



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y
DISEÑO INDUSTRIAL

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

TRABAJO FIN DE GRADO

GUIADO DE UN ROBOT MÓVIL BASADO EN ROS Y KINECT

Autor: Daniel Manzaneque Amo

Cotutor: Dr. Miguel Hernando

Gutiérrez

Departamento: Electricidad,
Electrónica, Automática y Física
aplicada.

Tutor: Dr. Alberto Brunete

González

Departamento: Electricidad,
Electrónica, Automática y Física
aplicada.

Madrid, Febrero 2016



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y
DISEÑO INDUSTRIAL

Grado en Ingeniería Electrónica y Automática Industrial

TRABAJO FIN DE GRADO

**GUIADO DE UN ROBOT MÓVIL
BASADO EN ROS Y KINECT**

Firma Autor

Firma Cotutor

Firma Tutor

Copyright ©2016. Daniel Manzaneque Amo

Esta obra está licenciada bajo la licencia Creative Commons

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 3.0 Unported (CC BY-NC-ND 3.0). Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/deed.es> o envíe una carta

a Creative Commons, 444 Castro Street, Suite 900, Mountain View, California, 94041, EE.UU.

Todas las opiniones aquí expresadas son del autor, y no reflejan necesariamente las opiniones de la Universidad Politécnica de Madrid.

Título: Guiado de un robot móvil basado en ROS y kinect
Autor: Daniel Manzaneque Amo
Tutor: Dr. Alberto Brunete González
Cotutor: Dr. Miguel Hernando Gutiérrez

EL TRIBUNAL

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Grado el día de de ... en, en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

"Es que jo... Se me escapa la
vida"

— Sofía Díaz, Memorias de un
estudiante en prácticas y con
TFG

Agradecimientos

Agradezco a

Resumen

Realizar la navegación y guiado de un robot móvil surge como herramienta para acceder a lugares donde el ser humano no puede o se encontraría en riesgo, para realizar tareas repetitivas o que conllevarasen algún tipo de desgaste.

Un robot autónomo es por tanto una pieza fundamental en tareas de rescate, salvamento, inspección, exploración de entornos peligrosos o inaccesibles, como la exploración en la superficie de otros planetas. Además, las tareas sociales cada vez están tomando más relevancia en nuestro día a día, como la asistencia a humanos en entornos públicos, la interacción con el entorno o una navegación más segura, como es el caso de los coches autónomos.

Este proyecto de fin de grado trata sobre el guiado y control de un robot móvil de cuatro ruedas, con un sistema motriz en configuración diferencial, equipado con una serie de sensores que permiten su orientación y posicionado en el entorno así como un sensor capaz de captar este en tres dimensiones y un sensor adicional que lo haría tan solo en dos dimensiones.

Los datos de los sensores sirven tanto para construir mapas en dos dimensiones del entorno del robot como para navegar por él evitando obstáculos de manera dinámica. El robot es capaz de generar mapas de celdas en los que situar tanto los objetos estáticos como los móviles, calcular una trayectoria adecuada y dirigirse hasta un punto indicado evitando obstáculos interpuestos en su camino.

Todo esta información, procesado de datos, cálculo de trayectorias y ejecución de movimientos se realiza en un ordenador de abordo integrado en el propio robot utilizando el software Robot Operating System (conocido en robótica por sus siglas ROS), que nos ofrece una interfaz común para interconectar nuestro robot con los sensores y con los algoritmos de navegación.

El proceso de navegación se realiza de dos formas conjuntamente. Por un lado el robot realiza un mapa global con obstáculos que permanecen inmóviles y calcula la trayectoria más adecuada, es lo que denominamos navegación global. Por otro lado, el robot genera un mapa dinámico a su alrededor e identifica la información de los sensores como obstáculos, a continuación, el robot calcula continuamente una trayectoria que se ajuste todo lo posible a la trayectoria global pero que evite los obstáculos cercanos, es lo que se denomina navegación reactiva o local.

Finalmente, un algoritmo de cálculo de movimientos realiza el control de los

motores para que el robot realice el movimiento adecuado en base a las trayectorias definidas anteriormente. De esta forma el robot puede avanzar, retroceder, darse la vuelta o realizar tareas de recuperación de trayectoria en caso de encontrarse bloqueado en algún punto.

A parte de la navegación autónoma, también dispone de un sistema de telecontrol del robot mediante otro ordenador externo y de un algoritmo de detección frontal de objetos en 3 dimensiones (nubes de puntos) que puedan servirle como guía. De esta forma, el robot es capaz de navegar siguiendo el movimiento de una persona o de un robot que le preceda.

El robot Pioneer 3 AT es el robot móvil que se ha empleado en este proyecto (Figura 1) y sobre el que se ha trabajado de manera específica para realizar las pruebas reales de este proyecto. A este robot se le incorporan un sensor láser de dos dimensiones (sensor Sick LMS100) y un sensor de tres dimensiones (sensor Kinect). El cómputo de la navegación se realiza en un ordenador compacto incorporado en el robot (Intel NUC NUC5i7RYH).

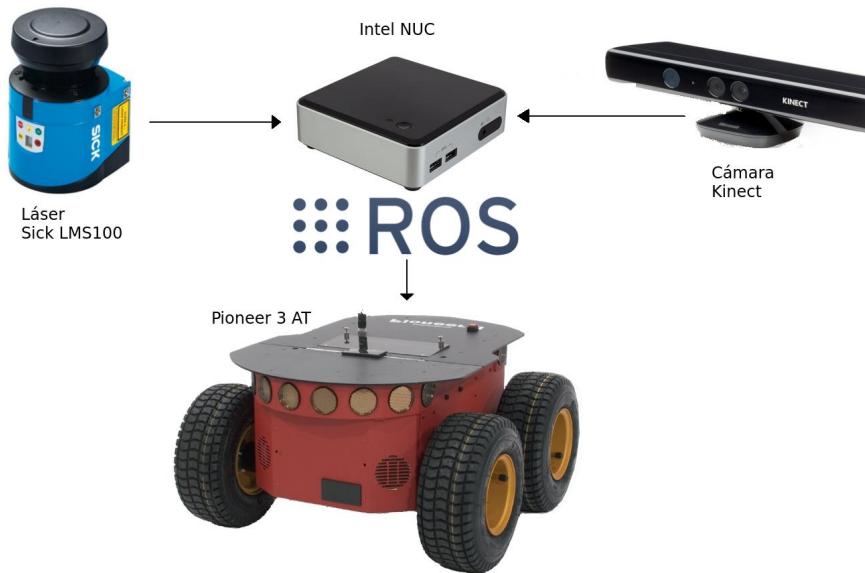


Figura 1: Esquema del sistema robótico utilizado en el proyecto

Las consignas de navegación se realizan mediante un ordenador externo cualquiera conectado a una red inalámbrica o mediante consignas de voz, en las que se indica al robot las tareas de navegación a realizar (avanzar, girar, seguir a una persona...) o un punto del entorno al que dirigirse.

Todas estas implementaciones están desarrolladas bajo el entorno ROS, lo cual permite añadir funcionalidades de manera más rápida y menos laboriosa, como es el caso del control mediante comandos de voz o la interacción mediante sonidos. Es el caso también del simulador de robótica Gazebo, que se integra como funcionalidad en ROS y que ha servido para testar el sistema y aportar las pruebas teóricas pertinentes para luego aplicarlas en el robot real.

Para concluir, podemos decir que este proyecto se encarga de integrar ROS como sistema en un ordenador de abordo incorporado en el robot que permita conectarse con los sensores y realizar la construcción de mapas y navegación autónoma mediante el cálculo de mapas y trayectorias globales y locales, realizar los movimientos del robot, así como reconocer consignas de voz o de teleoperación.

Palabras clave: robot móvil, ROS, navegación reactiva, cálculo de trayectorias.

Abstract

Achieving navigation and guidance of mobile robot comes up as a tool for rescue purposes in places where humans can't access or that involve a high risk for life. Many of those repetitive and fatigating tasks could be done with a robust and capable mobile robot.

An autonomous robot is, by the way, an essential part in rescue, inspection and exploration tasks developed in dangerous or non-reachable places, such as the surface of other planets. Moreover, social tasks are taking more and more interest in our nowadays, such as assistance for humans in public places, interaction with the environment or a safer navigation in the cities. Autonomous car navigation is a good example of this.

This final degree project is about guidance and control of a four-wheel mobile robot with a skid-steer configuration. It is equipped with a sort of sensors, allowing it to make positioning and orientation in the environment. There is also a main sensor capturing the environment in three dimensions and an additional one doing it in two dimensions.

Sensor data is used to build two dimensional maps of the exploration place as well as to take care of dynamical obstacles. The robot can build maps formed by cells where to incorporate or raytrace static and dynamic obstacles, calculate the proper trajectory plan and head for a destination point avoiding obstacles in its way.

All this information, data processing, trajectory calculation and movement execution is done in an onboard computer inside the robot. It uses the Robot Operating System software (known as ROS), which offers a common interface to communicate the robot with sensors and navigation algorithms.

The navigation process is divided in two parts. Firstly, a global obstacle map is done and static objects are added, then the most suitable trajectory is planned. This is called global navigation. Secondly, a dynamic map is done and sensor data incorporates obstacles near the robot. Immediately, a possible trajectory is planned following the original trajectory of the global navigation but avoiding the obstacles. This is called reactive or local navigation.

Finally, a movement algorithm does the control over the robot. It calculates movements to make the robot go forward, backward, turn around or make recovery tasks to recover if the robot has lost the trajectory path or it is stucked at any point.

Apart from autonomous navigation, the robot also has a telecontrol system from an outside computer and an algorithm to detect frontal objects in three dimensions (pointclouds) that can guide the robot. This is how it can navigate following a person when it is walking or another robot in front of it.

Pioneer 3 AT robot is the one used in this project (Figure 2). It is the specific platform and all real tests have been made with it. This robots is equipped with a two dimension laser scanner (Sick LMS100 sensor) and a three dimensional sensor (Kinect sensor). The navigation computation is done in an onboard compact computer (Intel NUC NUC5i7RYH computer).

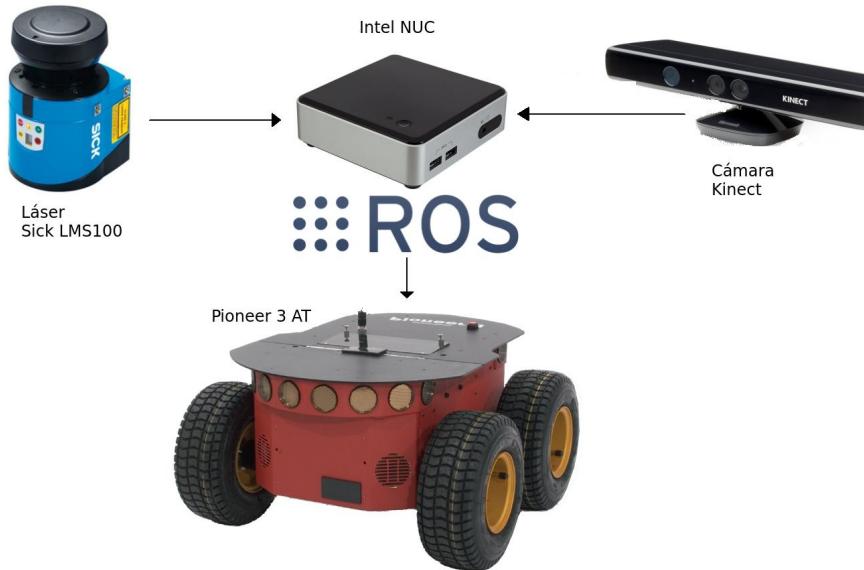


Figure 2: Diagram of the robotic system used for this project

The navigation commands are sent from an outside computer connected to the same wireless network or from voice navigatin commands speaking directly to the robot (go forward, backward, turn right...) or a point in the map to move forward.

All those implementations are developed under ROS framework. This is why additional features can be added in a faster and effortless way. Tha is the case of the robot simulator Gazebo, which integrates as an add-on in ROS. Gazebo has been used to perform tests in navigation and to check theorical concepts to lately incorporate them in the real robotic system.

To conclude, it can be said that this project integrates ROS as a robotic system in an onboard computer and connects to sensors to perform tasks such as building maps or navigation from one point to other. The system calculates local and global maps and trajectories, makes movements according to them, as well as recognises voice or teleoperation commands.

Keywords: mobile robot, ROS, reactive navigation, trajectory calculation.

Índice general

Agradecimientos	v
Resumen	vii
Abstract	xi
1 Introducción	1
1.1 Robótica	1
1.2 Robótica Móvil	2
1.3 Motivación del proyecto	3
2 Estado del arte	5
2.1 Hardware en robótica móvil	5
2.2 Sensores en robótica móvil	8
2.2.1 Sensores internos	9
2.2.2 Sensores externos	10
2.3 Control en la robótica móvil actual	12
2.3.1 Localización y orientación en un entorno	12
2.4 Aplicaciones actuales de la robótica móvil	12
3 Alcance y objetivos del proyecto	19
3.1 Propósito y alcance	19
3.2 Objetivos	20

4 Desarrollo del proyecto	21
4.1 Planteamiento	21
4.2 Planificación del proyecto	22
4.3 Tecnologías y herramientas empleadas en el proyecto	27
4.3.1 Robot Operating System	27
4.3.2 Lenguaje de programación C++	28
4.3.3 Lenguaje de programación Python	28
4.3.4 Controlador de versiones git y repositorios GitHub	28
4.3.5 Simulador de robótica Gazebo	29
4.3.6 RViz: Herramienta de visualización robótica	30
4.3.7 Impresión 3D	31
4.4 Hardware	31
4.4.1 Pioneer 3 AT	31
4.4.2 Sensor Kinect	33
4.4.3 Láser SICK LMS100	34
4.4.4 Intel NUC NUC5i7RYH	36
5 Arquitectura	37
5.1 Arquitectura general	37
5.2 Arquitectura del proyecto	38
6 Entorno ROS	41
6.1 Funcionamiento de ROS	41
6.2 Configuración de ROS	44
6.3 Configuración de los paquetes ROS	45
7 Control primario	47
7.1 Nodos hardware	47

ÍNDICE GENERAL	xv
7.1.1 Control del robot: Rosaria y p2os	47
7.1.2 Sensor Kinect	48
7.1.3 Sensor Láser Sick LMS100	50
7.1.4 Integración del hardware	51
7.2 Nodo de teleoperación	51
7.3 Nodo de navegación estimada	52
7.4 Nodo de guiado (follower)	53
8 Navegación	55
8.1 Navigation Stack	55
8.1.1 Funcionamiento	56
8.1.2 Requisitos para la navegación	57
8.1.3 Configuración de la navegación	58
8.2 SLAM	60
8.3 AMCL	62
8.4 Mapas de coste: Costmaps	64
8.5 Planificador de trayectoria global	66
8.5.1 Algoritmo de Dijkstra	67
8.5.2 Algoritmo de A estrella	69
8.5.3 Parámetros del global_planner	70
8.6 Planificador de trayectoria local	70
9 Implementación del sistema	71
9.1 Configuraciones hardware	72
9.1.1 Pioneer 3 AT	72
9.1.2 Sensor Kinect	72
9.1.3 Sensor Láser	72
9.1.4 Intel NUC	72

9.1.5	Primera configuración	72
9.1.6	Segunda configuración	72
9.2	Navegación	72
9.2.1	Sensores	72
9.2.2	Navegación con mapa	72
9.2.3	Navegación reactiva	72
9.3	Nodo de navegación por puntos	72
9.4	Nodo de comandos por voz	72
9.4.1	Reconocimiento de comandos de voz	72
9.4.2	Feedback mediante text-to-speech	72
9.5	Nodo de ejecución automática de nodos	72
10	Pruebas del sistema	73
10.1	Visualización mediante RViz	73
10.2	Simulación con MobileSim	73
10.3	Simulación con Gazebo	73
10.3.1	SLAM	73
10.3.2	Datos de navegacion	73
10.4	Pruebas reales	73
10.4.1	SLAM	73
10.4.2	Datos de navegacion	73
10.4.3	Ascpectos de la navegación	73
11	Conclusiones	75
11.1	Conclusión sobre la metodología	75
11.2	Conclusión sobre los resultados	75
11.3	Desarrollos futuros	75

Apéndice	76
A Configuración del sistema	79
A.1 Configuración del espacio de trabajo	79
A.1.1 Instalación de las librerías	79
A.1.2 Gestión de las dependencias	79
A.2 Configuración del hardware	80
A.2.1 Calibración de la odometría	80
A.2.2 Ordenador de abordo	80
A.2.3 Sensor Kinect	80
A.2.4 Láser SICK LMS100	80
B Información y documentos ONLINE	81
B.1 Multimedia	81
B.2 Repositorio de código	81
B.2.1 Readme	81
B.3 Memoria del trabajo	81

Índice de figuras

1	Esquema del sistema robótico utilizado en el proyecto	viii
2	Diagram of the robotic system used for this project	xii
2.1	Motor de corriente continua con encoder	6
2.2	Configuraciones hardware. Basado en [SOGSBS ⁺ 10]	6
2.3	Robot de configuración diferencial Pioneer 3 DX	7
2.4	Ejemplos de configuración skid-steer: Cargador frontal, Robotnik Guardian, Pioneer 3 AT	8
2.5	Configuración síncrona	8
2.6	Configuración síncrona y rueda omnidireccional	9
2.7	Robot Uranus con ruedas tipo Mecanum	9
2.8	Esquema de un encoder absoluto	9
2.9	Unidad de medida inercial, IMU	10
2.10	Cámara estereoscópica del robot PR2	11
2.11	Sensor de 3 dimensiones Kinect para Xbox 360	12
2.12	Imagen tomada a sí mismo por el robot Curiosity en la superficie marciana	13
2.13	Robots de desactivación de explosivos: iRobot 510 Packbot y TALON	14
2.14	Robot Quince (izq.) y robot Raccoon (dcha.)	14
2.15	Robot para limpieza del hogar Roomba, de iRobot	14
2.16	Robot pulverizador de aplicación agrícola, AgriRobot	15

2.17 Robot de inspección de viñedos, VinBot	15
2.18 Robot social Maggie y robot de asistencia ROSA	16
2.19 Robot PR2 desarrollado por Willow Garage	16
2.20 Sensores del coche autónomo de Google	17
4.1 Logo de ROS	27
4.2 Entorno de simulación Gazebo	30
4.3 Entorno gráfico RViz	30
4.4 Robot Pioneer 3-AT	31
4.5 Panel de control del robot Pioneer 3-AT	32
4.6 Sensor Kinect	33
4.7 Proyección de infrarrojos y obtención de la nube de puntos	33
4.8 Sensor escaner láser Sick LMS100	34
4.9 Campo de visión del sensor láser Sick LMS100	35
5.1 Estructura del proyecto	38
5.2 Estructura de carpetas del paquete pioneer_utils	39
6.1 Grafo de ejemplo con nodos conectados	42
6.2 Esquema del funcionamiento de ROS	42
6.3 Frames utilizados en el robot PR2	44
8.1 Diagrama de funcionamiento del Navigation Stack [ME10b]	56
8.2 Visualización de costmaps, sensor láser y modelo del robot en RViz. .	61
8.3 slam_gmapping visualizado en RViz	63
8.4 Esquema de la labor del nodo AMCL entre los <i>frames</i> map y base. .	63
8.5 Esquema sobre el cálculo del coste de cada celda en el mapa.	66
8.6 Clasificación de los diferentes métodos de planificación de trayectorias. Basado en [Jos15].	67

8.7	Implementación del algoritmo de Dijkstra en un mapa sin obstáculos. Basado en [Pat10].	68
8.8	Implementación del algoritmo Best-First-Search en un mapa sin obstáculos. Basado en [Pat10].	68
8.9	Algoritmo de Dijkstra (Izq.) y algoritmo Best-First-Search (Dcha.) en un mapa con obstáculo cóncavo. Basado en [Pat10].	69
8.10	Algoritmo A* sin obstáculo (Izq.) y con obstáculo cóncavo (Dcha.). Basado en [Pat10].	70

Índice de tablas

4.1	Especificaciones del robot Pioneer 3 AT	32
4.2	Características del sensor Kinect	34
4.3	Características del sensor láser Sick LMS100. Basado en [SIC09] . . .	35
4.4	Características del ordenador Intel NUC NUC5i7RYH	36
7.1	API de rosaria utilizada. Basado en [ROS15]	48
7.2	API de freenect_stack utilizada.	49
7.3	API de LMS1xx utilizada.	50
7.4	API de teleop_p3at	52
7.5	API de moving_alone	53
7.6	API de turtlebot_follower	53

Índice de códigos

6.1	Mandato de consola para instalar la versión completa de ROS Indigo.	45
6.2	Source al setup de ROS Indigo	45
6.3	Instalación y workspace de Catkin	45
6.4	Source al setup de nuestro entorno Catkin	45
6.5	Clonado del repositorio <i>pioneer3at_ETSIDI</i>	46
7.1	Launchfile para RosAria.	48
7.2	Launchfile para Kinect en el paquete freenect.launch.	49
7.3	Launchfile para el sensor Láser Sick LMS100.	50
7.4	Launchfile creado para robot Pioneer 3 AT.	51
7.5	Líneas del archivo <i>.bashrc</i> en el ordenador de abordo.	52
7.6	Ejemplo <i>.bashrc</i> en un ordenador externo para realizar comunicación con el máster.	52
7.7	Ejemplo <i>.bashrc</i> en un ordenador externo para realizar comunicación con el máster.	52
7.8	Launchfile para turtlebot_follower en el robot Pioneer 3 AT.	54
8.1	Ejemplo de <i>costmap_common_params.yaml</i>	58
8.2	Ejemplo de <i>global_costmap.yaml</i>	58
8.3	Ejemplo de <i>local_costmap.yaml</i>	59
8.4	Ejemplo de <i>local_costmap.yaml</i>	59
8.5	Ejemplo de <i>global_planner_params.yaml</i>	59

8.6 Ejemplo de <i>robot_navigation.launch</i>	60
8.7 Launchfile <i>slam_gmapping</i>	62
8.8 Launchfile para visualizar <i>slam_gmapping</i> en RViz	62
8.9 Ejecución del nodo <i>map_saver</i> para guardar el mapa	62
8.10 Launchfile del nodo <i>amcl</i> utilizado.	64
A.1 Inicializando la herramienta <i>rosdep</i>	79
A.2 Instalando los paquetes de navegación mapeo.	79
A.3 Instalando las dependencias de <i>rosaria</i>	80

Capítulo 1

Introducción

Esta primera sección será un apartado previo para poner en contexto al lector sobre la robótica móvil en general y a todo el desarrollo del proyecto ”Guiado de un robot móvil basado en ROS y Kinect” en particular.

En esta sección explicaremos qué consiste y cuáles son los principales problemas de la robótica móvil así como las motivaciones para el desarrollo del proyecto.

