ejes (figura 2.12).

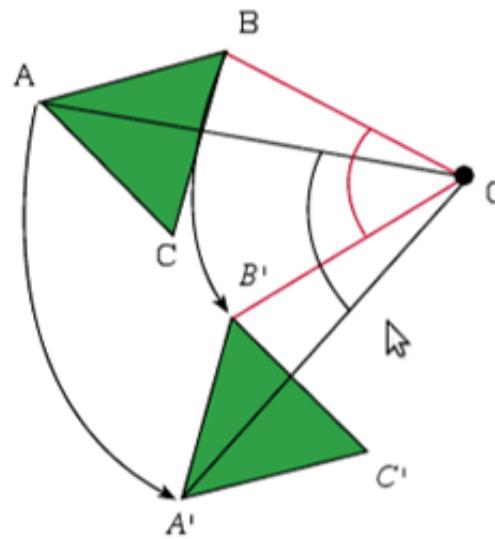


Figura 2.12: Rotación en el espacio

Para realizar esta rotación sobre el eje z en un espacio en tres dimensiones se debe aplicar la ecuación 2.5, las cuales cambiarán dependiendo del eje sobre el que se quiera rotar.

$$\begin{aligned} x' &= x \cdot \cos(\alpha) - y \cdot \sin(\alpha) \\ y' &= x \cdot \sin(\alpha) + y \cdot \cos(\alpha) \\ z' &= z \end{aligned} \tag{2.5}$$

Estas funciones de rotación son expresadas matricialmente como las matrices MRX (matriz de rotación para rotar sobre el eje X), MRY (matriz de rotación para rotar sobre el eje Y), MRZ (matriz de rotación para rotar sobre el eje Z):

$$MRX = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$MRY = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$MRZ = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Además hay que tener en cuenta que la rotación se aplica siempre con respecto al origen de coordenadas, por lo que en algunos casos hay que trasladar primero el elemento que queremos rotar al origen de coordenadas si no queremos que este sea trasladado de posición.

Escalado

En cuanto al escalado, este movimiento geométrico consiste en la modificación de las dimensiones, permitiendo agrandar el objeto en las diferentes dimensiones del espacio (figura 2.13).

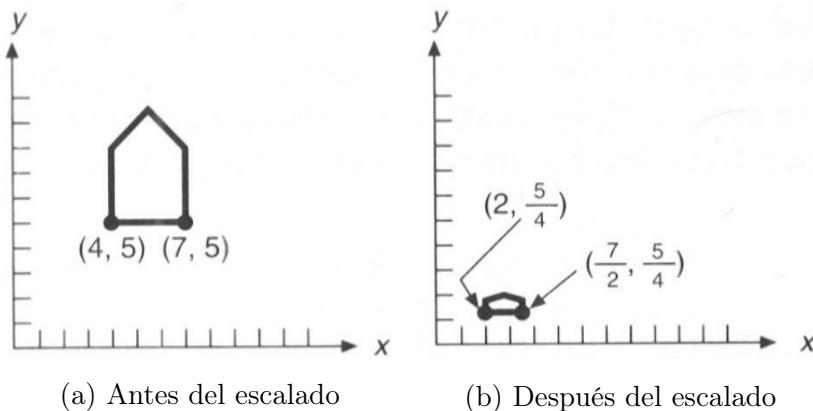


Figura 2.13: Escalado en el espacio

Para realizar esta transformación geométrica de escalado en tres dimensiones, utilizando s_x (valor de escalado en el eje x en tanto por uno), s_y (valor de escalado en el eje y en tanto por uno), s_z (valor de escalado en el eje z en tanto por uno), se debe aplicar las ecuaciones 2.6.

$$\begin{aligned} x' &= x \cdot s_x \\ y' &= y \cdot s_y \\ z' &= z \cdot s_z \end{aligned} \tag{2.6}$$

Este escalado en el espacio puede ser expresada matricialmente como la matriz de escalamiento MS:

$$MS = \begin{bmatrix} sx & 0 & 0 & 0 \\ 0 & sy & 0 & 0 \\ 0 & 0 & sz & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.4.3. Composición de transformaciones

Por último, es destacable conocer que al utilizar matrices para aplicar transformaciones geométricas se pueden concatenar transformaciones.

Estas concatenaciones dependerán de como se aplique la transformación a los diferentes puntos, en nuestro caso vamos a utilizar la post-multiplicación, de forma que para concatenar transformaciones en una sola matriz se debe hacer de derecha a izquierda, es decir, para aplicar una transformación de translación al punto seguida de una transformación de rotación se debe realizar la concatenación $Punto' = MR \cdot MT \cdot Punto$:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & tx \\ 0 & 1 & 0 & ty \\ 0 & 0 & 1 & tz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

2.5. Herramientas Software utilizadas

2.5.1. ROS

Introducción a ROS

Para la realización del trabajo se usa el “middleware” ROS que permite y facilita el control de actuadores y sensores permitiendo un tratamiento de los datos obtenidos por los sensores y la elaboración de respuestas con los actuadores. De esta forma se pueden realizar tareas como la creación de mapas, comunicación entre los diferentes nodos del sistema, etc.

Arquitectura de ROS

ROS tiene una arquitectura específica [11] que debemos entender para poder realizar el trabajo con este sistema. En ROS encontramos diferentes elementos:

- **ROS Master:** El ROS Master se encarga de proveer nombres y registrar servicios al resto de nodos del sistema de ROS, también se encarga de gestionar las publicaciones y suscripciones a los tópicos.

- **Tópicos:** Los tópicos son los canales por los que se publican mensajes, de forma que un nodo puede publicar en estos tópicos o suscribirse a ellos para recibir mensajes de otros nodos.
- **Mensajes:** Es la forma de comunicación entre los diferentes nodos. Se debe definir el tipo del mensaje necesariamente.
- **Servicios:** Es otro método de comunicación que tienen la característica de tener dos fases, la petición y la respuesta. Este método de comunicación no se utilizará en el desarrollo llevado a cabo en este trabajo de fin de grado.
- **Nodos:** Los nodos son los procesos que realizan la computación en esta arquitectura. Estos nodos pueden utilizar o proporcionar servicios, tópicos u otras acciones para comunicarse con otros nodos, permitiendo, por ejemplo, la capacidad de obtener imágenes de sensores. Estos nodos son escritos utilizando librerías de ROS como pueden ser roscpp que utiliza C++ como lenguaje de programación, rospy que utiliza Python u otros.

2.5.2. Gazebo

Además de ROS se ha utilizado un software para la simulación del robot, su entorno y los diferentes sensores mediante Gazebo.

En Gazebo se ha modelado el robot a localizar (figura 2.14), añadiéndole una cámara para poder localizarlo mediante sensores visuales y permitiendo su control con el teclado para poder cambiar su posición en el entorno.



Figura 2.14: Robot Pioneer 3DX en el entorno de simulación

Además, se ha diseñado un escenario sencillo con carreteras y casas para poder simular un entorno donde trabajar con el problema de la localización (figura 2.15).



Figura 2.15: Sistema de navegación de ROS

2.5.3. Funcionamiento del sistema de navegación de ROS

Para la utilización de un movimiento autónomo que permita evitar obstáculos con el robot es necesario conocer como funciona el sistema de navegación de ROS (figura 2.16).

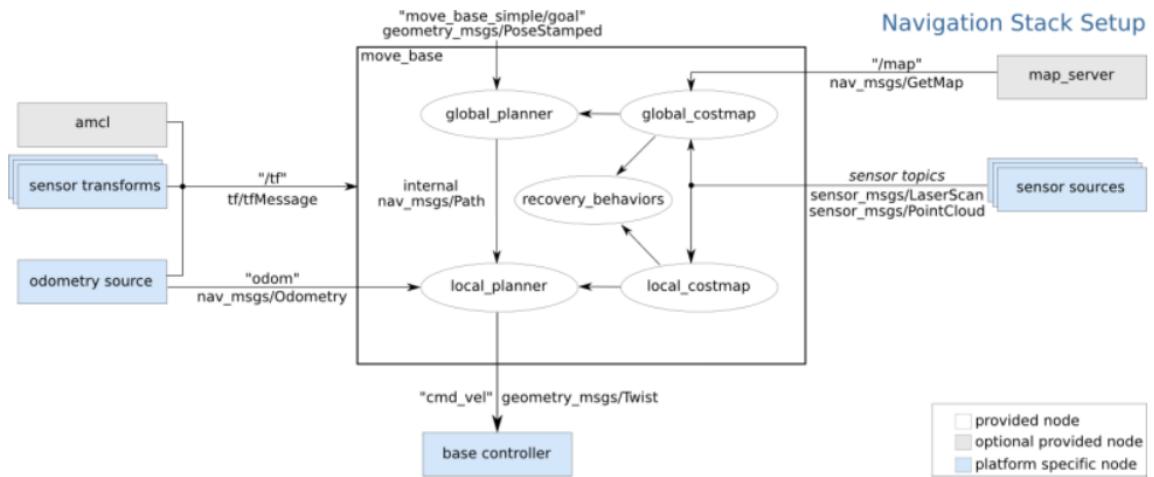


Figura 2.16: Sistema de navegación de ROS (fuente: [1])

En la figura 2.16, se puede ver como el sistema de navegación utiliza un conjunto de elementos que ROS proporciona por defecto para la localización y que no serán modificados. Este conjunto de elementos que proporciona ROS y no debemos modificar son todos los nodos dentro del conjunto ‘‘move_base’’. Estos nodos tienen que ver con los planificadores locales y globales.

Por otro lado, la posición real del robot en el entorno es la publicada en el topic ‘‘/odom’’.

El algoritmo de localización definido en la figura 2.16 es “`amcl`”, que es el método de Monte Carlo que ofrece ROS para la localización y que utiliza la odometría y el árbol de transformaciones para conocer la posición del robot. Esta posición se usará en el nodo planificador permitiendo obtener las rutas a realizar y navegar por el entorno.

Se puede observar también que el planificador necesita conocer su entorno, por lo que necesitamos indicarle el mapa del entorno mediante el topic “`/map`”.

Además, se necesita indicarle al “stack de navegación” la información obtenida mediante los sensores para que sea capaz de evitar obstáculos. Esto lo realizaremos mediante el topic “`/sensor_msgs/PointCloud`” puesto que nuestro sensor es una cámara.

La salida del sistema de navegación será la publicación de un topic del tipo *geometry_msgs::Twist* [12], concretamente publicará en el topic “`cmd_vel`” que dirigirá nuestro robot al punto que se le ordene mediante un planificador que irá evitando obstáculos.

2.5.4. Uniendo ROS y Gazebo

ROS y Gazebo pueden complementarse, por lo que se puede utilizar Gazebo como entorno de simulación, encargándose de la representación gráfica del entorno y de la representación física en un espacio, permitiendo simular modelos con sensores que permitirían mandar datos a ROS como si del mundo real se tratase.

De la misma manera ROS sería capaz de actuar sobre ese entorno simulado mediante los actuadores que le proporciona Gazebo, como aplicar velocidades a los modelos y permitiendo el movimiento al robot.

Capítulo 3

METODOLOGÍA Y DESARROLLO

Este capítulo tratará sobre el trabajo realizado, la metodología seguida y su planificación.

3.1. Introducción

Este trabajo trata de localizar un robot en un espacio abierto, concretamente en una carretera. La localización en robótica se suele hacer en base a un mapa y las lecturas de un láser según se va moviendo el robot, pero, puesto que no se puede utilizar un sensor láser para la localización al no existir elementos en la carretera para realizar medidas, se va a diseñar un Filtro de Partículas basado en información visual.

La información visual que captarán los sensores será un conjunto de puntos en un sistema de coordenadas tridimensional. Estos puntos se identifican con sus coordenadas (x,y,z) y su color (R,G,B) y son representaciones de la superficie externa de un objeto. Este conjunto es lo que se denomina nube de puntos.

Para determinar la localización del robot de forma visual se necesita una forma de dar peso a la creencia de una posición mediante la comparación de las imágenes obtenidas por los sensores y las que obtendría el robot en las posiciones predichas, conseguidas proyectando la nube de puntos del entorno, obtenida tras “mapear”, en una imagen en dos dimensiones.

3.2. Metodología seguida para el desarrollo del trabajo

Para la realización de este trabajo se ha utilizado una metodología de desarrollo ágil, concretamente el framework Scrum adaptado[13] donde se realizan entregas parciales

y regulares del producto final priorizadas por el beneficio que aportan al proyecto.

Se ha elegido el uso de Scrum porque está especialmente indicado para proyectos en entornos complejos, donde se necesita obtener resultados pronto, donde los requisitos son cambiantes o poco definidos.

En Scrum los roles de los integrantes del equipo han sido:

- **Dueños del producto:** Ismael García Varea y Cristina Romero González. Coordinadores entre el equipo para establecer una buena comunicación y evitar problemas al establecer los requisitos y compromisos con el proyecto.
- **Equipo de trabajo y Scrum Master:** Rafael Muñoz González. Estudiante de 4º de Ingeniería Informática, defensor del trabajo de fin de grado.

El funcionamiento de este framework se realiza por medio de Sprints. Un Sprint es un bloque de tiempo de hasta un mes de duración.

Antes de comenzar el Sprint se establecen los requisitos del proyecto y se almacenan en un “Product Backlog”.

Este Sprint contiene 4 eventos diferenciados:

- **Planificación del Sprint:** Evento en el que participan todos los miembros del equipo Scrum. En este evento se establece un objetivo para el Sprint y se planifica el trabajo a realizar durante el Sprint almacenándose en un “Sprint Backlog”.
- **Scrum Diario:** Evento en el que participa el Equipo de Desarrollo. En este evento se planea el trabajo a realizar durante las próximas 24 horas. Posteriormente se divide el trabajo a realizar en subtareas, optimizando el desempeño del equipo y permitiendo evaluar el progreso hacia el objetivo planificado en la anterior fase.
- **Revisión del Sprint:** Evento en el que participan todos los miembros del equipo Scrum. En este evento se realizan los siguientes elementos
 - El Dueño del Producto explica qué elementos del “Product Backlog” se han terminado y cuales no.
 - El Equipo de Desarrollo comenta los problemas que aparecieron y cómo se resolvieron.
 - El Equipo de Desarrollo hace una demostración del trabajo que se ha terminado y responde preguntas sobre el incremento realizado al proyecto.
 - El Dueño del Producto proyecta objetivos probables y fechas de entrega basándose en el progreso obtenido hasta la fecha.

