



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



*“Lo sé porque muchos ya se fueron  
y hoy sigo sus pasos al caminar.  
Y aquí tú y yo, solo quedamos los buenos,  
nadie nos enseña donde parar.”*

— Vetusta Morla, *Los Buenos*



# 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).

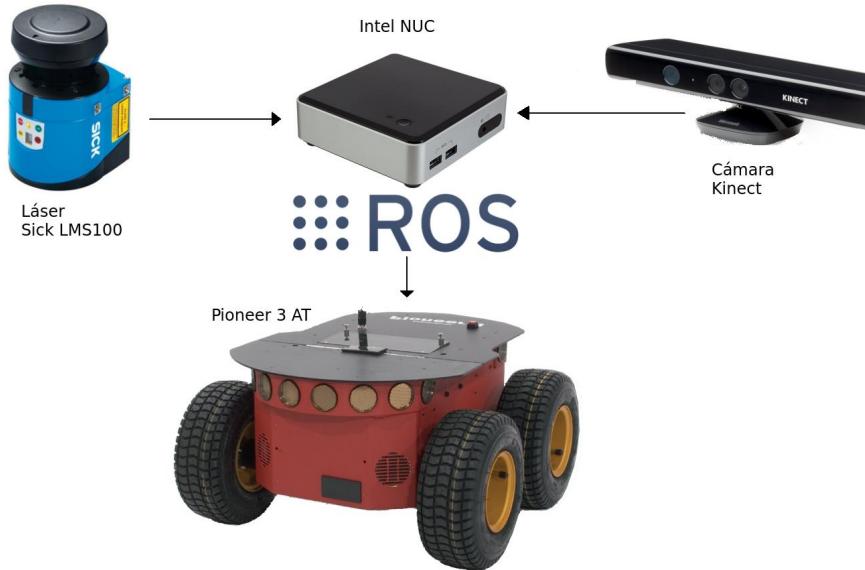


Figura 1: Esquema del sistema robótico utilizado en el proyecto

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).

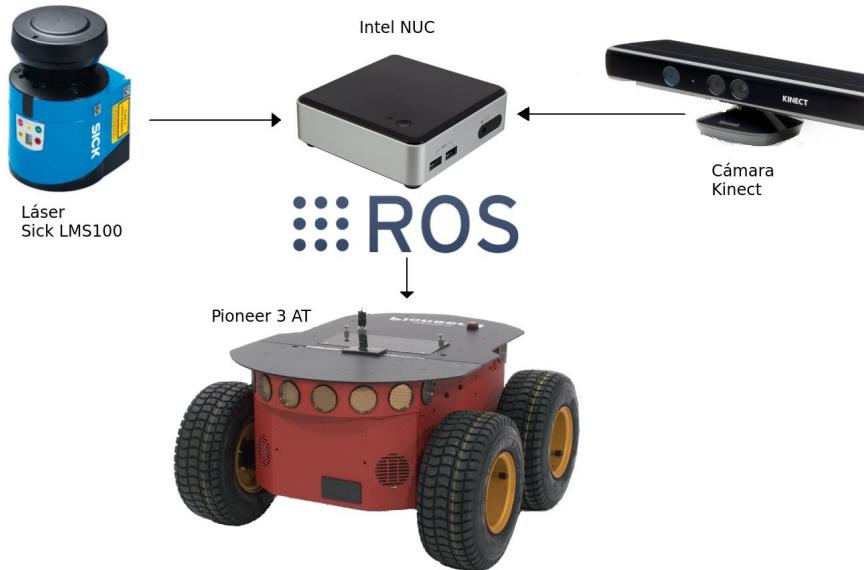


Figure 2: Diagram of the robotic system used for this project

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

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Robótica . . . . .	1
1.2 Robótica Móvil . . . . .	2
1.3 Motivación del proyecto . . . . .	3
1.4 Alcance y objetivos del proyecto . . . . .	4
1.4.1 Propósito y alcance . . . . .	4
1.4.2 Objetivos . . . . .	4
<b>2 Estado del arte</b>	<b>7</b>
2.1 Hardware en robótica móvil . . . . .	7
2.2 Sensores en robótica móvil . . . . .	10
2.2.1 Sensores internos . . . . .	11
2.2.2 Sensores externos . . . . .	12
2.3 Control en la robótica móvil actual . . . . .	14
2.3.1 Localización y orientación en un entorno . . . . .	14
2.4 Aplicaciones actuales de la robótica móvil . . . . .	14

<b>3 Planteamiento del proyecto</b>	<b>21</b>
3.1 Planteamiento preliminar . . . . .	21
3.2 Planificación del proyecto . . . . .	22
3.3 Tecnologías y herramientas empleadas en el proyecto . . . . .	27
3.3.1 Robot Operating System . . . . .	27
3.3.2 Lenguaje de programación C++ . . . . .	28
3.3.3 Lenguaje de programación Python . . . . .	28
3.3.4 Controlador de versiones git y repositorios GitHub . . . . .	28
3.3.5 Simulador de robótica Gazebo . . . . .	29
3.3.6 RViz: Herramienta de visualización robótica . . . . .	30
3.3.7 Impresión 3D . . . . .	31
3.4 Hardware . . . . .	31
3.4.1 Pioneer 3 AT . . . . .	31
3.4.2 Sensor Kinect . . . . .	32
3.4.3 Láser SICK LMS100 . . . . .	33
3.4.4 Intel NUC NUC5i7RYH . . . . .	35
<b>4 Conceptos previos</b>	<b>39</b>
4.1 Entorno ROS . . . . .	39
4.1.1 Funcionamiento de ROS . . . . .	39
4.1.2 Configuración de ROS . . . . .	42
4.1.3 Configuración de los paquetes ROS . . . . .	43
4.2 Arquitectura . . . . .	44
4.2.1 Arquitectura del sistema . . . . .	44
4.2.2 Arquitectura del proyecto . . . . .	44
<b>5 Control primario</b>	<b>47</b>
5.1 Nodos hardware . . . . .	47

<b>ÍNDICE GENERAL</b>	xix
5.1.1 Control del robot: Rosaria y p2os . . . . .	47
5.1.2 Sensor Kinect . . . . .	48
5.1.3 Sensor Láser Sick LMS100 . . . . .	50
5.1.4 Integración del hardware . . . . .	51
5.2 Nodo de teleoperación . . . . .	51
5.3 Nodo de navegación estimada . . . . .	52
5.4 Nodo de guiado (follower) . . . . .	53
<b>6 Navegación</b>	55
6.1 Navigation Stack . . . . .	55
6.1.1 Funcionamiento . . . . .	56
6.1.2 Requisitos para la navegación . . . . .	57
6.1.3 Configuración de la navegación . . . . .	58
6.2 SLAM . . . . .	60
6.3 AMCL . . . . .	62
6.4 Mapas de coste: Costmaps . . . . .	64
6.5 Planificador de trayectoria global . . . . .	66
6.5.1 Algoritmo de Dijkstra . . . . .	67
6.5.2 Algoritmo de A estrella . . . . .	69
6.6 Planificador de trayectoria local . . . . .	70
<b>7 Implementación del sistema</b>	71
7.1 Configuraciones hardware . . . . .	71
7.1.1 Pioneer 3 AT . . . . .	71
7.1.2 Sensor Láser . . . . .	72
7.1.3 Sensor Kinect . . . . .	73
7.1.4 Primera configuración hardware . . . . .	74
7.1.5 Segunda configuración hardware . . . . .	76

7.2 Navegación . . . . .	79
7.2.1 Configuración de los costmaps y los sensores . . . . .	79
7.2.2 Configuración de los planificadores de trayectoria . . . . .	83
7.2.3 Navegación con mapa . . . . .	84
7.2.4 Navegación reactiva . . . . .	84
7.3 Nodo de navegación por puntos . . . . .	86
7.4 Nodo de ejecución automática de nodos . . . . .	86
7.4.1 Reconocimiento de comandos de voz . . . . .	86
7.4.2 Feedback mediante text-to-speech . . . . .	86
<b>8 Pruebas del sistema</b>	<b>89</b>
8.1 Simulación con MobileSim . . . . .	89
8.2 Simulación con Gazebo . . . . .	90
8.2.1 Modelado del robot en el simulador . . . . .	90
8.2.2 Pruebas simuladas . . . . .	94
8.3 Pruebas reales . . . . .	98
8.3.1 SLAM . . . . .	99
8.3.2 Prueba de resistencia . . . . .	101
8.3.3 Aspectos de la navegación . . . . .	102
<b>9 Conclusiones</b>	<b>103</b>
9.1 Conclusión sobre la metodología . . . . .	103
9.2 Conclusión sobre los resultados . . . . .	103
9.3 Desarrollos futuros . . . . .	103
<b>Apéndice</b>	<b>104</b>
<b>A Configuración del sistema</b>	<b>107</b>
A.1 Configuración del espacio de trabajo . . . . .	107

A.1.1 Instalación de las librerías . . . . .	108
A.1.2 Gestión de las dependencias . . . . .	108
A.2 Configuración del hardware . . . . .	110
A.2.1 Calibración de la odometría . . . . .	110
A.2.2 Ordenador de abordo Intel NUC . . . . .	111
A.2.3 Sensor Kinect . . . . .	111
A.2.4 Láser SICK LMS100 . . . . .	111
<b>B Manual de uso del robot</b>	<b>113</b>
B.1 Encendido del robot . . . . .	113
B.2 Panel de control y parada de emergencia . . . . .	113
B.3 Conexión mediante un ordenador externo vía Wifi . . . . .	115
B.4 Acceder a la placa de alimentación . . . . .	116
B.5 Cargar las baterías del robot . . . . .	116
B.6 Ordenador interno del Pioneer 3 AT . . . . .	116
<b>C Información y documentos ONLINE</b>	<b>119</b>
C.1 Repositorio de código . . . . .	119
C.1.1 Readme . . . . .	119
C.2 Preguntas en ROS Answers y Github . . . . .	119
C.3 Multimedia . . . . .	120
C.4 Memoria del trabajo . . . . .	120



# Índice de figuras

1	Esquema del sistema robótico utilizado en el proyecto . . . . .	xii
2	Diagram of the robotic system used for this project . . . . .	xvi
2.1	Motor de corriente continua con encoder . . . . .	8
2.2	Configuraciones hardware. Basado en [SOGSBS <sup>+</sup> 10] . . . . .	8
2.3	Robot de configuración diferencial Pioneer 3 DX . . . . .	9
2.4	Ejemplos de configuración skid-steer: Cargador frontal, Robotnik Guardian, Pioneer 3 AT . . . . .	10
2.5	Configuración síncrona . . . . .	10
2.6	Configuración síncrona y rueda omnidireccional . . . . .	11
2.7	Robot Uranus con ruedas tipo Mecanum . . . . .	11
2.8	Esquema de un encoder absoluto . . . . .	11
2.9	Unidad de medida inercial, IMU . . . . .	12
2.10	Cámara estereoscópica del robot PR2 . . . . .	13
2.11	Sensor de 3 dimensiones Kinect para Xbox 360 . . . . .	14
2.12	Imagen tomada a sí mismo por el robot Curiosity en la superficie marciana . . . . .	15
2.13	Robots de desactivación de explosivos: iRobot 510 Packbot y TALON	16
2.14	Robot Quince (izq.) y robot Raccoon (dcha.) . . . . .	16
2.15	Robot para limpieza del hogar Roomba, de iRobot . . . . .	16
2.16	Robot pulverizador de aplicación agrícola, AgriRobot . . . . .	17

2.17 Robot de inspección de viñedos, VinBot . . . . .	17
2.18 Robot social Maggie y robot de asistencia ROSA . . . . .	18
2.19 Robot PR2 desarrollado por Willow Garage . . . . .	18
2.20 Sensores del coche autónomo de Google . . . . .	19
3.1 Logo de ROS . . . . .	27
3.2 Entorno de simulación Gazebo . . . . .	30
3.3 Entorno gráfico RViz . . . . .	30
3.4 Robot Pioneer 3-AT . . . . .	32
3.5 Panel de control del robot Pioneer 3-AT . . . . .	32
3.6 Sensor Kinect . . . . .	34
3.7 Proyección de infrarrojos y obtención de la nube de puntos . . . . .	34
3.8 Sensor escaner láser Sick LMS100 . . . . .	35
3.9 Campo de visión del sensor láser Sick LMS100 . . . . .	36
4.1 Grafo de ejemplo con nodos conectados . . . . .	40
4.2 Esquema del funcionamiento de ROS . . . . .	41
4.3 Frames utilizados en el robot PR2 . . . . .	42
4.4 Estructura del proyecto . . . . .	45
4.5 Estructura de carpetas del paquete pioneer_utils . . . . .	46
6.1 Diagrama de funcionamiento del Navigation Stack [ME10b] . . . . .	56
6.2 Visualización de costmaps, sensor láser y modelo del robot en RViz. .	61
6.3 slam_gmapping visualizado en RViz . . . . .	63
6.4 Esquema de la labor del nodo AMCL entre los <i>frames</i> map y base. .	63
6.5 Esquema sobre el cálculo del coste de cada celda en el mapa. . . . .	66
6.6 Clasificación de los diferentes métodos de planificación de trayectorias. Basado en [PB15]. . . . .	67