1.1 Robótica

a historia de la robótica tiene su precursor en la mecánica y los mecanismos desarrollados para imitar el movimiento y funciones de los seres vivos. Los antiguos egipcios ya empleaban mecanismos para mover los brazos de las estatuas y los griegos utilizaban sistemas hidráulicos para adornar sus templos.

Podemos decir que en torno al siglo XVII es cuando se inicia la historia de la robótica actual. En concreto, cuando Jacques de Vaucanson en 1745 inventó el primer telar automático de la historia. También construyó lo que se denominó como autómatas en la época, con obras como El flautista, El tamborilero o El pato, obra conocida como una de las pioneras en la historia de la robótica [Roj07].

Más tarde, Joseph Jacquard inventa en 1801 una máquina textil programable mediante tarjetas perforadas refinando la tecnología empleada por Vaucanson [MGB00]. Años más tarde, la Revolución Industrial impulsó el desarrollo de máquinas que automatizaban tareas que antes realizaban las personas dando paso a la historieta de la automatización industrial.

Antes ya se habían desarrollado algunos mecanismos automáticos como el León mecánico creado por Leonardo Da Vinci en el siglo XVI [DL12], que abría su pecho mostrando el escudo del rey Luis XII, o el Hombre de palo, un autómata de madera construido por Juanelo Turriano que andaba y movía la cabeza, ojos, boca y brazos.

La palabra “robot” comenzó a utilizarse en el mundo del teatro y de la ciencia

ficción. Una obra checoslovaca publicada en 1917 por Karel Čapek, denominada Rossum's Universal Robots, dio lugar al término robot. La palabra checa "Robota" significa servidumbre o trabajador forzado, y cuando se tradujo al inglés se convirtió en el término robot. Como ejemplo de ciencia ficción se podría mencionar al escritor Isaac Asimov por la publicación sobre las tres leyes de la robótica [AdN87].

Los primeros robots llamados como tal fueron creados en 1958 y eran de tipo teleoperados, con el objetivo de manipular elementos sin riesgo para el operario. Este tipo de robots consisten en un sistema maestro-esclavo en el que los movimientos realizados por el maestro son transmitidos mecánicamente a cierta distancia y reproducidos por el robot esclavo.

Años más tarde, se comenzó a utilizar la tecnología electrónica y el uso del servocontrol, sustituyendo la transmisión mecánica por otra eléctrica. Ejemplos de estos manipuladores fue el realizado por Ralph Mosher, Handy-Man, consistente en dos brazos mecánicos teleoperados mediante un maestro del tipo denominado exoesqueleto.

La sustitución del operador en este tipo de sistemas por un programa de ordenador que controlase los movimientos del manipulador dio paso al concepto de robot [BPBA07].

1.2 Robótica Móvil

Prácticamente cualquier robot consta de alguna parte móvil que le permite realizar algún tipo de tarea, sin embargo nos referimos a la «robótica móvil» como el área de la robótica que estudia los robots con capacidad para trasladarse en un ambiente dado.

Los robots móviles son aquellos que tienen la capacidad de desplazarse utilizando algún sistema locomoción como pueden ser ruedas, patas, girar sobre sí mismos... Estos robots se diferencian respecto a los robots fijos que permanecen anclados a una superficie, como un brazo robótico industrial. Tampoco debe confundirse con los robots destinados a desplazarse por otros medios como agua o aire, ya que estaríamos entrando en el área de la robótica acuática/submarina o robótica aérea respectivamente. Podemos decir por tanto que la robótica móvil se refiere a robots que se mueven en el entorno terrestre.

Las aplicaciones dentro de la robótica móvil pueden ser múltiples: exploración de entornos peligrosos, exploración espacial o minera, misiones e búsqueda y rescate de personas, telepresencia, automatización de procesos, transporte autónomo, vigilancia, inspección y reconocimiento del terreno o utilizados como plataformas móviles que incorporan otros sistemas robóticos como podrían ser un brazo manipulador.

La robótica móvil surgió como manera extender el campo de la robótica hacia robots que anclados a un punto fijo. La capacidad de estos robots para desenvolverse en entornos diferentes ofrecía la posibilidad de abrir nuevas líneas de investigación

y automatizar tareas que estaban asociadas con la navegación y localización.

Los primeros pasos dentro de la robótica móvil eran motivados por la idea de introducir la mayor autonomía posible a los robots, tanto en términos de suministro de energía como en computación para realizar las tareas de planificación, percepción y control.

Ampliar **REFERENCIAS A LIBROS**

1.3 Motivación del proyecto

Dotar a un robot de la capacidad de navegar autónomamente puede ser una alternativa imprescindible en el caso de que se necesite explorar un entorno que no sea fácilmente accesible para el ser humano o que conlleve cierto riesgo.

Cualquier proyecto que desarrolle la automatización de un proceso es ya una motivación, puesto que se va a diseñar una máquina que sea capaz de realizar una tarea que antes solo podía realizarse por un ser humano. Además, dichas tareas realizadas por un robot pueden realizarse, en principio, con una mayor precisión y con mayor repetibilidad debido a que se elimina el factor del cansancio.

Este proyecto también viene motivado por la integración de ROS dentro de una plataforma móvil. Con esta plataforma de desarrollo software podemos explorar un concepto diferente de programación en robótica, que ofrece características como:

- Abstraerse de la programación a bajo nivel.
- Reutilizar software ya desarrollado (nodos).
- Interfaz de comunicación común.
- Escalabilidad del sistema.
- Simulación mediante Gazebo.
- Visualización gráfica de la información aportada por sensores.
- Transformación entre los diferentes sistemas de coordenadas.

Utilizar sensor de bajo coste Kinect es otra de las motivaciones de este proyecto debido a que este sensor de bajo coste permite obtener información en tres dimensiones del entorno, pudiéndose realizar una navegación basada solamente en este sensor además de reconocer objetos por su forma y realizar el guiado del robot detectando objetos.

De las aplicaciones que más han servido como motivación para el desarrollo de este proyecto ha sido la automatización de las tareas de conducción de automóviles [Xat11], un sector que se encuentra en auge y que comienza a dar sus primeros pasos en el mundo real [Nev12].

También los robots de exploración espacial de la NASA, en especial a su último rover en Marte, Curiosity [NAS12], que permite explorar el entorno árido de la superficie marciana con un alto grado de autonomía en las labores de inspección y análisis de elementos.

Capítulo 2

Estado del arte

La robótica móvil vive actualmente un momento de gran desarrollo para multitud de aplicaciones en entornos diversos, desde espacios abiertos con orografía accidentada y condiciones climáticas adversas [Gui13] [PBR06], entornos controlados y espacios interiores conocidos como la automatización de tareas de almacenaje de productos [Reu12], hasta orientación y exploración de espacios interiores desconocidos con robots usados para la creacion de mapas de edificios.

De la misma forma, el interés en robots que sea capaces de reproducir las capacidades de un ser humano e incluso que pueda dar asistencia ya sea en entornos conocidos o no abre un área de posibilidades en las que los robots móviles cobran importancia.

Los avances tanto el las características hardware como software son notables aunque estas suelen variar dependiendo de la aplicación a la que un robot esté destinado. En este capítulo trata de hacer un resumen del estado actual de la robótica móvil.

2.1 Hardware en robótica móvil

Como hemos indicado previamente, la configuración hardware de un robot móvil varía dependiendo de la aplicación a la que vaya destinado. Es cierto que lo ideal para un robot sería disponer de una configuración hardware común que fuera polivalente en los diferentes terrenos y situaciones, sin embargo, debido a la variedad de aplicaciones y dado que un robot suele destinarse a tareas específicas, la elección del hardware que mejor se adapta es una tendencia común en robótica.

Para seleccionar el hardware debemos valorar el tipo de actuador que se requiere, entendiéndose por actuador al dispositivo que genera el movimiento de los elementos que hacen que el robot móvil se desplace. En robótica móvil suelen utilizarse los actuadores de tipo eléctrico, ya que ofrecen unas prestaciones de potencia, controlabilidad y coste adecuados. Además, ofrecen la posibilidad de que la alimentación

tación esté integrada en el robot, haciéndolo independiente de una fuente de energía accesoria.

Los actuadores eléctricos son, por tanto, los más utilizados. En concreto, los motores de corriente continua (Figura 2.1) ofrecen un fácil control y acoplamiento a un encoder. Los encoder son sensores de posición que permiten conocer el giro de un eje de rotación. Estos sensores son muy importantes en robótica móvil, ya que a partir de la información que arrojan el robot tiene conciencia de su posición relativa, en el caso de los encoders incrementales, o su posición absoluta, en el caso de los encoders absolutos (Más detalladamente en el apartado 2.2).



Figura 2.1: Motor de corriente continua con encoder

Existen otros tipos de actuadores eléctricos que se utilizan en robótica, como puede ser el caso de los motores paso a paso, sin embargo su baja velocidad de giro no los hacen adecuados para robots móviles.

La disposición de los actuadores determina la configuración del robot. Centrándonos en robots que se desplazan mediante ruedas y descartando a los robots con patas, podemos distinguir las siguientes configuraciones: Ackerman, triciclo clásico, tracción diferencial, skid-steer, síncrona y omnidireccional.

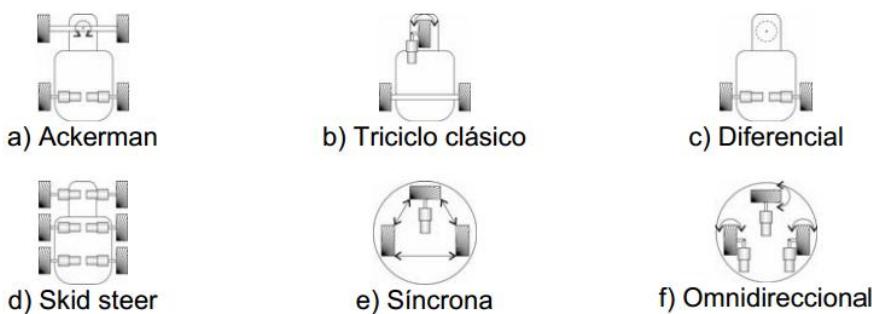


Figura 2.2: Configuraciones hardware. Basado en [SOGSBS⁺10]

- a. Configuración Ackerman

Consta de cuatro ruedas. Las ruedas motrices son las traseras o delanteras, y éstas últimas se encargan además de la dirección. Permite un desplazamiento a altas velocidades y la posibilidad de realizar giros con estabilidad. Esta configuración es la que se utiliza en la industria del automóvil.

b. Triciclo clásico

Consta de tres ruedas. Las ruedas motrices pueden ser las dos ruedas traseras o solo la delantera, que se encarga de la dirección. Este es el caso de los triciclos y de algunas bicicletas. Esta configuración ofrece alto grado de maniobrabilidad penalizando la estabilidad del conjunto y realizar giros den 90°.

c. Configuración diferencial

Consta de dos ruedas colocadas en el eje perpendicular a la dirección de desplazamiento del robot. Cada rueda es controlada por un motor, de tal forma que la diferencia de velocidad giro de una rueda respecto a otra determina el giro, avance o retroceso del robot. Los robots que presentan esta configuración suelen utilizar una tercera rueda que gira libremente que sirve como apoyo (rueda loca). Es la configuración típica de las sillas de ruedas y su característica principal es que permite realizar giros completos sobre sí mismo.



Figura 2.3: Robot de configuración diferencial Pioneer 3 DX

d. Skid steer

Consta de cuatro ruedas, todas ellas motrices, y su principio de funcionamiento es el mismo que el utilizado en la configuración diferencial. Esta configuración presenta las ventajas de la configuración diferencial, pudiendo realizar giros sobre el eje del robot, pero presenta la desventaja de que las ruedas deben deslizarse lateralmente, por tanto existe un rozamiento que varía en función de la inclinación el tipo de terreno que dificulta realizar un modelo cinemático.

Proporciona mucha tracción y estabilidad y suele encontrarse en aplicaciones relacionadas con la exploración, vehículos obra o vehículos todo terreno (Figura 2.4).

Este sistema es el que se utiliza también en los tanques de guerra, aunque en vez de neumáticos se utilizan orugas, denominado configuración por deslizamiento de cintas [dS07].



Figura 2.4: Ejemplos de configuración skid-steer: Cargador frontal, Robotnik Guardian, Pioneer 3 AT

e. Configuración síncrona

Conformado por tres o más ruedas acopladas mecánicamente y dotadas de tracción, este sistema permite que todas las ruedas rotén en la misma dirección y giren a la misma velocidad (Figura 2.5). Es utilizada ampliamente en robótica para robots móviles de interior, aunque está siendo desplazada por la configuración omnidireccional.

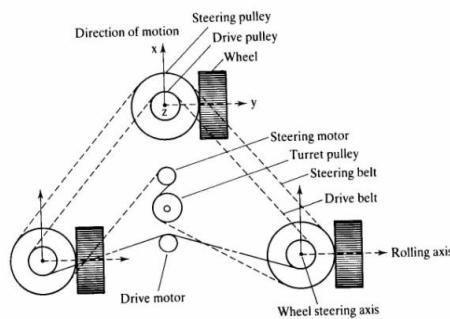


Figura 2.5: Configuración síncrona

f. Configuración omnidireccional

Consta de 3 ruedas cada una con un motor independiente, que permiten el desplazamiento en cualquier dirección (Figura 2.6). Las ruedas omnidireccionales constan de una serie de rodillos con el eje de rotación perpendicular a la dirección de avance.

Esta configuración diferencial empieza a utilizarse en sistemas de 4 ruedas con las denominadas "Mecanum Wheels" [DL91], que son ruedas similares a las omnidireccionales pero con los rodillos colocados en cierto ángulo (Figura 2.7). La combinación de los giros de cada una permiten al robot moverse en cualquier dirección.

2.2 Sensores en robótica móvil

Para que un robot pueda realizar tareas con una determinada precisión y velocidad debe conocer el entorno del sistema en el que se quiera actuar así como el estado del robot en ese sistema.

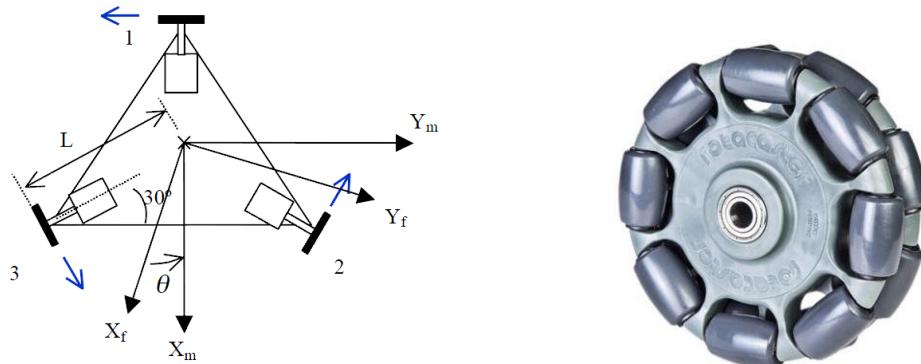


Figura 2.6: Configuración síncrona y rueda omnidireccional



Figura 2.7: Robot Uranus con ruedas tipo Mecanum

Existen dos tipos de sensores, los sensores internos, que aportan información sobre la posición orientación del robot, y los externos, que aportan información del entorno alrededor del robot.

2.2.1 Sensores internos

Dentro de los sensores internos, los sensores de posición primordiales son los encoders, tanto los de tipo incremental como los de tipo absoluto (Figura 2.8). Su funcionamiento se basa en un foto-emisor y un foto-receptor que detectan el paso o no de luz a través de un disco con ciertas marcas acoplado al eje de giro del actuador.

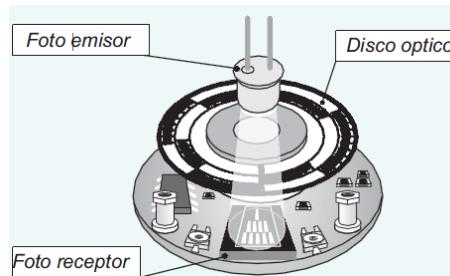


Figura 2.8: Esquema de un encoder absoluto

Los sensores de velocidad son similares a los encoders pero miden la velocidad de giro del eje del actuador. La tacogeneratriz proporciona una tensión proporcional a la velocidad de giro.

Los sensores acelerómetros o inclinómetros, permiten conocer la inclinación del robot en cada uno de sus ejes, así como las aceleraciones producidas por su propio desplazamiento.

Existen otros sensores más sofisticados como las Unidades de medida inercial (IMU) (Figura 2.9). Son dispositivos que combinan las medidas de un giróscopo y varios acelerómetros para determinar la posición relativa (x , y , z) y la orientación (roll, pitch, yaw), velocidad y aceleración respecto a un sistema de referencia.



Figura 2.9: Unidad de medida inercial, IMU

Debido a que la aceleración se ha de integrar dos veces para obtener la posición, el error crece de forma cuadrática. Luego para largos períodos de operación las unidades IMU se deben de resetear con otros sensores tipo GPS.

2.2.2 Sensores externos

Los sensores externos son aquellos que nos aportan información sobre el estado del robot respecto al entorno o que nos da información sobre lo que ocurre alrededor de este.

Los sensores de presencia, como son los sensores de tipo inductivo, capacitivo, óptico o mecánico. Sea cual sea la naturaleza del sensor, su función es la de detectar presencia. Un ejemplo de aplicación a un robot móvil sería una serie de sensores de presencia mecánicos, denominados "fin de carrera", colocados en la parte delantera, de modo que al tocar algún obstáculo se tuviera conciencia de la presencia de un obstáculo.

Sensores de posicionamiento global GPS (Global Positioning System) que permiten determinar la posición de un objeto en todo el mundo, normalmente con una precisión de metros. El GPS funciona con una red de satélites con trayectorias sincronizadas que cubren toda la superficie de la tierra. El GPS lanza señales a los satélites y calculando el tiempo que tarda éstos en responder, se obtiene la posición por triangulación.

Los sensores GPS se utilizan en robots móviles que operan en el exterior y suelen combinarse con otros sensores que ofrezcan una mayor precisión.

Los sensores de distancia son aquellos que nos dan una referencia de la longitud que existe a los objetos cercanos. Es el caso de los sensores e ultrasonidos, donde un emisor emite una onda ultrasónica y cuando es reflejada por un objeto se puede determinar la distancia a la que se encuentra midiendo el tiempo que tarda el sonido en ir y volver. Los sensores de distancia también pueden ser infrarrojos, funcionando de la misma manera.

Existen sensores de distancia que utilizan tecnología láser para determinar la longitud de un punto a otro, se denominan Scanners láser. Estos sensores emiten rayos láser en un plano de 2 dimensiones y en un rango determinado, y midiendo el tiempo de vuelo del haz láser son capaces de obtener una medida muy precisa de la distancia.

Existen otro tipo de sensores de distancia que permiten obtener distancias a puntos de manera tridimensional. Algunos utilizan un sistema de doble cámara conocidos como cámara estereoscópica (Figura 2.10). Estos sensores son capaces de obtener imágenes 3D con la información de dos imágenes tomadas a cierta distancia una de otra. Es el sensor más parecido a la visión humana.



Figura 2.10: Cámara estereoscópica del robot PR2

Otros sensores de distancia en 3 dimensiones, son los sensores de tipo infrarrojo, como es el sensor Kinect, que ha sido muy popular debido a su bajo coste y su buena respuesta.

Kinect es un dispositivo desarrollado por PrimeSense y distribuido por Microsoft para la videoconsola Xbox 360 (Figura 4.6).

Inicialmente permitía controlar e interactuar con la consola XBOX sin necesidad de tener contacto físico con un controlador. Este sensor permite reconocer gestos, comandos de voz, objetos e imágenes; esto hace que tenga mucho interés en el mundo de la robótica.

Para captar el entorno en 3 dimensiones, Kinect incluye una cámara de vídeo RGB, un emisor de haz infrarrojo y una cámara infrarroja.



Figura 2.11: Sensor de 3 dimensiones Kinect para Xbox 360

2.3 Control en la robótica móvil actual

El control del movimiento en los robots móviles con ruedas puede describirse, de manera general, en cuatro tareas fundamentales: localización y orientación, planificación de trayectoria, seguimiento de la misma y evasión de los obstáculos.

2.3.1 Localización y orientación en un entorno

Normalmente, uno de los mayores problemas que conciernen a la navegación de robots móviles consiste en la determinación de su localización respecto a un mapa en función de la información captada por los sensores.. No basta con situar una referencia global, si no que es imprescindible conocer la posición relativa respecto a los posibles obstáculos, tanto móviles como estáticos, de su entorno. Para esta tarea existen diferentes opciones, como utilizar mapas introducidos en el robot, o bien elaborar un mapa de manera simultánea al movimiento del robot por un lugar, como si se tratase de un robot de exploración. Es lo que se conoce como SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

Uno de las motivaciones para el uso de esta técnica es la construcción de mapas desde el punto de vista del robot, así como el ruido que se genera en los sensores de posición internos del robot que miden la odometría. Sin embargo, esta técnica en ocasiones puede producir efectos no deseados, como incorrecciones en el mapa debido a su alto coste computacional o variaciones debidas a objetos que se mueven en torno al robot.

Pueden distinguirse tres tipos de mapas: geométrico, topológico y semántico. El nivel geométrico es el más utilizado y consiste en un mapa métrico donde se representan los segmentos básicos de un entorno, o un mapa discretizado, donde se efectúa la descomposición de los elementos en celdillas. En el nivel topológico, se representan nodos y conexiones entre ellos, y el nivel semántico es cuando se elimina la información geométrica.

2.4 Aplicaciones actuales de la robótica móvil

Algunas de las aplicaciones del área de la robótica móvil ya han sido mencionadas con anterioridad en este documento, estas van enfocadas a sustituir la labor que

realiza el ser humano en situaciones de riesgo o en tareas repetitivas que aportan poco valor.

Una de las aplicaciones más famosas sobre robótica móvil son los Rovers de exploración espacial de la NASA "Spirit" y "Opportunity" dentro de la misión "Mars Exploration Rover" lanzada en 2003. Estos robots disponen de sistemas de navegación y exploración ideados para sus misiones en la superficie del planeta Marte, con el objetivo de analizar el entorno y los materiales de sus rocas y cráteres y enviar la información de vuelta a la Tierra [NAS03].

Un tercer robot no tripulado fue enviado con posterioridad a la superficie del planeta rojo. El robot "Curiosity" forma parte de la segunda generación de robots de exploración espacial y aterrizó en Marte en el año 2012. La misión "Mars Science Laboratory" ha permitido descubrir la existencia de antiguos lagos en la superficie del planeta [NAS12].