- El grupo completo colabora acerca de qué hacer a continuación, corrigiendo en caso de ser necesario el “Product Backlog”.
- **Retrospectiva del Sprint:** En este evento el Equipo Scrum inspeccionan cómo fue el Sprint en cuanto a procesos y herramientas, buscando mejorar el proceso de desarrollo del proyecto.

La organización del trabajo ha sido la siguiente:

- **Inicio del proyecto:** Esta fase planteará el proyecto con su planificación, definiendo los requisitos del sistema y todos los aspectos técnicos del proyecto.
- **Estudio del estado del arte:** Esta etapa se centrará en el estudio de la base teórica sobre la que se sustenta el trabajo.
- **Desarrollo de un mapa para realizar pruebas y validación:** Fase donde se conseguirá realizar o encontrar un mapa para permitir la realización de pruebas y validaciones en el desarrollo del sistema.
- **“Mapeo” del entorno:** Etapa que se centrará en obtener la nube de puntos del entorno mediante la información visual dada por la cámara del robot.
- **Desarrollo de proyección de nube de puntos en imágenes:** Etapa que se centrará en captar las nubes de puntos obtenidas por los sensores y el mapeo, recortarlas, transformarlas para obtener la nube de puntos que se obtendría en caso de que una partícula este en una posición dada y proyectarla en una imagen.
- **Desarrollo de mecanismos para comparación de imágenes:** Etapa que se centrará en desarrollar diferentes técnicas para comparar imágenes y dar pesos a las diferentes partículas.
- **Desarrollo del módulo de localización:** Etapa que se centrará en desarrollar el módulo de localización basado en el método del Filtro de Partículas utilizando información visual.
- **Desarrollo del módulo de navegación:** Etapa transversal que se utilizará durante todo el proyecto, permitiendo dar la capacidad al robot de moverse por el entorno.
- **Pruebas y validación:** Fase encargada de buscar fallos en el sistema para posteriormente solucionarlos y lograr el objetivo propuesto en el trabajo de fin de grado. Además se realizarán pruebas de diferentes experimentos llevados a cabo para comprobar el funcionamiento del módulo de localización implementado en ROS.

- Presentación y defensa del trabajo de fin de grado.

3.3. Estudio previo

3.3.1. Introducción

Para una mejor comprensión de los métodos de localización se ha realizado un estudio previo de los diferentes métodos de localización realizando un experimento con un sensor de distancia, un modelo de nuestro robot Pioneer-3DX y una habitación cerrada, concretamente el laboratorio software 1 de la Escuela Superior de Ingeniería Informática en la Universidad de Castilla La-Mancha.

Además, se ha acotado el experimento eliminando una de las dimensiones, la altura, pues esta no resultaba de utilidad y facilitaba el estudio.

En el estudio previo se usan tres métodos de localización para su posterior comparación, permitiendo así un acercamiento a los diferentes métodos y sus ventajas y desventajas.

Se ha movido el robot en el interior del laboratorio tal y como se muestra en la figura 3.1.

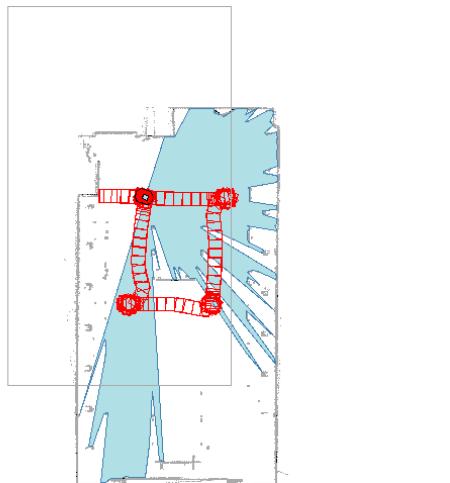


Figura 3.1: Circuito realizado para el estudio previo de los algoritmos de localización

3.3.2. Preparación del experimento

Los objetivos de este experimento han sido:

- Configurar Gmapping [14] para realizar SLAM[15].
- Crear y configurar el “stack” o módulo de navegación.

- Usar los métodos de localización y navegación.
- Evitar obstáculos en la navegación del robot mediante un planificador.

Configurando Gmapping

En este proyecto se necesita configurar Gmapping para generar el mapa que se utilizará después para la navegación y localización del robot.

Se ha utilizado un sensor láser (Lidar) del Pioneer 3-DX y la odometría para generar el mapa del entorno.

Para ello, se usó un comando que permite publicar mensajes de tipo *geometry_msgs* :: *Twist* en el topic “/cmd_vel” simplemente mediante el teclado, controlando el robot mediante modificaciones en su velocidad lineal y angular:

```
$ rosrun teleop_twist_keyboard teleop_twist_keyboard.py
```

Además, para ver el proceso de la generación del mapa se puede utilizar la herramienta Rviz [16], que permite ver una gran cantidad de elementos de forma gráfica como topics, el árbol de transformaciones, etc. (Véase figura 3.2).

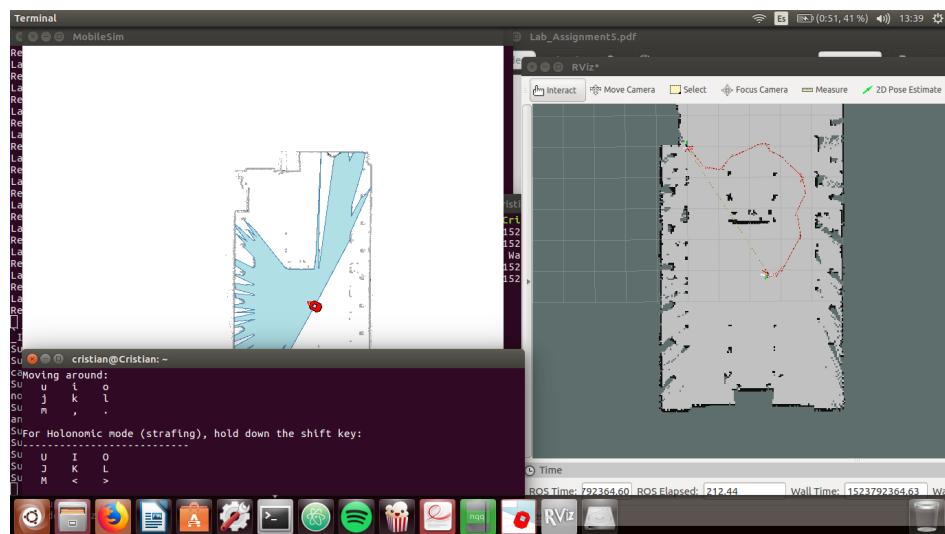


Figura 3.2: Visualización en Rviz de la generación del mapa mediante SLAM

Una vez completado el mapeo se almacena en el ordenador mediante el comando:

```
$ rosrun map_server map_saver [-f mapname]
```

Generado el mapa se obtendría lo mostrado en la figura 3.3.

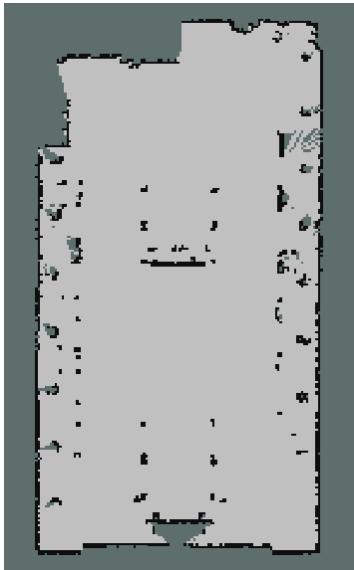


Figura 3.3: Mapa generado con la técnica de SLAM

Configurando el “stack de navegación”

La configuración del “stack de navegación” para conseguir que el robot se mueva hacia un punto dado evitando obstáculos, debe establecer:

- **Un árbol de transformaciones:** Estableciendo un sistema que relacione traslaciones y rotaciones entre las coordenadas de los diferentes elementos del robot (cámara, posición del robot, etc.).
- **La información que utilizará para evitar obstáculos:** Estableciendo que tipo de sensor se utilizará para evitar obstáculos, en nuestro caso un sensor láser cuya estructura viene definida como “*sensor_msgs::LaserScan*” [17].
- **La posición del robot:** Es necesario conocer la posición del robot para que este pueda navegar. Esta posición se puede dar mediante un algoritmo de localización o utilizando la odometría del robot que permite conocer el movimiento que realiza el robot basándose en el movimiento de las ruedas. Esta posición tiene una estructura definida como “*nav_msgs::Odometry.msg*” [18].
- **El mapa del entorno:** Establecer un mapa del entorno permite planificar rutas que utilizaremos para la navegación autónoma del robot. Este mapa se establecerá mediante el nodo “*Map Server*” [19], que cargará el mapa que guardamos anteriormente utilizando Gmapping.

Navegación autónoma usando los diferentes métodos de localización

Para la utilización de los diferentes métodos de localización en la navegación autónoma se han utilizado nodos que ya proporciona ROS como “*amcl*” basado en un Filtro

de Partículas y “robot_pose_ekf” basado en un Filtro de Kalman.

La navegación autónoma se ha realizado eligiendo una posición objetivo a la que llegar, posteriormente el robot obtiene la ruta óptima mediante el planificador y la sigue hasta llegar a su objetivo.

Mientras se realiza la navegación se puede utilizar Rviz para ver el mapa con los obstáculos (sombreados en el mapa), la ruta que define el planificador (línea de color verde), el conjunto de partículas (flechas rojas) y los frames que suponen la posición real del robot y el mapa tal y como se puede ver en la figura 3.4.

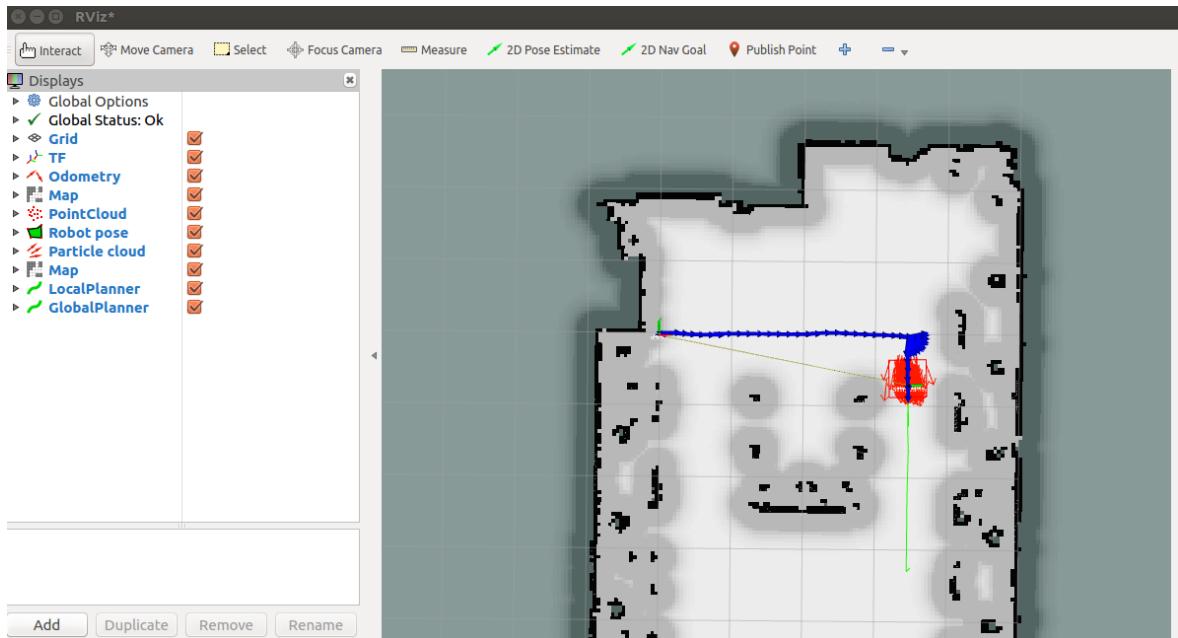


Figura 3.4: Configuración en Rviz para mostrar elementos mientras el robot navega

3.3.3. Resultados de los diferentes métodos de localización

Tras la navegación autónoma se ha realizado un análisis del error de la posición de los distintos métodos de localización.

Usando la odometría como método de localización

Este método se basa en 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.

Los resultados se han mostrado utilizando un gráfico de barras donde el eje x es la iteración y el eje y el error cometido.

En el gráfico obtenido por medio del método de localización basado en la odometría encontramos que los mayores errores han sido **0.052 m en el eje x** (movimiento vertical) y **0.058 m en el eje y** (movimiento horizontal) tal y como podemos ver en la figura 3.5.