6.7	Implementación del algoritmo de Dijkstra en un mapa sin obstáculos. Basado en [Pat10]. . . . .	68
6.8	Implementación del algoritmo Best-First-Search en un mapa sin obstáculos. Basado en [Pat10]. . . . .	68
6.9	Algoritmo de Dijkstra (Izq.) y algoritmo Best-First-Search (Dcha.) en un mapa con obstáculo cóncavo. Basado en [Pat10]. . . . .	69
6.10	Algoritmo A* sin obstáculo (Izq.) y con obstáculo cóncavo (Dcha.). Basado en [Pat10]. . . . .	70
7.1	Estado del robot al comienzo del proyecto [] . . . . .	72
7.2	Adaptación de cables para la alimentación del sensor Kinect (izq.) y cable a 12V de la placa de alimentación del robot (dcha.). . . . .	73
7.3	Primera configuración hardware del robot . . . . .	74
7.4	Esquema de la segunda configuración del sistema. Basado en **REFERENCIA ALENJANDRO**. . . . .	75
7.5	Modelo 3D de la segunda configuración hardware hecho en Gazebo . . . . .	77
7.6	Esquema del sistema robótico final utilizado en el proyecto. . . . .	79
7.7	Creación de un mapa mediante SLAM. . . . .	85
8.1	MobileSim junto con RViz funcionando con teleoperación. . . . .	90
8.2	Simulación en Gazebo y visualizado de datos en RViz. . . . .	93
8.3	Pioneer 3 AT simulado en el mapa Willow Garage. . . . .	93
8.4	Prueba de SLAM en el simulador Gazebo. . . . .	94
8.5	Trayectoria global erronea. . . . .	95
8.6	Navegación con mapa final. . . . .	96
8.7	Navegación con mapa final. . . . .	96
99figure.caption.127		
100figure.caption.128		
B.1	Panel de control del robot Petrois. . . . .	114
B.2	Panel del ordenador interno (lateral izquierdo) del robot Petrois. . . . .	117



# Índice de tablas

3.1	Especificaciones del robot Pioneer 3 AT . . . . .	33
3.2	Características del sensor Kinect . . . . .	35
3.3	Características del sensor láser Sick LMS100. Basado en [SIC09] . . .	36
3.4	Características del ordenador Intel NUC NUC5i7RYH . . . . .	37
5.1	API de rosaria utilizada. Basado en [ROS15] . . . . .	48
5.2	API de freenect_stack utilizada. . . . .	49
5.3	API de LMS1xx utilizada. . . . .	50
5.4	API de teleop_p3at . . . . .	52
5.5	API de moving_alone . . . . .	53
5.6	API de turtlebot_follower . . . . .	53
8.1	Primera prueba de resistencia simulada. . . . .	97
8.2	Segunda prueba de resistencia simulada. . . . .	98
8.3	Tercera prueba de resistencia simulada. . . . .	98
8.4	Primera prueba de resistencia real <sup>1</sup> . . . . .	101
8.5	Segunda prueba de resistencia real. . . . .	102



# Índice de códigos

4.1	Mandato de consola para instalar la versión completa de ROS Indigo.	43
4.2	Source al setup de ROS Indigo . . . . .	43
4.3	Instalación y workspace de Catkin . . . . .	43
4.4	Source al setup de nuestro entorno Catkin . . . . .	43
4.5	Clonado del repositorio <i>pioneer3at_ETSIDI</i> . . . . .	44
5.1	Launchfile para RosAria. . . . .	48
5.2	Launchfile para Kinect en el paquete freenect.launch. . . . .	49
5.3	Launchfile para el sensor Láser Sick LMS100. . . . .	50
5.4	Launchfile creado para robot Pioneer 3 AT. . . . .	51
5.5	Líneas del archivo <i>.bashrc</i> en el ordenador de abordo. . . . .	52
5.6	Ejemplo <i>.bashrc</i> en un ordenador externo para realizar comunicación con el máster. . . . .	52
5.7	Ejemplo <i>.bashrc</i> en un ordenador externo para realizar comunicación con el máster. . . . .	52
5.8	Launchfile para turtlebot_follower en el robot Pioneer 3 AT. . . . .	54
6.1	Ejemplo de <i>costmap_common_params.yaml</i> . . . . .	58
6.2	Ejemplo de <i>global_costmap.yaml</i> . . . . .	58
6.3	Ejemplo de <i>local_costmap.yaml</i> . . . . .	59
6.4	Ejemplo de <i>local_costmap.yaml</i> . . . . .	59
6.5	Ejemplo de <i>global_planner_params.yaml</i> . . . . .	59

6.6 Ejemplo de <i>robot_navigation.launch</i> . . . . .	60
6.7 Launchfile <i>slam_gmapping</i> . . . . .	62
6.8 Launchfile para visualizar <i>slam_gmapping</i> en RViz . . . . .	62
6.9 Ejecución del nodo <i>map_saver</i> para guardar el mapa . . . . .	62
6.10 Launchfile del nodo <i>amcl</i> utilizado. . . . .	64
7.1 Launchfile <i>DepthImage_to_LaserScan</i> para obstáculos lejanos. . . . .	81
7.2 Launchfile <i>DepthImage_to_LaserScan</i> para obstáculos lejanos. . . . .	82
7.3 Launchfile <i>DepthImage_to_LaserScan</i> para obstáculos lejanos. . . . .	82
7.4 Configuración del <i>global_costmap</i> . . . . .	82
7.5 Configuración del <i>local_costmap</i> . . . . .	83
7.6 Configuración de navegación global. . . . .	85
7.7 Configuración de <i>global_costmap</i> para navegación reactiva. . . . .	86
7.8 Configuración del launchfile para navegación reactiva. . . . .	87
8.1 Fragmento de la configuración URDF del robot. . . . .	91
8.2 Launchfile para lanzar Gazebo con el modelo del robot y sus sensores.	92
A.1 Instalación y workspace de Catkin . . . . .	107
A.2 Source al setup de nuestro entorno Catkin . . . . .	108
A.3 Clonado del repositorio <i>pioneer3at_ETSIDI</i> . . . . .	108
A.4 Inicializando la herramienta <i>rosdep</i> . . . . .	108
A.5 Instalando los paquetes de navegación mapeo. . . . .	109
A.6 Instalando las dependencias de rosaria. . . . .	109
A.7 Instalando las dependencias de <i>pocketsphinx</i> y <i>gstreamer</i> . . . . .	109
A.8 Instalando las dependencias de <i>audio_capture</i> . . . . .	109
A.9 Instalando las dependencias de <i>sound_play</i> . . . . .	109
A.10 Compilando los paquetes del espacio de trabajo Catkin. . . . .	110

B.1 Abriendo el <i>.bashrc</i> . . . . .	115
B.2 Añadiendo las direcciones IP al <i>.bashrc</i> . . . . .	115



# 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.

## 1.4 Alcance y objetivos del proyecto

En esta sección 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.

### 1.4.1 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.

### 1.4.2 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 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.

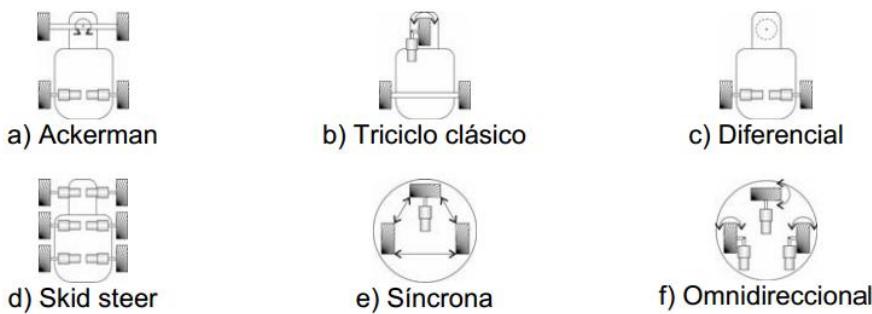


Figura 2.2: Configuraciones hardware. Basado en [SOGSBS<sup>+</sup>10]

- 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.

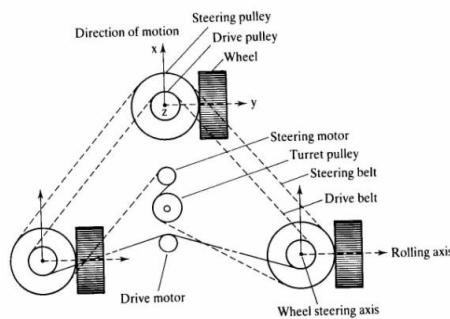


Figura 2.5: Configuración síncrona

#### 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.

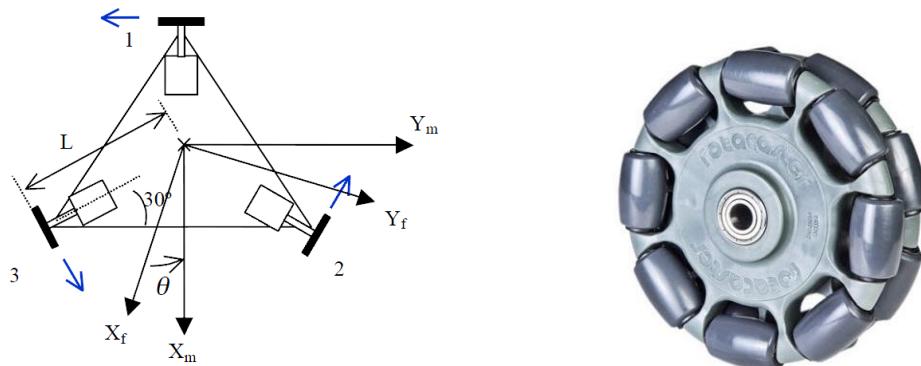


Figura 2.6: Configuración síncrona y rueda omnidireccional



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.

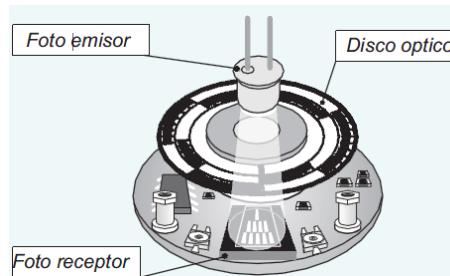


Figura 2.8: Esquema de un encoder absoluto

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 giroscopio 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 3.6).

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<sup>+</sup>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.

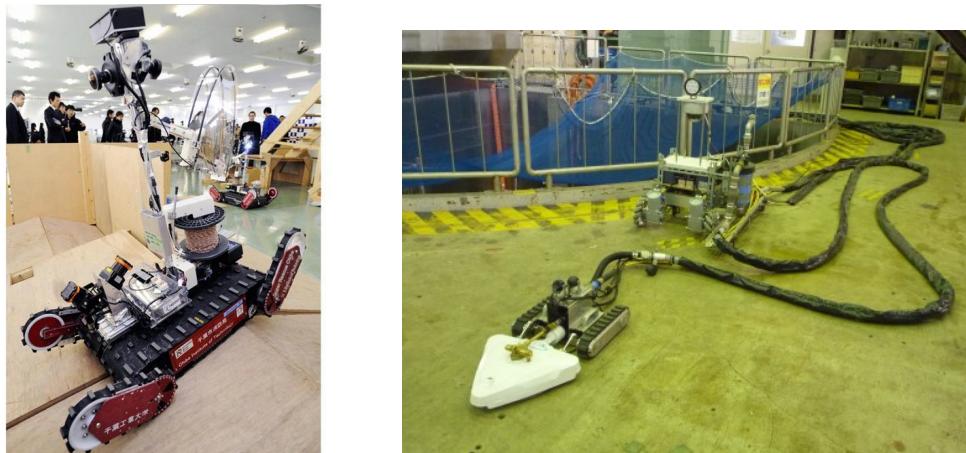


Figura 2.14: Robot Quince (izq.) y robot Raccoon (dcha.)

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].

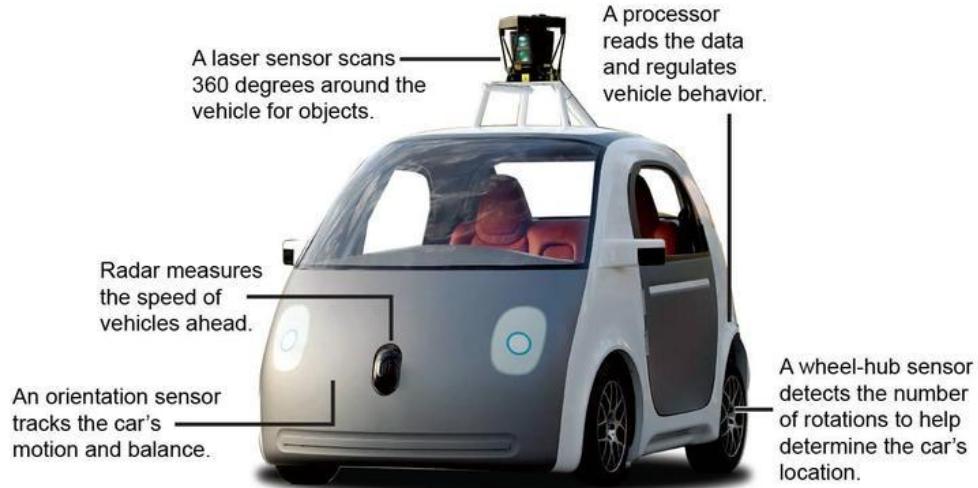


Figura 2.20: Sensores del coche autónomo de Google

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

## Planteamiento del proyecto

En esta capítulo se expone cuál ha sido el planteamiento incial del proyecto, un análisis de tiempos, las tecnologías y equipos utilizados y el hardware que forma parte del proyecto en sí mismo.