Figura 2.12: Imagen tomada a sí mismo por el robot Curiosity en la superficie marciana

Otras aplicaciones conocidas de la robótica móvil son los robots de búsqueda, reconocimiento y desactivación de explosivos. Robots como el iRobot 510 PackBot (Figura 2.13), desarrollado por iRobot Corporation, o TALON (Figura 2.13), desarrollado por QinetiQ North America, son ejemplos de cómo la robótica móvil es una herramienta muy valiosa en situaciones peligrosas o en sectores como seguridad y defensa.

También existen robots ideados para realizar tareas en entornos peligrosos o en situaciones de desastre. Como ejemplo podemos citar la catástrofe que sufrió Japón el 11 de Marzo de 2011, en la que un terremoto causó daños catastróficos en la central nuclear de Fukushima [Paí11]. Los niveles de radiación fueron tan altos que solo los robots eran capaces de entrar a valorar la situación de la central.

Estos robots, preparados para aguantar la radiación y realizar tareas de exploración y limpieza fueron Quince (Figura 2.14), desarrollado por Chiba Institute of Technology [NKO⁺11], un robot móvil capaz de subir y bajar escaleras y operar en las plantas superiores de la central nuclear.



Figura 2.13: Robots de desactivación de explosivos: iRobot 510 Packbot y TALON

Y Raccoon (Figura 2.14), desarrollado por Tepco, equipado con dos cabezales móviles preparados para aspirar y limpiar, encargado de recuperar el polvo contaminado del edificio del reactor 2.

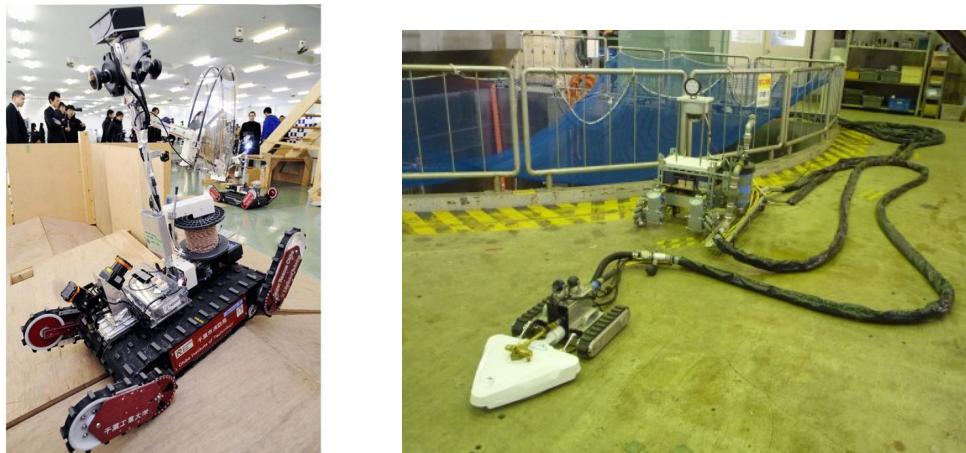


Figura 2.14: Robot Quince (izq.) y robot Raccoon (dcha.)

Siguiendo con la aplicación de robots móviles en tareas de limpieza, podemos destacar la popularización de los robots domésticos de tipo aspiradora, que se encargan de las tareas repetitivas del entorno del hogar, como el iRobot Roomba (Figura 2.15).



Figura 2.15: Robot para limpieza del hogar Roomba, de iRobot

También existen aplicaciones de robots móviles en el ámbito de la agricultura.

La empresa Robotnik [Rob02] tiene en marcha diferentes programas para incorporar sus robots en tareas de recolección o inspección de la cosecha.

Su proyecto AgriRobot (Figura 2.16), investiga el aspecto de la interacción humano-robot (Human-Robot Interface, HRI, en inglés). Para ello se sirven del robot Summit X Lincorporado con 4 ruedas motoras de alta potencia. El robot contiene un pulverizador eléctrico de 10 litros, tiene un sistema de visión, navegación y localización, y utiliza el software ROS.



Figura 2.16: Robot pulverizador de aplicación agrícola, AgriRobot

Al igual que el proyecto VinBot (Figura 2.17), de la misma empresa. Un robot móvil autónomo todo terreno dotado con un conjunto de sensores capaces de capturar y analizar imágenes de viñedos y datos en 3D mediante el uso de aplicaciones de cloud computing. Su finalidad es determinar el rendimiento de los viñedos y compartir esta información con los viticultores.



Figura 2.17: Robot de inspección de viñedos, VinBot

En el apartado de la robótica social, podemos hablar de robots móviles con ruedas destinados a la asistencia de personas en lugares públicos como centros comerciales, aeropuertos u hospitales, o también como asistentes domésticos en hogares de personas con movilidad reducida. Es el caso del robot Maggie [AMRS11], desarrollado por la Universidad Carlos III de Madrid, o el robot de asistencia social ROSA, desarrollado por la Universidad Politécnica de Madrid (Figura 2.18).



Figura 2.18: Robot social Maggie y robot de asistencia ROSA

Existen otro tipo de robots con altas capacidades que realizan la función de un robot móvil, como el robot de investigación PR2 (Figura 2.19), dotado con un sistema de desplazamiento omnidireccional.



Figura 2.19: Robot PR2 desarrollado por Willow Garage

Este robot, desarrollado por los investigadores de Willow Garage, fue creado para proporcionar una plataforma común junto con ROS (Robot Operating System), sobre la que realizar investigaciones que ayuden al desarrollo software de aplicaciones robóticas.

Finalmente, podemos destacar una de las aplicaciones que más han llamado la atención en la sociedad, los coches sin conductor. Potenciados por los desarrollos de la empresa Google, cuyo proyecto consiste en combinar la información obtenida del

servicio de mapas de la compañía con la inteligencia artificial, estos coches (Figura 2.20) suponen un cambio notable a nivel de seguridad en el transporte urbano de nuestra sociedad.

Los vehículos van equipados con cámaras de vídeo, un sensor láser de 360° colocado en la parte superior del vehículo, sensores radar, sensores de odometría en las ruedas y de posición con localización GPS [Gui11].

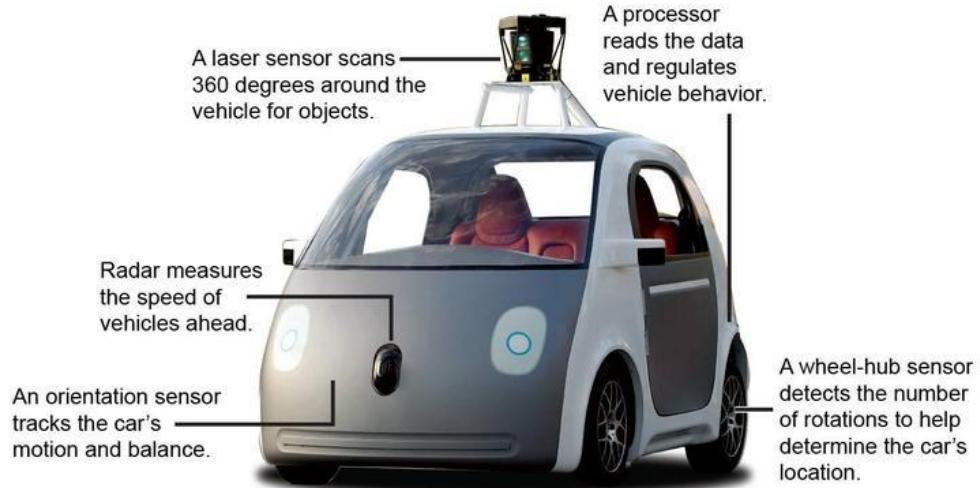


Figura 2.20: Sensores del coche autónomo de Google

Estos coches disponen actualmente de permiso para circular en algunos estados de Estados Unidos tras haber superado 1.800.000 millas desde que el programa (Google Self-Driving Car Project) comenzase en 2009 [Goo09].

En conclusión, podemos decir que los campos de aplicación de la robótica móvil son amplios, variados y con grandes perspectivas de futuro. Sin embargo, el mercado de la robótica civil a penas acaba de comenzar con la aparición de los primeros robots domésticos y los robots de carácter social. En otros campos, vemos que existe un auge de la robótica móvil y que a medida que los sistemas robóticos avanzan surgen nuevas posibilidades donde aplicarla.

Capítulo 3

Alcance y objetivos del proyecto

En este capítulo se define el alcance y los objetivos de este proyecto, es decir, lo que se pretende conseguir con este proyecto y hasta donde puede llegar.

3.1 Propósito y alcance

El propósito de este proyecto es el control automático de un robot móvil utilizando ROS. Lo que se pretende es implementar la navegación autónoma del robot basándose en un control reactivo a partir de la información obtenida a través del sensor Kinect.

El alcance del proyecto requiere múltiples elementos de trabajo:

En primer lugar, requiere un conocimiento previo del sistema hardware, como es el robot Pioneer 3 AT así como el sensor Kinect. Cómo integrar estos elementos y acceder a la información que aportan sus sensores y comandar al robot para que realice movimientos.

En segundo lugar, requiere un conocimiento del entorno de desarrollo ROS. Las herramientas software de las que dispone, el funcionamiento interno y la manera de programar e interaccionar con los diferentes elementos, el aprendizaje y comprensión.

En tercer lugar, incorporar los sensores pertinentes para obtener la información que permita al robot posicionarse en el entorno.

En cuarto lugar, implementar los ajustes necesarios para que el robot pueda operar utilizando el entorno de navegación ofrecido por ROS. Realizar una configuración óptima de los sensores y realizar las pruebas reales para el cálculo de trayectorias y el control reactivo del robot.

Por último, realizar la integración del sistema dentro de la plataforma robótica. Disponer de todo lo necesario para que el robot quede totalmente adaptado al sistema ROS e integrado con el sensor Kinect y los sensores pertinentes.

3.2 Objetivos

El objetivo de este proyecto es realizar el control de un robot móvil para que sea un robot autónomo, basándose en la información que da la odometría y la nube de puntos que proporciona un sensor que captura el entorno en 3 dimensiones como el sensor Kinect. Este control debe realizarse con la ayuda del software ROS, integrándolo como parte del sistema robótico para que sirva de soporte al desarrollo del proyecto.

El robot debe ser capaz de localizarse y situarse en el entorno, el sensor Kinect ofrecerá información sobre los objetos alrededor del robot, y el software desarrollado para ROS deberá ser capaz de hacer un control reactivo sobre los movimientos para permitir al robot moverse por interiores y guiarlo hacia un punto indicado.

Los objetivos principales de este proyecto serán los siguientes:

- a) El primer objetivo es familiarizarse con el control de los robots móviles y más concretamente en el control del robot Pioneer 3 AT. Familiarizarse con el sensor Kinect y con el software necesario para su uso. Y familiarizarse con el framework ROS y sus herramientas para el desarrollo de sistemas robóticos.
- b) Detección de obstáculos simples con el sensor Kinect para su inclusión posterior en el sistema de navegación del robot.
- c) Telecontrol del robot Pioneer 3 AT a partir del software ROS para realizar un controlador manual desde un ordenador externo.
- d) Realizar un sistema de navegación autónomo que sea capaz de dirigir el robot basándose en la información aportada por el sensor Kinect y otro tipo de sensores embebidos.

De los objetivos anteriores podemos desgranar algunos objetivos intermedios:

- a) Comprender el funcionamiento de ROS y la integración e interacción del software desarrollado bajo este entorno.
- b) Control del movimiento del robot Pioneer 3 AT a través de ROS, así como la obtención de la información de la odometría, estado de la batería, encendido de motores...
- c) Puesta en marcha el sistema de navegación para robots de ROS conocido como "Navigation Stack" y exploración de las capacidades del sistema.
- d) Valorar el uso de sensores adicionales y buscar una disposición óptima de los mismos para integrarlos en el sistema de navegación y en la arquitectura hardware del propio robot.

Capítulo 4

Desarrollo del proyecto

En esta capítulo se expone cuál ha sido el planteamiento del proyecto y los pasos que se han seguido para conseguir los objetivos y llegar a unos resultados óptimos.

4.1 Planteamiento

El robot sobre el que se pretende trabajar es el Pioneer 3 AT, de la empresa Adept Mobile Robots, cuyas características se detallarán más adelante. La configuración del sistema motriz es de tipo skid-steer y será determinante a la hora de realizar el control del desplazamiento.

Para realizar la teleoperación del robot, utilizaremos las herramientas de comunicación de ROS, que hacen que la ejecución de los diferentes nodos de forma distribuida entre equipos se realice de forma transparente para el usuario. Con esta característica podremos desarrollar con facilidad un sistema de telecontrol sin preocuparnos en exceso por la implementación de la comunicación entre equipos.

Para la navegación se pretende que el robot base sus movimientos en un sistema reactivo, es decir, que el robot base su navegación principalmente en la información captada por sus sensores y no en un mapa preestablecido. El control en navegación del robot se basará en la funcionalidad "Navigation Stack" de ROS, que también será explicada en detalle más delante.

El desarrollo principal para la navegación se basa en la infomación aportada por el sensor Kinect, sin embargo, el sensor láser proporciona una información muy potente para robots y también ha sido incluido en el desarrollo de este proyecto, utilizándolo en conjunto con el sensor Kinect.

Seguidamente, se han realizado los ajustes pertinentes en la navegación del robot, para la cual se ha seguido el concepto de mapas de coste y descomposición en celdas. También se ha valorado la disposición de ambos sensores para capturar el entorno, así como el tratamiento dispar de los datos capturados por cada uno de ellos. De esta

forma logramos que no se produzcan detecciones de objetos de manera duplicada y que no haya discrepancias entre los obstáculos que detecta un sensor respecto al otro¹.

Finalmente, se han incorporado características adicionales que aportan valor al desarrollo del proyecto, como el uso del simulador Gazebo o la interacción con el robot mediante comandos de voz y sintetizado de voz.

4.2 Planificación del proyecto

En este apartado se desarrollan las fase por las que ha pasado este proyecto y realizaremos un análisis de tiempos.

Fase inicial: Familiarización con el entorno ROS y elección de herramientas.

- i. Utilizaremos las herramientas proporcionadas por ROS para evaluar los datos que pueda manejar el robot: RViz, rqt_graph, map_server, rostopics...
- ii. Para el control del movimiento del robot utilizaremos el nodo RosAria debido a sus amplias posibilidades.
- iii. Para acceder a la información de la Kinect utilizaremos los drivers libfreenect, por ser librerías de código libre y utilizadas ampliamente.

Segunda fase: Realización del nodo de teleoperación y comunicación entre equipos conectados a la misma red.

- i. Utilizamos la configuración de equipos en red para acceder a la información publicada por nodos que se ejecuten en varias máquinas [ROS14].
- ii. Partiendo del nodo de teleoperación de "Turtlesim"**referencia*, realizamos un nodo similar para nuestro robot.

Tercera fase: Incorporación de los sensores al robot y acceso a los datos.

- i. Para el sensor Kinect, realizamos un adaptador para conectarlo a la alimentación del robot. Utilizando el nodo "freenect_stack"**REFERENCIA*, accedemos a la nube de puntos y la imagen.
- ii. Utilizamos el nodo LMS1xx **Referencia** para la puesta en marcha del láser y el acceso a los datos.
- iii. Incorporación de sistemas de referencia "base_link", "laser", "camera_link" y sus transformadas mediante el paquete "tf"**referencia**.

¹De especial interés en la incorporación de obstáculos al mapa mediante el uso de Costmaps en el sistema de navegación de ROS

iv. Visualización del conjunto de datos junto con los ejes de referencia en RViz.

Cuarta fase: Incorporación del sistema de navegación y ajuste de los parámetros

- i. Calibrado de los encoders de las ruedas del robot y ajuste de la odometría mediante RosAria.
- ii. Incorporación del sistema de navegación ROS de forma básica.
- iii. Navegación utilizando el sensor Kinect y el sensor Sick y generado de mapas mediante "slam_gmapping".
- iv. Ajuste de los planeadores de trayectoria del robot y parámetros de giro y control.

Quinta fase: Ajuste de la navegación y simulación mediante Gazebo

- i. Navegación en modo global (utilizando un mapa guardado) y en modo local (completamente reactivo).
- ii. Puesta en marcha del simulador Gazebo y configuración del robot en el entorno.
- iii. Disposición de los sensores de manera óptima y remodelado de la estructura física del robot.

Sexta fase: Nuevas funcionalidades y toma de datos.

- i. Incorporación de la funcionalidad "follower", adaptada a partir del robot Turtlebot **Referencia**, para el guiado del robot.
- ii. Interfaz de comandos por voz y sintetizador de texto a voz.
- iii. Pruebas físicas, recogida y análisis de los datos.

Análisis de tiempos:

Este proyecto fin de grado comenzó en Noviembre de 2014 y terminó en Febrero de 2015.

Durante el primer mes de Noviembre se estuvo recopilando información sobre ROS y su funcionamiento, los desarrollos existentes aplicados a robots reales y la filosofía del sistema.

En el mes de Diciembre se comenzó a trabajar con el robot, comprobando que todos los elementos se encontraban en correcto funcionamiento y se instaló el sistema operativo en su ordenador de abordo

Durante el mes de Enero se pudo avanzar menos debido a los exámenes y trabajos de las últimas asignaturas.

En el mes de Febrero se retomó el trabajo, empezando por una primera toma de contacto con la librería Aria y la ejecución de movimientos desde un ordenador externo conectado vía puerto serie.

Durante los meses de Marzo y Abril, el robot comenzó a funcionar con ROS, realizando los primeros movimientos con control por teclado. Seguidamente se realizó el nodo de telecontrol y un nodo para realizar movimientos basados tan solo en la odometría.

En el mes de mayo, se comenzaron a probar la compatibilidad con ROS de la cámara Kinect y el sensor Láser. Acto seguido, comenzaron las primeras pruebas de navegación autónoma.

En los meses de Junio y Julio, siguieron los ajustes en la navegación, tanto en el planificador de trayectoria como en los mapas de coste, así como en el sensor Kinect para la detección de obstáculos a diferente altura. Además se incorporó la funcionalidad de seguimiento.

En Julio también comenzaron las primeras pruebas de comandos de voz y la sintetización de voz.

Durante ese mes y el mes de Agosto, se comenzó a redactar gran parte del trabajo en esta memoria, donde se organizó la estructura del proyecto y la información a incluir.

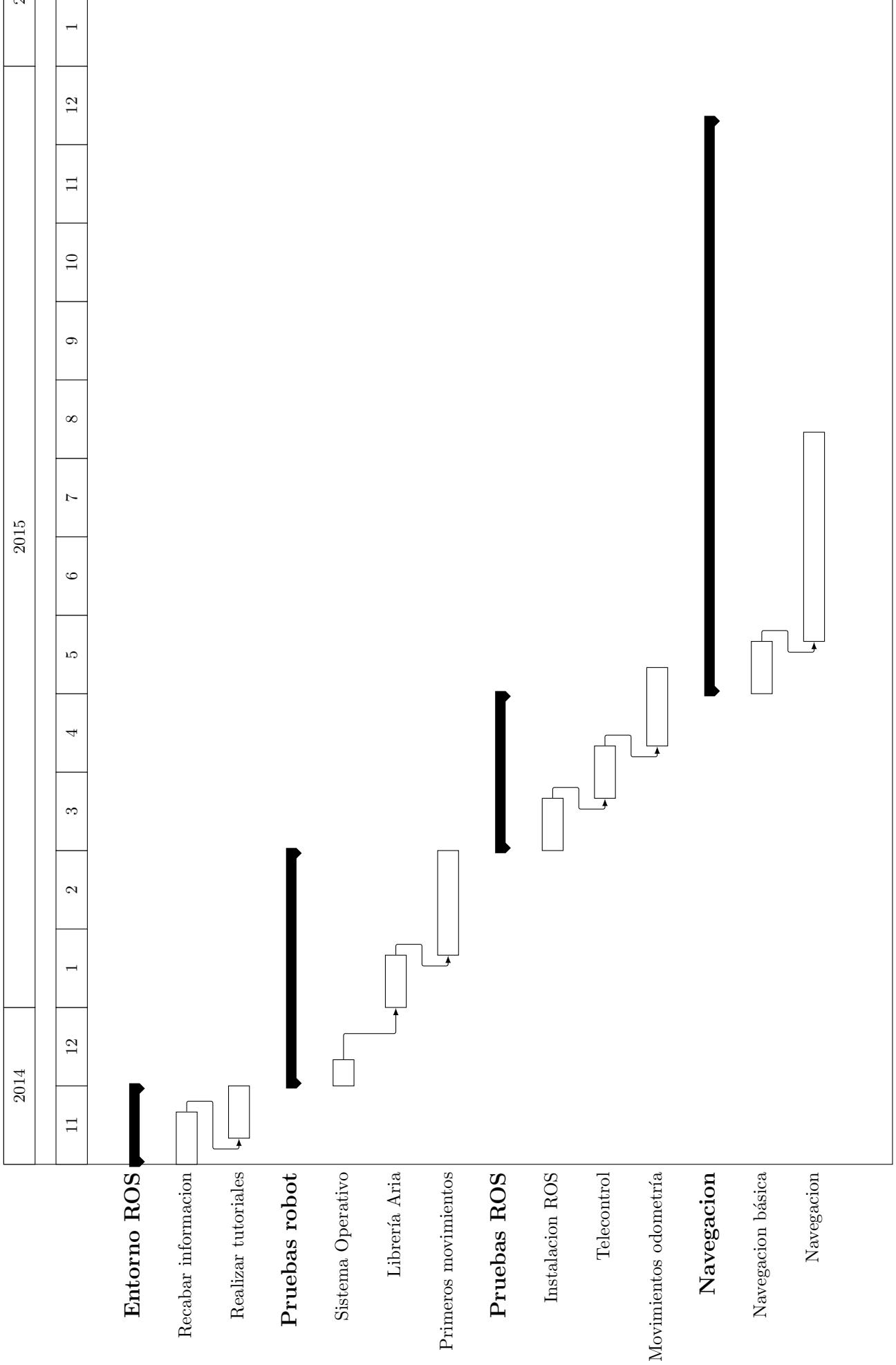
En el mes de Septiembre se decidió incorporar un ordenador más potente al robot y reestructurar su chasis para dejar el sistema desarrollado integrado de manera permanente. También se utilizó el array de micrófonos del sensor Kinect para los comandos de voz.

Durante el mes de Octubre se organizó la estructura del proyecto y se puso en marcha el simulador Gazebo. A continuación se realizó el ajuste de los sensores y la optimización del sistema de navegación. En paralelo se realizaron las modificaciones mecánicas y estructurales para la integración de los sensores y el ordenador en el robot.

Durante el mes de Noviembre se realizó un pequeño parón a nivel de software, se continuó con la parte mecánica y con la redacción de la memoria de este proyecto.

A continuación, comenzaron a realizarse las pruebas reales con la nueva configuración en el robot.

A continuación se muestra un diagrama de Gantt con el análisis de tiempos de las diferentes tareas.



4.3 Tecnologías y herramientas empleadas en el proyecto

En esta sección se describen tanto las tecnologías como las herramientas utilizadas en el desarrollo del proyecto.