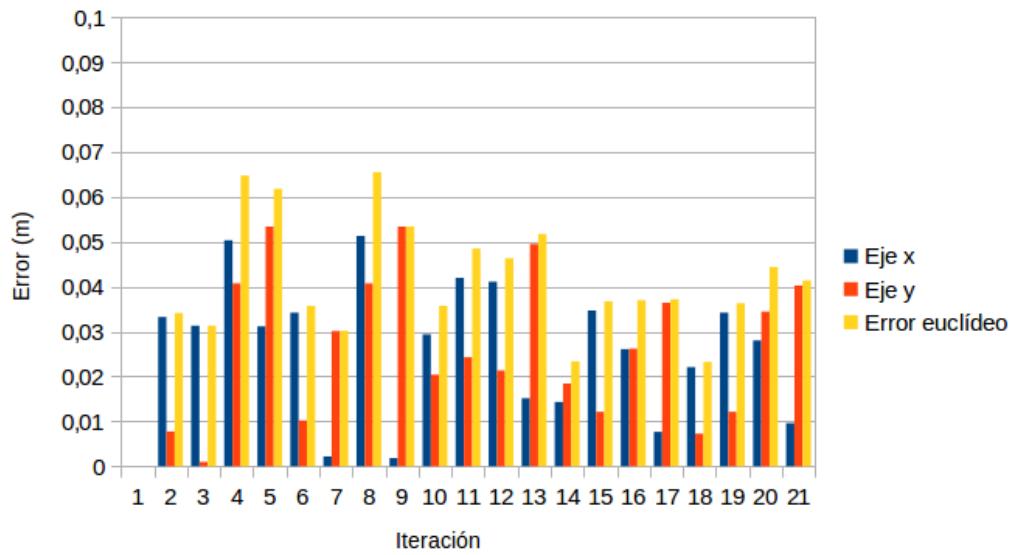


Figura 3.5: Errores de localización basado en la odometría

Usando el Filtro de Partículas como método de localización

Estudiando el caso del Filtro de Partículas como método de localización encontramos que los mayores errores han sido **0.065 m en el eje x** y **0.07 m en el eje y**, tal y como podemos ver en la figura 3.6.

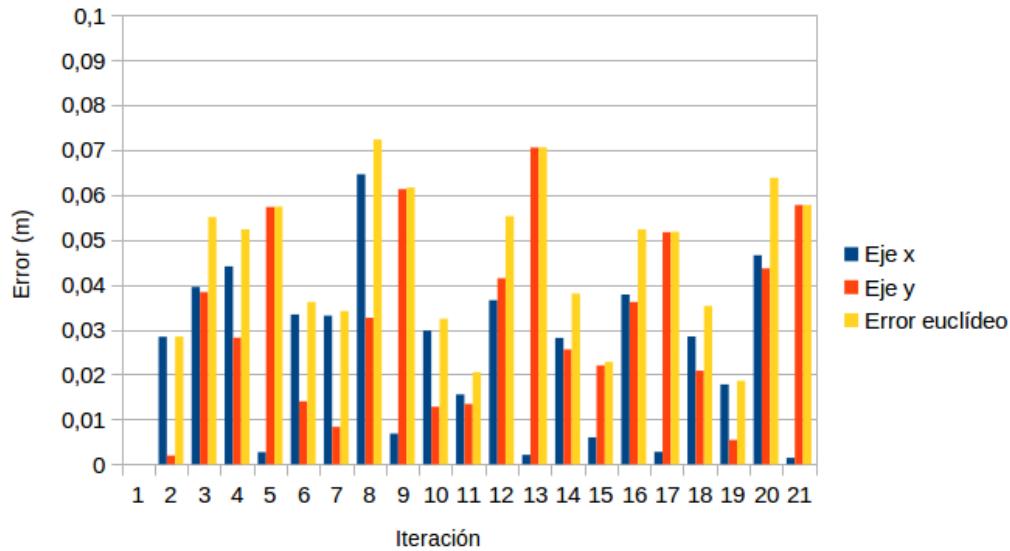


Figura 3.6: Errores de localización en el método de Filtro de Partículas

Resultados usando el Filtro de Kalman como método de localización

Estudiando el caso del Filtro de Kalman como método de localización encontramos que los mayores errores han sido **0.061 m en el eje x y 0.073 m en el eje y**, tal y como podemos ver en la figura 3.7.

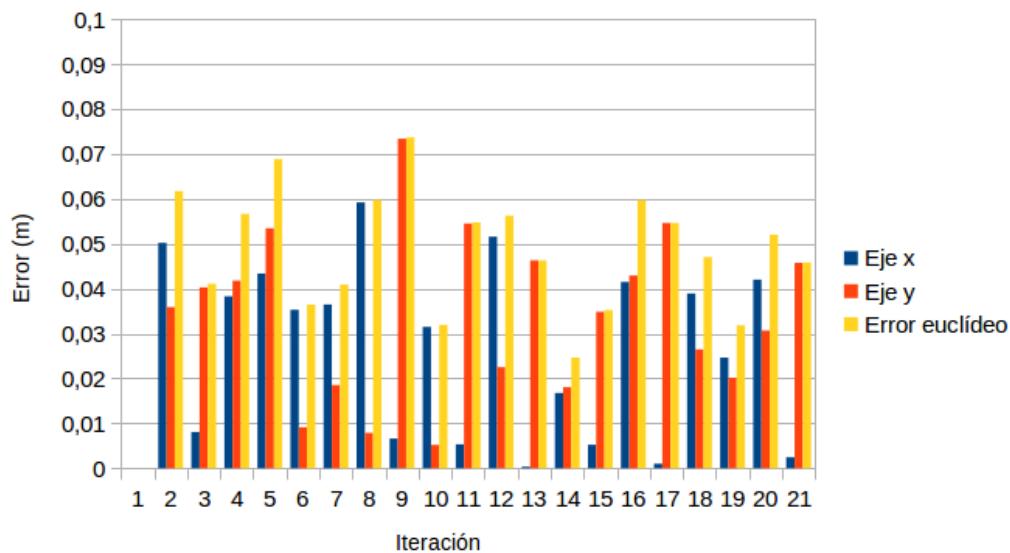


Figura 3.7: Errores de localización en el método de Filtro de Kalman

3.3.4. Conclusiones del estudio previo de los algoritmos de localización

Tras analizar los errores cometidos en la localización por los diferentes métodos, se ha obtenido como conclusión que todos los métodos probados han dado grandes resultados.

En el caso de que se probase en un entorno real, donde la odometría tuviese error o la posición al inicio no se conozca, los errores en el método de localización basado en la odometría serían mucho mayores que los otros algoritmos de localización. Esto será mostrado en el apartado de experimentos del Filtro de Partículas basado en información visual.

3.4. Desarrollo del trabajo

3.4.1. Introducción

En este trabajo se busca localizar un robot en un espacio abierto. Para ello, se va a diseñar un Filtro de Partículas basado en información visual captada por los sensores. Esta información visual (nube de puntos) será proyectada a imágenes para, en la fase de actualización de pesos, asignar pesos a las posibles posiciones del robot mediante la comparación de las imágenes obtenidas por los sensores y las que obtendría el robot en las posibles posiciones.

En el desarrollo se explicará el trabajo para realizar un Filtro de Partículas basado en información visual que incluirá:

- Preparar el entorno de pruebas en Gazebo y ROS para utilizarlo en el desarrollo y validación del Filtro de Partículas.
- “Mapear” el entorno, para obtener la nube de puntos del entorno.
- Obtener imágenes de los sensores y de las partículas.
- Calcular el peso de las partículas.
- Aplicar los anteriores pasos a la teoría del Filtro de Partículas para desarrollar el módulo de localización basado en un Filtro de Partículas con información visual.

3.4.2. Preparación del entorno

Para el desarrollo y validación del Filtro de Partículas se ha preparado un entorno (figura 3.8) utilizando la herramienta Gazebo, donde se ha cargado un modelo de una

carretera, un modelo del Pioneer 3-DX al cual se le ha añadido una cámara de tipo profundidad (Kinect) y un controlador para poder mover el robot a través del entorno.

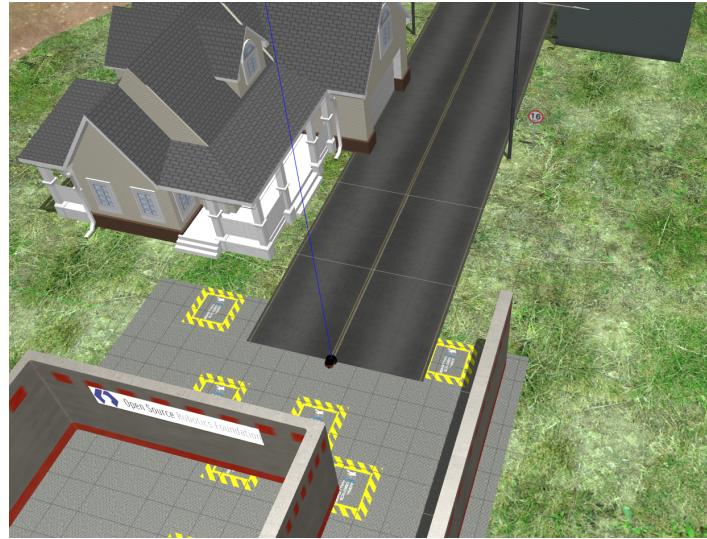


Figura 3.8: Entorno simulado en Gazebo

3.4.3. “Mapeo” del entorno

Para el desarrollo del módulo de localización es necesario realizar un mapeo en tres dimensiones del entorno, para ello se ha utilizado el nodo “`rtabmap_ros`” [20] que permite realizar esta acción utilizando información visual.

Rtabmap utiliza un algoritmo basado en “SURF” [21] para obtener los puntos de interés de la información visual. Estos puntos de interés son utilizados para agrupar toda la información en una sola nube de puntos con toda la información del entorno.

Para mapear el entorno se ha movido el robot mediante el nodo “`teleop_twist_keyboard`” que publica la velocidad que se desee obtener en el topic “`/cmd_vel`”.

Además, para que el robot obtenga la velocidad que le pasamos mediante el comando anterior se ha añadido al modelo del robot el plugin “`differential_drive_controller`” [22].

Podemos ver como se va mapeando el entorno con la herramienta Rviz que permite suscribirse a topics y visualizarlos. Rtabmap publicará la nube de puntos del entorno en un topic por lo que con Rviz se puede llevar un seguimiento tal y como vemos en la imagen 3.9.

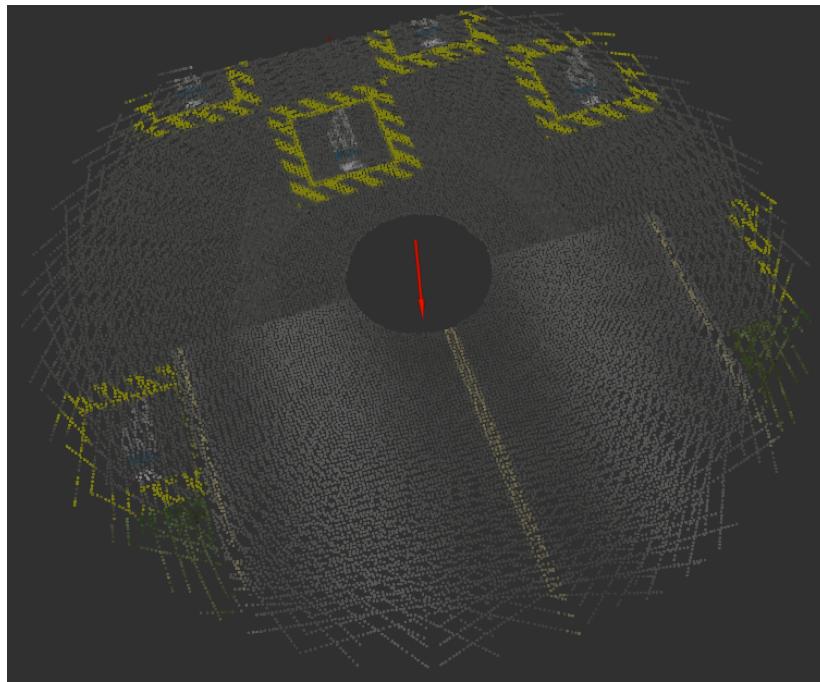


Figura 3.9: Nube de puntos obtenida al realizar un mapeo con rtabmap

3.4.4. Obtención de la nube de puntos de las partículas

Una vez que mapeado todo el entorno se necesita conocer la nube de puntos de cualquier partícula del Filtro de Partículas. Para ello, se debe obtener la nube de puntos que observaría el sensor suponiendo que el robot se encuentra localizado en la posición (x, y, θ) , siendo “x” la posición en el eje de la profundidad, “y” la posición en el eje horizontal y “ θ ” la orientación del robot.

Para obtener la nube de puntos de la partícula situada en la posición (x, y, θ) se debe trasladar la nube de puntos del entorno (obtenida tras mapear) $(-x, -y, 0)$ aplicando la transformación M1 a todos los puntos del entorno.

$$M1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x \\ 0 & 1 & 0 & -y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Posteriormente rotar la nube de puntos $(0,0,\theta)$ aplicando la transformación M2 a todos los puntos del entorno.

$$M2 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Una vez aplicadas estas transformaciones se obtendría la nube de puntos del robot localizado en la posición (x, y, θ) , a la que habría que limitar el rango en función de la profundidad y anchura del sensor. Un ejemplo del resultado final sería el mostrado en la figura 3.10.

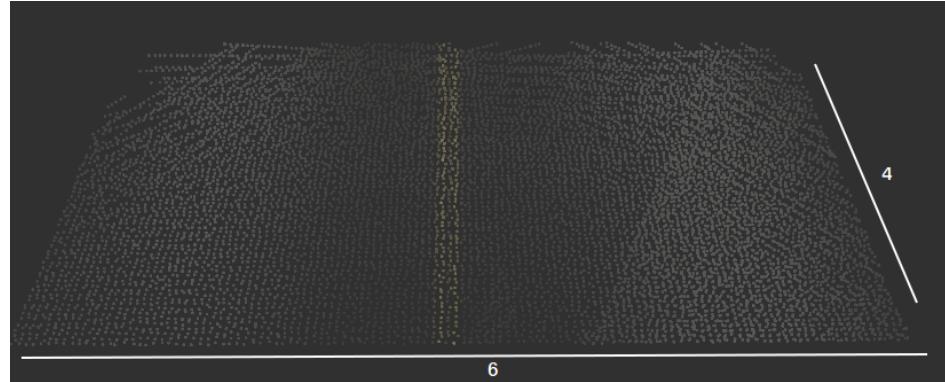


Figura 3.10: Nube de puntos obtenida recortando la nube de puntos obtenida mediante mapeo.