### 3.1 Planteamiento preliminar

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 dasarrollo 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 otro<sup>1</sup>.

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.

## 3.2 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"<sup>\*referencia\*</sup>, 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"<sup>\*REFERENCIA\*</sup>, accedemos a la nube de puntos y la imagen.
- ii. Utilizamos el nodo LMS1xx <sup>\*\*Referencia\*\*</sup> 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"<sup>\*\*referencia\*\*</sup>.

---

<sup>1</sup>De 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 planificadores 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 \*\*Refencia\*\*, 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.

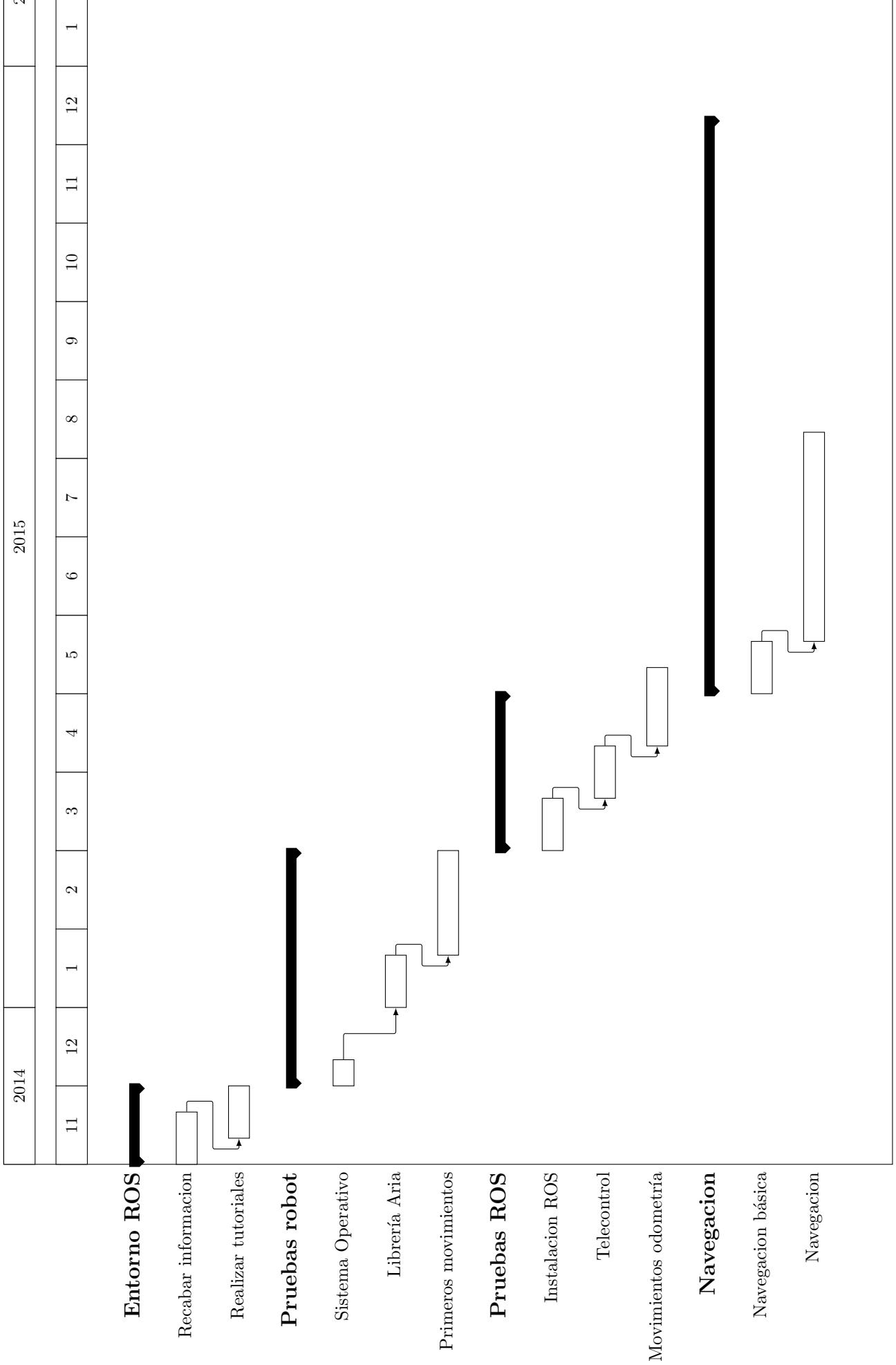
Durante el mes de Octubre se organizó la estructura del proyecto y se puso en marcha el simulador Gazebo. A continuación se realizó el ajuste de los sensores y la optimización del sistema de navegación. En paralelo se realizaron las modificaciones mecánicas y estructurales para la integración de los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





### 3.3 Tecnologías y herramientas empleadas en el proyecto

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

#### 3.3.1 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 3.1: 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.

### 3.3.2 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.

### 3.3.3 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++.

### 3.3.4 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](https://github.com/danimtb/pioneer3at_ETSIDI)
- Memoria del proyecto [https://github.com/danimtb/TFG\\_pioneer3at](https://github.com/danimtb/TFG_pioneer3at)

### 3.3.5 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].

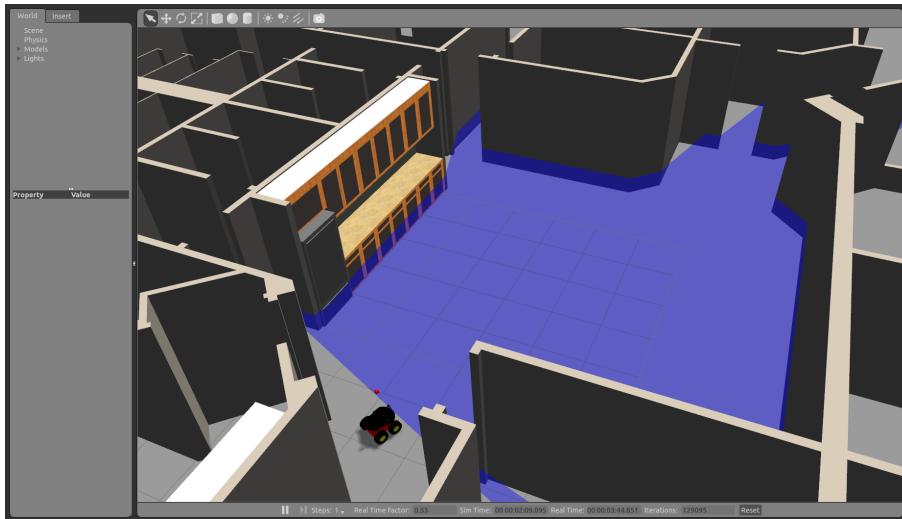


Figura 3.2: Entorno de simulación Gazebo

### 3.3.6 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 3.3). 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.

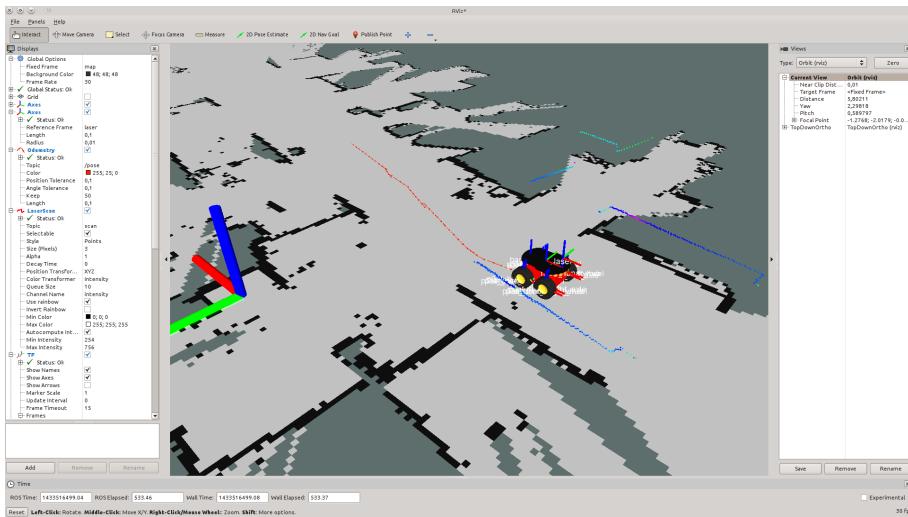


Figura 3.3: Entorno gráfico RViz

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 de una manera intuitiva.

### 3.3.7 Impresión 3D

La impresión 3D es un grupo de tecnologías de fabricación por adición donde un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de materia.

Las impresoras 3D de uso popular utilizan un extrusor preparado para plásticos procesados en forma de filamento de pocos milímetros de grosor que deposita material capa a capa hasta que el objeto deseado alcanza su forma final.

EL diseño de los objetos se realiza mediante una herramienta de diseño asistido por ordenador y los objetos deseados se exportan en formato de mallas.

En este proyecto la impresión 3D ha servido de ayuda para crear piezas específicas para colocar los sensores del robot, anclar elementos de la estructura del robot o servir de soporte a equipos provisionales.

El software utilizado para el modelado 3D ha sido la herramienta FreeCAD y la impresora 3D Makerbot thing-o-matic con su software ReplicatorG para generar las capas y controlar la impresora.

## 3.4 Hardware

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

### 3.4.1 Pioneer 3 AT

El robot Pioneer 3 AT (Figura 3.4), 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.

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.



Figura 3.4: Robot Pioneer 3-AT

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 3.5)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.

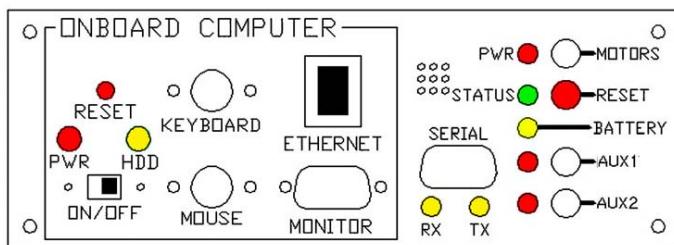


Figura 3.5: Panel de control del robot Pioneer 3-AT

En la siguiente tabla (Tabla 3.1) se describen las principales características del robot.

### 3.4.2 Sensor Kinect

Kinect es un conjunto de sensores de bajo coste que lo convierte en una herramienta excepcional (Figura 3.6). 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.

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.

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, estancas, plomo-ácido
Autonomía	4-8 horas
Sistema motriz	4 ruedas motrices
Ruedas	Neumáticos de Nylon
Diámetro de rueda	222 mm (Ruedas todoterreno) / 190 mm (Ruedas interior)
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 3.1: Especificaciones del robot Pioneer 3 AT

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.

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 3.7), obteniendo finalmente los puntos de toda la nube en coordenadas cartesianas XYZ.

La siguiente tabla (Tabla 3.2) muestra las especificaciones del sensor Kinect.

### 3.4.3 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 3.8).

Este es un sensor láser por infrarrojos de clase I (Inofensivo para el ojo humano),



Figura 3.6: Sensor Kinect

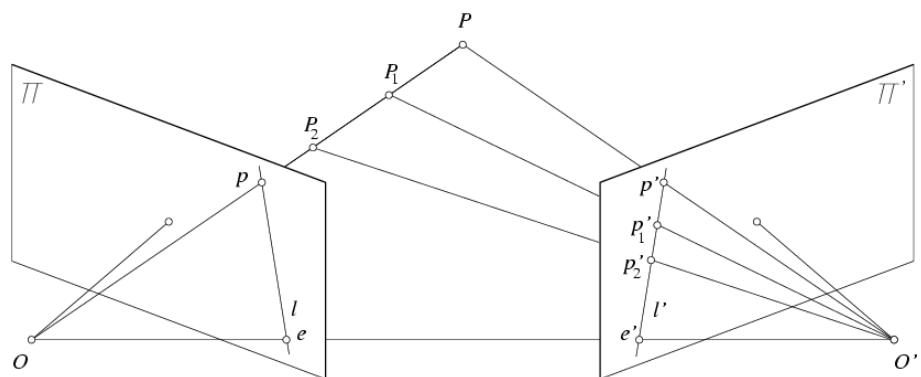


Figura 3.7: Proyección de infrarrojos y obtención de la nube de puntos

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
Pixel 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 3.2: Características del sensor Kinect



Figura 3.8: Sensor escáner láser Sick LMS100

que obtiene la medida de distancias con gran precisión y rapidez en un solo plano y realizando un barrido de 270° (Figura 3.9).

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 3.3) se recogen sus características principales.