4.3.1 Robot Operating System

El Sistema Operativo Robótico [ROSa] (conocido en inglés como Robot Operating System o ROS) es un framework para el desarrollo de software para robots que provee la funcionalidad de un sistema operativo [QCG+09]. ROS fue desarrollado originalmente en 2007 por el Laboratorio de Inteligencia Artificial de Stanford para dar soporte al proyecto del Robot con Inteligencia Artificial de Stanford [NQG+08]. Desde 2008, el desarrollo continua primordialmente en Willow Garage, un instituto de investigación robótico con más de veinte instituciones que colaboran conjuntamente.

ROS provee los servicios estándar de un sistema operativo como abstracción del hardware, control de dispositivos de bajo nivel, implementación de funcionalidad de uso común, paso de mensajes entre procesos y mantenimiento de paquetes. Está basado en una arquitectura de nodos interconectados que pueden mandar, recibir y multiplexar mensajes de sensores, control, estados, planificaciones y actuadores, entre otros. La librería está orientada para un sistema UNIX (Ubuntu (Linux)) aunque también se está adaptando a otros sistemas operativos como Fedora, Mac OS X, Arch, Gentoo, OpenSUSE, Slackware, Debian o Microsoft Windows, considerados como 'experimentales'.



Figura 4.1: Logo de ROS

ROS consta de dos partes básicas: la parte del sistema operativo, ros, como se ha descrito anteriormente y ros-pkg, una suite de paquetes aportados por la contribución de usuarios (organizados en conjuntos llamado en inglés "stacks") que implementan las funcionalidades tales como localización y mapeo simultáneo, planificación, percepción, simulación, etc. Este tipo de paquetes favorecen el desarrollo rápido de otros robots, consiguiendo que el código pueda reutilizarse gracias a su sistema de nodos, que mantienen cada funcionalidad desacoplada.

ROS ofrece principalmente dos lenguajes de programación para acceder a su API (Application Programming Interface) completa. Esos lenguajes son C++ y Python [ROS13].

ROS es software libre bajo términos de licencia BSD. Esta licencia permite libertad para uso comercial e investigador. Las contribuciones de los paquetes en ros-pkg están bajo una gran variedad de licencias diferentes.

Actualmente ROS es mantenido y desarrollado de manera Open Source por Open Source robotics Foundation [OSF], una organización independiente sin ánimo de lucro fundada por miembros de la comunidad robótica a nivel global.

4.3.2 Lenguaje de programación C++

El lenguaje C++ es un lenguaje orientado a objetos, y como tal, tiene como objetivo la reducción del tiempo de desarrollo aumentando la eficacia del proceso de generación de los programas.

Como consecuencia, los programas tienden a tener menos líneas de código y con más facilidad de introducir elementos nuevos escritos por otras personas.

Al tratarse de un lenguaje compilado, presenta una buena eficiencia en tiempo de ejecución frente a los lenguajes interpretados.

En sistemas operativos basados en Linux, el lenguaje C++ se compila bajo el compilador GCC (GNU Compiler Collection).

Dentro del desarrollo software en C++ para ROS (roscpp [ROSb]), existe una amplia interfaz para acceder a las diferentes funcionalidades y comunicarse con nodos desarrollados tanto en C++ como en Python.

4.3.3 Lenguaje de programación Python

Python es un lenguaje de programación interpretado cuya principal característica es que utiliza una sintaxis que favorece el código legible.

Se trata de un lenguaje de programación multiparadigma, ya que soporta orientación a objetos, programación imperativa y, en menor medida, programación funcional. Es un lenguaje interpretado, usa tipado dinámico y es multiplataforma.

Gracias a sus características, su uso es totalmente flexible y permite un tiempo de desarrollo menor principalmente por su tipado dinámico y su sintaxis. Sin embargo, al tratarse de un lenguaje interpretado, el tiempo de ejecución es más alto lo cual no lo hace adecuado para tareas que requieran altos niveles de eficiencia.

Dentro del desarrollo en Python para ROS (rospy [ROSc]), existe una interfaz completa para comunicarse con los nodos y otras funcionalidades de ROS desarrolladas en Python o C++.

4.3.4 Controlador de versiones git y repositorios GitHub

Git es un software de control de versiones libre. Es decir, git gestiona los archivos y directorios y los cambios hechos en ellos a lo largo del tiempo. Esto te permite

recuperar antiguas revisiones del proyecto o ver tu historial de cambios.

Git fue creado pensando en la eficiencia y la confiabilidad del mantenimiento e versiones cuando estas tienen un gran número de archivos de código fuente. Tiene la capacidad de poder trabajar varias personas con el mismo paquete siempre que no modifiquen el mismo archivo, en ese caso, sería posible ver las diferencias entre ambas versiones, y unirlas o crear unrama del proyecto principal si fuera necesario tener las dos versiones.

GitHub **Referencia pag web**es un sistema de almacenamiento público de código fuente (de cualquier tipo) o un servicio de repositorios. Su principal característica es la de ofrecer una plataforma de interacción social [DSTH12]en la que distintas personas pueden trabajar en conjunto. Esto permite que varios desarrolladores contribuyan a un proyecto y trabajen de manera coordinada.

Tanto para el desarrollo software de este proyecto como para la redacción de esta memoria se han utilizado estas herramientas, y el acceso a los repositorios se encuentran en las siguientes direcciones:

- Desarrollo software del proyecto https://github.com/danimtb/pioneer3at_ETSIDI
- Memoria del proyecto https://github.com/danimtb/TFG_pioneer3at

4.3.5 Simulador de robótica Gazebo

Gazebo [Ope] es un simulador de robótica en tres dimensiones que ofrece la simulación de complejos entornos de diversas características, así como robots de todo tipo, su interacción con el entorno y la representación visual de datos obtenidos por diversos sensores como cámaras, láseres, ultrasonidos...

Un buen simulador de robótica es esencial para cualquier tipo de desarrollo robótico, ya que podemos realizar las pruebas software o la viabilidad de un sistema antes de construirlo. Gazebo cuenta con un potente motor de física simulada, interacción con objetos y dinámica de los mismos [KH04].

Gazebo permite una integración completa con ROS, gestiona modelos físicos de robots utilizando el formato URDF (Unified Robot Description Format) [Gar11] y añade características específicas como el tipo de material, los momentos de inercia o el modelo de colisión. Además, incorpora plug-ins (funcionalidades añadidas) que permiten la simulación de robots de tipo diferencial, simulación de sensores y el cálculo de transformadas entre los distintos sistemas de referencia.

Gazebo es mantenido y desarrollado actualmente por la Open Source Robotics Foundation [OSF].

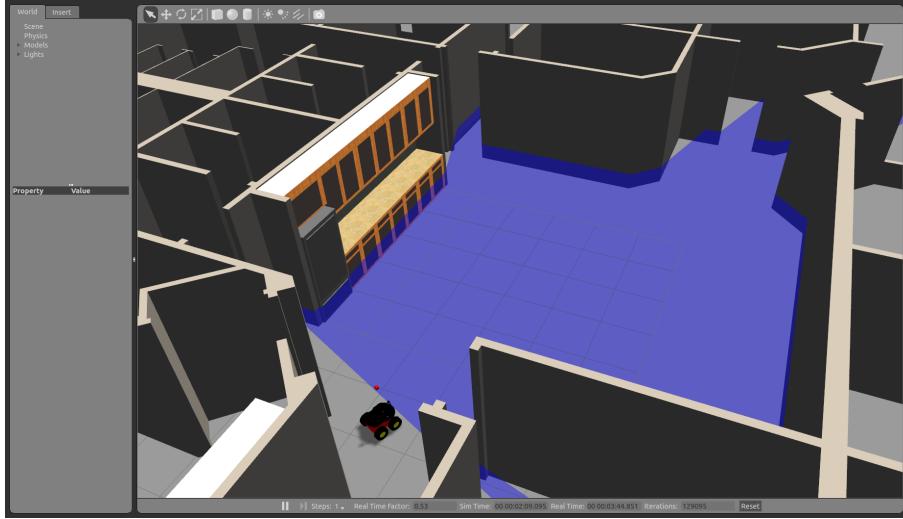


Figura 4.2: Entorno de simulación Gazebo

4.3.6 RViz: Herramienta de visualización robótica

RViz es una herramienta para la visualización de datos en 3 dimensiones de forma gráfica que trabaja dentro del entorno ROS (Figura 4.3). Esta aplicación nos permite ver lo que está ocurriendo en nuestra plataforma robótica a tiempo real.

RViz puede usarse para mostrar lecturas de sensores, datos devueltos por sensores de percepción en 3 dimensiones (nubes de puntos), visualizar mapas, visualizar un modelo de nuestro robot y su posición...

También puede utilizarse para interactuar con nuestro robot, utilizando marcadores interactivos o su interfaz de usuario.

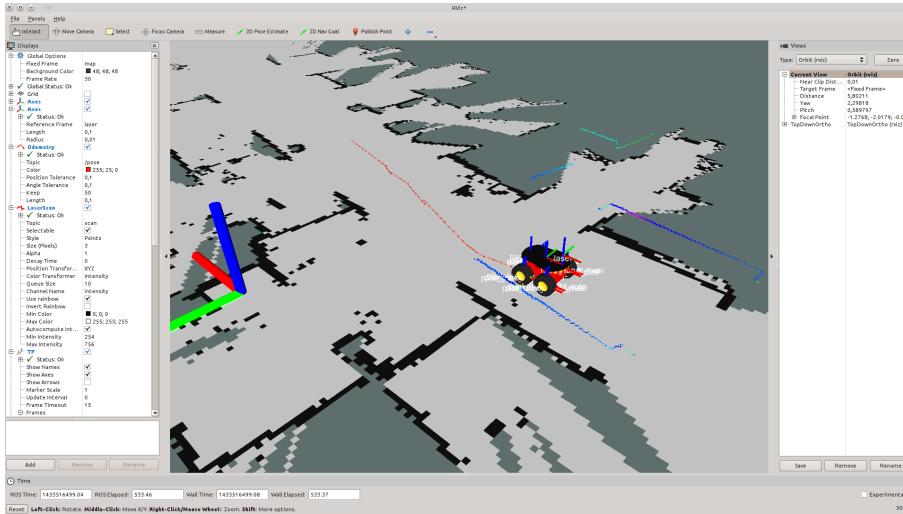


Figura 4.3: Entorno gráfico RViz

Al uso, RViz es un nodo más dentro de ROS que se suscribe o publica mensajes a otros nodos.

Su uso está muy extendido en ROS ya que nos permite entender lo que ocurre alrededor del robot y la información que manejan los nodos dentro del sistema.

4.3.7 Impresión 3D

4.4 Hardware

En esta parte se explica detalladamente el hardware empleado en el desarrollo del proyecto.

4.4.1 Pioneer 3 AT

El robot Pioneer 3 AT (Figura 4.4), perteneciente a la empresa Adept MobileRobots, es un robot de cuatro ruedas en configuración skid-steer y todo terreno (AT, All Terrain) de operación e investigación en laboratorio.



Figura 4.4: Robot Pioneer 3-AT

Su configuración en skid-steer permite un control relativamente simple utilizando el modo diferencial para poder realizar giros con gran maniobrabilidad, sin embargo, esta configuración depende mucho del tipo de suelo, con lo que se pierde precisión.

Este robot dispone de baterías, interruptor con parada de emergencia, dos motores de corriente continua para cada par de ruedas con transmisión mediante correa, encoders para leer la odometría y un microcontrolador con firmware ARCOS.

Ademas cuenta con un pequeño computador interno conectado al microcontrolador que puede utilizarse para realizar operaciones de manera autónoma.

El cuerpo del robot es de aluminio y su parte delantera así como superior es fácilmente desmontable para realizar las conexiones pertinentes y acceder al ordenador de a bordo y la placa microcontroladora. En la plataforma superior se sitúa el panel de control (Figura 4.5)para acceder al ordenador de abordo conectando un

monitor, teclado y ratón, puerto serial RS-232, botones de encendido y reset varios leds indicadores de estado y de envío y recepción de datos.

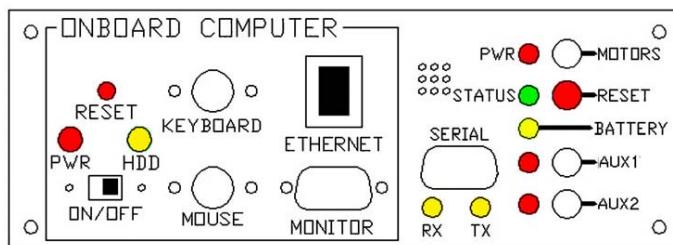


Figura 4.5: Panel de control del robot Pioneer 3-AT

En la siguiente tabla (Tabla 4.1) se describen las principales características del robot.

Especificaciones	Pioneer 3 AT
Largo	508 mm
Ancho	497 mm
Alto	277 mm
Distancia al suelo	80 mm
Peso	12 kg
Carga útil	32 kg
Cuerpo	Aluminio de 1.6 mm
Baterías	3 de 12 V Ah, estancas, plomo-ácido
Autonomía	4-8 horas
Sistema motriz	4 ruedas motrices
Ruedas	Neumáticos de Nylon
Diámetro de rueda	222 mm
Ancho de rueda	88 mm
Sistema de giro	Diferencial
radio máxima curvatura	40 cm
Radio de giro	0 cm
Máxima velocidad de avance	1.2 m/s
Máximo escalón	10 cm
Máximo hueco	15.2 cm
Terreno	Asfalto, Tierra, Césped, etc.
Encoders	500 pulsos
Procesador	Hitachi H8S

Tabla 4.1: Especificaciones del robot Pioneer 3 AT

4.4.2 Sensor Kinect

Kinect es un conjunto de sensores de bajo coste que lo convierte en una herramienta excepcional (Figura 4.6). Este dispositivo incluye una cámara de vídeo RGB, una cámara infrarroja de profundidad, un array de micrófonos y altavoces, un acelerómetro y un pequeño motor que le permite hacer movimientos de inclinación.

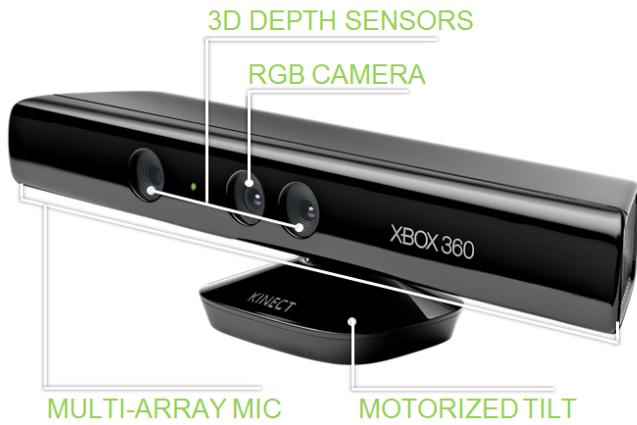


Figura 4.6: Sensor Kinect

Su función principal es la de percibir el entorno captando una serie de puntos que se ubican en las tres dimensiones. Su funcionamiento a grandes rasgos se basa en un emisor de infrarrojos a 830 nm que interactúa con los objetos y una cámara infrarroja que detecta la diferencia entre la proyección anterior y la actual, obteniendo la distancia a cada objeto.

En primer lugar, el laser infrarrojo es emitido por Kinect con un patrón determinado (Projected textures **REFERENCIA**), el cual no es simétrico sino que tiene puntos aleatorios que se dispersa gracias a unas lentes de proyección. Estos puntos aleatorios se reflejan en los objetos, los cuales sería posible verlos con una cámara externa.

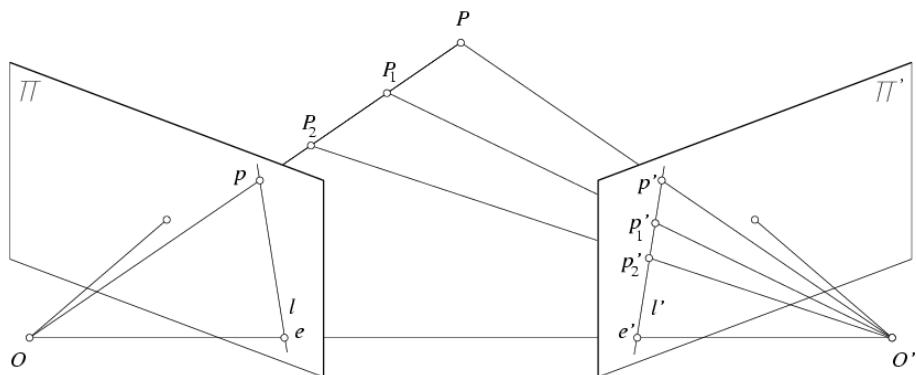


Figura 4.7: Proyección de infrarrojos y obtención de la nube de puntos

A continuación, al sensor de Kinect MT9M001C12STM, que no es más que el sensor CMOS de una cámara en la que se le trata para que observe solo el infrarrojo,

obteniendo los puntos infrarrojos en el plano 2D. El motivo por el que podemos medir la profundidad de los objetos (su distancia) es porque sabemos el patrón de cómo emite el laser emisor [Kon10], por tanto sabremos que si un punto no está en el sitio que corresponde, se ha trasladado respecto al punto inicial y se le aplica la correspondiente transformación (Figura 4.7), obteniendo finalmente los puntos de toda la nube en coordenadas cartesianas XYZ.

La siguiente tabla (Tabla 4.2) muestra las especificaciones del sensor Kinect.

Especificaciones	Sensor Kinect
Dimensiones del conjunto	270mm x 50mm x 70mm
Fuente infrarroja	830nm
Potencia	60 mW
Cámara Infrarroja	MT9M001C12STM
Resolución cámara infrarroja	1200x960 pixeles
Frecuencia	30 Hz
Tamaño pixel	5.2um x 5.2um
Pixeles activos	1280H x 1024V
Campo de visión	58° H, 45° V, 70° D
Resolución espacial	3mm (a 2 metros de distancia)
Resolución de profundidad	1cm (a 2 metros de distancia)
Distancia de operación	0.45m ? 6.5m
Cámara RGB	MT9M112
Resolución cámara RGB	640 x 480
Audio	TAS1020B (Controlador de Audio)
Formato	16kHz, 16-bit mono, modulación por codificación de pulso (PCM)
Entrada de audio	4 micrófonos con conversión analógico digital de 24bits
Acelerómetro	KXSD9-2050

Tabla 4.2: Características del sensor Kinect

4.4.3 Láser SICK LMS100

Aunque el planteamiento incial del proyecto planteaba la navegación basada únicamente en el sensor kinect, debemos mencionar el uso del sensor láser Sick LMS100 (Figura 4.8).



Figura 4.8: Sensor escaner láser Sick LMS100

Este es un sensor láser por infrarrojos de clase I (Inofensivo para el ojo humano), que obtiene la medida de distancias con gran precisión y rapidez en un solo plano y realizando un barrido de 270° (Figura 4.9).

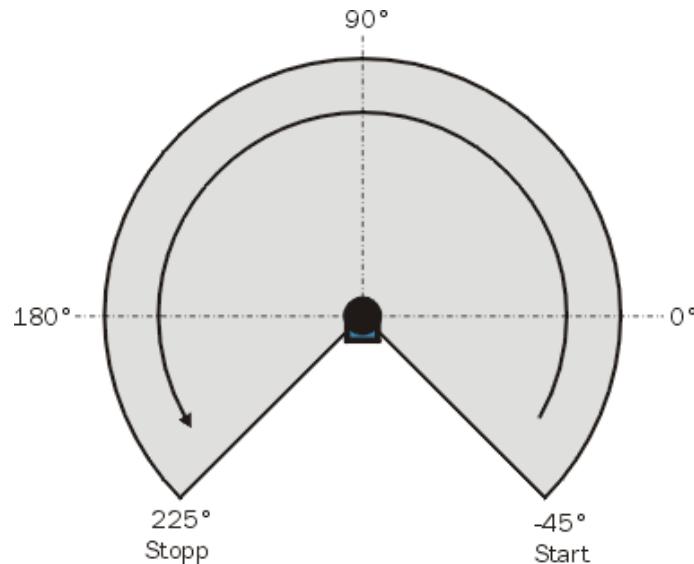


Figura 4.9: Campo de visión del sensor láser Sick LMS100

Este sensor está colocado en la parte trasera del robot, enfocando hacia atrás para cubrir un mayor rango y conocer todo el entorno alrededor del robot.

En la siguiente tabla (Tabla 4.3) se recogen sus características principales.

Especificaciones	Sick LMS100
Campo de aplicación	Interno
Fuente infrarroja	905 nm
Clase Láser	1 (IEC 60825-1)
Campo de visión	270°
Frecuencia de escaneo	25Hz/50Hz
Resolución angular	0.25°/0.5°
Distancia de operación	0.05 - 20 m
Tiempo de respuesta	20 ms
Error	30 mm
Interfaz de datos	Ethernet
Tensión de operación	10.8V - 20V DC
Consumo	20 W
Peso	1.1 Kg
Dimensiones	105mm x 102mm x 152mm

Tabla 4.3: Características del sensor láser Sick LMS100. Basado en [SIC09]

4.4.4 Intel NUC NUC5i7RYH

El ordenador Intel NUC NUC5i7RYH, es un ordenador de altas prestaciones y de tamaño compacto que ofrece unas buenas características para procesar datos y realizar la algoritmia adecuada para tareas de robótica.

Está equipado con un procesador Intel i7-5557U de quinta generación que ofrece una frecuencia de reloj de 3.1 GHz. Está incorporado con un disco duro de estado sólido que permite una alta velocidad de lectura y escritura en disco, así como una tarjeta RAM de tipo DDR3L de 8GB que permitirá el intercambio de información entre los nodos ROS de una manera fluida.

Su cometido será el de procesar la información de los sensores, generar los mapas incorporando los obstáculos, generar las trayectorias de navegación y comandar los motores del robot para realizar movimientos.

Dispone de tamaño compacto y un consumo bajo, juto con una alimentación a partir de los 12 voltios, lo que lo hace ideal para incorporarlo en robots móviles que requieran realizar tareas sin depender de una infraestructura.

En la tabla 4.4 pueden consultarse sus características principales.

Especificaciones	Intel NUC NUC5i7RYH
Procesador	Intel Core i7-5557U, dual-core
Frecuencia de reloj	3.1 GHz hasta 3.4 GHz
Memoria RAM	DDR3L1 8 GB
Disco duro	M.2 SSD 120 GB
Gráficos	Iris Graphics 6100
Conectividad de periféricos	2 x USB 3.0 en el panel posterior 2 x USB 3.0 en el panel frontal 2 x USB 2.0 internos vía colector Intel 10/100/1000 Mbps
Conectividad de red	Intel® Wireless-AC 7265 M.2 Antenas inalámbricas (IEEE 802.11ac)
Alimentación	12-19V DC
Consumo	65 W
Dimensiones	115mm x 111mm x 48.7mm

Tabla 4.4: Características del ordenador Intel NUC NUC5i7RYH

Capítulo 5

Arquitectura

Esta sección tiene como objetivo plantear la arquitectura general utilizada en el robot, las comunicaciones con el resto del hardware y con los nodos que proporcionan la información necesaria para que el robot sea totalmente autónomo.