Para reducir la complejidad computacional se ha recortado la nube de puntos antes de comenzar a realizar las diferentes transformaciones, esta reducción se ha realizado mediante un recorte de 6 metros alrededor de la imagen, consiguiendo así que las transformaciones no sean aplicadas a los puntos que no son potencialmente importantes para visualizar la imagen del sensor.

Para reducir aún más la complejidad computacional, se ha realizado conjuntamente la traslación de la nube de puntos (M1) y la rotación de la nube de puntos (M2) mediante la multiplicación de matrices, obteniendo una matriz MT que realiza las anteriores operaciones simultáneamente:

$$MT = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \cdot PosX - \sin(\alpha) \cdot PosY \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \cdot PosY + \sin(\alpha) \cdot PosX \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

MT se aplicaría a todos los puntos de la nube de puntos recortada anteriormente, es decir:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \cdot PosX - \sin(\alpha) \cdot PosY \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \cdot PosY + \sin(\alpha) \cdot PosX \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

3.4.5. Obtención de las imágenes vistas desde arriba

Para la localización basada en información visual es necesario obtener las imágenes que se obtendrían por el sensor y por las diferentes partículas, para ello se ha utilizado la nube de puntos del sensor/partícula (figura 3.11) y se ha proyectado sobre el plano z, obteniendo así una imagen en 2d (figura 3.12).

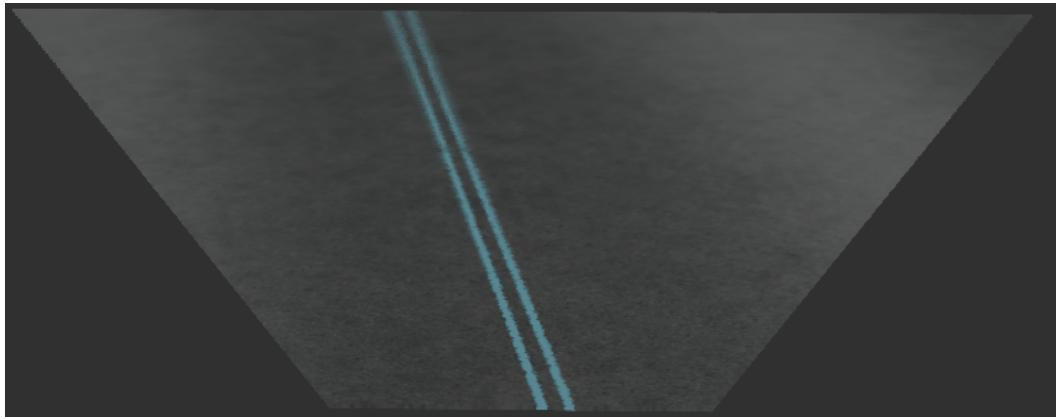


Figura 3.11: Nube de puntos obtenida por el sensor

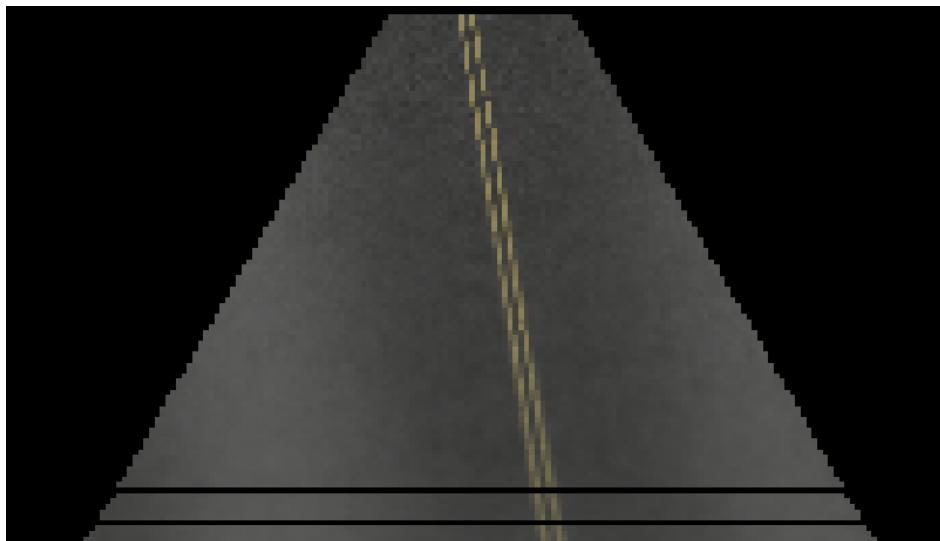


Figura 3.12: Imagen obtenida desde arriba proyectando la nube de puntos del sensor sobre el plano z

3.4.6. Detección de líneas

Para la localización basada en información visual también se ha tratado de detectar las líneas para facilitar los cálculos.

Para detectar las líneas se han utilizado las imágenes producto de la proyección de las nubes de puntos, se han pasado a blanco y negro, posteriormente se ha utilizado

el algoritmo “Canny Edge Detection” [23], que permite encontrar bordes en la imagen, después se han excluido los elementos de la imagen que no nos resultan útiles, como el cielo o las zonas fuera de la carretera, para ello se ha elegido una zona de interés y se ha eliminado todo elemento que no esté dentro de esta zona (ver figura 3.13).

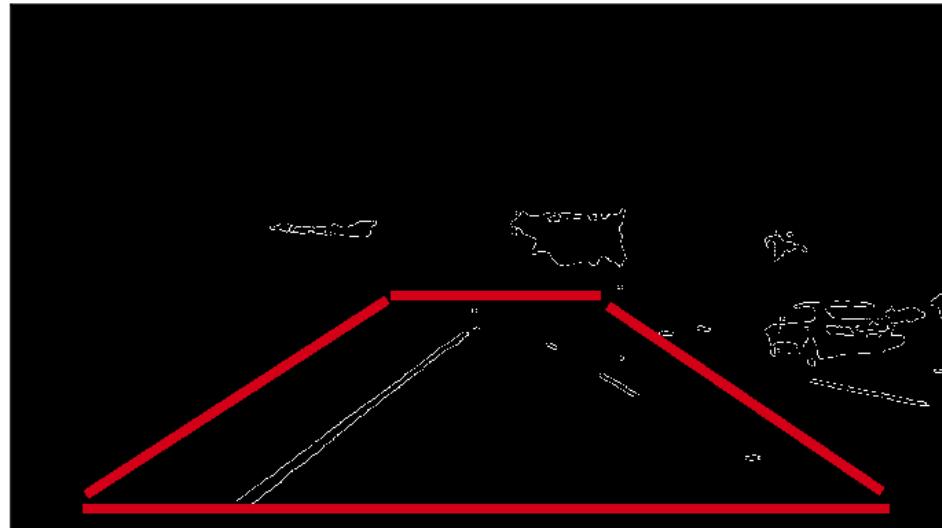


Figura 3.13: Zona de interés seleccionada de la imagen

Posteriormente se han seleccionado las regiones de los elementos que tienen bordes de la imagen en blanco y negro, obteniéndose la linea de la carretera en su totalidad, no solo los bordes, y así obtendríamos las lineas detectadas para basarnos en la visualización a la hora de localizar el robot en el entorno.

Debido a las pruebas que se han realizado posteriormente se ha decidido no utilizar las lineas detectadas para la localización y utilizar la imagen íntegra.

3.4.7. Cálculo de pesos de las partículas

Para la realización del Filtro de Partículas se necesita una forma de comparar las medidas obtenidas con las esperadas, para ello se comparan las imágenes obtenidas anteriormente del sensor con las de las partículas.

Cálculo de pesos mediante comparación por histogramas

La comparación se ha decidido hacerla de forma rápida, por lo que se ha utilizado un método basado en los histogramas de las imágenes, de forma que se divide la imagen que obtendría la partícula en pequeñas sub-imágenes, concretamente 16 sub-imágenes.

Para cada una de las sub-imágenes se calculan los valores medios de los canales RGB y posteriormente se comparan con los valores medios de las sub-imágenes obtenidas de

la imagen del sensor mediante la expresión 3.1 que devuelve la distancia entre las imágenes, siendo “S” la subimagen, “RGB” los componentes rojo, verde y azul de la imagen, “VIS” el valor de la imagen del sensor y “VIP” el valor de la imagen de la partícula.

$$Distancia = \sum_{i=0}^S \sum_{j=0}^{RGB} |VIS_{ij} - VIP_{ij}| \quad (3.1)$$

Una vez conocida la distancia entre las imágenes se asigna el peso a las partículas en base a éste. Para calcular el peso se ha decidido buscar una función exponencial y decreciente, como la mostrada en la figura 3.14, que devolvería el peso de la partícula calculada según la expresión (3.2), teniendo como entrada la distancia entre las imágenes y de base un factor mayor que 0 según la pendiente que se quiera en la función.

$$f(distancia) = factor^{(1/(distancia/100))} \quad (3.2)$$

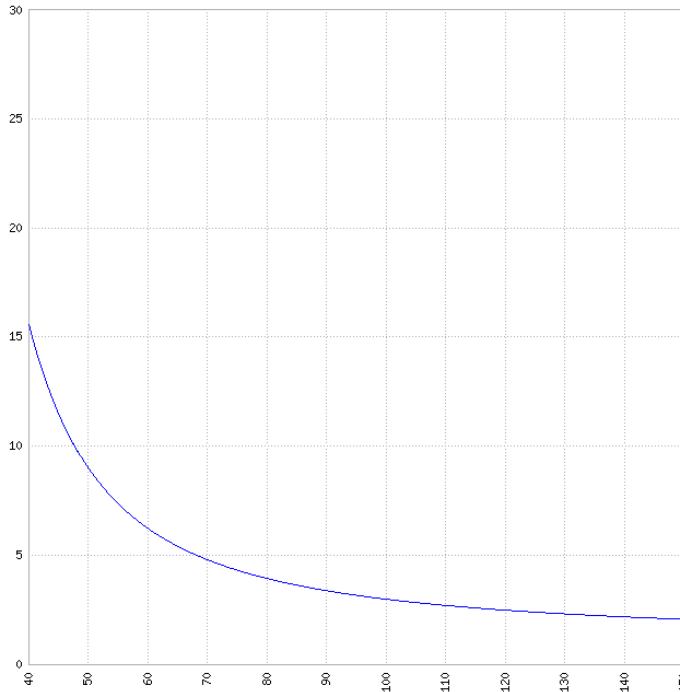


Figura 3.14: Función exponencial decreciente, $f(x) = 3^{1/(x/100)}$

3.4.8. Desarrollo del Filtro de Partículas

Tras establecer el entorno y desarrollar un método para calcular los pesos de las partículas, se comienza el desarrollo del módulo de ROS para la localización basado en el Filtro de Partículas con información visual.

El Filtro de Partículas diseñado seguirá la teoría básica de un Filtro de Partículas (algoritmo 3.1).

Algoritmo 3.1: Filtro de Partículas

| | |
|----|---|
| 1 | Algoritmo de Filtro de Partículas(X_{t-1}, u_t, z_t): |
| 2 | for each number of particles do: |
| 3 | $x_t^{[m]} \sim N(\mu, \sigma^2)$ |
| 4 | set $x_t^{[m]}$ to X_t |
| 5 | end for |
| 6 | for each number of iteration do: |
| 7 | for each number of particles do: |
| 8 | sample $x_t^{[m]} \sim p(x_t u_t, x_{t-1}^{[m]})$ |
| 9 | $w_t^{[m]} = p(z_t x_t^{[m]})$ |
| 10 | $\bar{X}_t = \bar{X}_t + (x_t^{[m]}, w_t^{[m]})$ |
| 11 | end for |
| 12 | for each number of particles do: |
| 13 | draw i with probability $\alpha \cdot w_t^{[i]}$ |
| 14 | add $x_t^{[i]}$ to X_t |
| 15 | end for |
| 16 | end for |

Fase de inicialización

El Filtro de Partículas tendrá una fase de inicialización donde el conjunto de partículas se genera aleatoriamente o mediante una posición aproximada utilizando una distribución normal con μ como media y σ como varianza (ver desde la linea 2 a la 5 del algoritmo 3.1).

En el desarrollo del Filtro de Partículas se ha inicializado el conjunto de partículas asignando partículas aleatoriamente siguiendo una distribución normal $N(\mu, \sigma)$, donde μ es la posición dada por el sensor GPS y σ es la varianza que se necesite para corregir el error del GPS, consiguiendo distribuir las partículas por esa posición.

Para el cálculo de σ ha sido necesario conocer la proporción de los datos en una distribución normal (figura 3.15). Pudiendo asignar el valor de σ según el error del GPS.

3.15.

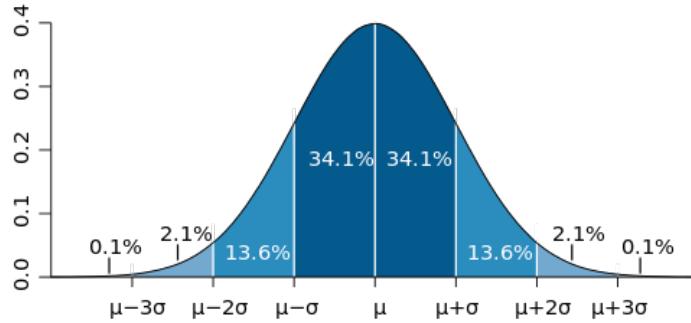


Figura 3.15: Porcentaje de datos en la distribución normal

Una vez inicializado el conjunto de partículas quedaría como se muestra en la figura 3.16 donde se muestra la posición del robot como una flecha roja grande y el conjunto de partículas disperso por el entorno mediante flechas pequeñas rojas.