#### 3.4.4 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.

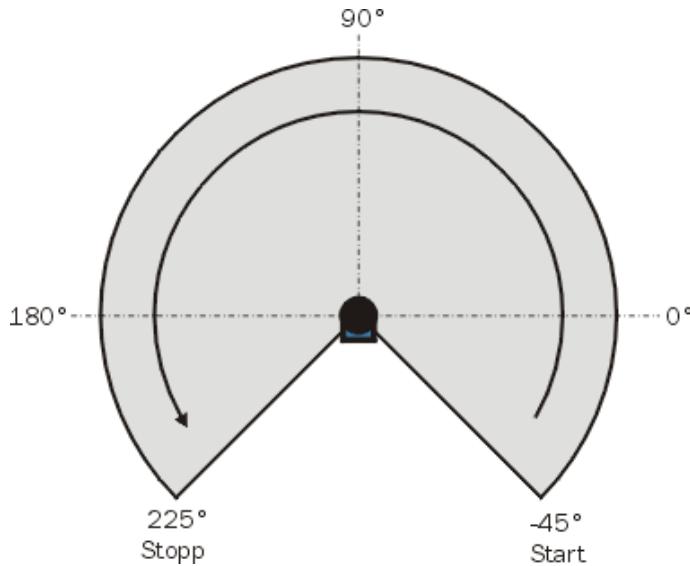


Figura 3.9: Campo de visión del sensor láser Sick LMS100

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

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 3.4 pueden consultarse sus características principales.

<b>Especificaciones</b>	<b>Intel NUC NUC5i7RYH</b>
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 3.4: Características del ordenador Intel NUC NUC5i7RYH



# Capítulo 4

## Conceptos previos

### 4.1 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.

#### 4.1.1 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 4.1 vemos un ejemplo para el robot simulado "turtlesim", al cual le envía comandos el nodo de teleoperación "teleop\_turtle" ambos publican información a través del nodo rosout".

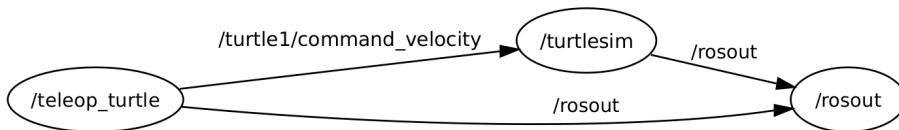


Figura 4.1: Grafo de ejemplo con nodos conectados

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.

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...

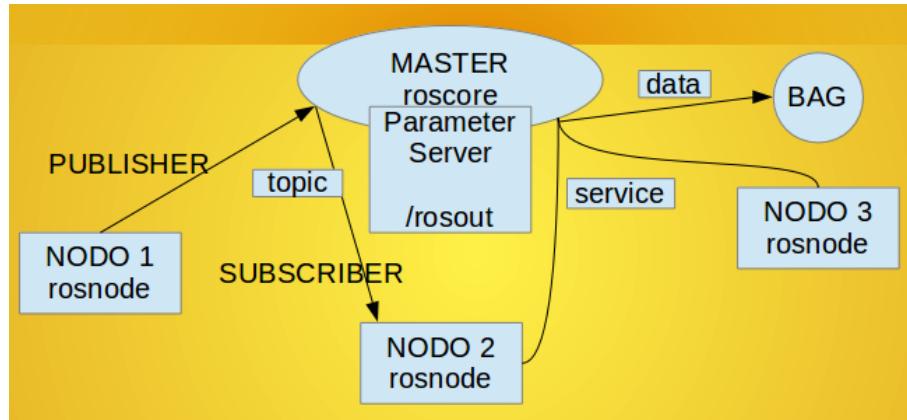


Figura 4.2: Esquema del funcionamiento de ROS

- **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 `roslaunch` 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.

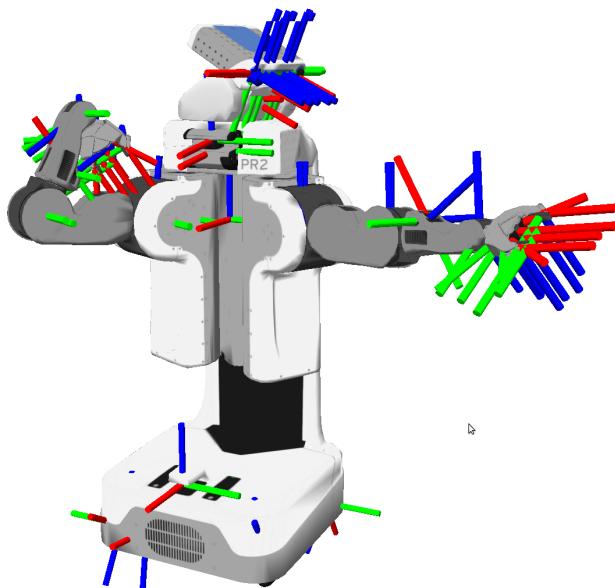


Figura 4.3: Frames utilizados en el robot PR2

#### 4.1.2 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.

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

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

Código 4.1: Mandato de consola para instalar la versión completa de ROS Indigo.

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

Código 4.2: 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 4.3: 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 4.4: 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>.

### 4.1.3 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:

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.

```

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

```

Fuente: [https://github.com/danimtb/pioneer3at\\_ETSIDI](https://github.com/danimtb/pioneer3at_ETSIDI)

Código 4.5: Clonado del repositorio *pioneer3at\_ETSIDI*

## 4.2 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.

### 4.2.1 Arquitectura del sistema

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 conectará 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.

### 4.2.2 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:

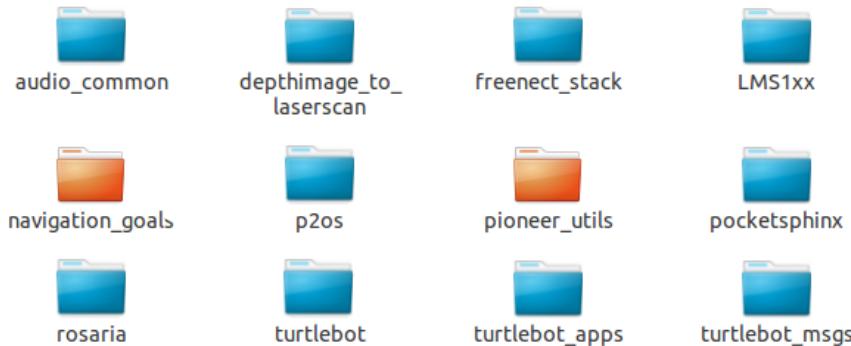


Figura 4.4: Estructura del proyecto

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 transfroman 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.

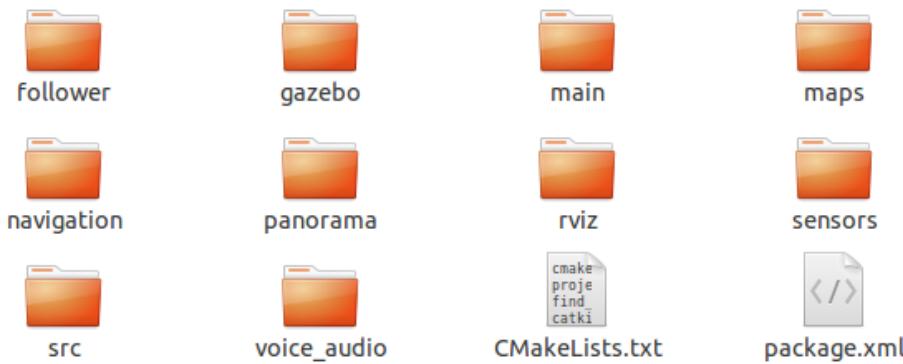


Figura 4.5: Estructura de carpetas del paquete `pioneer_utils`

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 5

## 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.

### 5.1 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.

#### 5.1.1 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 8.1)

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 5.1: 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 5.6 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 5.1: API de rosaria utilizada. Basado en [ROS15]

### 5.1.2 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](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 5.2: Launchfile para Kinect en el paquete `freenect_launch`.

En la tabla 5.2 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 5.2: API de `freenect_stack` utilizada.

### 5.1.3 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 5.3: 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 5.3: API de LMS1xx utilizada.

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

### 5.1.4 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 5.4) 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 5.4: 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\*\*\*

## 5.2 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 5.5: 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 5.6: 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 5.7: 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 5.4: API de teleop\_p3at

### 5.3 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\*\*

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

Tabla 5.5: API de moving\_alone

## 5.4 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.

<b>turtlebot_follower API</b>		
<b>Topics suscritos</b>	<b>Mensaje</b>	<b>Descripción</b>
camera/depth/points	sensor_msgs/PointCloud2	Recibe la nube de puntos
<b>Topics publicados</b>		
cmd_vel	geometry_msgs/Twist	Publica comandos de velocidad
<b>Parámetros</b>		
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 5.6: 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 5.8: Launchfile para turtlebot\_follower en el robot Pioneer 3 AT.

# Capítulo 6

## 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 7, donde hablaremos de su implementación más en detalle.

### 6.1 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.

## RELENAR ALGO MAS

### 6.1.1 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`).

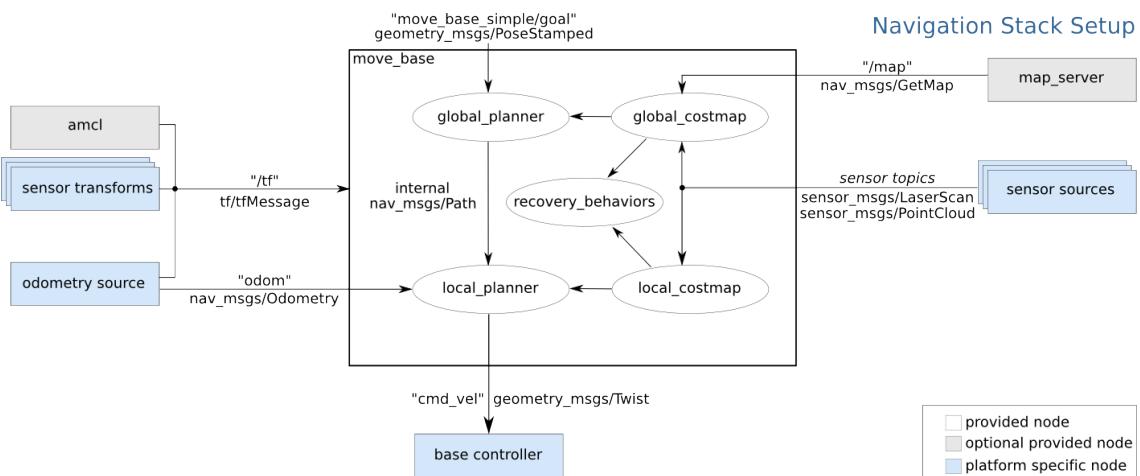


Figura 6.1: Diagrama de funcionamiento del Navigation Stack [ME10b]

En el diagrama mostrado en la figura 6.1 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 6.2).

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 6.3).

### 6.1.2 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 5.1.1) 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 5.1.1) 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 5.1.2) y para el sensor Láser (Subsección 5.1.3). 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 5.1.4, proporcionan la información necesaria.

### 6.1.3 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 6.1: 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 6.2: 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 6.3: 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 6.4: 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 6.5: 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 6.5).

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 6.6: 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 6.2.

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 7).

## 6.2 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.

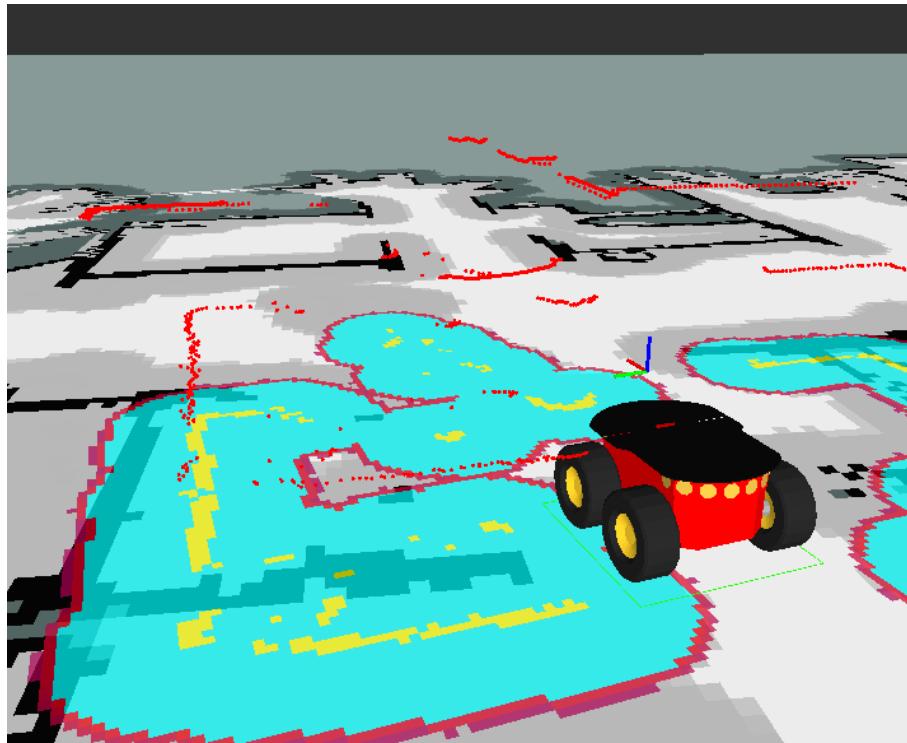


Figura 6.2: Visualización de costmaps, sensor láser y modelo del robot en RViz.

$$p(x|d) = \frac{p(d|x)p(x)}{p(d)} \quad (6.1)$$

\*\*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<sup>+</sup>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 6.7: 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 6.8: 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 6.9: Ejecución del nodo *map\_saver* para guardar el mapa

## 6.3 AMCL

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

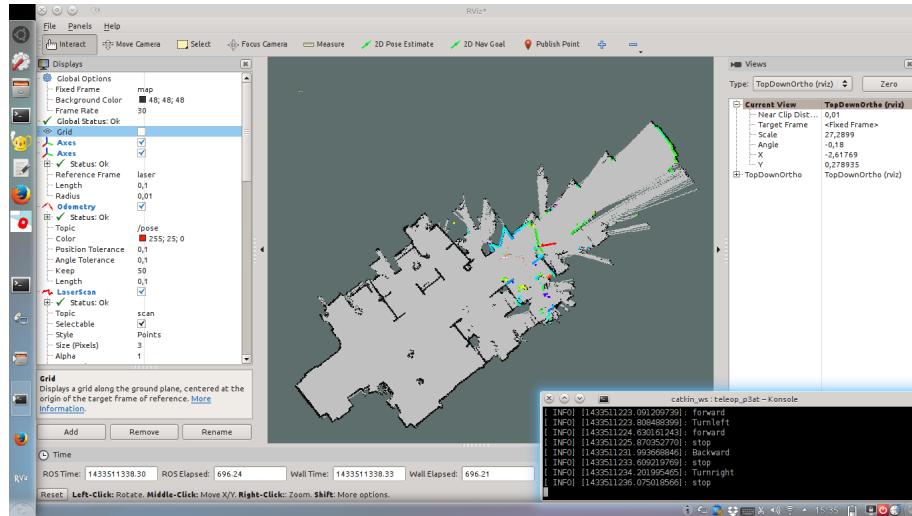


Figura 6.3: slam\_gmapping visualizado en RViz

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 6.4).