5.1 Arquitectura general

A nivel de hardware utilizado en el proyecto, como es el propio robot, los sensores el ordenador de abordo el sistema se estructura de a siguiente manera:

- i) Robot Pioneer 3 AT: Este es el robot mencionado anteriormente, el cual debe ser configurado para acceder al puerto serie RS-232 de su placa controladora. Esto nos permite conectarnos con el firmware ARCOS **referencia** y comunicarnos a través de la librería ARIA. De esta forma controlamos los motores y podemos leer el valor de los encoders de la odometría.
- ii) Sensores: Tanto el sensor Kinect como el sensor láser irán alimentados a través de las baterías del robot y se comunicarán con el ordenador de abordo a través de puerto USB y ethernet respectivamente.
- iii) Ordenador Intel NUC: Será el ordenador de abordo encargado de ejecutar ROS y realizar todo el procesamiento necesario. Irá equipado con el sistema operativo Ubuntu 14.04 por ser la última versión estable disponible a fecha de la entrega del proyecto. Irá conectado al robot mediante un convertidor RS-232 a USB, el sensor láser se comunica vía ethernet y el sensor Kinect a través de puerto USB igualmente. También se conectarán el audio al altavoz integrado del robot.
- iv) Ordenador externo: Como se ha mencionado anteriormente, un ordenador externo opcional equipado con ROS podrá utilizarse para realizar tareas de supervisión inalámbrica a través de RViz y para realizar la teleoperación del robot vía TCP/IP integrado en ROS.

5.2 Arquitectura del proyecto

El proyecto está estructurado siguiendo la filosofía de "paquetes" desarrollados en ROS. Los paquetes se compilan dentro de un entorno de trabajo tipo Catkin **REFERENCIA** que se encarga de compilar correctamente a través de CMake **referencia** todos los ejecutables y de realizar el enlazado correctamente.

En el directorio raíz del proyecto por tanto, encontraremos los paquetes necesarios para que el sistema funcione:

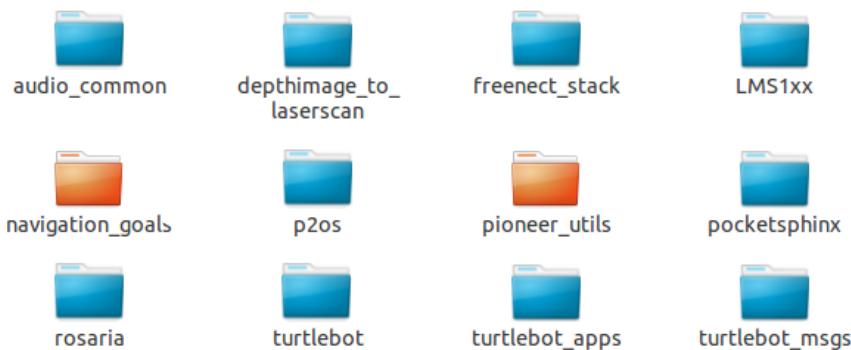


Figura 5.1: Estructura del proyecto

Las carpetas de color azul son paquetes desarrollados por terceros que no vienen integrados por defecto en ROS. El procedimiento para utilizarlos es clonar su repositorio en github e incluirlos como submodulos dentro de nuestro proyecto.

A continuación se realiza una breve descripción de cada uno:

- **audio_common:** Agrupa todas las funcionalidades para reproducir sonidos y voz sintetizada.
- **depthimage_to_laserscan:** Nodo que realiza la conversión del tipo de dato Pointcloud2 a laserscan mediante el análisis de imagen. Configurable mediante parámetros.
- **freenect_stack:** Agrupa los nodos controladores del sensor Kinect basados en libfreenect y tranfroman toda la información a la interfaz de ROS.
- **LMS1xx:** Nodo para la conexión con los sensores Láser Sick De la familia LMS100 a través de puerto ethernet.
- **p2os:** Agrupa utilidades y nodos para conectarse con los robots de la familia Pioneer, en especial Pioneer 3 AT y 3 DX. Ofrece modelos 3D de cada robot y algunos parámetros de configuración de los robots.
- **pocketsphinx:** Utilidad para el reconocimiento de voz mediante cualquier tipo de micrófono.
- **rosaria:** Interfaz de comunicación ROS con la librería Aria para el control de los motores del robot y la lectura de los encoders. Ofrece parámetros de calibración

de los encoders y acceso al array de ultrasonidos del robot (funcionalidad no incorporada en el robot utilizado para este proyecto).

- turtlebot, turtlebot_apps y turtlebot_msgs: Paquetes que agrupan funcionalidades para el robot Turtlebot, usadas en este caso en nuestro desarrollo.

Los paquetes ROS de desarrollo propio en este proyecto son los indicados en color naranja.

El paquete navigation_goals es un nodo que realiza navegación a través de puntos establecidos de modo que se puedan programar rutas a seguir por el robot.

El paquete pioneer_utils es donde se encuentra el desarrollo principal de este proyecto y se describirá en detalle a continuación.

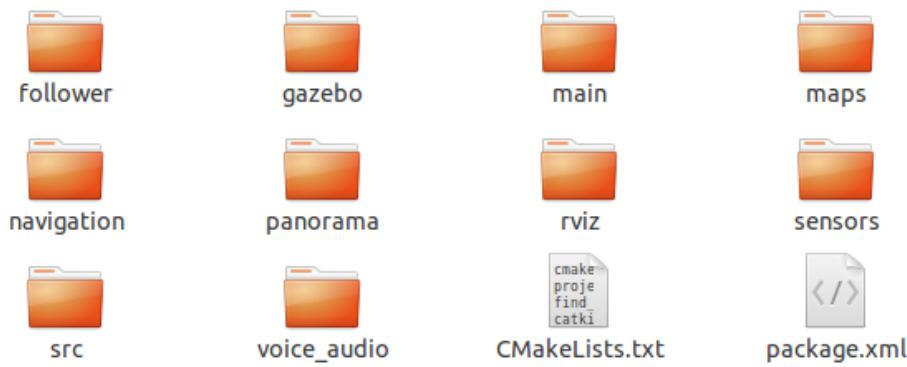


Figura 5.2: Estructura de carpetas del paquete pioneer_utils

Como cualquier paquete en ROS, disponemos de un archivo CMakeLists.txt y un package.xml, donde se indican los objetivos a compilar y las librerías adicionales para el enlazado así como las dependencias respectivamente.

En cada carpeta encontramos:

- follower: Archivos de configuración para utilizar la funcionalidad follower del robot Turtlebot en el nuestro.
- gazebo: Configuraciones necesarias para ejecutar Gazebo utilizando un modelo del robot Pioneer 3 AT y sus sensores del mismo tipo que el utilizado en la realidad. Se incluyen launchfiles ****OJO**** para realizar la navegación con diferentes mapas.
- main: Launchfiles de las aplicaciones principales que incorpora el robot ****COMPLETAR****.
- maps: Mapas guardados realizados con la funcionalidad de slam_gmapping.
- navigation: archivos y ajustes necesarios para realizar navegación del robot con y sin mapa (global navigation o local navigation).
- panorama: Archivos de configuración para utilizar la funcionalidad panorama del robot Turtlebot en el nuestro.

- rviz: Configuraciones preguardadas para rviz.
- sensors: Archivos de configuración para tener acceso a toda la información del hardware y los sensores que se utilizan.
- src: Carpeta donde se incluye el código fuente en C++ o Python de los nodos de teleoperación, test de navegación y navegación por estima (Dead reckoning).
- voice_audio: Archivos de configuración para el nodo de reconocimiento de voz y sonido, diccionarios de palabras y pronunciación.

Capítulo 6

Entorno ROS

La versión del software ROS utilizada para el desarrollo del proyecto ha tratado de ser siempre la más actual posible, ya que eso nos asegura mantener la compatibilidad en futuros trabajos y que el software esté actualizado.

La versión utilizada fue ROS Indigo Igloo desde el comienzo del proyecto, bajo el sistema operativo Ubuntu 14.04. A fecha de entrega del proyecto existe una versión más actualizada del software ROS, sin embargo se desestimó su uso debido a que aún no era una versión estable y algunos paquetes no se encontraban disponibles para tal versión.

ROS realiza funciones similares a un sistema operativo, como la comunicación e interacción entre diferentes procesos, la distribución en hilos, comunicación distribuida entre máquinas, abstracción del hardware, control a bajo nivel...

ROS también proporciona herramientas y librerías para crear código, compilarlo y ejecutarlo en diferentes máquinas.

El concepto más importante dentro de ROS son los nodos, que no son más que un proceso que se ejecuta y conecta al proceso principal, llamado máster, para comunicarse con otros nodos. Existen diferentes conceptos rostopics, rosservices, nodelets... que serán explicados en el siguiente punto.

6.1 Funcionamiento de ROS

Como hemos dicho, en ROS las acciones del robot se llevan a cabo mediante la interacción de diferentes nodos que se conectan entre sí en forma de grafo. Cada nodo se conecta a un nodo principal llamado máster (roscore) que se encarga de abrir un canal de comunicación entre cada nodo o proceso.

En la figura 6.1 vemos un ejemplo para el robot simulado "turtlesim", al cual le envía comandos el nodo de teleoperación "teleop_turtlez ambos publican información a través del nodo rosout".

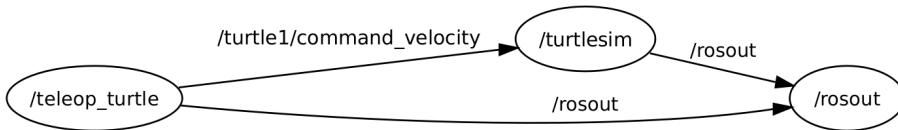


Figura 6.1: Grafo de ejemplo con nodos conectados

Teniendo esta estructura en mente, es conveniente definir algunos conceptos sobre los que trabaja ROS **referencia**:

- Nodos (nodes): Los nodos son procesos que realizan algún tipo de cómputo. Un robot basado en ROS precisará de varios nodos ejecutándose al mismo tiempo e intercambiándose información.
- Máster (master): El nodo ROS master proporciona una vía comunicación para el intercambio de mensajes y un registro de cada nodo. También dispone de un registro de parámetros a los que pueden tener acceso cualquiera de los nodos.
- Mensajes (messages): Los nodos se comunican unos con otros a través de mensajes. La estructura de estos mensajes puede definirse por el usuario y contener diferentes tipos de datos.
- Topics: Los mensajes son transmitidos a través de un sistema de publicación / suscripción. Un nodo envía un mensaje publicándolo en cierto topic y otro nodo puede leer el mensaje si se suscribe.
- Servicios (services): Los servicios son similares a los topics pero son mucho más apropiados para realizar comunicaciones del tipo solicitud / respuesta.
- Bags: El concepto de "bag" puede entenderse como un almacen de mensajes. Los mensajes de cierto topic pueden guardarse para analizar los datos más tarde o reproducir cierta situación.

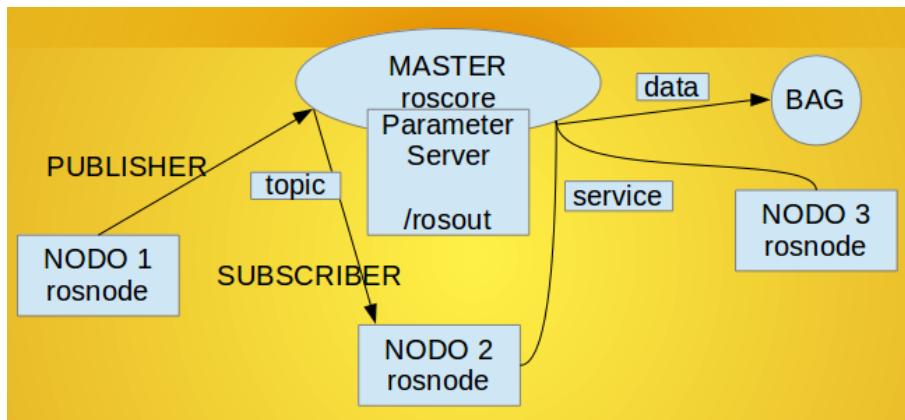


Figura 6.2: Esquema del funcionamiento de ROS

A nivel de sistema de ficheros ROS se estructura de la siguiente forma:

- Paquetes (packages): Es la unidad principal de organización de software en ROS. Un paquete puede contener nodos, tipos de datos, archivos de configuración.
- Metapaquetes (metapackages): Sirven para representar un conjunto de paquetes que tienen relación entre sí.
- Package manifests: Son archivos de tipo xml donde se indican los metadatos de un paquete, como su nombre, su versión, una descripción, licencia, dependencias de otras librerías o paquetes...
- Repositorios: Normalmente, para distribuir los paquetes en ROS se utilizan repositorios bajo un sistema de control de versiones.
- Tipos de mensajes: Son archivos con la estructura de un tipo de mensaje (MiMensaje.msg)
- Tipos de servicios: Son archivos con la estructura de un tipo de servicio tanto para los datos de solicitud como los de respuesta (MiServicio.srv)

También es necesario conocer algunos tipos de archivos y su uso dentro de ROS para comprender el trabajo de este proyecto:

- Launchfiles: ROS ofrece la herramienta rosrun para ejecutar varios nodos con un solo comando y configurar sus parámetros. Es una forma cómoda de organizar la puesta en marcha de todos los nodos y enlazar unos launchfiles con otros. Los archivos suelen tener la extensión .launch y su estructura es similar a la sintaxis xml **referencia**.
- yaml: Es un formato de serialización de datos legible para los humanos de tal modo que se enfoca más en los datos que en el marcado de los archivos. Su formato es .yaml y se utiliza para definir parámetros en cada nodo.
- xacro: Son archivos que combinan el lenguaje xml con macros de tal modo que podemos mantener los archivos más legibles y ordenados **referencia**. Estos archivos se utilizan principalmente para definir un modelo de nuestro robot en URDF (Unified Robot Description Format) y su extensión es .xacro.
- URDF (Unified Robot Description Format): Es un tipo de formato utilizado para describir la estructura de un objeto en forma de eslabones y articulaciones de distinto tipo **referencia**. En ROS se utilizan para generar modelos del robot en Gazebo y en RViz y conocer de manera gráfica el estado de los eslabones del robot. La extensión de estos archivos es .urdf.
- gazebo: Los archivos .gazebo definen características concretas para utilizar robots definidos mediante URDF. Estos archivos permiten desacoplar las características utilizadas en Gazebo del modelo original.

- world: Los archivos *.world* definen en sintaxis xml mundos virtuales para cargar en el simulador Gazebo. Pueden definirse los objetos a incorporar, las luces y la posición del punto de vista.

Por último, cabe destacar la importancia de uno de los paquetes integrados en ROS que más beneficios nos aporta, el paquete de transformadas *tf*.

tf **referencia** es uno de los paquetes de geometría dentro de ROS que nos permite realizar transformadas de los datos a un sistema de coordenadas concreto, estos sistemas de coordenadas son denominados como *frames*. Muchas funcionalidades de ROS se basan en este tipo de transformadas para realizar los cálculos matemáticos oportunos así como para determinar la posición de nuestro robot y sus articulaciones.

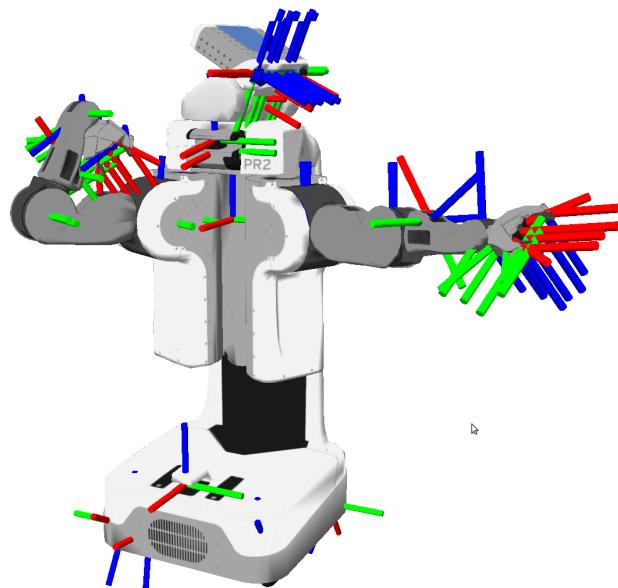


Figura 6.3: Frames utilizados en el robot PR2

6.2 Configuración de ROS

Para la instalación de ROS es necesario seguir ciertos pasos bien explicados en la wiki de su página **referencia**. Al ser un sistema fuertemente basado en sistemas UNIX y con mayor soporte para Ubuntu, las instalaciones se realizan principalmente a través de herramientas como apt (Advanced Packaging Tool) **referencia**.

Existen diferentes instalaciones de ROS dependiendo de si precisamos de todas sus herramientas y utilidades o no, ya que por ejemplo no tendría sentido instalar herramientas de interfaz gráfica en un robot que dispone de entorno gráfico. Para el ordenador de abordo del robot utilizamos la versión completa del software.

```
1 $ sudo apt-get install ros-indigo-desktop-full
```

Código 6.1: Mandato de consola para instalar la versión completa de ROS Indigo.

Añadimos nuestra variable de entorno para que el sistema reconozca todas herramientas de ROS:

```
1 $ source /opt/ros/indigo/setup.bash
```

Código 6.2: Source al setup de ROS Indigo

Para el desarrollo dentro de ROS se utiliza el entorno de desarrollo Catkin **referencia**, que facilita el enlazado y compilación de los paquetes. para ello es necesario tenerlo instalado y crear un entorno de desarrollo:

```
1 $ sudo apt-get install ros-indigo-catkin
2 $ mkdir -p ~/catkin_ws/src
3 $ cd ~/catkin_ws/src
4 $ catkin_init_workspace
```

Código 6.3: Instalación y workspace de Catkin

Y a continuación es necesario incluir nuestro directorio de desarrollo para que sea reconocido:

```
1 $ cd ~/catkin_ws
2 $ source devel/setup.bash
```

Código 6.4: Source al setup de nuestro entorno Catkin

A partir de este punto podríamos crear nuestros propios paquetes utilizando las funcionalidades de ROS **referencia <http://wiki.ros.org/catkin/Tutorials/CreatingPackage>.

6.3 Configuración de los paquetes ROS

Los paquetes ROS son funcionalidades desarrolladas por terceros que se integran en el sistema ROS y que son transferibles de un robot a otro.

Los paquetes ROS incorporan un archivo *CMakeLists.txt* para la compilación de los nodos que se hayan desarrollado así como sus mensajes y un archivo Package Manifest (*package.xml*), como hemos indicado anteriormente.

Para el desarrollo de este proyecto es necesario clonar el repositorio GitHub *pioneer3at_ETSIDI* en nuestra carpeta *~/catkin_ws/src*. Este repositorio contiene todos los paquetes necesarios en nuestro entorno:

```
1 $ cd ~/catkin_ws/src  
2 $ git clone --recursive https://github.com/danimtb/pioneer3at_ETSIDI.git .
```

Fuente: https://github.com/danimtb/pioneer3at_ETSIDI

Código 6.5: Clonado del repositorio *pioneer3at_ETSIDI*

Junto con el repositorio de desarrollo también es preciso instalar funcionalidades adicionales de ROS. Toda esta configuración puede consultarse con más detalle en el apéndice A.

Capítulo 7

Control primario

En este capítulo se realiza una primera aproximación al control del robot y a los nodos básicos que deben ejecutarse para controlarlo y acceder a la información de los sensores.

7.1 Nodos hardware

Los nodos necesarios para el control del robot requieren el acceso a los motores y a la lectura de la odometría. También es necesario disponer de controladores para ambos sensores utilizados y que su información se publique en tipos de datos reconocibles por ROS. Los nodos utilizados para estos dispositivos hardware se describen a continuación.

7.1.1 Control del robot: Rosaria y p2os

Como hemos indicado anteriormente, la librería que nos proporciona el acceso a la placa controladora de nuestro robot Pioneer es Aria. Esta librería es la que proporciona Adept Mobile Robots para realizar el control completo del robot y acceder a sus parámetros con figurables.

Los paquetes disponibles en ROS para el control de los robots de la familia Pioneer son dos, por un lado tenemos Rosaria y por otro p2os.

p2os **referencia** es un paquete que agrupa conjunto de utilidades y nodos desarrollados para controlar el robot. Su característica principal es que accede de manera nativa a la placa controladora del robot y no dependen de la librería Aria. Además incorpora funcionalidades configuradas como modelos 3D de robot, simulación con Gazebo o la configuración de la navegación.

Sin embargo, p2os no integra todas las funcionalidades a las que tiene acceso Aria como son la reconfiguración de los parámetros de la odometría.

Rosaria **referencia** es un nodo de interfaz entre ROS y Aria, por tanto incluye todas prácticamente todas las funcionalidades de esta. Podemos acceder a la calibración de los encoders de la odometría así como conectar con el simulador MobileSim (ver sección 10.2)

A continuación se muestra el launchfile para ejecutar el nodo RosAria:

```

1 <launch>
2   <!-- Starting rosaria driver for motors and encoders -->
3   <node name="rosaria" pkg="rosaria" type="RosAria" args="--port:=/dev/ttyUSB0">
4     <rosparam>
5       TicksMM: 166
6       RevCount: 37350
7       DriftFactor: 0
8     </rosparam>
9     <remap from="~cmd_vel" to="cmd_vel"/>
10    </node>
11 </launch>
```

Fuente: *pioneer_utils/sensors/rosaria.launch*

Código 7.1: Launchfile para RosAria.

Como puede verse, podemos modificar los valores usados por Aria para realizar el cómputo de la odometría (más información la subsección A.2.1 del apéndice).

En la tabla 7.6 se muestra parte de la API utilizada de rosaria.

RosAria API			
Topics suscritos	Mensaje	Descripción	
cmd_vel	geometry_msgs/Twist	Recibe los comandos de velocidad	
Topics publicados	Mensaje	Descripción	
pose	nav_msgs/Odometry	Publica la odometría	
Parámetros	Tipo	Descripción	
port	string	Puerto serie del robot	
TicksMM	float	Calibración de la odometría	
DriftFactor	float	Rozamiento de la odometría	
RevCount	float	Calibración de los encoders	
Frames publicados			
base_link		Referencia base del robot	
odom		Referencia odométrica	

Tabla 7.1: API de rosaria utilizada. Basado en [ROS15]

7.1.2 Sensor Kinect

Para la puesta en marcha del sensor Kinect existen en ROS diferentes paquetes que utilizan una u otra librería de código en función de quién haya lo haya desarrollado.