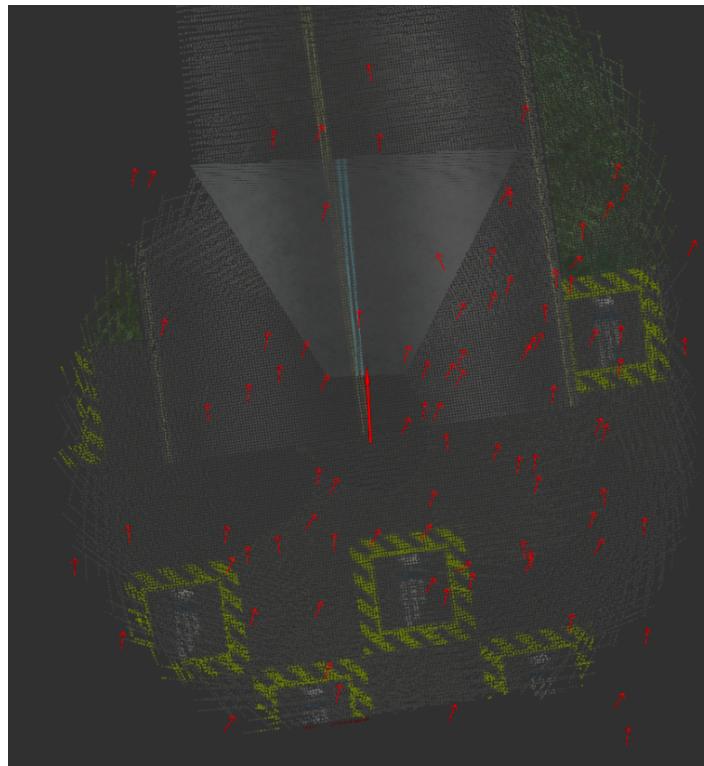


Figura 3.16: Partículas tras ser inicializadas

Fase de predicción

El Filtro de Partículas contiene una fase de predicción que será la encargada de, dependiendo de las entradas del robot u_t , predecir su localización (ver linea 8 del algoritmo 3.1) modificando las partículas mediante la aplicación de las expresiones (3.3), (3.4) y (3.5) donde α es la orientación de la partícula.

$$P_{X_t} = P_{X_{t-1}} + (|X_t - X_{t-1}| + |Y_t - Y_{t-1}|) \cdot \cos(\alpha) \quad (3.3)$$

$$P_{Y_t} = P_{Y_{t-1}} + (|X_t - X_{t-1}| + |Y_t - Y_{t-1}|) \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (3.4)$$

$$P_{Theta_t} = P_{Theta_{t-1}} + Theta_t - Theta_{t-1} \quad (3.5)$$

Tras la predicción de la posición del robot se añade un ruido gaussiano de media la posición de la partícula y varianza la que necesaria para que las partículas no converjan a un punto fijo.

Fase de actualización

A continuación el Filtro de Partículas realiza la fase de actualización de pesos de las partículas (ver linea 9 del algoritmo 3.1) utilizando la distancia entre imágenes tal y como se muestra en la expresión (3.6), siendo “S” la subimagen, “RGB” los componentes rojo, verde y azul de la imagen, “VIS” el valor de la imagen del sensor y “VIP” el valor de la imagen de la partícula.

$$Distancia = \sum_{i=0}^S \sum_{j=0}^{RGB} |VIS_{ij} - VIP_{ij}| \quad (3.6)$$

Posteriormente, la posición de la partícula calculada en la fase de predicción con su respectivo peso es añadida al conjunto de partículas (ecuación 3.7).

$$\overline{X}_t = \overline{X}_t + (x_t^{[m]}, w_t^{[m]}) \quad (3.7)$$

Fase de “Resampling”

El algoritmo, tras pasar la fase de actualización de pesos mediante la comparación de imágenes, llega a la fase de “Resampling” (ver desde la linea 12 a la 15 del algoritmo 3.1).

En esta fase se aplica el método de resample “Resample Wheel” donde aquellas partículas que mejor se ajusten a las medidas (partículas de mayor peso normalizado) darán lugar a nuevas partículas con mayor probabilidad consiguiendo el conjunto de partículas que es probablemente el más correcto.

En esta fase también se obtiene la localización según el algoritmo, pues nos quedaremos con la partícula de mayor peso que indicará la posición del robot tal y como se ve en la figura 3.17 como una flecha de color verde junto con la posición real del robot mostrada como una flecha de color rojo.



Figura 3.17: Mejor partícula del conjunto y posición real

Tras esta fase se pasa a la fase de predicción para seguir localizando el robot realizando el esquema mostrado en la figura 3.18.

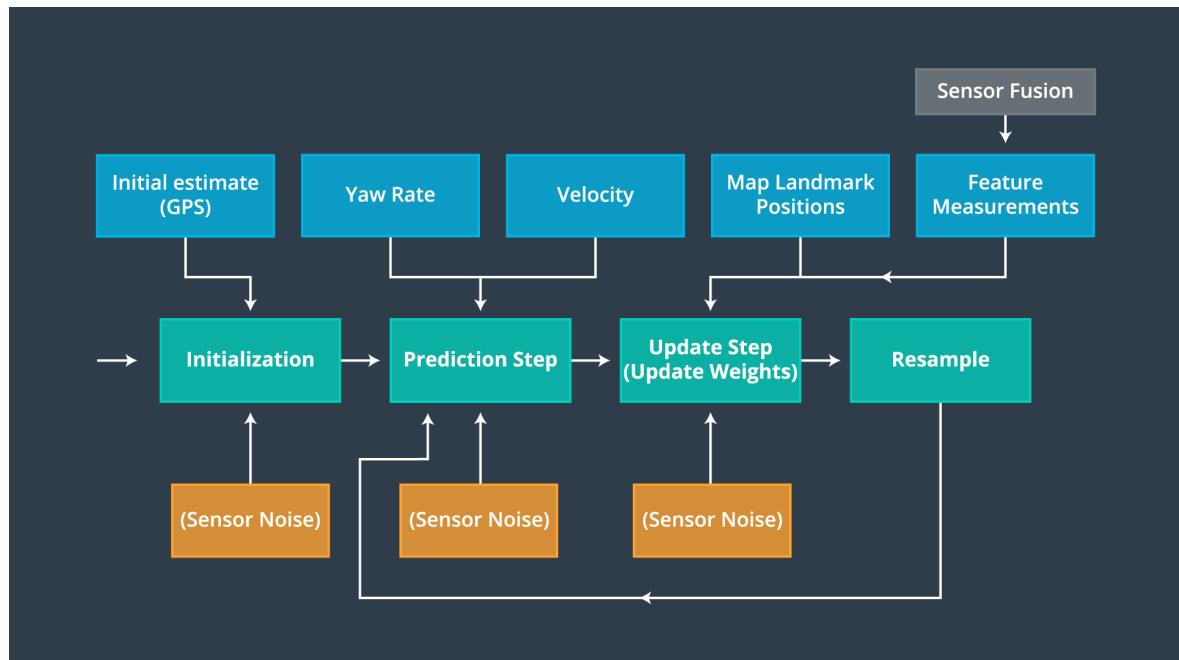


Figura 3.18: Esquema del Filtro de Partículas

Capítulo 4

EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

En este capítulo se mostrarán diferentes experimentos y resultados para probar la robustez del algoritmo de localización basado en información visual utilizando:

- Un entorno perfecto, sin errores de ningún tipo donde se pueda ver y probar como converge la posición dada por el algoritmo a la posición real del robot.
- Un entorno que muestre la robustez a una odometría con error, puesto que en un entorno de verdad el movimiento definido por la odometría puede no corresponder con el real.
- Un entorno que muestre la robustez a oclusiones, es decir, donde el entorno no es estático y pueden haber cambios con el tiempo.
- Un entorno combinando los dos tipos de robustez, la robustez a oclusiones y al error en la odometría.

Además, en este capítulo se analizarán los tiempos de cada una de las fases del Filtro de Partículas para posteriormente realizar mejoras.

4.1. Resultados obtenidos del error de la localización

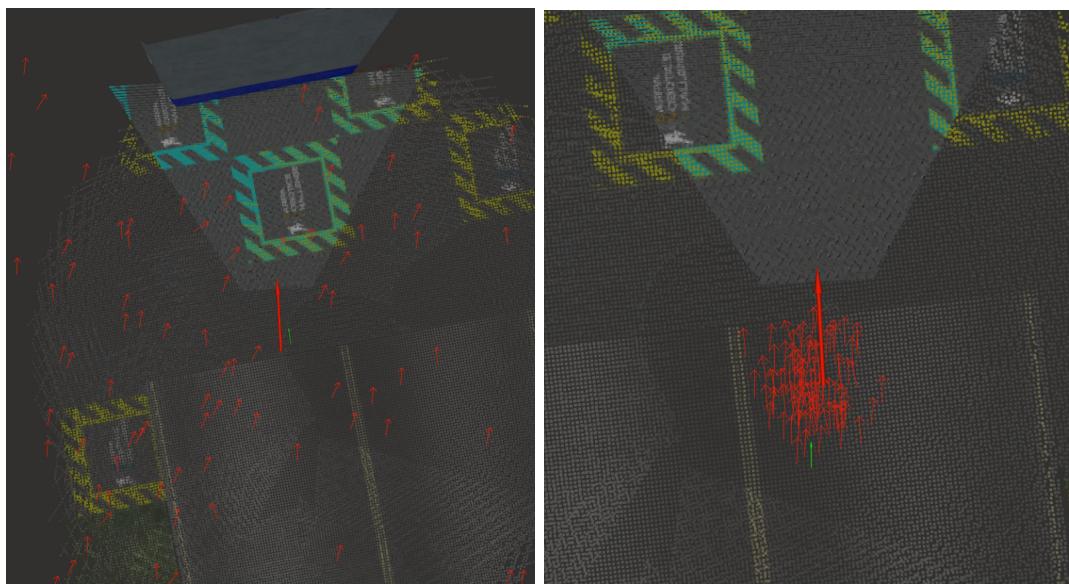
En esta sección se probará el funcionamiento del Filtro de Partículas en diferentes condiciones para probar la robustez del método de localización. Estas pruebas de robustez buscan simular una situación real, donde el movimiento definido por la odometría puede no corresponder con el movimiento real y el entorno puede cambiar con el tiempo.

4.1.1. Resultados de la localización en un entorno perfecto

Tras desarrollar el Filtro de Partículas se ha decidido probar en diferentes entornos, el primero es utilizando una odometría perfecta, es decir, el movimiento que realiza el

robot es perfecto, no existen defectos como deslizamientos en las ruedas, de esta forma podemos validar que la implementación desarrollada del Filtro de Partículas es capaz de converger a la posición real del robot en un caso ideal.

En este experimento se ha movido el robot realizando un cuadrado en el entorno. Se puede ver la evolución del conjunto de partículas tras varias iteraciones en la figura 4.1.



(a) Conjunto de partículas tras iniciarse el experimento (b) Conjunto de partículas tras finalizar el experimento

Figura 4.1: Evolución del conjunto de partículas

Comparando la localización dada por el algoritmo con la posición real del robot, se ve como realmente la posición dada por el algoritmo converge a la posición real (figuras 4.2 y 4.3), validando el funcionamiento del Filtro de Partículas.

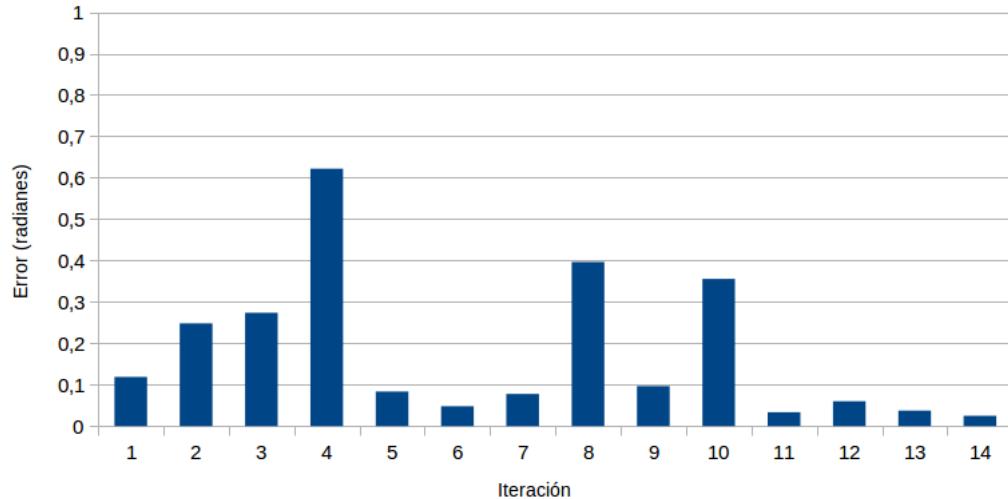


Figura 4.2: Error en la orientación en un escenario perfecto

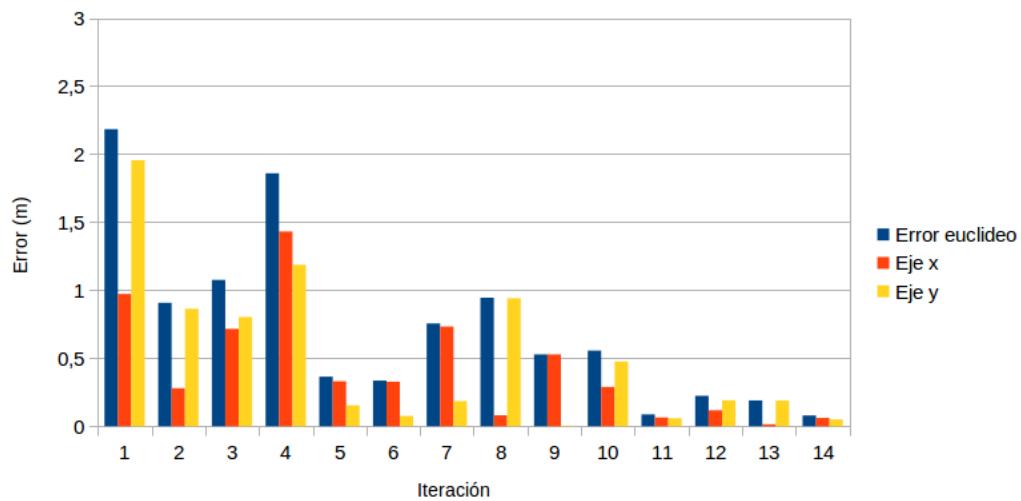


Figura 4.3: Error en la posición en un escenario perfecto

4.1.2. Resultados de la localización a pruebas de robustez de error en la odometría

Para probar la efectividad de este Filtro de Partículas en una situación real, donde el movimiento definido por la odometría puede no corresponder con el movimiento real, se ha decidido simular que la odometría obtenida tiene error, es decir, se simulará que el robot detecta que realiza, según la odometría, movimientos lineales y angulares mayores que los que realmente realiza, concretamente se ha añadido un error aleatorio entre 0.06 m/s y 0.13 m/s a la hora de realizar movimientos lineales y entre 3°/s y 6°/s a la hora de realizar movimientos angulares.