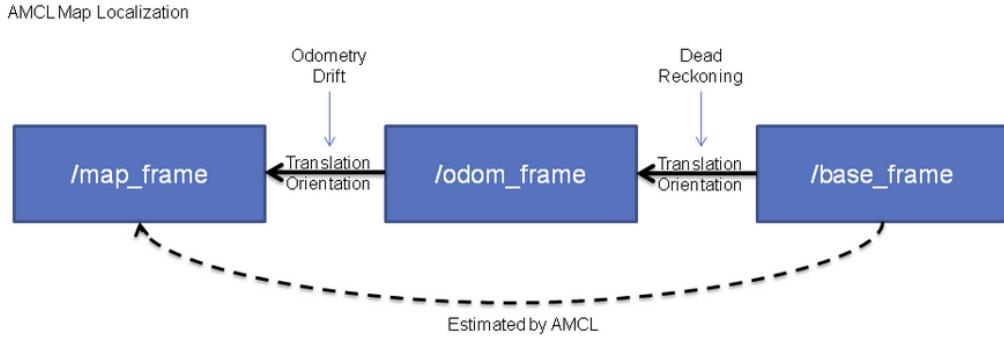


Figura 6.4: Esquema de la labor del nodo AMCL entre los *frames* map y base.

## 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 6.10: Launchfile del nodo amcl utilizado.

## 6.4 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 "possible" 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.

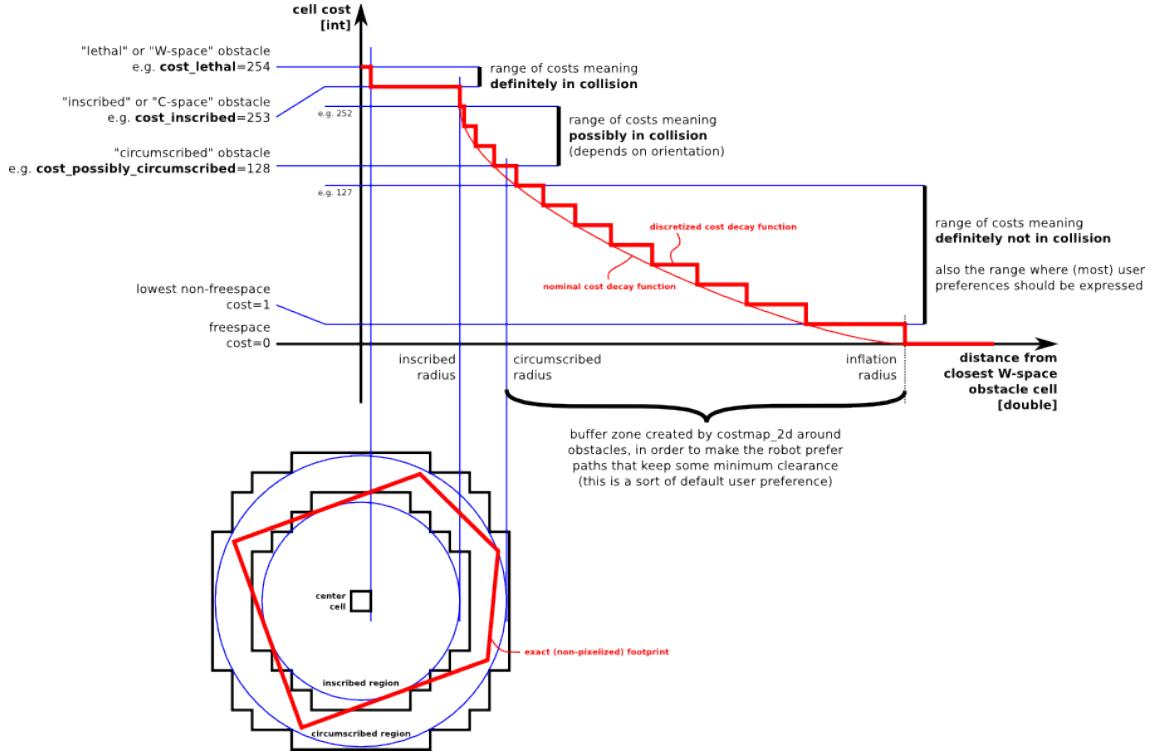


Figura 6.5: Esquema sobre el cálculo del coste de cada celda en el mapa.

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\*\***.

## 6.5 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 6.6 se muestra una clasificación de los principales métodos de planificación de trayectorias

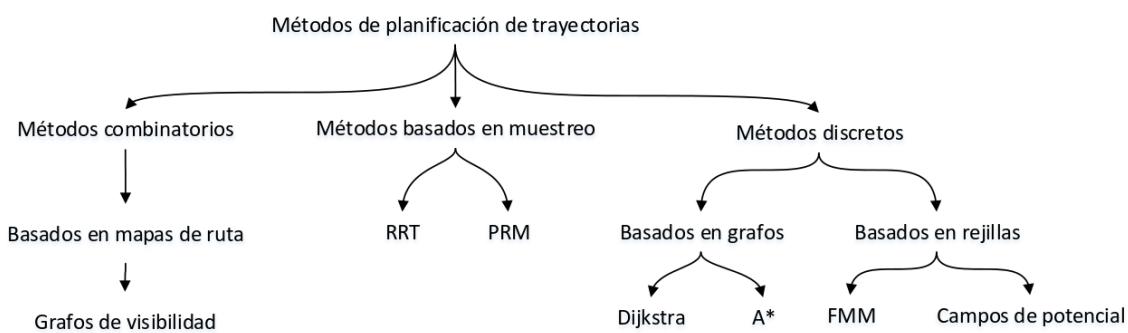


Figura 6.6: Clasificación de los diferentes métodos de planificación de trayectorias. Basado en [PB15].

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.

### 6.5.1 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 6.7 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.

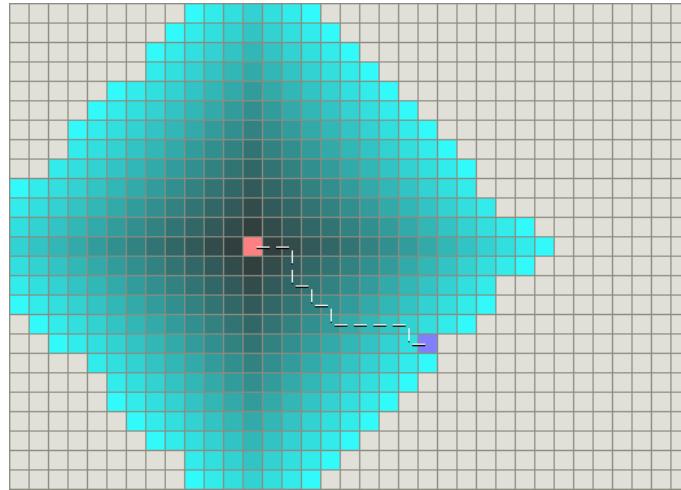


Figura 6.7: Implementación del algoritmo de Dijkstra en un mapa sin obstáculos. Basado en [Pat10].

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.

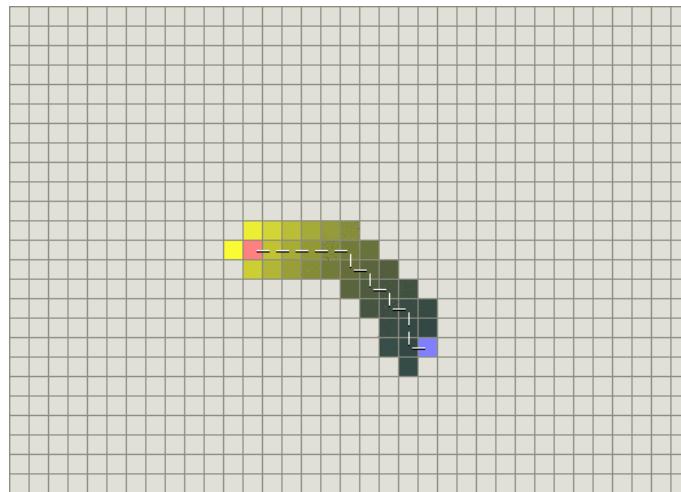


Figura 6.8: Implementación del algoritmo Best-First-Search en un mapa sin obstáculos. Basado en [Pat10].

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 6.9.

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.

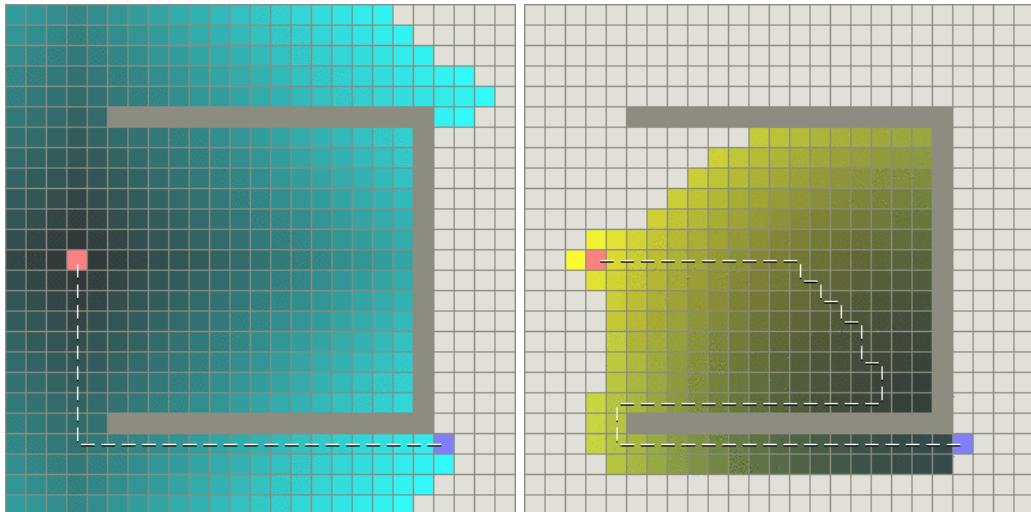


Figura 6.9: Algoritmo de Dijkstra (Izq.) y algoritmo Best-First-Search (Dcha.) en un mapa con obstáculo cóncavo. Basado en [Pat10].

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.

### 6.5.2 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 6.10 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.

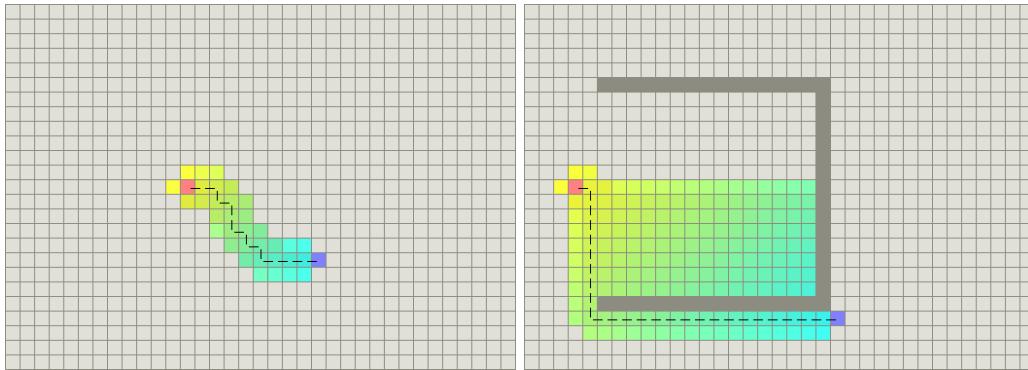


Figura 6.10: Algoritmo A\* sin obstáculo (Izq.) y con obstáculo cóncavo (Dcha.). Basado en [Pat10].