Existen dos paquetes destinados al control del sensor Kinect:

Por un lado tenemos openni_kinect **referencia**, que utiliza los drivers originales desarrollados por la empresa PrimeSense encargada de fabricar este dispositivo.

Este paquete y en concreto los drivers del dispositivo han sido utilizados ampliamente tanto en desarrollos realizados con ROS como fuera de este entorno. Sus características principales son la total funcionalidad, aprovechamiento de toda la tecnología de este sensor y capacidad para monitorear la posición del esqueleto de una persona. Sin embargo, desarrollo del paquete `openni_kinect` solo se mantuvo activo hasta a versión de ROS Fuerte **referencia** debido a la compra de PrimeSense por la conocida marca de informática Apple **referencia**.

Por otro lado, gracias al gran desarrollo software llevado a cabo por la comunidad OpenSource, disponemos de los divers libfreenect desarrollados por el proyecto OpenKinect http://openkinect.org/wiki/Main_Page que trata de ofrecer una vía alternativa para controlar el sensor de Microsoft. Estos drivers se encapsulan y adaptan su interfaz a ROS a través del paquete `freenect_stack` **referencia** el cual nos ofrece acceso tan solo a la imagen y la nube de puntos del sensor. Su integración no es completa, no dispone de características adicionales como el monitoreo de la posición de una persona, sin embargo su funcionamiento es correcto y está adaptado a ROS en su versión Indigo y esto nos ofrece la posibilidad de integrarlo en nuestro sistema. Por estas razones ha sido el software utilizado para acceder al sensor Kinect en este proyecto.

`freenect_stack`, al ser un paquete de terceros, debe clonarse desde su repositorio de código fuente e incorporarlo a nuestro entorno catkin.

Su puesta en marcha es bastante inmediata y podemos hacer uso de los launch files que ofrece `freenect_launch` desde consola de la siguiente forma:

```
1 rosrun freenect_launch freenect.launch
```

Fuente: `freenect_stack/freenect_launch/launch/freenect.launch`

Código 7.2: Launchfile para Kinect en el paquete `freenect_launch`.

En la tabla 7.2 se muestra parte de la API utilizada.

libfreenect_stack API		
Topics publicados	Mensaje	Descripción
camera/depth/points	sensor_msgs/PointCloud2	Publica la nube de puntos
camera/depth/image_raw	sensor_msgs/Image	Imagen captada
camera/depth/camera.info	sensor_msgs/CameraInfo	Información de la cámara
Frames		Descripción
camera_link		Referencia base de Kinect
camera_rgb_frame		Referencia cámara RGB
camera_depth_frame		Referencia cámara IR

Tabla 7.2: API de `freenect_stack` utilizada.

7.1.3 Sensor Láser Sick LMS100

Existe un amplio soporte para sensores láser de la marca Sick, entre ellos el más popular es la familia Sick LMS200 ya que se utiliza en muchos desarrollos relacionados con la robótica móvil **referencia**. Esa familia de sensores utiliza una interfaz de comunicación en serie a través de puerto RS-232, sin embargo, la familia de dispositivos Sick LMS100 utiliza interfaz ethernet y requiere un tratamiento de datos diferente.

El láser Sick LMS100 ha sido integrado en ROS y utilizado en este proyecto ya que se había dado uso en proyectos anteriores **referencia alejandro** y se consideró conveniente incorporarlo y utilizarlo para obtener una navegación más precisa del robot.

Para acceder al sensor Sick LMS100 utilizamos el paquete LMS1xx desarrollado por Clearpath Robotics **referencia** que se basa en el trabajo de otros dos desarrolladores de la comunidad ROS, y en concreto en los drivers desarrollados por **referencia** <https://github.com/konradb3/libLMS1xx>

El paquete LMS1xx consta de un solo nodo que se conecta a través de una IP indicada como parámetro. Su uso es sencillo mediante un archivo launchfile y tan solo debemos tener la precaución de configurar correctamente la IP manual del puerto ethernet de nuestro ordenador.

```

1 <launch>
2   <arg name="host" default="192.168.1.14" />
3   <node pkg="lms1xx" name="lms1xx" type="LMS1xx_node">
4     <param name="host" value="$(arg host)" />
5   </node>
6 </launch>
```

Fuente: *LMS1xx/launch/LMS1xx.launch*

Código 7.3: Launchfile para el sensor Láser Sick LMS100.

Pueden precisarse algunos ajustes previos con la herramienta que ofrece el fabricante ”SOPAS Engineering tool”, los cuales pueden encontrarse en el apéndice de este trabajo (Sección A.2.4).

LMS1xx API		
Topics publicados	Mensaje	Descripción
/scan	sensor_msgs/LaserScan	Puntos láser
Parámetros	Tipo	Descripción
host	string	Dirección IP del láser
Frames		Descripción
laser		Centro del haz láser

Tabla 7.3: API de LMS1xx utilizada.

<http://wiki.ros.org/LMS1xx>

7.1.4 Integración del hardware

Una vez disponemos de todos los paquetes necesarios para poner en funcionamiento todo el hardware en el robot, necesitamos integrar todos los nodos bajo una misma configuración y definir mediante transformadas la posición de los sensores en el robot.

Es necesario por tanto crear un nuevo archivo launchfile (Código 7.4) desde el cual lanzar cada nodo con las configuraciones del hardware y definir transformadas estáticas entre cada uno de los *frames*.

```

1 <launch>
2
3 <!-- Launching p2os RobotModel --> OJO!!!!!!!!!!!!!!!
4   <include file="$(find p2os_urdf)/launch/pioneer3at_urdf.launch"/>
5
6 <!-- Launching LMS1xx_node for laser Sick LMS100 via ethernet -->
7   <include file="$(find pioneer_utils)/sensors/LMS1xx.launch"/>
8
9 <!-- start sensor-->
10 <include file="$(find freenect_launch)/launch/freenect.launch"/>
11
12 <!-- Launch kinect and depthimage_to_laser node -->
13   <include file="$(find pioneer_utils)/sensors/kinect_to_laser_low.launch"/>
14
15 <!-- Launch kinect and depthimage_to_laser node -->
16   <include file="$(find pioneer_utils)/sensors/kinect_to_laser.launch"/>
17
18 <!-- Starting rosaria driver for motors and encoders -->
19   <include file="$(find pioneer_utils)/sensors/rosaria.launch"/>
20
21   <node pkg="tf" type="static_transform_publisher" name="base_to_laser_broadcaster" args="-0.2
22     0 0.390 3.141592 0 0 base_link laser 1" />
23   <node pkg="tf" type="static_transform_publisher" name="base_to_camera_broadcaster" args
24     ="0.020 0 0.375 0 0 0 base_link camera_link 1" />
25
26 </launch>
```

Fuente: *pioneer_utils/sensors/pioneer3at-rosaria.launch*

Código 7.4: Launchfile creado para robot Pioneer 3 AT.

Como resultado, obtenemos una relación entre cada sistema de coordenadas (*frame*) y podemos realizar cálculos entre cada uno de ellos. Esto también sirve para que el robot "sea consciente" de su configuración.

FIGURA VIEW FRAMES***

7.2 Nodo de teleoperación

Uno de los primeros objetivos de este proyecto es realizar el control teleoperado del robot. Utilizando ROS y sus características para operar de manera distribuida en diferentes máquinas, esta tarea se vuelve inmediata para el usuario.

ROS trabaja en forma de procesos que se ejecutan de manera independiente y se comunican a través del nodo principal o Máster con el paso de mensajes. Ya que el máster dispone de una dirección IP en la máquina que lo ejecuta, basta con indicar en el entorno ROS de cada máquina la dirección de este para que los nodos abran

una comunicación con esa dirección IP.

Los pasos para configurar las máquinas bajo la misma red se describen con detalle en la guía ROS NETWORKING y consisten básicamente en indicar en el script `.bashrc` el parámetro ROS_IP y ROS_MASTER_URI.

ROS_IP debe contener la IP que tenga nuestra máquina en la red que esté operando y ROS_MASTER_URI la dirección *http* correspondiente de la máquina donde se ejecute el nodo principal.

```
1 | export ROS_IP=10.42.0.1
2 | export ROS_MASTER_URI=http://10.42.0.1:11311
```

Fuente: `~/.bashrc`

Código 7.5: Líneas del archivo `.bashrc` en el ordenador de abordo.

```
1 | export ROS_IP=10.42.0.77
2 | export ROS_MASTER_URI=http://10.42.0.1:11311
```

Fuente: `~/.bashrc`

Código 7.6: Ejemplo `.bashrc` en un ordenador externo para realizar comunicación con el máster.

De esta manera podemos desarrollar un nodo ROS que se conecte al topic de RosAria que comanda los motores `cmd_vel` y publicar diferentes valores de velocidad en función de las teclas que se pulsen.

```
1 | }
```

Fuente: `~/.bashrc`

Código 7.7: Ejemplo `.bashrc` en un ordenador externo para realizar comunicación con el máster.

teleop_p3at API		
Topics publicados	Mensaje	Descripción
cmd_vel	geometry_msgs/Twist	Publica comandos de velocidad

Tabla 7.4: API de teleop_p3at

7.3 Nodo de navegación estimada

La navegación estimada, más conocida en inglés como Dead Reckoning [Wik15], es la capacidad para realizar navegación en un entorno basándose solamente en la información que aportan los sensores de la odometría.

Es un método estimado de localización que se basa en la información de los encoders y no tiene en cuenta aspectos como el tipo de superficie, la inclinación, el rozamiento o incluso obstáculos que puedan frenar o modificar el desplazamiento del robot (a pesar de que sus ruedas giren).

Este nodo de navegación puede utilizarse para indicar al robot que avance cierta cantidad de metros y que realice giros a derecha o izquierda en un determinado ángulo.

Fragmento de código

moving_alone API		
Topics suscritos	Mensaje	Descripción
pose	nav_msgs/Odometry	Recibe la odometría
Topics publicados		
cmd_vel	geometry_msgs/Twist	Publica comandos de velocidad
Frames suscritos		
base_link		Referencia base del robot
odom		Referencia odométrica

Tabla 7.5: API de moving_alone

7.4 Nodo de guiado (follower)

El nodo de guiado se basa en el procesamiento de la nube de puntos obtenida a través de los nodos del paquete freenect_stack.

El nodo está originalmente desarrollado para el robot Turtlebot pero es fácil adaptable a otros robots.

Requiere un Topic de tipo *sensor_msgs/PointCloud2* al que suscribirse para leer la nube de puntos y un topic de tipo *geometry_msgs/Twist* al que publicar los movimientos de giro, avance y retroceso.

turtlebot_follower API		
Topics suscritos	Mensaje	Descripción
camera/depth/points	sensor_msgs/PointCloud2	Recibe la nube de puntos
Topics publicados		
cmd_vel	geometry_msgs/Twist	Publica comandos de velocidad
Parámetros		
min_y	double	Posición mínima de puntos en Y
max_y	double	Posición máxima de puntos en Y
min_x	double	Posición mínima de puntos en X
max_x	double	Posición máxima de puntos en X
max_z	double	Posición máxima de puntos en Z
goal_z	double	Distancia mantenida en el seguimiento
z_scale	double	Factor de escala velocidad trans.
x_scale	double	Factor de escala en velocidad de rot.
enabled	bool	Habilita los movimientos

Tabla 7.6: API de turtlebot_follower

El tratamiento de la nube de puntos se realiza con la librería PCL (PointCloud Library [poi10]) y su funcionamiento es el siguiente:

- 1.- Busca puntos dentro de los límites establecidos.
- 2.- Calcula las dimensiones de los puntos encontrados.
- 3.- Calcula el centroide del la zona destacada.
- 4.- Mueve el robot de manera acorde hasta que alcanza la distancia establecida.

```

1 <launch>
2
3   <!-- Load turtlebot follower into the 3d sensors nodelet manager to avoid pointcloud
4     serializing -->
5   <node pkg="nodelet" type="nodelet" name="turtlebot_follower" args="load turtlebot_follower/
6     TurtlebotFollower camera/camera_nodelet_manager">
7     <remap from="turtlebot_follower/cmd_vel" to="/cmd_vel"/>
8     <remap from="depth/points" to="camera/depth/points"/>
9     <param name="enabled" value="true" />
10    <param name="x_scale" value="10.0" />
11    <param name="z_scale" value="10.0" />
12    <param name="min_x" value="-0.35" />
13    <param name="max_x" value="0.35" />
14    <param name="min_y" value="0.1" />
15    <param name="max_y" value="0.5" />
16    <param name="max_z" value="1.2" />
17    <param name="goal_z" value="0.6" />
18  </node>
19 </launch>

```

Fuente: *pioneer_utils/follower/simple-follower.launch*

Código 7.8: Launchfile para turtlebot_follower en el robot Pioneer 3 AT.

Capítulo 8

Navegación

En este capítulo se expone el desarrollo referente a la navegación dentro del ecosistema ROS. En él se describen las características de navegación del paquete de navegación y sus posibilidades.

Este capítulo trata de abordar el aspecto de la navegación desde el punto de vista de la utilidad, pasando por su fundamento teórico y sin dejar de lado su aplicación en el robot Pioneer 3 AT.

Por tanto, se exponen algunos ejemplos de configuraciones para la navegación, sin embargo, la configuración final del robot y la discusión sobre la misma se abordará en el capítulo 9, donde hablaremos de su implementación más en detalle.

8.1 Navigation Stack

Dentro de las funcionalidades de ROS ya hemos comentado que existen los metapquetes o "Stacks", que son grupos de paquetes de software que todos juntos ofrece una funcionalidad.

El paquete de navegación de ROS [ME10a] se define como un paquete de navegación en dos dimensiones que toma información de la odometría, de los sensores y de un punto de meta y dirige el robot mediante comandos de velocidad seguros.

La navegación se basa en el uso de "Mapas de coste" y planificación global y local de trayectorias.

Por un lado, el sistema hace un mapa de coste global que tiene encuentra información de los sensores y la posibilidad de cargar un mapa previo. A este mapa se incorporan los obstáculos que permanecen estáticos durante más tiempo y en base a este se realizan los cálculos de trayectoria global.

Por otro lado, el sistema realiza un mapa de coste local, que analiza los obstáculos más cercanos al robot en cada momento. A este mapa se incorpora la información

de los sensores sobre cualquier tipo de obstáculo detectado. En base a este mapa se realizan los cálculos de trayectoria local que llevará el control de la navegación reactiva del robot.

RELEÑAR ALGO MAS

8.1.1 Funcionamiento

El paquete de navegación se basa en diferentes nodos que interactúan para dirigir el robot hasta un punto en el mapa indicado como meta.

Este sistema utiliza un mapa de obstáculos estáticos (`global_costmap`), un mapa de obstáculo locales (`local_costmap`), un nodo de cálculo de trayectoria global (`global_planner`), un nodo de cálculo de trayectoria local (`local_planner`) y mecanismos de recuperación de trayectoria (`recovery_behaviors`).

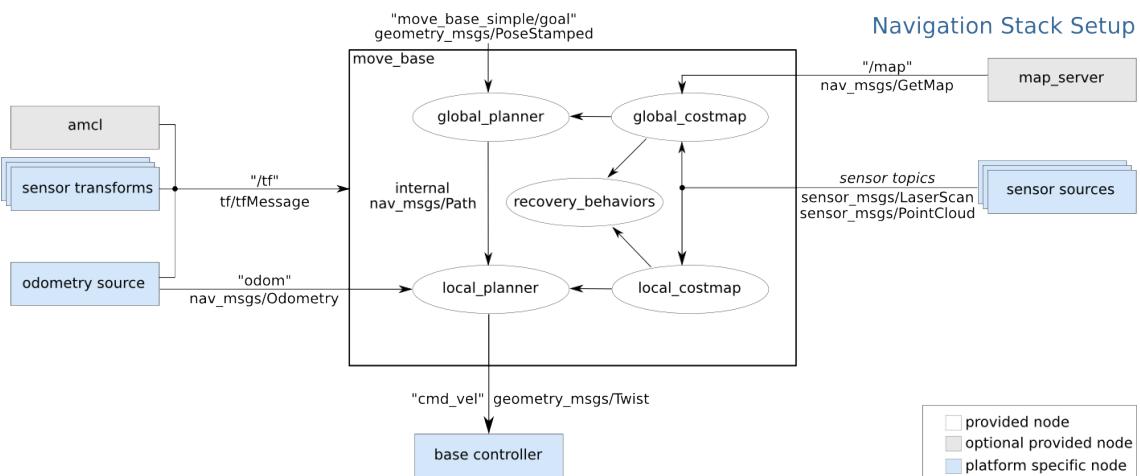


Figura 8.1: Diagrama de funcionamiento del Navigation Stack [ME10b]

En el diagrama mostrado en la figura 8.1 podemos ver una representación de los nodos y mensajes utilizados por el paquete de navegación así como la información externa y opcional que se precisa.

Como puede apreciarse, los sensores, la odometría y el ajuste de las transformadas entre cada uno de los sistemas de coordenadas son específicos de cada plataforma robótica. La ejecución principal se centra en el nodo `move_base` **referencia**, que es el encargado de realizar los movimientos acorde a la información que aportan los mapas y los planificadores de trayectoria.

Por último indicar que el paquete de navegación no precisa de un mapa pregrabado para funcionar. Puede utilizarse un mapa si se precisa y cargarlo mediante un nodo externo como `map_server` o generararlo simultáneamente a la navegación mediante `slam_gmappig` (Subsección 8.2).

El uso de un nodo de localización del robot en el mapa, como AMCL (Adaptive Monte Carlo Localization), será preciso cuando se utilice un mapa pregrabado para

conocer la posición inicial del robot y posicionarlo correctamente dentro del mismo (Sección 8.3).

8.1.2 Requisitos para la navegación

El sistema de navegación de ROS está diseñado para ser flexible, altamente configurable y adaptable a muchos tipos de robots. Sin embargo requiere de ciertos requisitos para poder ser integrado. A continuación se describe cada uno de los requisitos aplicados al robot Pioneer 3 AT utilizado en este trabajo.

Odometría

El sistema de navegación requiere de un robot que publique información sobre la odometría del robot en mensajes de tipo *nav_msgs/Odometry*.

En el robot Pioneer 3 AT y gracias al paquete RosAria (Subsección 7.1.1) obtenemos la información de los encoders del robot convertida en datos de odometría a través del topic *pose*.

Movimientos

El sistema de navegación requiere que el robot sea controlable a través de comandos de velocidad de tipo *geometry_msgs/Twist*.

En el robot Pioneer 3 AT y gracias al paquete RosAria (Subsección 7.1.1) podemos mover nuestro robot con comandos de velocidad publicándolos al topic *cmd_vel*.

Sensores

Los tipos de sensores que pueden utilizarse en la navegación son variados, el requisito que deben cumplir para poder integrarse en el sistema de navegación es que publiquen información de tipo *sensor_msgs/LaserScan* o *sensor_msgs/PointCloud2*.

Con los nodos descritos anteriormente, podemos obtener información de este tipo para el sensor Kinect (Subsección 7.1.2) y para el sensor Láser (Subsección 7.1.3). El nodo *freenect_stack* publica información de la nube de puntos a través del topic *camera/depth/points* y el nodo *LMS1xx* lo hace a través del topic *scan*.

Transformadas

Es necesario que toda la información esté estructurada geométricamente para que el sistema de navegación pueda realizar los cálculos pertinentes. Se requiere información de los sistemas de coordenadas de cada sensor, de la base del robot y de la odometría.

Cada uno de los nodos descritos con anterioridad publican diferentes *frames* que sirven para este propósito. Estos *frames* (*odom*, *base_link*, *laser*, *camera_link*) relacionados mediante transformadas estáticas como se describió en la subsección 7.1.4, proporcionan la información necesaria.

8.1.3 Configuración de la navegación

Hablar sobre los archivos necesarios .yaml y los launchfiles. de momento navegación con mapa y explicación.

Aunque se explicará más adelante, una vez explicados los requisitos para utilizar el paquete de navegación es necesario explicar cual es la configuración necesaria para hacer que el sistema funcione.

En primer lugar, para facilitar la comprensión, suponemos que disponemos de un mapa del entorno en el que se va a desplazar nuestro robot y que disponemos de tan solo un sensor láser para realizar la navegación.

Comenzamos por la configuración de los llamados Costmaps, esto es, mapas que van almacenar los obstáculos del entorno del robot. Disponemos de global_costmap y local_costmap como dijimos antes y parte de la configuración de estos será compartida, por tanto debemos crear un archivo de parámetros comunes *costmap_common_params.yaml*.

```

1  obstacle_range: 6.0
2  raytrace_range: 6.5
3  footprint: [ [0.254, -0.230], [-0.254, -0.230], [-0.254, 0.230], [0.254, 0.230] ]
4  inflation_radius: 0.5
5
6  observation_sources: laser_scan_sensor
7
8  laser_scan_sensor: {sensor_frame: laser, data_type: LaserScan, topic: /scan, marking: true,
    clearing: true}

```

Código 8.1: Ejemplo de *costmap_common_params.yaml*

Como vemos, configuramos parámetros como la forma de nuestro robot, el radio de seguridad de los obstáculos, el rango de incorporación de obstáculos y los sensores.

A continuación creamos el archivo e configuración de nuestro mapa global *global_costmap.yaml*.

```

1  global_costmap:
2    global_frame: /map
3    robot_base_frame: base_link
4    update_frequency: 5.0
5    static_map: true

```

Código 8.2: Ejemplo de *global_costmap.yaml*

En este archivo vemos como este "mapa de coste" permanece estático y anclado al eje de coordenadas del mapa.

El mapa de navegación local o reactiva es similar, aunque en este caso el mapa tendrá unas dimensiones preestablecidas y se moverá con el robot.

La configuración básica del planificador local se guardará en un archivo *base_local_planner_params.yaml*.

También debemos indicar la configuración del planificador global en *global_planner_params.yaml*

```

1 local_costmap:
2   global_frame: odom
3   robot_base_frame: base_link
4   update_frequency: 5.0
5   publish_frequency: 2.0
6   static_map: false
7   rolling_window: true
8   width: 6.0
9   height: 6.0
10  resolution: 0.05

```

Código 8.3: Ejemplo de *local_costmap.yaml*

```

1 TrajectoryPlannerROS:
2   max_vel_x: 0.45
3   min_vel_x: 0.1
4   max_vel_theta: 1.0
5   min_in_place_vel_theta: 0.4
6
7   acc_lim_theta: 3.2
8   acc_lim_x: 2.5
9   acc_lim_y: 2.5
10
11  holonomic_robot: true

```

Código 8.4: Ejemplo de *local_costmap.yaml*

```

1 GlobalPlanner:
2   old_navfn_behavior: false
3   use_quadratic: true
4   use_dijkstra: flase
5   use_grid_path: false

```

Código 8.5: Ejemplo de *global_planner_params.yaml*

Aquí podemos definir el cálculo de trayectorias siguiendo aproximaciones cuadráticas, basadas en ocupación de celdas, tipo A* o Dijkstra (Se hablará de cada una en la sección 8.5).