Tras realizar un cuadrado en el entorno con el robot, el error en la odometría es el mostrado en las figuras 4.4 y 4.5.

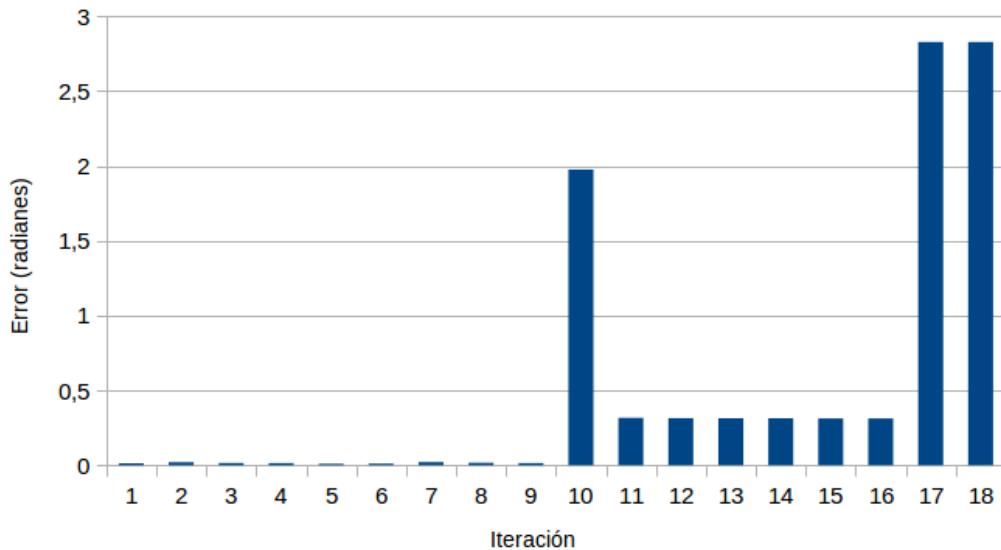


Figura 4.4: Error de la odometría en la orientación

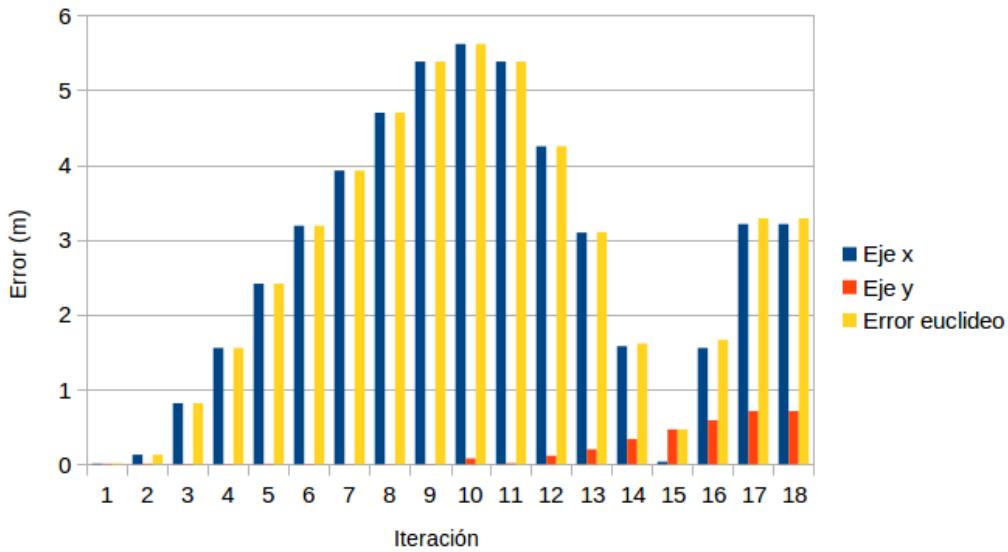


Figura 4.5: Error de la odometría en la posición

Se puede ver como el error va aumentando según el tiempo va transcurriendo, por lo que a mayor tiempo ejecutando el Filtro de Partículas, mayor será el error de la odometría, llegando a conseguir que el robot se pierda completamente.

La localización obtenida por el algoritmo de localización basado en el Filtro de

Partículas con información visual obtendría unos errores con respecto a la posición real mostrados en las figuras 4.6 y 4.7, reduciéndose en comparación a la odometría.

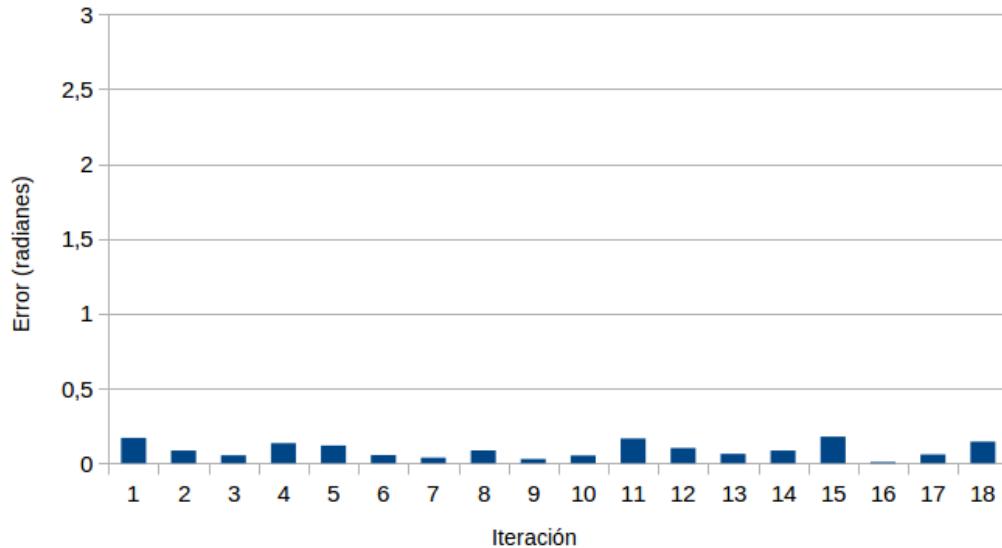


Figura 4.6: Error de la localización en la orientación

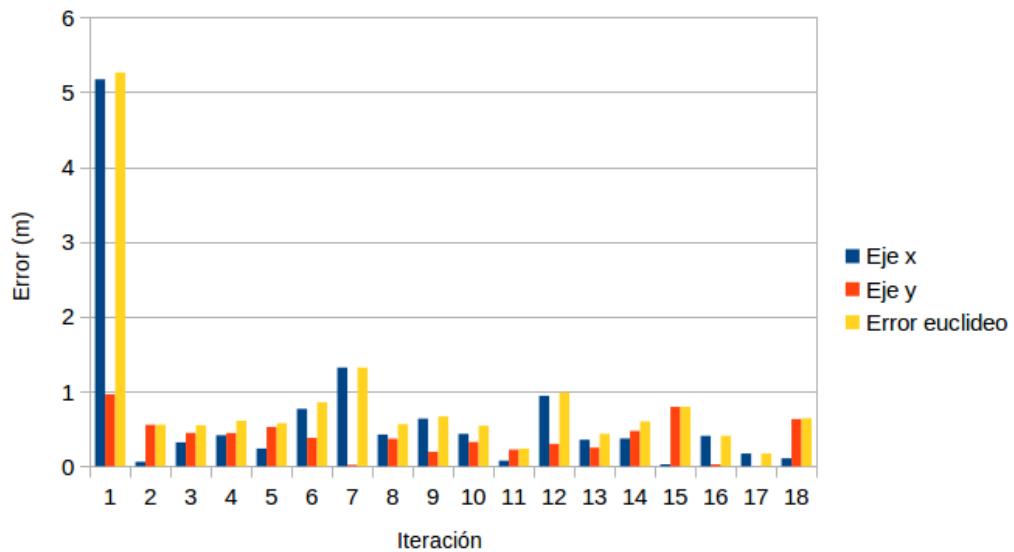


Figura 4.7: Error de la localización en la posición

Podemos utilizar el visualizador Rviz para mostrar todos los elementos del Filtro de Partículas. En la figura 4.8, obtenida mediante Rviz, se muestra la posición real del robot como una flecha azul, la posición obtenida según la odometría del robot como una flecha roja de gran tamaño, las diferentes partículas del conjunto como flechas rojas y la localización dada por el algoritmo como una flecha verde.

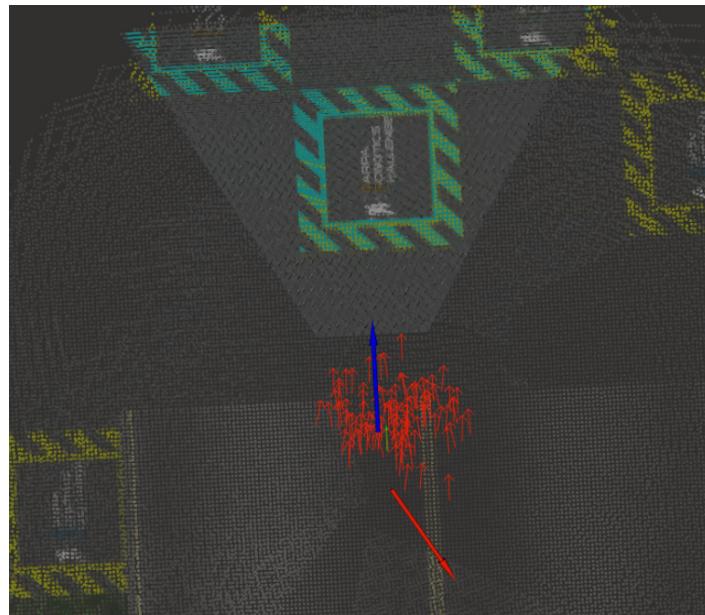


Figura 4.8: Visualización de la información de los elementos del Filtro de Partículas en la última iteración

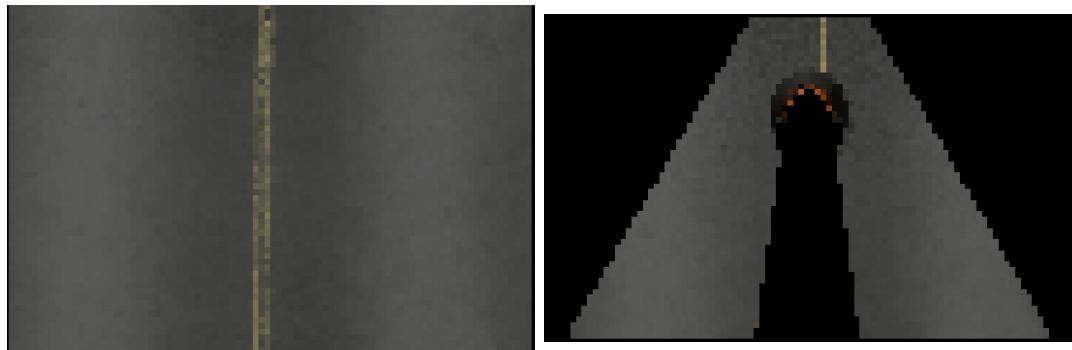
4.1.3. Resultados de la localización a pruebas de robustez a occlusiones

Debido a que el entorno no es estático, es decir, puede haber cambios con el tiempo, en esta prueba se validará la robustez a occlusiones del algoritmo añadiendo obstáculos para dificultar la localización del robot. Este aspecto es resuelto eficazmente debido al método de comparación de imágenes basado en histogramas, pues no tiene en cuenta aquellas zonas de la imagen donde no hay elementos proyectados.

En esta prueba se han añadido al entorno algunos elementos (figura 4.9) que no han sido mapeados anteriormente, tal y como se puede ver comparando la imagen obtenida de los sensores con la de la misma posición obtenida del mapeado (figura 4.10).