## 6.6 Planificador de trayectoria local

EL planificador de trayectoria local es el encargado de guiar al robot, según sus posibilidades de movimiento, hacia la ruta marcada por el planificador global. Este planificador de trayectoria se basa en el mapa de coste local, el cuál determina por la información de los sensores los obstáculos más próximos al robot.

La filosofía del planificador de trayectoria local es servir de control reactivo del robot además de conducirlo hacia la ruta marcada por el planificador global. Su misión es 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 7

## Implementación del sistema

Este capítulo describe los cambios, ajustes y modificaciones que, basados en la información anterior expuesta, las características de ROS y el hardware del que disponemos, se han realizado para alcanzar los objetivos del proyecto.

### 7.1 Configuraciones hardware

Como ya se ha descrito, la navegación se basa en el sensor Kinect pero también se ha considerado integrar el sensor láser debido a la valiosa información que aporta y su disponibilidad.

Por ello, el robot deberá llevar incorporados estos sensores proporcionándoles alimentación y una interfaz de conexión adecuada.

#### 7.1.1 Pioneer 3 AT

El robot Pioneer 3 AT de Adept Mobile Robots es la base de la plataforma robótica. El modelo disponible en el laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial llevaba incorporado un ordenador de tipo **\*\*ORDENADOR PIONEER\*\***. También, al comienzo de este proyecto ya existían algunas adaptaciones como la incorporación de un altavoz frontal, acceso a los puestos USB del ordenador interno y conexión para el sensor láser (Figura 7.1).

El robot había sido utilizado anteriormente mediante el software MRCore en el proyecto **\*\*PROYECTO DE ALEJANDRO\*\*** y el sistema operativo del ordenador interno era Ubuntu Server 10.

Para integrar la versión Indigo de ROS lo más recomendable era partir de la versión estable más actualizada de Ubuntu, por lo que se sustituyó el sistema operativo por Ubuntu 14.04 LTS en su versión de escritorio.



Figura 7.1: Estado del robot al comienzo del proyecto [].

Una vez integrado el sistema operativo, la primera toma de contacto con el robot fue a partir de la librería Aria \*\*referencia\*\* para controlar el movimiento de los motores y comprobar que el robot se encontraba en buen estado.

\*\*Añadir el puerto al grupo de dialout\*\*

A continuación, tras instalar ROS Indigo, se procedió a las pruebas mediante el paquete Rosaria de ROS. La conexión con el microcontrolador de la placa de motores fue exitosa y se comprobó que los valores de la odometría también funcionaban.

\*\*cambiar el puerto de conexión\*\*?

Llegados a este punto, ya disponíamos del robot preparado para realizar las primeras pruebas.

### 7.1.2 Sensor Láser

El sensor láser Sick ya había sido integrado en un proyecto anterior y sus conexiones de alimentación y datos vía Ethernet ya estaban preparadas para utilizarlo.

Para conectarlo a través del puerto Ethernet fue necesario ajustar su dirección IP a través del software del fabricante y ajustar la IP del ordenador del robot Pioneer (más información en el apéndice \*\*TAL\*\*).

El agarre mecánico del sensor se dejó tal y como había sido utilizado en ocasiones anteriores, situado en la parte frontal agarrado mediante un par de tornillos al chasis

con tuercas de palometa para su fácil manipulación.

El sensor láser se conecta a la interfaz ROS mediante el paquete LMS1xx tal y como se describió en el apartado 5.1.3.

### 7.1.3 Sensor Kinect

La integración del sensor Kinect fue relativamente sencilla debido a que las entradas de los puestos USB del ordenador habían sido cableadas previamente. La adaptación a realizar era sobre la parte de alimentación, ya que este sensor trabaja a una tensión de 12 voltios.

En el manual del robot se encuentra una descripción detallada de la placa de alimentación a la cual pueden conectarse diferentes periféricos. Esta placa ofrece tomas de conexión de 5 voltios controlados por unos botones auxiliares y tomas de 12 voltios (ver apéndice **\*\*TAL\*\***).

El sensor Kinect dispone de un adaptador USB, preparado para trabajar con la videoconsola XBOX 360, el cual suministra 12 voltios mediante un transformador conectado a una toma de corriente alterna de 220v e incorpora los cables de datos del propio sensor Kinect.

**\*\*Esquema conexión usual\*\*.**

Para integrar el sensor Kinect en el robot, se cortó el cable de alimentación del cable adaptador y se soldaron unas clavijas tipo Jack **\*\*REVISAR\*\*** macho-hembra para conectar el adaptador directamente a los 12 voltios de la placa del robot. También se realizó lo oportuno en el adaptador de corriente, para poder usar el sensor Kinect de la manera habitual (Figura 7.2).



Figura 7.2: Adaptación de cables para la alimentación del sensor Kinect (izq.) y cable a 12V de la placa de alimentación del robot (dcha.).

Para anclar el sensor Kinect al robot se optó por situarlo en la parte superior del sensor Láser, para lo cual se diseñó una pieza que encajase en la base de la Kinect

y en el sensor láser (figura \*\*REF\*\*).

\*\*Imagen del diseño 3D\*\*

El sensor Kinect se conecta a la interfaz ROS mediante el paquete freenect\_stack tal y como se describió en el apartado 5.1.2.

#### 7.1.4 Primera configuración hardware

La primera configuración del robot consistió en ambos sensores situados en la parte frontal del mismo. Los sensores se encontraban colocados de manera vertical uno sobre otro, de tal forma que no existieran interferencias entre uno y otro.



Figura 7.3: Primera configuración hardware del robot

De esta forma conseguíamos una vista frontal despejada y contábamos con la información del láser para detectar obstáculos laterales.

#### Primera configuración del sistema

El ordenador interno corría todos los nodos de ROS, de modo que se disponía de la información de los sensores, el control sobre los motores y la lectura de la odometría para realizar las primeras pruebas con el paquete de navegación de ROS (Sección ).

Sin embargo, la primera implementación con los primeros ajustes a nuestro hardware de los sensores no fue posible debido a la sobrecarga de la CPU del ordenador interno del robot Pioneer y a problemas de memoria en la ejecución de nodos como AMCL.

### Segunda configuración del sistema

La siguiente opción fue utilizar un ordenador externo que realizase los cálculos de navegación y enviase al robot las consignas de movimiento a través de una red WLAN. Esta idea no era la solución más ideal, ya que desde el principio la idea era que el robot fuese lo más autónomo posible sin depender de una infraestructura, sin embargo era una posibilidad directa que no suponía mucho esfuerzo.

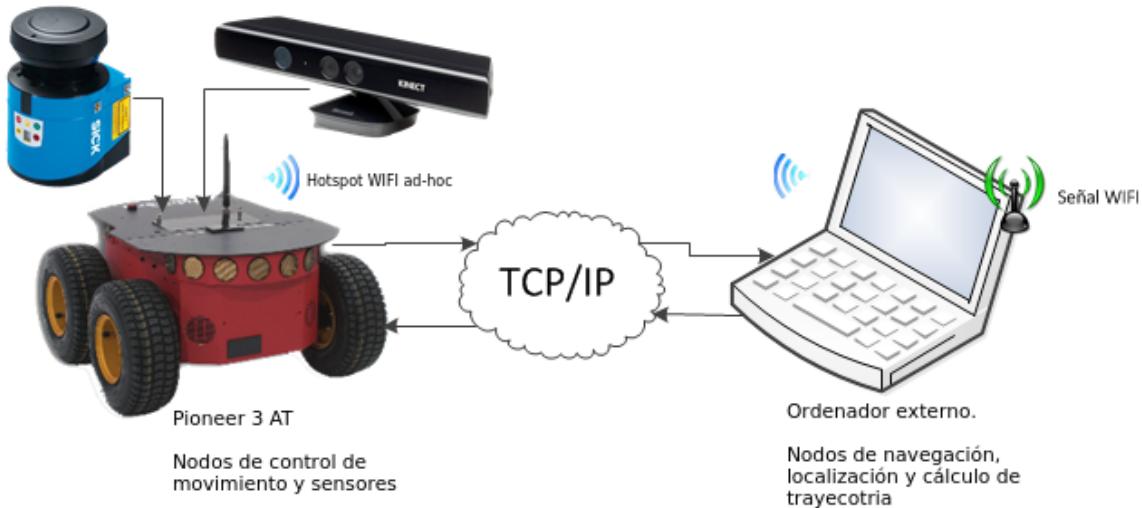


Figura 7.4: Esquema de la segunda configuración del sistema. Basado en \*\*REFERENCIA ALEN-JANDRO\*\*.

Gracias a la filosofía de ejecución distribuida de nodos de ROS, ejecutar nodos en máquinas diferentes y compartir la información entre procesos es una tarea sencilla. Para configurarlo, tan solo es necesario indicar a las máquinas la IP del nodo master. De esta forma, los nodos que se ejecuten en cada una de las máquinas tratarán de realizar la comunicación a través de IPs dentro de la misma red.

Este ajuste fue puesto en marcha utilizando un ordenador portátil con suficiente capacidad de procesamiento y memoria como para ejecutar la navegación, sin embargo aparecieron algunos inconvenientes. El primero de ellos fueron las direcciones IP en el ordenador interno del Pioneer.

- **Problemas con el sensor Láser: LM1xx**

Debido a que el sensor láser se conecta vía Ethernet a este ordenador, el nodo LMS1xx debe obtener información a través de la IP del láser y enviarla a través del adaptador Wifi a la IP del nodo master. El problema residía en que el nodo se saturaba al tener que lidiar con ambas interfaces de conexión y provocaba su detención.

Tras varias consultas a Clearpath Robotics a través de su repositorio de GitHub y preguntas en el foro ROS Answers \*\*Enlaces de referencia\*\*, la solución no estaba implementada en código y lo más inmediato era hacer un bridge en el ordenador del Pioneer 3 AT entre la interfaz Ethernet y la Wifi.

Los resultados de esta solución no fueron satisfactorios ya que el comportamiento era el mismo: el nodo LMS1xx se saturaba e interrumpía a los pocos minutos de su ejecución.

Tratando de resolver este problema, se hicieron pruebas generando una red Wifi Ad-hoc desde el ordenador del robot, a la cual se conectaba el ordenador externo. Los resultados fueron buenos siempre y cuando las IPs del nodo master y del sensor Láser se encontraran en el mismo subrango **\*\*revisar nomenclatura\*\***.

En la implementación final del sistema esta solución se sigue utilizando para conectarse desde un ordenador externo al ordenador que incorpora el robot Pioneer.

Una vez se pudo conectar el ordenador externo, la ejecución del nodo de navegación era la correcta y las consignas de movimiento se enviaban correctamente al robot, pudiendo realizar las primeras pruebas de navegación autónoma.

**\*\*Imagen primeras navegaciones\*\***

Sin embargo en ocasiones la recepción y envío de datos era demasiado alta y esto provocaba que existiese mucho retraso en la comunicación, haciendo que el robot reaccionase tarde para esquivar los obstáculos y el control del robot fuera impracticable.

### Tercera configuración del sistema

Finalmente se optó por montar un ordenador más potente en el robot, para lo cual se utilizó un portátil externo al que se conectaba tanto el sensor Kinect como el sensor Láser y se utilizaba un convertidor de puerto USB a puerto serie RS-232 para controlar el movimiento del robot y leer la odometría. El ordenador del robot quedaba sustituido y así se mantuvo hasta la versión final.

**\*\*Imagen del robot con el portátil\*\***

Llegados a este punto, ahora sí disponíamos de la plataforma robótica completa sobre la que trabajar en la navegación del robot. Las primeras pruebas fueron satisfactorias, logrando correr todos los nodos en el portátil, el cual se incorporó de manera provisional al robot por medio de unos agarres realizados con una impresora 3D.

**\*\*Imagen de los agarres\*\***

#### 7.1.5 Segunda configuración hardware

La segunda configuración hardware vino dada tras las pruebas satisfactorias con el ordenador portátil como encargado de la ejecución del sistema ROS. Debido a ello se

optó por utilizar el ordenador compacto Intel NUC de manera dedicada en el robot, sustituyendo al portátil, dejando más espacio para colocar los sensores y hacer un sistema más integrado.

Una de las principales desventajas con las que contaba la primera configuración hardware era la posición tan adelantada del sensor Kinect, ya que debido a sus características, si un objeto se sitúa a medio metro o menos delante de la cámara infrarroja, las proyecciones de su emisor de infrarrojos no pueden ser captadas y por tanto obtenemos una nube de puntos vacía (la cámara Kinect se queda "ciega"). Es por tanto que esta nueva configuración hardware del robot vino motivada por el hecho de retrasar la posición de la cámara y obtener cierta distancia de margen para evitar el efecto anterior.