Para finalizar, debemos ejecutar el nodo *move_base* con las configuraciones descritas anteriormente, así como el mapa y el nodo de localización AMCL.

```

1 <launch>
2     <!-- Run the map server -->
3     <node name="map_server" pkg="map_server" type="map_server" args="$(find pioneer_utils)/maps
4         /floor_zero-map.yaml"/>
5
6     <!-- Run AMCL -->
7     <include file="$(find pioneer_utils)/navigation/common/amcl.launch"/>
8
9     <node pkg="move_base" type="move_base" respawn="false" name="move_base" output="screen
10        ">
11         <rosparam file="$(find pioneer_utils)/navigation/common/costmap_common_params_p3at.yaml
12             " command="load" ns="global_costmap" />
13         <rosparam file="$(find pioneer_utils)/navigation/common/costmap_common_params_p3at.yaml
14             " command="load" ns="local_costmap" />
15         <rosparam file="$(find pioneer_utils)/navigation/common/local_costmap_params.yaml
16             " command="load" />
17         <rosparam file="$(find pioneer_utils)/navigation/global_navigation/
18             global_costmap_params.yaml" command="load" />
19         <rosparam file="$(find pioneer_utils)/navigation/common/base_local_planner_params.yaml
20             " command="load"/>
21         <rosparam file="$(find pioneer_utils)/navigation/common/global_planner_params.yaml
22             " command="load" />
23     </node>
24 </launch>false

```

Código 8.6: Ejemplo de *robot_navigation.launch*

La representación visual de ambos costmaps, el área del robot (footprint), el haz láser y el modelo de robot pueden observarse mediante RViz, tal y como muestra la figura 8.2.

Este primer ajuste no tiene en cuenta muchos factores concretos de la navegación en el robot Pioneer 3 AT, como pueda ser la disposición correcta de los sensores, los ajustes de actualización de los mapas, el rango de los sensores o las interferencias de información que se incorporan o borran en los costmaps. Estos detalles se presentarán en la implementación del sistema (Capítulo 9).

8.2 SLAM

La técnica de SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) es una técnica muy utilizada en robótica para construir un mapa de un entorno que es desconocido al mismo tiempo que se estima la posición del robot en el mismo.

Esta técnica presenta dificultades como la imperfección de los sensores, la imperfección del sistema de locomoción el robot, la repetitividad de las medidas... Además de que la localización y el mapeado simultáneo de un entorno son dos problemas que están intrínsecamente acoplados [PY12]. Es por ello que se utilizan modos probabilísticos como la regla de Bayes.

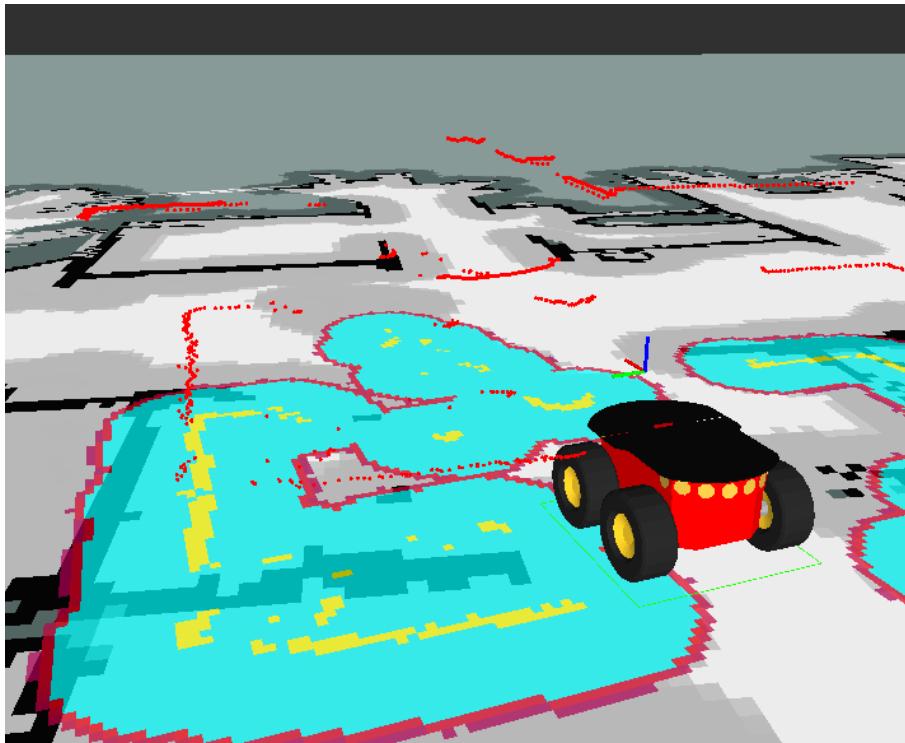


Figura 8.2: Visualización de costmaps, sensor láser y modelo del robot en RViz.

$$p(x|d) = \frac{p(d|x)p(x)}{p(d)} \quad (8.1)$$

REVISAR EQCUACIÓN

Principales algoritmos

Los principales algoritmos para realizar los cálculos pababilísticos en técnicas de SLAM son los siguientes:

- Filtro extendido de Kalman: Es uno de los métodos más extendidos en la técnica del SLAM por ofrecer resultados satisfactorios a pesar de sus problemas de estimación [RLMJG06]. Esta ha sido la técnica utilizada de facto hasta a aparición del FastSLAM [MTK⁺02].
- Mapas de ocupación de celdillas: Se basa en discretizar el espacio dividiéndolo en unidades de tamaño predefinido que se clasifican como ocupadas o vacías con un determinado nivel de confianza o probabilidad. La precisión (mayor cuanto más fina es la división del espacio), permite que el algoritmo de localización empleado acumule errores reducidos a lo largo de intervalos prolongados de tiempo. Su mayor desventaja de estos métodos es la pérdida de potencia que se deriva de no tener en cuenta la incertidumbre asociada a la posición del robot, lo cual origina que su capacidad para cerrar bucles correctamente se vea mermada [CCR07].

slam_gmapping en ROS

GMapping es una librería perteneciente al proyecto OpenSLAM [SFG07] que utiliza la técnica SLAM Grid Mapping, basada en la generación de mapas mediante la ocupación de celdillas utilizando un filtro de partículas [GSB07].

En ROS se integra bajo el paquete gmapping <http://wiki.ros.org/gmapping> que no es más que un wrapper de OpenSLAM adaptando su interfaz.

Para crear mapas utilizando slam_gampping precisamos de nuestro robot configurado para leer su odometría un sensor capaz de ofrecernos información de tipo *sensor_msgs/LaserScan*.

Existen muchos parámetros para ajustar el proceso de SLAM en este nodo, sin embargo en este caso nos servimos de la configuración utilizada por el paquete *p2os* por ofrecer unos resultados más que aceptables:

```

1 <launch>
2   <node pkg="gmapping" type="slam_gmapping" name="slam_gmapping" args="/scan">
3     <param name="delta" type="double" value="0.05" />
4     <param name="temporalUpdate" type="double" value="2.5" />
5     <param name="xmin" type="double" value="-2" />
6     <param name="xmax" type="double" value="2" />
7     <param name="ymin" type="double" value="-2" />
8     <param name="ymax" type="double" value="2" />
9   </node>
10 </launch>
```

Fuente: *p2os/p2os_launch/launch/gmapping.launch*

Código 8.7: Launchfile slam_gmaping

Para visualizar la creación del mapa en RViz se ha creado un archivo específico:

```
1 $ roslaunch pioneer_utils rviz-gmapping.launch
```

Fuente: *pioneer_utils/rviz/rviz-gmapping.launch*

Código 8.8: Launchfile para visualizar slam_gmaping en RViz

Finalmente, para guardar los mapas generados nos servimos de la herramienta *map_server* que nos ofrece guardar mapas que se estén publicando en el topic *map* así como publicar estos mapas para utilizarlos en la navegación.

```
1 $ rosrun map_server map_saver
```

Código 8.9: Ejecución del nodo *map_saver* para guardar el mapa

8.3 AMCL

”Adaptative Monte Carlo Localizaion”, también conocida por localización mediante filtro de partículas, es un algoritmo utilizado en robótica para determinar la posición

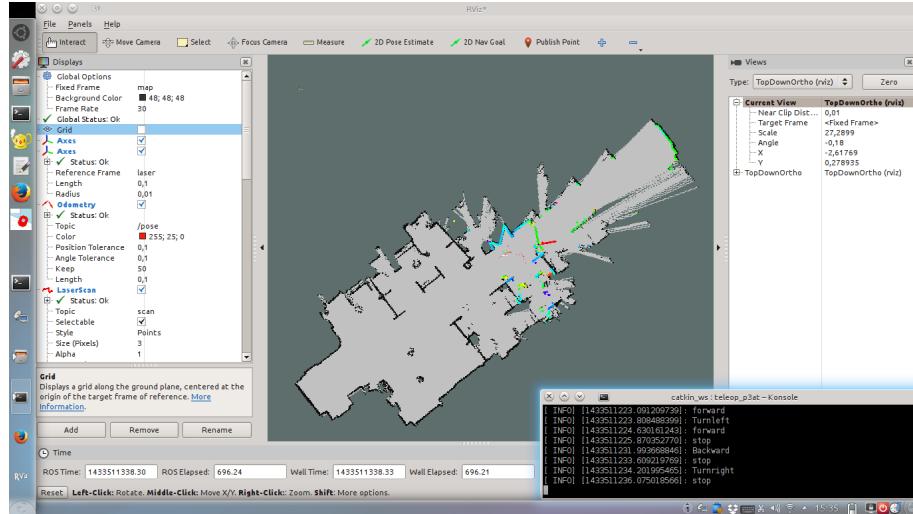


Figura 8.3: slam_gmapping visualizado en RViz

de un robot en un mapa [FBDT99].

El algoritmo emplea un filtro de partículas para representar una distribución de posibles estados dentro del mapa. A medida que los sensores detectan el entorno y el robot se desplaza dentro de este se van otorgando mayor peso a aquellas partículas que se encuentran más cercanas a la posición correcta y se van descartando otras.

La idea de esta técnica es conseguir que todas las partículas converjan en una sola (a efectos prácticos, unas pocas partículas) para determinar la posición del robot en el mapa.

Esta técnica se encuentra en ROS bajo un paquete llamado *amcl* [Ger09] y utiliza las técnicas descritas en el libro Probabilistic Robotics [TBF05].

Transladado a la filosofía de funcionamiento de ROS, esta técnica nos ofrece la posibilidad de situar al robot en un mapa pregrabado, aportándonos la transformada entre el sistema de referencia (*frame*) del mapa y el sistema de la odometría (Figura 8.4).

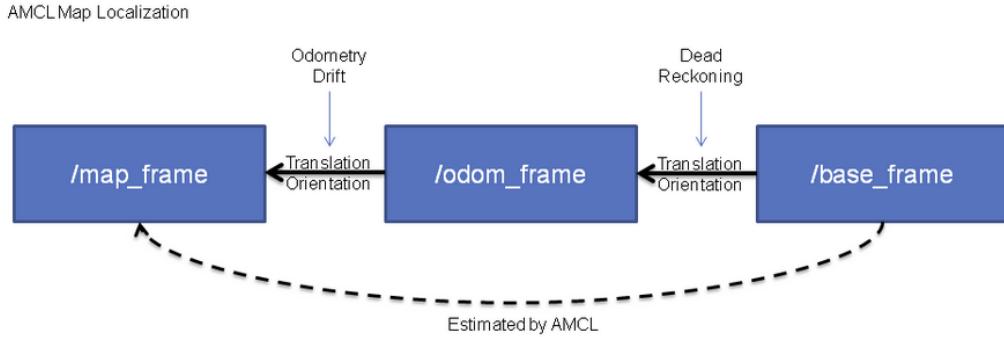


Figura 8.4: Esquema de la labor del nodo AMCL entre los *frames* map y base.

Configuración

Como es habitual en ROS, esta funcionalidad nos aparece empaquetada en forma de nodo configurable a través de parámetros.

Para funcionar requiere el uso de un mapa, el árbol de transformadas de nuestro robot e información de tipo *sensor-msgs/LaserScan*.

La lista de parámetros configurables es amplia ya que debemos encontrar un modelo que se comporte bien con nuestro robot y sensor láser. Son especialmente importantes los parámetros del modelo de la odometría y los referentes al haz láser de nuestro sensor.

```

1  <launch>
2      <node pkg="amcl" type="amcl" name="amcl">
3          <param name="odom_model_type" value="diff"/>
4          <param name="odom_alpha5" value="0.1"/>
5          <param name="transform_tolerance" value="0.2" />
6          <param name="gui_publish_rate" value="10.0"/>
7          <param name="laser_max_beams" value="30"/>
8          <param name="min_particles" value="500"/>
9          <param name="max_particles" value="5000"/>
10         <param name="kld_err" value="0.05"/>
11         <param name="kld_z" value="0.99"/>
12         <param name="odom_alpha1" value="0.2"/>
13         <param name="odom_alpha2" value="0.2"/>
14         <param name="odom_alpha3" value="0.8"/>
15         <param name="odom_alpha4" value="0.2"/>
16         <param name="laser_z_hit" value="0.5"/>
17         <param name="laser_z_short" value="0.05"/>
18         <param name="laser_z_max" value="0.05"/>
19         <param name="laser_z_rand" value="0.5"/>
20         <param name="laser_sigma_hit" value="0.2"/>
21         <param name="laser_lambda_short" value="0.1"/>
22         <param name="laser_lambda_short" value="0.1"/>
23         <param name="laser_model_type" value="likelihood_field"/>
24         <param name="laser_likelihood_max_dist" value="2.0"/>
25         <param name="update_min_d" value="0.2"/>
26         <param name="update_min_a" value="0.5"/>
27         <param name="odom_frame_id" value="odom"/>
28         <param name="resample_interval" value="1"/>
29         <param name="transform_tolerance" value="0.1"/>
30         <param name="recovery_alpha_slow" value="0.0"/>
31         <param name="recovery_alpha_fast" value="0.0"/>
32     </node>
33 </launch>
```

Fuente: *pioneer-utils/navigation/common/amcl.launch*

Código 8.10: Launchfile del nodo amcl utilizado.

8.4 Mapas de coste: Costmaps

Como ya se ha referido con anterioridad, el modelo de navegación que sigue el Navigation Stack de ROS se basa en el concepto de Costmaps.

Un costmap es un mapa generado a partir de los obstáculos detectados por sensores que son representados en forma de mapa de celdas y sobre los que se calcula un gradiente de "coste" desde los obstáculos hasta las zonas despejadas. Este tipo de mapas pretenden disponer de la información necesaria para que el robot pueda navegar.

Generalmente, este enfoque solo tiene en cuenta navegación en un solo plano o

navegación en dos dimensiones, ya que todos los objetos son incorporados al mapa sin importar su altura. Existe una variante que pseudo-3D que tiene en cuenta la altura a la que se sitúan los sensores, aunque no es el modelo típico de aplicación.

El funcionamiento de este tipo de mapas se basa en la incorporación o el borrado de obstáculos al mapa. Cada sensor puede utilizarse de manera independiente para incorporar o borrar obstáculos en estos mapas. Esto permite a nuestro sistema robótico abstraerse de la información directa de los sensores y obtener información más completa de todos los obstáculos su alrededor.

La principal ventaja de utilizar este tipo de mapas en navegación es la de crear mapas dinámicos locales en el que guardar información de los obstáculos alrededor del robot sin que necesariamente dispongamos de un sensor captando el mismo continuamente. Esto nos permite, por ejemplo, realizar navegación con un sensor con un rango horizontal de pocos grados, como el sensor Kinect, y aún así permitir al robot conocer información de obstáculos que han quedado fuera del rango del sensor.

El nodo encargado de la creación de estos costmaps es *costmap_2d* y su funcionamiento está basado en diferentes capas que manejan la infomración de los sensores y generan cálculos a partir de los mismos.

Las denominadas capas de las que hace uso *costmap_2d* son las siguientes:

- Static Map: Esta capa es la encargada de tener el cuenta los obstáculos que aporta un mapa pregrabado en caso de utilizarse en la navegación. Está ligado al parámetro *static_map* y normalmente se utiliza con nodos de localización en un mapa como *amcl*.
- Obstacle Map: Esta capa es la encargada de incorporar o borrar obstáculos obteniendo la información de los sensores declarados en su archivo de configuración. Destaca la facilidad para incorporar varios sensores a la vez.
- Inflation: En esta capa se realizan los cálculos de coste de cada celda a partir de la información que aportan las capas anteriores. Este gradiente de valores clasifica cada celda del mapa en diferentes tipos:
 1. Letal: Existe un obstáculo real en esa celda del mapa
 2. Inscrito: Las celdas con este valor se encuentran a una distancia de un obstáculo que es menor o igual al radio de la circunferencia inscrita en el área que ocupa el robot.
 3. Posiblemente circunscrito: Celdas que se encuentran a una distancia de un obstáculo que es mayor que el radio de la circunferencia inscrita en el área que ocupa el robot pero menor que el radio de la circunferencia circunscrita. Esta información como "posible" debido que la orientación del robot puede no ser exacta.
 4. Espacio libre: El coste de este tipo de celdas es cero e indica que no existe ningun obstáculo cercano que impida o limite el movimiento del robot.
 5. Desconocido: No existe información sobre el estado de esa celda.

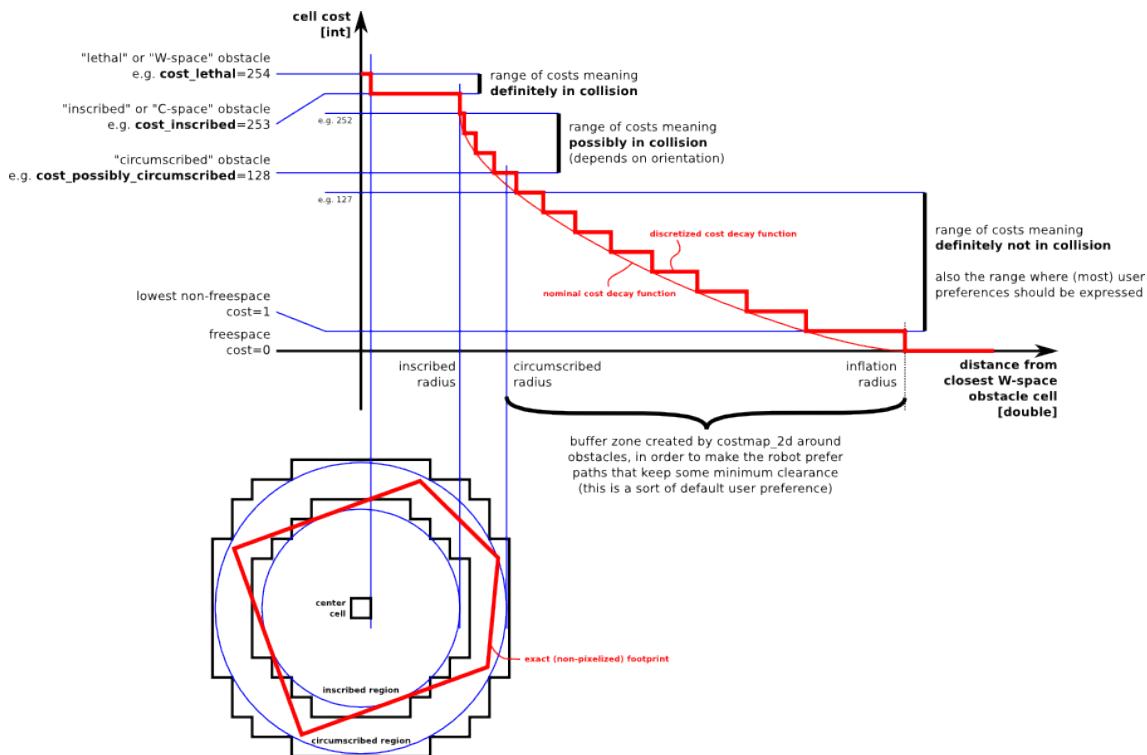


Figura 8.5: Esquema sobre el cálculo del coste de cada celda en el mapa.

Esta capa indica a los planeadores las zonas óptimas por las que trazar su ruta, es la más importante y donde reside gran parte de la funcionalidad de los costmaps. Existen parámetros configurables por el usuario como el radio de inflado (*inflation_radius*) o el valor de escala (*cost_scaling_factor*).

A parte de estas capas, existe una API que nos permite crear nuestras propias capas para el nodo *costmap_2d* para darles la funcionalidad que se desee.

Existe una configuración por defecto que de estos costmaps que genera una sola capa de obstáculos, una capa de inflado y adicionalmente una capa de mapa estático siempre y cuando pongamos el parámetro *static_map* a TRUE. Sin embargo, existe la posibilidad de crear costmaps con las capas que consideremos oportunas, siendo de especial interés poder incorporar diferentes capas de obstáculos.

Este último enfoque es el que ha sido adoptado en la implementación final de navegación y será descrito en el apartado **APARTADO****.

8.5 Planificador de trayectoria global

La planificación de trayectoria es una de las áreas que más interés suscita entre los investigadores relacionados con la robótica móvil o la navegación autónoma, no en vano, existe una gran variedad de algoritmos que realizan cálculos apoyándose en distintos enfoques matemáticos.

Los planificadores de trayectoria tratan de construir la ruta que lleve al robot desde su posición a un punto en un mapa o en un entorno que pudiera ser desconocido. Esta planificación es calculada en un ámbito que denominamos "global" que se realiza en función al mapa global (*global_costmap* en nuestro caso) y no se consideran los detalles del entorno local al robot. Es, por tanto, una aproximación al camino final que el robot va a seguir.

Por tanto, los planificadores de trayectoria global deben basarse en información almacenada del entorno como un mapa estático y el cálculo se realiza mediante el análisis de sus características.

En la figura 8.6 se muestra una clasificación de los principales métodos de planificación de trayectorias

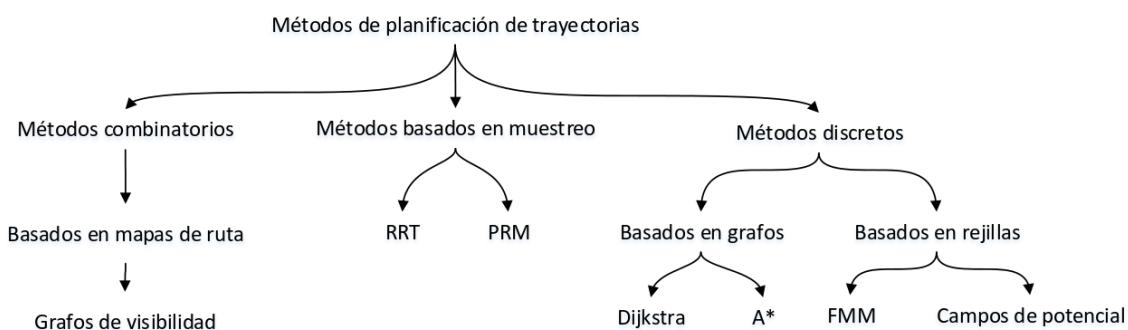


Figura 8.6: Clasificación de los diferentes métodos de planificación de trayectorias. Basado en [Jos15].