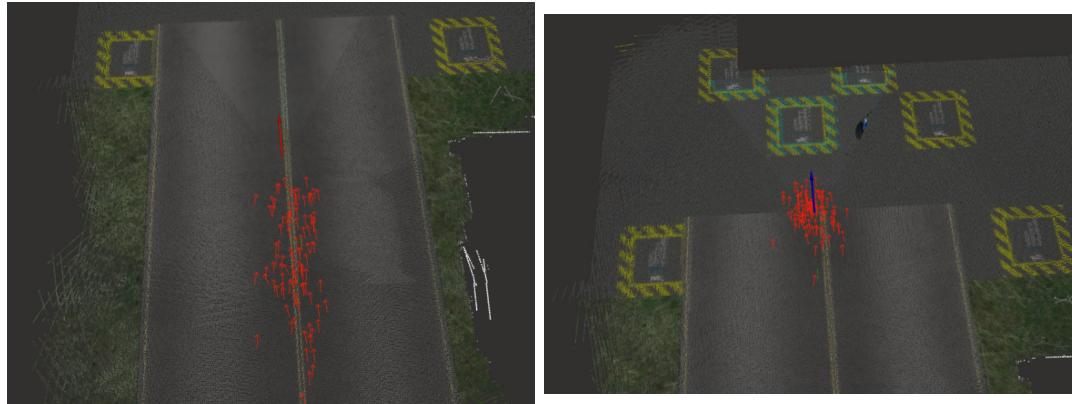
Figura 4.9: Entorno gazebo con obstáculos



(a) Imagen obtenida mapeando el entorno (b) Imagen obtenida mediante el sensor

Figura 4.10: Comparación de las imágenes obtenidas en un entorno con occlusiones

La prueba realizada en este caso ha sido la de avanzar por la carretera para demostrar también que las partículas pueden obtener imágenes muy similares y por tanto tener pesos parecidos creando ambigüedad en la localización. Esto se resolvería posteriormente, cuando alguna partícula junto al sensor encuentre un elemento distintivo y las demás partículas pierdan su peso, ejemplo que se puede ver en la figura 4.11.



(a) Conjunto de partículas con ambigüedad en la localización (b) Conjunto de partículas resolviendo ambigüedad en la localización

Figura 4.11: Corrección de ambigüedad

Analizando el error medio del conjunto de partículas en este experimento (figuras 4.12 y 4.13) y el error de la localización (figuras 4.14 y 4.15), se puede ver la parte donde aparece ambigüedad desde la iteración 7 a la 16, haciendo que el error en el eje x no se corrija hasta que se encuentre un elemento distintivo en la iteración 17.

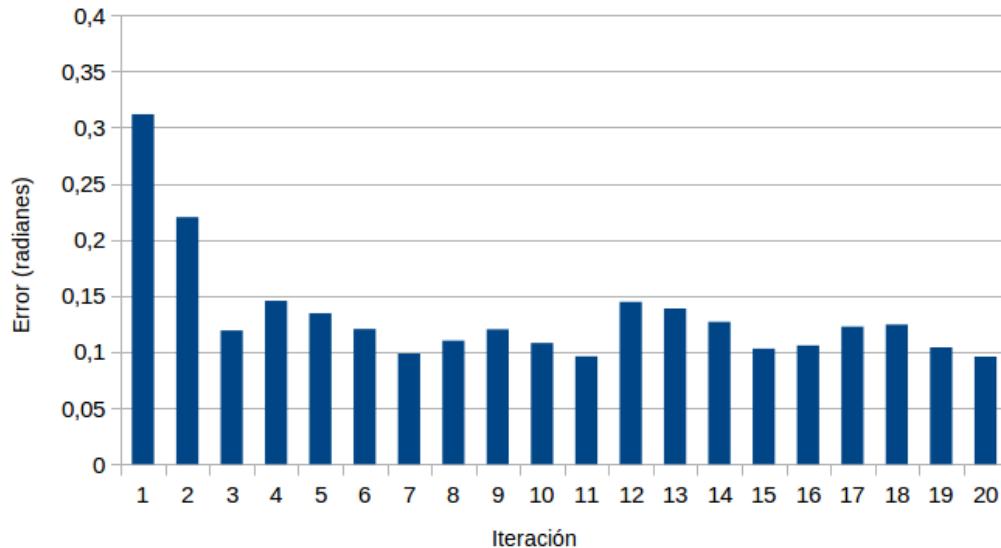


Figura 4.12: Errores medios en la orientación del conjunto de partículas

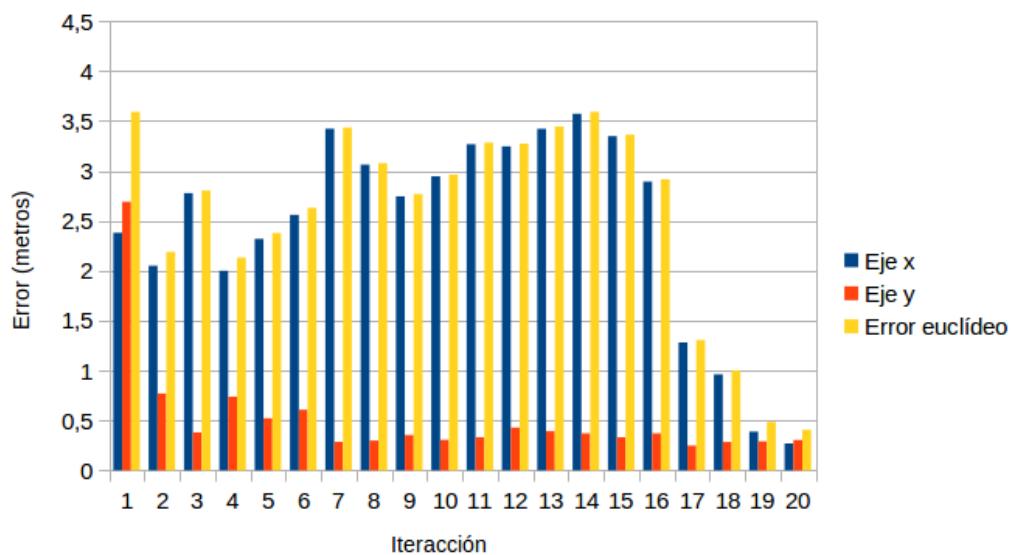


Figura 4.13: Errores medios en la posición del conjunto de partículas

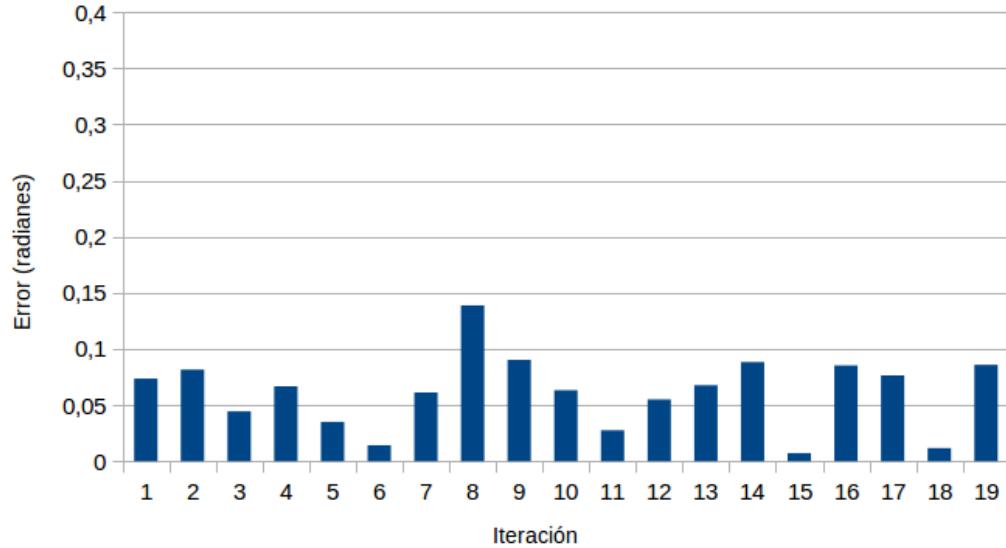


Figura 4.14: Errores de localización en la orientación

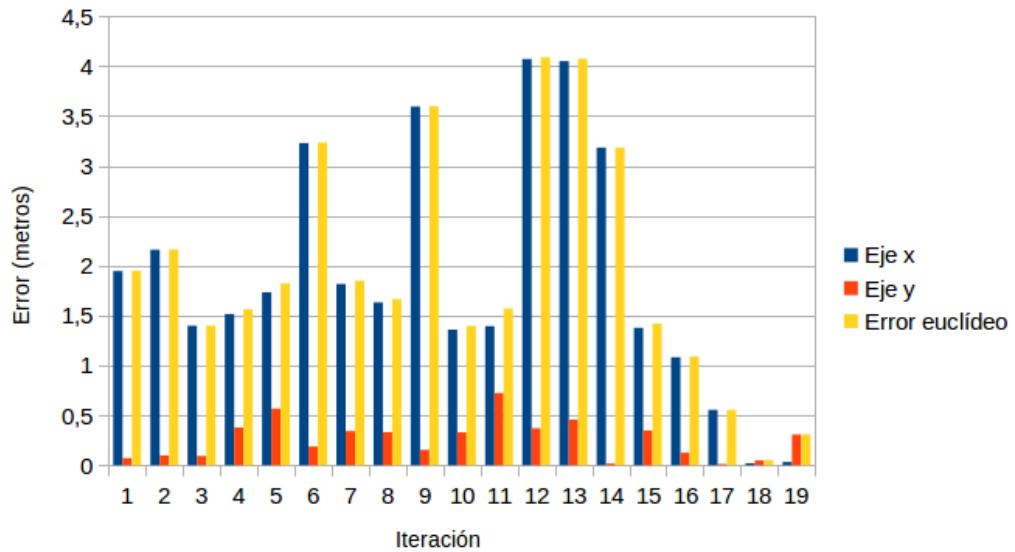


Figura 4.15: Errores de localización en la posición

4.1.4. Resultados de la localización a pruebas de robustez en occlusiones y error en odometría

En esta sección se probará la robustez a occlusiones y al error en la odometría, simulando un entorno casi real, donde la odometría puede no corresponder con el movimiento real y el entorno es cambiante con el tiempo.

Se ha movido el robot por el entorno, obteniendo un error en la odometría que va aumentando según el tiempo va transcurriendo, consiguiendo que el robot se pierda

completamente (figuras 4.16 y 4.17).

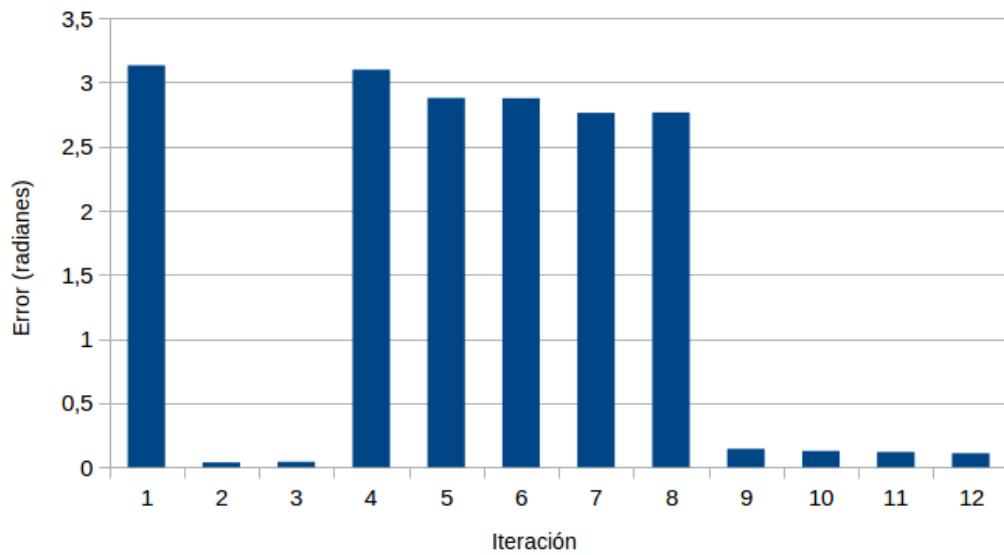


Figura 4.16: Error de odometría en la orientación

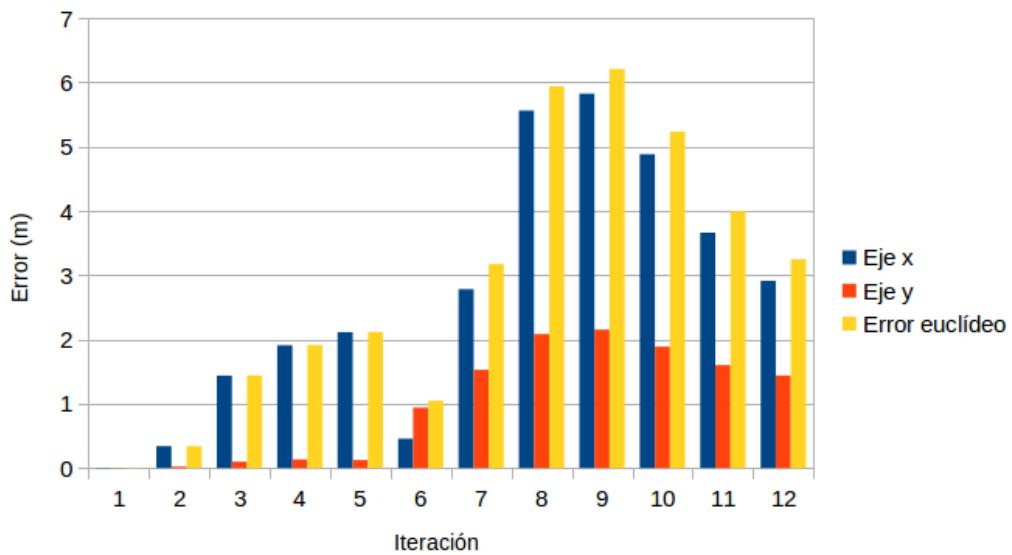


Figura 4.17: Error de odometría en la posición

Por el contrario, el error de la localización (figuras 4.18 y 4.19) se estabiliza, validando el funcionamiento del Filtro de Partículas en esta prueba.