Tras varias pruebas en el simulador Gazebo (Sección 8.2) cambiando la posición del sensor Kinect, el ordenador Intel NUC y del sensor láser SICK, se aprovechó todo el área del robot de manera que ningún elemento estorbase a los haces de infrarrojos de los dos sensores. El sensor Kinect se situó más retrasado, hacia la mitad del robot, dejando tan solo sitio en la parte trasera para incorporar el resto de elementos. El sensor láser se situó en la parte trasera mirando hacia atrás ya que gracias a su amplio rango de 270°, podíamos obtener lecturas de prácticamente todo el perímetro del robot.

\*\*Imagen de la disposición del robot en freecad y pruebas reales\*\*.

El ordenador Intel NUC se situó al lado izquierdo del sensor láser dejando el lado derecho para situar el cableado de los sensores y del ordenador.

Finalmente, para dejar todo el sistema integrado, se diseñaron unos paneles laterales, un sistema de varillas roscadas atornilladas a la base del robot y un panel superior para esconder el cableado interno. Se diseñó un modelo en 3D en el simulador Gazebo para comprobar su correcta compatibilidad con la disposición de los sensores.

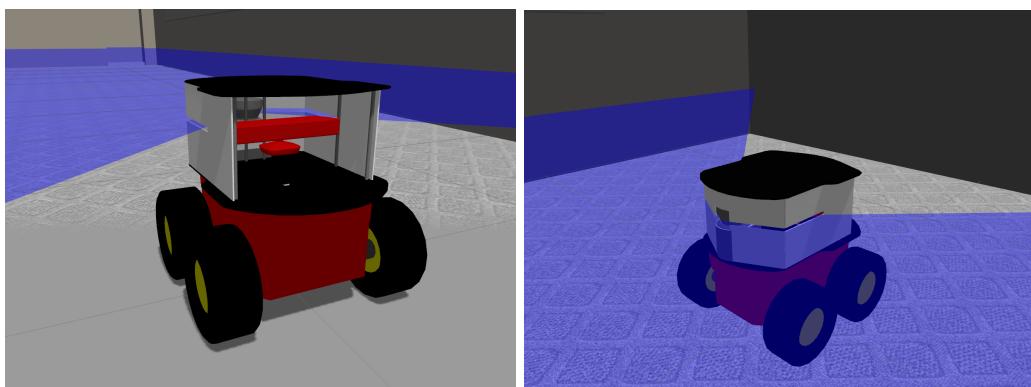


Figura 7.5: Modelo 3D de la segunda configuración hardware hecho en Gazebo

Tras comprobar que el diseño funcionaba y cumplía las características necesarias se mecanizó la parte superior del robot para anclar el sensor láser y las varillas roscadas, como se ve en la figura TAL

\*\*figura de robot con varillas roscadas y láser\*\*

Para evitar las vibraciones y que el sensor Kinect permaneciese inmóvil y situado a la altura necesaria, se diseñaron e imprimieron en 3D unas piezas de soporte (figura TAL)

\*\*figura de las piezas y figura de su disposición\*\*

Los paneles laterales y el panel superior se mecanizaron en metacrilato de 3 y 4 milímetros respectivamente con una fresadora y se sujetaron al robot mediante remaches, tornillos y escuadras en forma de L, algunas de las cuales fueron diseñadas en 3D.

\*\*Imagen de los paneles laterales, remaches, escuadra 3D\*\*

El panel de control del robot quedó dividido en dos partes, la destinada al ordenador de abordo y la destinada al microcontrolador del robot. Ambas partes fueron resituadas en los laterales del robot.

\*\*imágenes de los paneles de control laterales\*\*

A continuación se muestran algunas imágenes del robot completo rediseñado.

\*\*Imágenes del robot\*\*

### **Intel NUC**

El ordenador compacto Intel NUC se eligió como unidad de procesamiento y ejecución del sistema ROS debido a sus altas capacidades de procesador y memoria y a su bajo consumo. Éste fue alimentado a 12 voltios de la misma forma que el sensor Kinect y se fijó al chasis del robot mediante tiras del velcro adhesivo.

A él se conectaron el vía puerto USB el sensor Kinect y el cable convertidor de control del robot, el jack de auriculares al altavoz frontal del robot y vía ethernet el sensor láser.

### **Configuración del sistema final**

La configuración final del sistema quedó definida como se indica en la figura 7.6. El ordenador Intel NUC se configuró para que generase en su arranque una red Wifi ad-hoc propia, dentro del mismo subrango \*\*revisar nomenclatura\*\* que las direcciones IP del sensor láser para evitar el malfuncionamiento del mismo tal y como se ha indicado anteriormente.

El suministro de energía a todos los elementos que incorpora el robot se realiza a través de la placa de alimentación del robot, la cual se conecta al pack de 3 baterías alojado en su interior.

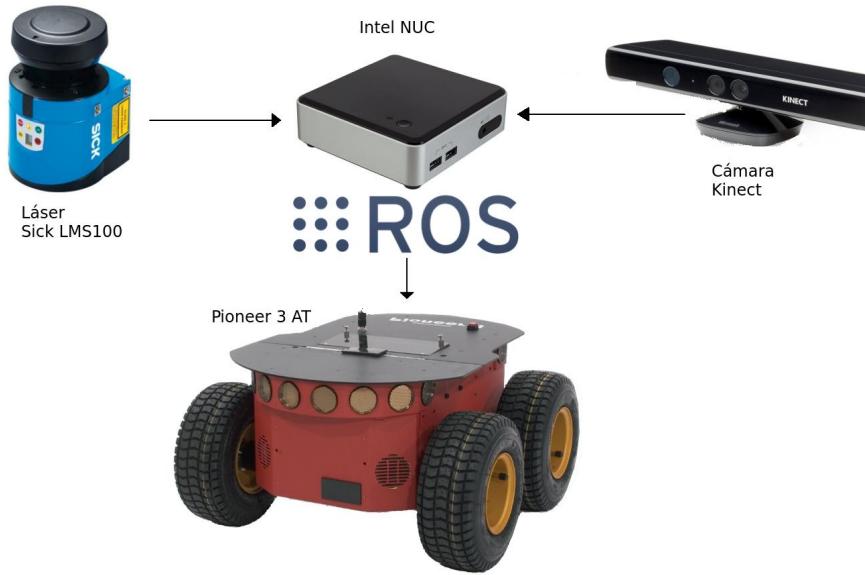


Figura 7.6: Esquema del sistema robótico final utilizado en el proyecto.

## 7.2 Navegación

La navegación es el propósito central de este proyecto. Como ya se ha indicado anteriormente la navegación se centra en el Navigation Stack de ROS.

En el capítulo 6 vimos una descripción de cada una de sus partes y unos ajustes generales para nuestro robot. En este apartado veremos unos ajustes más específicos y elaborados que son los ajustes finales para la navegación del robot.

El robot ha sido adaptado y configurado de manera óptima basándonos en las características de la navegación en dos dimensiones que ofrece ROS, como hemos visto en el apartado anterior.

### 7.2.1 Configuración de los costmaps y los sensores

La navegación del robot se basa en la información recogida en los llamados "costmaps".

Para realizar la navegación disponemos de dos costmaps, el llamado "global\_costmap" y el llamado "local\_costmap". El primero sirve de base al planificador de trayectoria global y el segundo lo hace para el planificador de trayectoria local.

Su comportamiento y posibilidades de configuración son las mismas con la excepción de que el mapa global toma información del mapa que se cargue para realizar navegación (en caso de utilizar uno) además de la información aportada por los sensores.

La misión de los mapas de coste es la tomar la información de los sensores e incorporarla a un mapa de celdillas y marcar o borrar los obstáculos pertinentes.

A partir de esa información se calcula un gradiente de coste que asigna un valor a cada una de ellas.

Los mapas de coste tal y como están implementados en ROS integran la información de los sensores en una misma capa, de tal forma que no existe distinción entre el tipo de información que está tomando un sensor u otro. Esto supone un problema añadido en el caso de este proyecto, ya que se pretendía utilizar la información de los dos sensores: Kinect y láser.

### • La problemática de los dos sensores

El problema consiste en que el sensor Kinect es capaz de tomar información de la posición de los obstáculos a diferente altura pero con un alcance más reducido. Sin embargo, el sensor láser dispone de un alcance mayor, pero no puede detectar obstáculos que queden por encima o por debajo de su haz.

Esto hacía que si se configuraban los mapas de coste con una sola capa de obstáculos, en caso de que el sensor Kinect incorporase un obstáculo al mapa que quedaba por debajo del haz láser, si ese obstáculo dejaba de ser visto por el sensor Kinect pero se encontraba dentro del rango del láser, al quedar por debajo del haz de este último no se detectaba ningún obstáculo y se borraba del mapa.

Esta problemática se producía tanto para el mapa de coste global como para el local.

Esta problemática es bien conocida dentro del mundo de la robótica y se denomina "Fusión sensorial" \*\*referencia\*\* donde una de las técnicas más conocidas es la de fusión mediante Filtro de Kalman \*\*refrencia\*\*.

La solución a esta problemática más adecuada era realizar una composición de los puntos obtenidos por el sensor Láser y el sensor Kinect. Sin embargo, el coste computacional de crear una nueva nube de puntos a partir de dos tipos de datos diferentes a una frecuencia adecuada se antojaba elevado, por lo que la opción más adecuada consistió en utilizar capas de obstáculos diferentes (*costmap\_2d::VoxelLayer*) para cada uno de los sensores.

Así, cada sensor sería capaz de incorporar o borrar obstáculos del mapa solo si eran detectados o no por ese mismo sensor y no por el otro. Si bien es cierto que de esta forma existen duplicidades de los obstáculos al tener que ser incorporados o borrados del mapa por cada sensor de manera independiente, esto nos permite salvar el caso en el que exista un obstáculo y este no se tenga en cuenta por interferencias de los sensores.

### • La problemática de la nube de puntos

Otro de los problemas a solventar fue la manera en la que gestionar los obstáculos del sensor Kinect.

El gran número de puntos disponibles incrementa mucho el cálculo de los obstáculos si se analiza toda la nube directamente, por lo que es mejor recurrir a analizarla por partes.

Para hacer esta operación se probaron nodos de ros que realizaban la conversión del dato tipo PointCloud2 a tipo LaserScan definiendo parámetros como la altura, distancia...

El nodo ***PointCloud\_to\_LaserScan*** \*\*referencia\*\* realiza este filtrado y conversión de tipo de datos a partir del análisis de la nube de puntos basándose en la librería PCL [poi10]. Su funcionamiento es correcto y el coste computacional se reduce, sin embargo no se consigue la frecuencia adecuada para que los datos se actualicen a tiempo a medida que el robot navega.

Otro de los nodos utilizados para este propósito es ***DepthImage\_to\_LaserScan*** \*\*referencia\*\*. En este caso su enfoque es diferente, ya que utiliza los píxeles de la imagen para analizar la nube de puntos de tal modo que solo analiza los puntos correspondientes a un determinado rango de píxeles. Este nodo es mucho más eficiente en el cálculo pero no tiene en cuenta aspectos como la inclinación del sensor o la detección del suelo como obstáculo.

Las pruebas realizadas utilizando este nodo fueron correctas, ya que el procesado de la nube de puntos era más rápido y permitía realizar los cálculos a una frecuencia adecuada. Sin embargo requiere más de una instancia de estos nodos para poder detectar obstáculos bajos a corta (hasta 1.5 metros) y media distancia (hasta unos 3 metros) para que no se produzcan interferencias con el suelo.

De este modo, se crearon 3 instancias diferentes de este nodo: uno para obstáculos situados a una distancia mayor, un segundo para obstáculos a distancias medias, y un tercero para obstáculos a distancias cortas.

```

1 <launch>
2   <node pkg="depthimage_to_laserscan" type="depthimage_to_laserscan" name=""
3     depthimage_to_laserscan_long">
4     <remap from="image" to="/camera/depth/image_raw"/>
5     <remap from="camera_info" to="/camera/depth/camera_info"/>
6     <remap from="scan" to="camera/scan_depth_long"/>
7     <rosparam>
8       scan_height: 10
9       scan_time: 0.167
10      </rosparam>
11    </node>
12  </launch>
```

Código 7.1: Launchfile *DepthImage\_to\_LaserScan* para obstáculos lejanos.

1

Una vez solventados los problemas anteriores el ajuste de ambos costmaps se realizó mediante ensayos prueba error con el propio robot y con su modelo creado en el simulador Gazebo.

La configuración de los mismos se expone a continuación.

De especial interés la configuración de los parámetros de la capa *costmap\_2d::InflationLayer* donde se ajusta el radio de “inflado” de los obstáculos así como un valor de escala en

---

<sup>1</sup> Fuente: *pioneer\_utils/sensors/kinect\_to\_laser\_long.launch*

<sup>2</sup> Fuente: *pioneer\_utils/sensors/kinect\_to\_laser\_long.launch*

<sup>3</sup> Fuente: *pioneer\_utils/sensors/kinect\_to\_laser\_long.launch*

<sup>4</sup> Fuente: *pioneer\_utils/navigation/global\_navigation/global\_costmap\_params.yaml*

```

1 <launch>
2   <node pkg="depthimage_to_laserscan" type="depthimage_to_laserscan" name=""
3     depthimage_to_laserscan_long">
4       <remap from="image" to="/camera/depth/image_raw"/>
5       <remap from="camera_info" to="/camera/depth/camera_info"/>
6       <remap from="scan" to="camera/scan_depth_long"/>
7       <rosparam>
8         scan_height: 10
9         scan_time: 0.167
10        </rosparam>
11      </node>
12    </launch>

```

Código 7.2: Launchfile *DepthImage\_to\_LaserScan* para obstáculos lejanos.