Los algoritmos implementados en ROS se basan en métodos discretos mediante grafos, debido a que los mapas utilizados son mapas de celdillas. A continuación se describen los planificadores de trayectoria disponibles en ROS, su fundamento teórico y su comportamiento en el cálculo de la trayectoria.

8.5.1 Algoritmo de Dijkstra

El algoritmo de Dijkstra es un algoritmo para la determinación del camino más corto dado un vértice origen al resto de vértices de un grafo con pesos en cada arista. Este algoritmo debe su nombre a Edsger Dijkstra, quien lo describió por primera vez en el año 1959.

El algoritmo de Dijkstra funciona visitando vértices partiendo desde el punto inicial. Examina repetidamente los vértices próximos que aún no han sido examinados expandiéndose desde el punto de partida hasta el punto de meta. De esta forma el algoritmo garantiza que se encuentre uno de los caminos más cortos (pueden existir varios caminos igual de cortos).

teoría fórmulaaaa?¿?¿?

En la figura 8.7 se pueden observar la implementación del algoritmo de Dijkstra.

El punto de color rosa es el punto inicial y el azul oscuro el punto de meta.

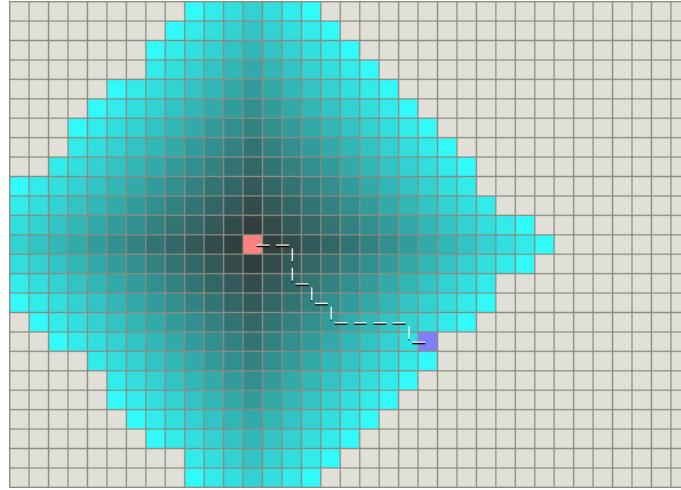


Figura 8.7: Implementación del algoritmo de Dijkstra en un mapa sin obstáculos. Basado en [Pat10].

Comparándolo con el algoritmo heurístico *Primero el mejor* ”Greedy Best-First-Search algorithm”, cuyo funcionamiento es similar al algoritmo de Dijkstra aunque descarta los vértices que no se encuentren en dirección al punto de meta, vemos en la figura que el camino encontrado es similar y que el número de vértices analizados se reduce considerablemente.

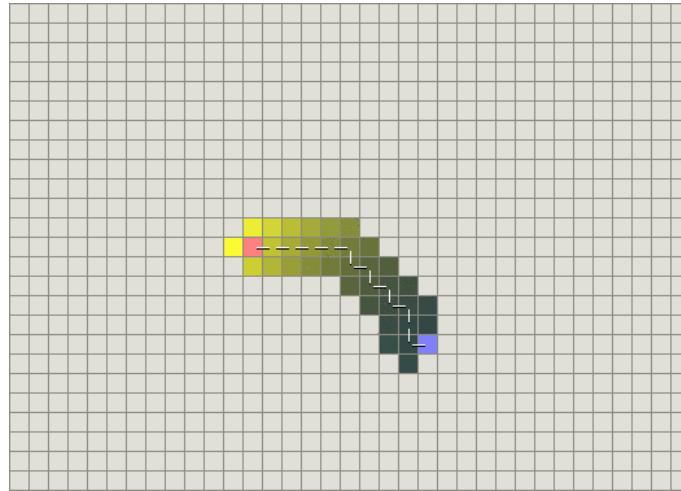


Figura 8.8: Implementación del algoritmo Best-First-Search en un mapa sin obstáculos. Basado en [Pat10].

Sin embargo, estamos analizando el mejor de los casos, cuando el mapa se encuentra libre de obstáculos. Situando un obstáculo cóncavo delante del punto inicial obtenemos el resultado de la figura 8.9.

El algoritmo Best-First-Search realiza un análisis de vértices menor hasta llegar al punto de meta comparado con el algoritmo de Dijkstra, lo cual se significa un menor coste computacional, sin embargo el camino obtenido no es el menor, ya que Best-First-Search prioriza aquellos vértices que se encuentran más cerca del punto de meta.

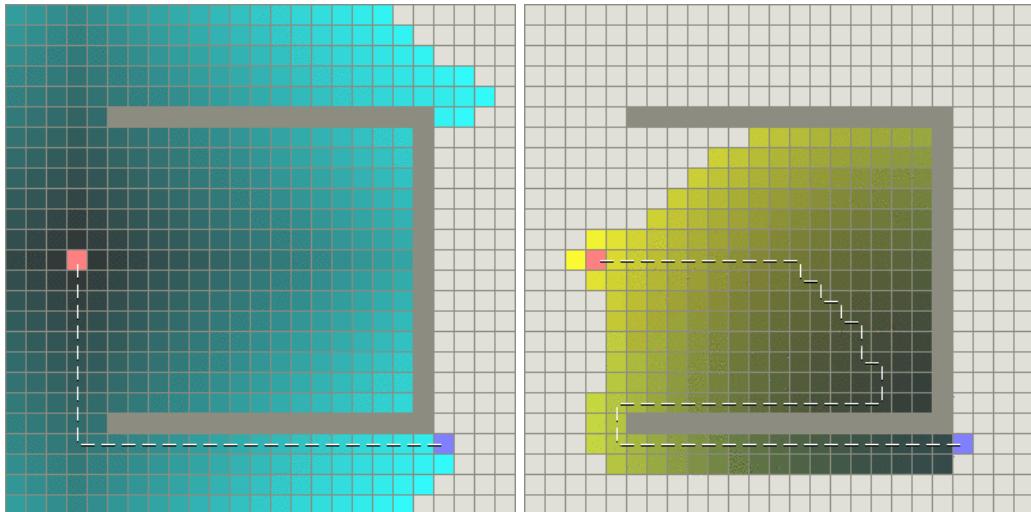


Figura 8.9: Algoritmo de Dijkstra (Izq.) y algoritmo Best-First-Search (Dcha.) en un mapa con obstáculo cóncavo. Basado en [Pat10].

El algoritmo de Dijkstra garantiza que se encuentre el camino más corto entre los dos puntos a costa de realizar un análisis de vértices mayor. Como vemos, este algoritmo es más inmersivo expandiéndose por todos los vértices, sin embargo su resultado es el óptimo.

8.5.2 Algoritmo de A estrella

El algoritmo A estrella (denominado comúnmente A*) es un algoritmo para la búsqueda del camino más corto entre vértices origen y objetivo dentro de un grafo con pesos en cada arista. Fue presentado por primera vez en 1968 por Peter E. Hart, Nils J. Nilsson y Bertram Raphael.

teoría fórmulas?¿?¿?

El algoritmo A* combina el enfoque de algoritmos como Best-First-Search y Dijkstra. Este algoritmo favorece la creación de un camino por vértices que se encuentren cerca del punto inicial, así como vértices que se encuentren en dirección al punto de meta. El cálculo del camino se realiza en los dos sentidos, partiendo del vértice inicial al final y partiendo del vértice final al inicial.

En la figura 8.10 podemos observar el comportamiento del algoritmo en un mapa despejado y en otro con un obstáculo cóncavo. Los vértices en color amarillo muestran la transición partiendo desde el vértice inicial y los de color azulado muestran la transición desde el vértice final.

El algoritmo A estrella ofrece por tanto unos resultados similares al algoritmo de Dijkstra en cuanto al camino calculado. Sin embargo análisis de los vértices es similar e incluso menor Best-First-Search y por tanto menor que en el de Dijkstra.

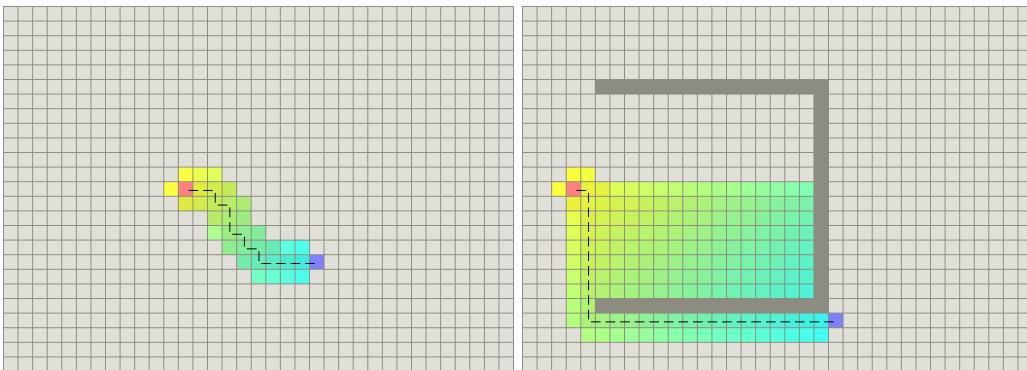


Figura 8.10: Algoritmo A* sin obstáculo (Izq.) y con obstáculo cóncavo (Dcha.). Basado en [Pat10].

8.5.3 Parámetros del global_planner

En ROS, el nodo encargado de realizar el cálculo de la trayectoria global es el denominado `global_planner`. Este nodo dispone de los algoritmos de planificación ya implementados que realizan los cálculos de trayectoria.

La configuración del planificador global se realiza a través de parámetros que podemos configurar, distinguiendo entre el uso del algoritmo de Dijkstra o el de A*, utilizar un camino definido por rejilla, etc.

A continuación podemos ver el comportamiento del planificador con diferente configuración en sus parámetros.

- **Algoritmo de Dijkstra:**

La configuración por defecto del planeador realiza el cálculo de trayectoria mediante el algoritmo de Dijkstra.

- **use_grid_path:**

- **use_quadratic:**

- **old_navfn_behavior:**

ALGORITMOS CON PRUEBAS PLANIFICADOR FINAL

8.6 Planificador de trayectoria local

Resolver las obstrucciones sobre la ruta global en el entorno local al robot para determinar la ruta real que será seguida. El modelo del entorno local se construye mediante la fusión de la información proporcionada por los sensores externos del robot móvil.

TEORÍA FUNCIONAMIENTO VALORACIÓN DE SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA GLOBAL PLANIFICADOR FINAL

Capítulo 9

Implementación del sistema

9.1 Configuraciones hardware

9.1.1 Pioneer 3 AT

9.1.2 Sensor Kinect

9.1.3 Sensor Láser

9.1.4 Intel NUC

9.1.5 Primera configuración

9.1.6 Segunda configuración

9.2 Navegación

9.2.1 Sensores

9.2.2 Navegación con mapa

9.2.3 Navegación reactiva

9.3 Nodo de navegación por puntos

9.4 Nodo de comandos por voz

9.4.1 Reconocimiento de comandos de voz

9.4.2 Feedback mediante text-to-speech

9.5 Nodo de ejecución automática de nodos

Capítulo 10

Pruebas del sistema

10.1 Visualización mediante RViz

10.2 Simulación con MobileSim

10.3 Simulación con Gazebo

10.3.1 SLAM

10.3.2 Datos de navegacion

10.4 Pruebas reales

10.4.1 SLAM

10.4.2 Datos de navegacion

Test de resistencia

10.4.3 Ascpectos de la navegación

Capítulo 11

Conclusiones

Se presentan a continuación las conclusiones...

11.1 Conclusión sobre la metodología

11.2 Conclusión sobre los resultados

Una vez finalizado el proyecto...

11.3 Desarrollos futuros

Un posible desarrollo...

Apéndice

Apéndice A

Configuración del sistema

A.1 Configuración del espacio de trabajo

A.1.1 Instalación de las librerías

A.1.2 Gestión de las dependencias

y gestionar algunas dependencias de librerías, para lo cual nos serviremos de la herramienta rosdep **referencia** creada por los desarrolladores de ROS para este propósito.

Inicializamos rosdep y actualizamos las dependencias:

```
1 $ sudo rosdep init  
2 $ rosdep update
```

Código A.1: Inicializando la herramienta *rosdep*.

- Navegación: Instalamos los paquetes adicionales para realizar la navegación y mapeo (se hablará de cada uno en el capítulo 8).

```
1 $ sudo apt-get install ros-indigo-navigation  
2 $ sudo apt-get install ros-indigo-gmapping
```

Código A.2: Instalando los paquetes de navegación mapeo.

- Rosaria: Instalamos las dependencias de RosAria, principalmente la librería Aria
- pocketsphinx

```
1 $ rosdep install rosaria
```

Código A.3: Instalando las dependencias de rosaria.

- rosdeps
- mirar cuaderno

A.2 Configuración del hardware

A.2.1 Calibración de la odometría

A.2.2 Ordenador de abordo

A.2.3 Sensor Kinect

A.2.4 Láser SICK LMS100

Apéndice B

Información y documentos ONLINE

B.1 Multimedia

B.2 Repositorio de código

B.2.1 Readme

B.3 Memoria del trabajo

Bibliografía

- [AdN87] Isaac Asimov and Rosa S de Naveira. *Robots e imperio*. Círculo de lectores, 1987.
- [AMRS11] F Alonso-Martin, Arnaud A Ramey, and Miguel A Salichs. Maggie: el robot traductor. In *Proceedings of the 9th Workshop RoboCity2030-II, Madrid, Spain*, pages 57–73, 2011.
- [BPBA07] Antonio Barrientos, Luis Felipe Peñin, Carlos Balaguer, and Rafael Aracil. *Fundamentos de robótica*. McGraw-Hill, Interamericana de España, 2007.
- [CCR07] Thomas Collins, JJ Collins, and Conor Ryan. Occupancy grid mapping: An empirical evaluation. In *Control & Automation, 2007. MED'07. Mediterranean Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2007.
- [DL91] Stephen L Dickerson and Brett D Lapin. Control of an omnidirectional robotic vehicle with mecanum wheels. In *Telesystems Conference, 1991. Proceedings. Vol. 1., NTC'91., National*, pages 323–328. IEEE, 1991.
- [DL12] E Duliep Lescaille. Leonardo da vinci: Arte y técnica//leonardo da vinci: art and technique. *Ingeniería Mecánica*, 3(2):91–94, 2012.
- [dS07] Universidad de Sevilla. Sistemas de locomoción de robots móviles. http://www.esi2.us.es/~vivas/ayr2iae/L0C_MOV.pdf, 2007. [Online, consultado 15 de Junio de 2015].
- [DSTH12] Laura Dabbish, Colleen Stuart, Jason Tsay, and Jim Herbsleb. Social coding in github: transparency and collaboration in an open software repository. In *Proceedings of the ACM 2012 conference on Computer Supported Cooperative Work*, pages 1277–1286. ACM, 2012.
- [FBDT99] Dieter Fox, Wolfram Burgard, Frank Dellaert, and Sebastian Thrun. Monte carlo localization: Efficient position estimation for mobile robots. *AAAI/IAAI*, 1999:343–349, 1999.
- [Gar11] Willow Garage. Unified Robot Description Format (URDF). <http://wiki.ros.org/urdf>, 2011. [Online, consultado 28 de Marzo de 2015].
- [Ger09] Brian P Gerkey. amcl. <http://wiki.ros.org/amcl>, 2009.

- [Goo09] Google. Google self-driving car project. <https://www.google.com/selfdrivingcar/>, 2009.
- [GSB07] Giorgio Grisetti, Cyrill Stachniss, and Wolfram Burgard. Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters. *Robotics, IEEE Transactions on*, 23(1):34–46, 2007.
- [Gui11] Erico Guizzo. How google’s self-driving car works. *IEEE Spectrum Online, October*, 18, 2011.
- [Gui13] Erico Guizzo. DARPA’s Rescue-Robot Showdown. <http://spectrum.ieee.org/robotics/humanoids/darpas-rescuerobot-showdown>, 2013. [Online, consultado 11 de Junio de 2015].
- [Jos15] Pardeiro Blanco Jose. Algoritmos de planificación de trayectorias basados en fast marching square. Master’s thesis, 2015.
- [KH04] Nathan Koenig and Andrew Howard. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In *Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 3, pages 2149–2154. IEEE, 2004.
- [Kon10] Kurt Konolige. Projected texture stereo. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pages 148–155. IEEE, 2010.
- [ME10a] Eitan Marder-Eppstein. Navigation Stack. <http://wiki.ros.org/navigation>, 2010.
- [ME10b] Eitan Marder-Eppstein. Navigation Stack Setup. <http://wiki.ros.org/navigation/Tutorials/RobotSetup>, 2010.
- [MGB00] R Martínez and A García-Beltrán. Breve historia de la informática. *España, Universidad Politécnica de Madrid*, 2000.
- [MTK⁺02] Michael Montemerlo, Sebastian Thrun, Daphne Koller, Ben Wegbreit, et al. Fastslam: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem. In *AAAI/IAAI*, pages 593–598, 2002.
- [NAS03] NASA. Mars Exploration Rover Mission: Overview. <http://mars.nasa.gov/mer/overview/>, 2003. [Online, consultado 20 de Junio de 2015].
- [NAS12] NASA. Curiosity Rover, Mars Science Laboratory. <http://www.nasa.gov/feature/jpl/nasas-curiosity-rover-team-confirms-ancient-lakes-on-mars/>, 2012. [Online; consultado 20 de Agosto de 2013].
- [Nev12] Nevada Department of Motor Vehicles. Nevada dmv issues first autonomous vehicle testing license to google. <http://www.dmvnv.com/news/12005-autonomous-vehicle-licensed.htm>, 2012. [Online, consultado 10 de Junio de 2015].

- [NKO⁺11] Keiji Nagatani, Seiga Kiribayashi, Yoshito Okada, Satoshi Tadokoro, Takeshi Nishimura, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, and Yasushi Hada. Redesign of rescue mobile robot quince. In *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2011 IEEE International Symposium on*, pages 13–18. IEEE, 2011.
- [NQG⁺08] Andrew Y Ng, Morgan Quigley, Stephen Gould, Ashutosh Saxena, and Eric Berger. STAIR: STanford Artificial Intelligence Robot. <http://stair.stanford.edu/>, 2008.
- [Ope] Open Source Robotics Foundation. Gazebo. <http://gazebosim.org/>.
- [OSF] OSFR. Open Source Robotics Foundation. <http://www.osrfoundation.org/>. [Online; consultado 12 de Noviembre de 2014].
- [Pat10] Amit Patel. Introduction to a*. <http://theory.stanford.edu/~amitp/GameProgramming/AStarComparison.html>, 2010. [Online, consultado 10 de Octubre de 2015].
- [Paí11] El País. Fukushima vive el peor accidente nuclear desde Chernóbil. http://internacional.elpais.com/internacional/2011/03/12/actualidad/1299884402_850215.html, 2011. [Online, consultado 21 de Junio de 2015].
- [PBR06] R Playter, M Buehler, and M Raibert. Bigdog. In *Defense and Security Symposium*, pages 62302O–62302O. International Society for Optics and Photonics, 2006.
- [poi10] pointclouds.org. Point cloud library. <http://pointclouds.org>, 2010.
- [PY12] Paloma de la Puente Yusty. *Probabilistic mapping with mobile robots in structured environments*. PhD thesis, Industriales, 2012.
- [QCG⁺09] Morgan Quigley, Ken Conley, Brian Gerkey, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Rob Wheeler, and Andrew Y Ng. Ros: an open-source robot operating system. In *ICRA workshop on open source software*, volume 3, page 5, 2009.
- [Reu12] Reuters. Amazon’s Kiva Systems Acquisition To Put Robots To Work. http://www.huffingtonpost.com/2012/03/19/amazoncom-kiva-acquisition_n_1365512.html, 2012. [Online, consultado 11 de Junio de 2015].
- [RLMJG06] Diego Rodriguez-Losada, Fernando Matia, Agustin Jimenez, and Ramón Galán. Consistency improvement for slam-ekf for indoor environments. In *ICRA*, pages 418–423, 2006.
- [Rob02] Robotnik. Servicios de ingeniería robótica. <http://www.robotnik.es/>, 2002.
- [Roj07] Sergio Gálvez Rojas. Historia de la informática (i). *Encuentros en la Biología*, 119:2, 2007.

- [ROSa] ROS. Robot Operating System. <http://www.ros.org/>.
- [ROSb] ROS.org. roscpp C++ API. <http://wiki.ros.org/roscpp>. [Online, consultado 10 de Noviembre de 2014].
- [ROSc] ROS.org. rospy Python API. <http://wiki.ros.org/rospy>. [Online, consultado 10 de Noviembre de 2014].
- [ROS13] ROS.org. ROS APIs. <http://wiki.ros.org/APIs>, 2013. [Online; consultado 10 de Noviembre de 2014].
- [ROS14] ROS.org. ROS Network Setup. http://wiki.ros.org/ROS_NetworkSetup, 2014. [Online, consultado 10 de Marzo de 2015].
- [ROS15] ROS.org. Rosaria. <http://wiki.ros.org/ROSARIA>, 2015.
- [SFG07] Cyrill Stachniss, Udo Frese, and Giorgio Grisetti. Openslam. <http://openslam.org>, 2007. [Online, consultado 20 de Febrero de 2015].
- [SIC09] SICK. Laser scanners, LMS100-10000. <https://www.mysick.com/ecat.aspx?go=FinderSearch&Cat=Row&At=Fa&Cult=English&FamilyID=344&Category=Produktfinder&Selections=34242>, 2009. [Online; consultado 22 de Agosto de 2013].
- [SOGSBS⁺10] Ramón Silva Ortigoza, Rafael García Sánchez, Ricardo Barrrientos Sotelo, María Aurora Molina Vilchis, Víctor Manuel Hernández Guzmán, and Gilberto Silva Ortigoza. Una panorámica de los robots móviles. *Télématique*, 6(3):1–14, 2010.
- [TBF05] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox. *Probabilistic robotics*. MIT press, 2005.
- [Wik15] Wikipedia. Dead Reckoning. https://en.wikipedia.org/wiki/Dead_reckoning, 2015. [Online, consultado 14 de Marzo de 2015].
- [Xat11] Xataka. Conducción autónoma y futuro de los coches. <http://www.xataka.com/automovil/conduccion-autonoma-y-futuro-de-los-coches>, 2011. [Online, consultado 10 de Junio de 2015].