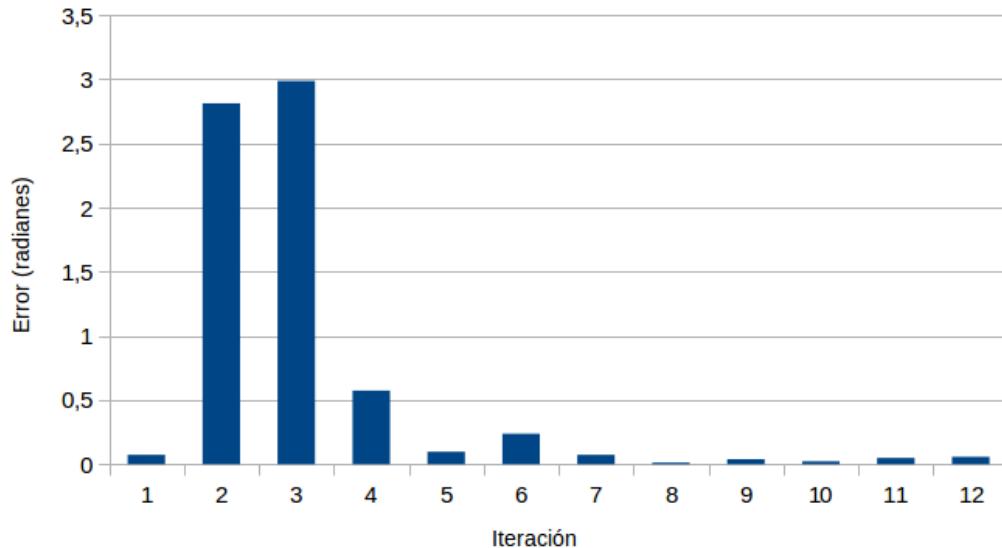


Figura 4.18: Error de la localización en la orientación

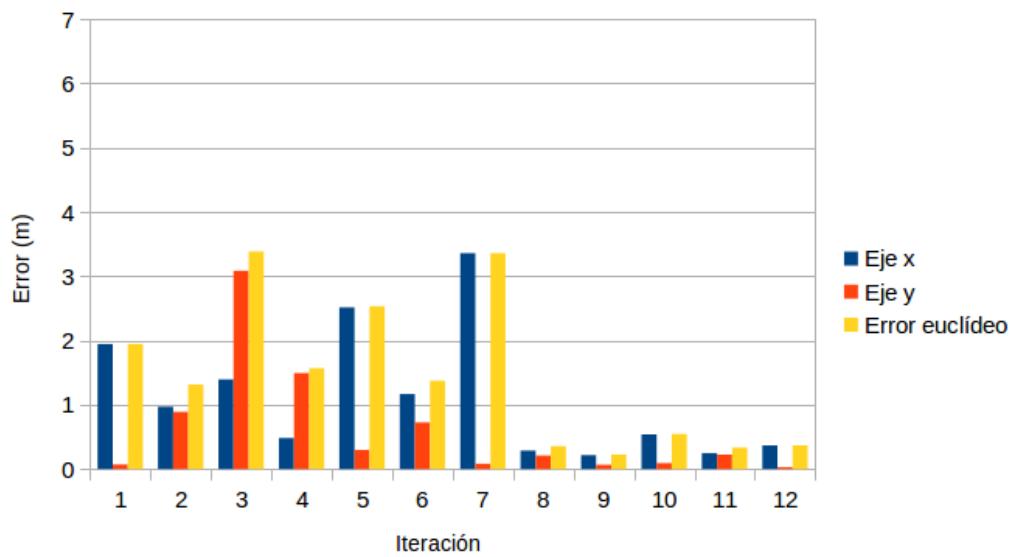


Figura 4.19: Error de la localización en la posición

4.2. Tiempos de cada una de las fases del Filtro de Partículas

Tras desarrollar el Filtro de Partículas se ha querido comprobar la complejidad computacional del algoritmo, procediendo a calcular los tiempos de cada fase para detectar posibles mejoras en las fases más pesadas.

Los tiempos obtenidos realizando una media de 20 iteraciones en el algoritmo son los mostrados en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Tiempos medios de cada una de las fases del algoritmo

| Tiempos | Media | Varianza |
|--|----------------|----------------|
| Fase de inicialización (100 partículas) | 0,000161 s | 0,000005 s |
| Fase de predicción (100 partículas) | 0,0002330526 s | 1,40E-09 s |
| Fase de actualización de pesos (100 partículas) | 23,63 s | 1,42 s |
| Calcular la imagen de una partícula | 0,231965 s | 0,0003605 s |
| Calcular la imagen del sensor | 0,0479708 s | 2,086677E-05 s |
| Comparar imagen del sensor con la de la partícula | 0,000447 s | 4,718639E-08 s |
| Fase de resample (100 partículas) | 9,99E-05 s | 9,03E-10 s |

En la figura 4.20 se muestra una gráfica con la media de los tiempos de 20 iteraciones en el bucle del Filtro de Partículas.

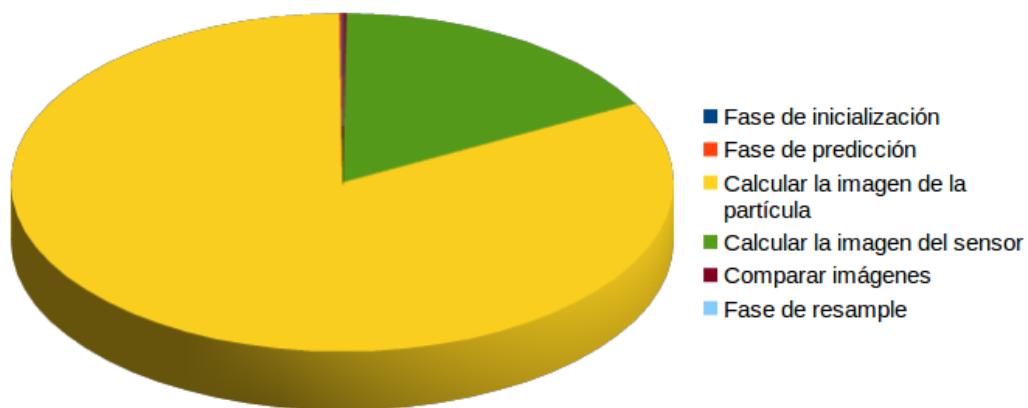


Figura 4.20: Tiempos medios de cada una de las fases del Filtro de Partículas

Se puede ver que las fases más pesadas computacionalmente son aquellas encargadas de obtener la imagen de la partícula y del sensor debido a la gran cantidad de operaciones que se realizan, y que crecerán proporcionalmente según la resolución que requiera la imagen y según la cantidad de puntos de la nube de puntos de todo el entorno.

4.3. Análisis de resultados

Con las diferentes pruebas realizadas sobre el Filtro de Partículas basado en información visual para localizar al robot hemos observado que:

- Se ha demostrado la importancia del uso de un algoritmo de localización, mostrando como el error acumulado en cada iteración no va aumentando continuamente tal y como haría un método de localización basado únicamente en la odometría.
- Se ha comprendido la gran utilidad de ROS en el ámbito de la robótica, pues, al utilizar un diseño modular y ser cada nodo independiente, nos permite afrontar los proyectos de una manera mucho más sencilla, centrándonos en el diseño de cada nodo para realizar una única labor específica.
- La unión de ROS con Gazebo tiene un gran potencial, pues permite realizar cualquier tipo de proyecto relacionado con la robótica sin necesidad de hardware, únicamente utilizando un entorno de simulación complejo pero con muchas características y flexibilidad para poder crear distintas soluciones a los problemas.
- El Filtro de Partículas debe tener en cuenta que a mayor cantidad de partículas, mayor complejidad computacional conlleva, y más exacta y precisa es la localización del robot. Por ello, se debe elegir una solución de compromiso entre el coste computacional y la precisión y exactitud de la localización.
- El Filtro de Partículas tiene una gran sencillez y capacidad de modificación, permitiendo crear un Filtro de Partículas especializado en cada tipo de problema específico.
- Los tiempos en realizar una iteración en el Filtro de partículas son elevados, pero estos pueden ser reducidos “mapeando” el entorno utilizando menos puntos, eliminando información no relevante, paralelizando las operaciones repetitivas o reduciendo el rango de los sensores.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y PROPUESTAS

5.1. Conclusiones

El trabajo realizado se ha centrado en el estudio, planteamiento y desarrollo de varias soluciones para probar diferentes métodos de localización en un coche autónomo. Algunas de estas soluciones implican mayor complejidad computacional y otras son poco precisas.

Se ha aprendido una gran cantidad de conceptos relativos a la robótica y se ha estudiado el uso de herramientas como Gazebo y ROS.

Se ha tratado con un algoritmo complejo computacionalmente hablando debido a la utilización de imágenes para la localización, lo que ha hecho plantear diversas formas de mejorar la eficiencia del código y plantear el paralelismo en el proyecto.

5.2. Competencias cubiertas

En este trabajo se han utilizado técnicas de las asignaturas de la rama de computación como son la visión artificial, la robótica y la informática gráfica. Además se han tocado transversalmente otras asignaturas como la estadística.

La robótica ha sido el centro del trabajo, centrando el trabajo en herramientas como ROS, Gazebo y estudiando una parte del temario de una forma más profunda, concretamente la de los filtros paramétricos y los no paramétricos, comprobándose empíricamente la gran utilidad para la localización.

Se ha comprobado que además de un buen algoritmo de localización, necesita tener buenos métodos para el cálculo de pesos y buenos sensores para que estos funcionen con exactitud.

Se ha tratado con sensores de diversos tipos como cámaras estéreo, cámaras de profundidad y sensores lidar.

En cuanto a la visión artificial se han utilizado técnicas de detección de elementos de una imagen y su tratamiento para la posterior comparación mediante técnicas relacionadas con los histogramas.

Por otro lado, las técnicas de informática gráfica también han sido utilizadas para realizar transformaciones geométricas en las nubes de puntos en un entorno en 3 dimensiones.

Otras disciplinas tratadas en el trabajo han sido el diseño de algoritmos y la aplicación de técnicas de sistemas inteligentes, evaluando y reduciendo la complejidad computacional de un problema, consiguiendo así, resolver, desarrollar e implementar una solución a dicho problema.

5.3. Trabajo futuro

En el trabajo futuro se estudiarán más algoritmos para la comparación de imágenes como “ORB”, “SURF” y “SIFT” que registran las imágenes basándose en puntos de interés para obtener mejores resultados.

También se buscará reducir la complejidad computacional reduciendo los elementos mapeados de la imagen de forma que solamente se utilicen los elementos que dan mayor información del entorno, como las líneas de la carretera.

En el proyecto se ha intentado añadir concurrencia al código, concretamente se ha añadido concurrencia con OpenMP [24] al apartado encargado de proyectar las nubes de puntos de las partículas en imágenes vistas desde arriba.

Esto no ha supuesto una mejora debido a la utilización de varios hilos por parte de otros nodos en el ordenador, pues ya estábamos utilizando todos los núcleos del procesador para realizar la localización.

Por ello, para mejorar la velocidad de computo tendríamos dos opciones más, utilizar CUDA [25] para aprovechar la tarjeta gráfica al realizar cálculos o utilizar Grid Computing.

Bibliografía

- [1] ROS, “Navigation Stack,” 2017. [xi](#), [25](#)
- [2] ElectronicTeacher, “What is Robotics?,” 2000. [1](#)
- [3] ROS, “Tutoriales de ROS, Robot Operating System,” 2010. [1](#)
- [4] Gazebo, “Gazebo, Robot simulation made easy,” 2009. [2](#)
- [5] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*. 2005. [2](#)
- [6] S. Thrun, “Particle Filters in Robotics,” tech. rep., 2002. [2](#), [3](#), [13](#)
- [7] T. Lacey, “Tutorial: The Kalman Filter,” tech. rep., 2015. [2](#), [3](#)
- [8] J. R. d. G. Pascual, “Robótica: Estado del arte,” tech. rep., 2007. [5](#)
- [9] S. Thurn, *Particle Filter, Resampling Wheel*, vol. 2012. 2005. [14](#), [16](#)
- [10] D. Fox, “KLD-sampling: Adaptive particle filters,” *Advances in neural information processing systems*, vol. 14, no. 1, pp. 713–720, 2001. [14](#)
- [11] Erle Robotics S.L., *Conceptos de ROS*. PhD thesis, 2013. [23](#)
- [12] ROS, “Twist Message,” 2018. [26](#)
- [13] K. Schwaber and J. Sutherland, “La Guía Definitiva de Scrum: Las Reglas del Juego,” tech. rep., 2016. [27](#)
- [14] ROS, “Gmapping,” 2019. [30](#)
- [15] W. Burgard, C. Stachniss, K. Arras, and M. Bennewitz, “Introduction to Mobile Robotics SLAM,” Tech. Rep. June, 2010. [30](#)
- [16] ROS, “Rviz,” 2018. [31](#)
- [17] ROS, “LaserScan Message,” 2018. [32](#)
- [18] ROS, “Odometry Message,” 2018. [32](#)

- [19] ROS, “Map Server,” 2018. [32](#)
- [20] ROS, “Rtab-map,” 2019. [37](#)
- [21] A. Mordvintsev and K. Abid, “Introduction to SURF,” 2013. [37](#)
- [22] Gazebo, “Gazebo Plugins,” 2014. [37](#)
- [23] OpenCV, “Canny Edge Detection,” *Página oficial OpenCV modules*, no. 2002, p. 1, 2015. [41](#)
- [24] OpenMP, “Application Programming Interface,” tech. rep., 2016. [62](#)
- [25] Nvidia, “CUDA,” 2007. [62](#)

CONTENIDO DEL CD

En el contenido del CD que acompaña a la memoria podemos encontrar los siguientes recursos:

- Memoria del trabajo en formato PDF.
- Código fuente del trabajo dentro del directorio Código fuente.
- Resultados de pruebas en el directorio Estadísticas
- Libros y artículos a los que se ha hecho referencia durante la memoria y que se han utilizado como bibliografía. Los cuales podemos encontrar en el directorio Bibliografía.
- Páginas Web que han servido de bibliografía. Las podemos encontrar dentro del directorio Bibliografia/Enlaces Web.
- Fichero con la explicación de los diferentes nodos del código fuente, lo podemos encontrar en el directorio de Código Fuente/Readme.