2

```

1 <launch>
2   <node pkg="depthimage_to_laserscan" type="depthimage_to_laserscan" name=""
3     depthimage_to_laserscan_long">
4       <remap from="image" to="/camera/depth/image_raw"/>
5       <remap from="camera_info" to="/camera/depth/camera_info"/>
6       <remap from="scan" to="camera/scan_depth_long"/>
7       <rosparam>
8         scan_height: 10
9         scan_time: 0.167
10        </rosparam>
11      </node>
12    </launch>

```

Código 7.3: Launchfile *DepthImage\_to\_LaserScan* para obstáculos lejanos.

3

```

1 global_costmap:
2   global_frame: /map
3   robot_base_frame: /base_link
4   update_frequency: 2.0
5   publish_frequency: 2.0
6   static_map: true
7   rolling_window: false
8   track_unknown_space: true
9   plugins:
10     - {name: static_layer,           type: "costmap_2d::StaticLayer"}
11     - {name: obstacle_layer_kinect, type: "costmap_2d::VoxelLayer"}
12     - {name: obstacle_layer_laser,  type: "costmap_2d::VoxelLayer"}
13     - {name: inflation_layer,      type: "costmap_2d::InflationLayer"}
14
15   obstacle_layer_kinect:
16     observation_sources: kinect_laser kinect_laser_low kinect_laser_long
17     kinect_laser: {sensor_frame: camera_link, data_type: LaserScan, topic: camera/scan_depth,
18                   marking: true, clearing: true, obstacle_range: 3.0, raytrace_range: 6.5, inf_is_valid:
19                   true}
20     kinect_laser_low: {sensor_frame: camera_link, data_type: LaserScan, topic: camera/
21                        scan_depth_low, marking: true, clearing: true, obstacle_range: 3.0, raytrace_range:
22                        6.5, inf_is_valid: true}
23     kinect_laser_long: {sensor_frame: camera_link, data_type: LaserScan, topic: camera/
24                        scan_depth_long, marking: true, clearing: true, obstacle_range: 3.0, raytrace_range:
25                        6.5, inf_is_valid: true}
26
27   obstacle_layer_laser:
28     observation_sources: sick_lms1xx
29     sick_lms1xx: {sensor_frame: laser, data_type: LaserScan, topic: scan, marking: true,
30                    clearing: true, obstacle_range: 5.0, raytrace_range: 10.5, inf_is_valid: true}
31
32   inflation_layer:
33     inflation_radius: 0.55
34     cost_scaling_factor: 4.0

```

Código 7.4: Configuración del *global\_costmap*.

4

el cálculo del coste de cada celda. Esto determina en gran medida el cálculo de trayectoria global, permitiendo trayectorias más suaves y alejadas de los obstáculos \*\*referencia Imagen\*\*.

#### \*\*IMAGEN GLOBAL COSTMAP\*\*

Para el mapa local la configuración es muy similar y lo más importante es una frecuencia de actualización del mapa mayor y la ausencia de la capa estática.

```

1 local_costmap:
2   global_frame: /odom
3   robot_base_frame: /base_link
4   update_frequency: 10.0
5   publish_frequency: 10.0
6   static_map: false
7   rolling_window: true
8   width: 6.0
9   height: 6.0
10  resolution: 0.05
11  max_obstacle_height: 0.5
12  plugins:
13    - {name: obstacle_layer_laser, type: "costmap_2d::VoxelLayer"}
14    - {name: obstacle_layer_kinect, type: "costmap_2d::VoxelLayer"}
15    - {name: inflation_layer, type: "costmap_2d::InflationLayer"}
16
17  obstacle_layer_kinect:
18    observation_sources: kinect_laser kinect_laser_low kinect_laser_long
19    kinect_laser: {sensor_frame: camera_link, data_type: LaserScan, topic: camera/scan_depth,
20      marking: true, clearing: true, obstacle_range: 9.0, raytrace_range: 9.5, inf_is_valid:
21      false}
22    kinect_laser_low: {sensor_frame: camera_link, data_type: LaserScan, topic: camera/
23      scan_depth_low, marking: true, clearing: true, obstacle_range: 9.0, raytrace_range:
24      9.5, inf_is_valid: false}
25    kinect_laser_long: {sensor_frame: camera_link, data_type: LaserScan, topic: camera/
26      scan_depth_long, marking: true, clearing: true, obstacle_range: 9.0, raytrace_range:
27      9.5, inf_is_valid: false}
28    kinect: {sensor_frame: camera_link, data_type: PointCloud2, topic: camera/depth/points,
29      marking: true, clearing: true, inf_is_valid: true}
30
31  obstacle_layer_laser:
32    observation_sources: sick_lms1xx
33    sick_lms1xx: {sensor_frame: laser, data_type: LaserScan, topic: scan, marking: true,
34      clearing: true, obstacle_range: 10.0, raytrace_range: 12.0, inf_is_valid: true}
35
36  inflation_layer:
37    inflation_radius: 0.55
38    cost_scaling_factor: 4.0

```

Código 7.5: Configuración del *local\_costmap*.

5

### 7.2.2 Configuración de los planificadores de trayectoria

Los planificadores de trayectoria por defecto en ROS utilizan algoritmos como Dijkstra o A\* además de algunos ajustes para el cálculo y parámetros especiales en el caso del planificador de trayectoria local.

---

<sup>5</sup> Fuente: *pioneer\_utils/navigation/common/local\_costmap\_params.yaml*

### 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

### Parámetros del local\_planner

#### 7.2.3 Navegación con mapa

Usualmente cuando hablamos de navegación nos referimos a una navegación basada en un mapa previo que se carga en la memoria del robot.

Los mapas utilizados para la navegación han sido todos creados utilizando el paquete *gmapping* de ROS, utilizando el sensor láser del robot para obtener un rango y precisión mayor (Figura 7.7).

Para realizar una navegación con mapa se utiliza un mapa del tipo anterior cargado en memoria acompañado del ya mencionado `global_costmap` de manera estática.

Esta es la configuración que se ha venido utilizando de manera general y el uso de todos sus elementos queda reflejado en el archivo launch de navegación global

#### 7.2.4 Navegación reactiva

La navegación reactiva es la que se conoce por carecer de un mapa previo cargado en la memoria del robot. En su caso el robot percibe el entorno a medida que

---

<sup>6</sup> Fuente: [pioneer-utils/navigation/global\\_navigation/global\\_navigation\\_p3at.launch](https://github.com/pioneer-utils/navigation/blob/master/global_navigation/global_navigation_p3at.launch)

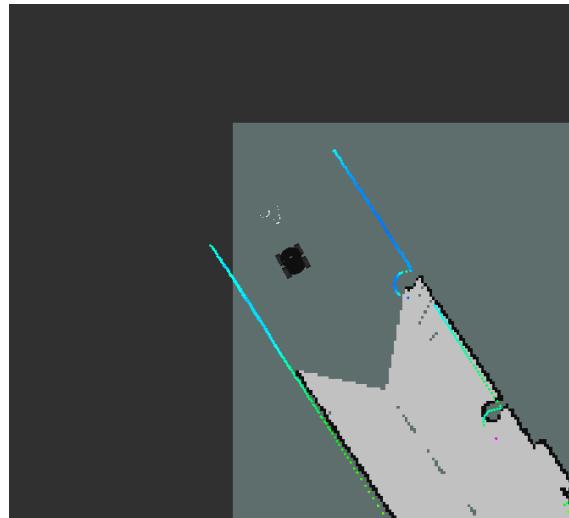


Figura 7.7: Creación de un mapa mediante SLAM.

```

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      <rosparam file="$(find pioneer_utils)/navigation/common/recovery_behaviors.yaml"
24        command="load" />
25      <rosparam>
26        planner_frequency: 1.0
27      </rosparam>
28      <param name="base_global_planner" value="global_planner/GlobalPlanner"/>
29    </node>
30  </launch>

```

Código 7.6: Configuración de navegación global.

navega construyendo un mapa global de manera dinámica al igual que sucede con la configuración del mapa local.

En este caso la configuración del mapa global carece de capa estática, por lo que el mapa se desplaza junto con el robot.

```

1  global_costmap:
2      global_frame: /odom
3      robot_base_frame: /base_link
4      update_frequency: 2.0
5      publish_frequency: 2.0
6      static_map: false
7      rolling_window: true
8      track_unknown_space: true
9      width: 15.0
10     height: 15.0
11     origin_x: 0.0
12     origin_y: 0.0
13
14     plugins:
15         - {name: obstacle_layer_kinect,           type: "costmap_2d::VoxelLayer"}
16         - {name: obstacle_layer_laser,           type: "costmap_2d::VoxelLayer"}
17         - {name: inflation_layer,             type: "costmap_2d::InflationLayer"}
18
19     obstacle_layer_kinect:
20         observation_sources: kinect_laser kinect_laser_low kinect_laser_long
21         kinect_laser: {sensor_frame: camera_link, data_type: LaserScan, topic: camera/scan_depth,
22                         marking: true, clearing: true, obstacle_range: 3.0, raytrace_range: 6.5, inf_is_valid:
23                         true}
24         kinect_laser_low: {sensor_frame: camera_link, data_type: LaserScan, topic: camera/
25                         scan_depth_low, marking: true, clearing: true, obstacle_range: 3.0, raytrace_range:
26                         6.5, inf_is_valid: true}
27         kinect_laser_long: {sensor_frame: camera_link, data_type: LaserScan, topic: camera/
28                         scan_depth_long, marking: true, clearing: true, obstacle_range: 3.0, raytrace_range:
29                         6.5, inf_is_valid: true}
30
31     obstacle_layer_laser:
32         observation_sources: sick_lms1xx
33         sick_lms1xx: {sensor_frame: laser, data_type: LaserScan, topic: scan, marking: true,
34                         clearing: true, obstacle_range: 5.0, raytrace_range: 12.5, inf_is_valid: true}
35
36     inflation_layer:
37         inflation_radius: 0.55
38         cost_scaling_factor: 4.0

```

Código 7.7: Configuración de *global\_costmap* para navegación reactiva.

<sup>7</sup>

La configuración de la navegación carece mapa y por tanto tampoco es preciso el nodo AMCL para situar al robot en el mismo. La orientación y posición del robot queda determinada por su odometría.

## 7.3 Nodo de navegación por puntos

## 7.4 Nodo de ejecución automática de nodos

### 7.4.1 Reconocimiento de comandos de voz

### 7.4.2 Feedback mediante text-to-speech

---

<sup>7</sup> Fuente: *pioneer\_utils/navigation/local\_navigation/global\_costmap\_params.yaml*

<sup>8</sup> Fuente: *pioneer\_utils/navigation/local\_navigation/local\_navigation\_p3at.launch*

```
1 <launch>
2     <node pkg="move_base" type="move_base" respawn="false" name="move_base" output="screen"
3         ">
4             <rosparam file="$(find pioneer_utils)/navigation/common/costmap_common_params_p3at.yaml"
5                 " command="load" ns="global_costmap" />
6             <rosparam file="$(find pioneer_utils)/navigation/common/costmap_common_params_p3at.yaml"
7                 " command="load" ns="local_costmap" />
8             <rosparam file="$(find pioneer_utils)/navigation/common/local_costmap_params.yaml"
9                 command="load" />
10            <rosparam file="$(find pioneer_utils)/navigation/local_navigation/global_costmap_params
11                .yaml" command="load" />
12            <rosparam file="$(find pioneer_utils)/navigation/common/base_local_planner_params.yaml"
13                command="load"/>
14            <rosparam file="$(find pioneer_utils)/navigation/common/global_planner_params.yaml"
15                command="load" />
16            <rosparam
17                planner_frequency: 1.0
18            </rosparam>
19            <param name="base_global_planner" value="global_planner/GlobalPlanner"/>
20        </node>
21    </launch>
```

Código 7.8: Configuración del launchfile para navegación reactiva.



# Capítulo 8

## Pruebas del sistema

En este capítulo se describen las principales pruebas realizadas con el robot de tal modo que sirva para validar el trabajo realizado y exponer a los resultados obtenidos.

Dividimos este capítulo en dos partes, pruebas del robot en simulación y pruebas en el entorno real, centrándonos exclusivamente en la creación de mapas mediante SLAM y los tests de navegación.

### 8.1 Simulación con MobileSim

Una de las ventajas de utilizar el nodo rosaria para controlar el robot y obtener los datos de odometría es que las herramientas ofrecidas por el fabricante siguen pudiendo utilizarse. Este es el caso del simulador MobileSim.

MobileSim es un simulador robótico en dos dimensiones creado para los robots de Adpet Mobile Robots que puede utilizarse con robots controlados mediante la librería Aria.

Su funcionamiento es el siguiente: El simulador abre un puerto de comunicación local en el ordenador y al ejecutar la conexión con el robot de Aria, si el robot no se encuentra se procede a conectarse a dicho puerto de comunicación. Esto nos permite utilizar MobileSim con RosAria de la misma manera y sin cambiar nuestra configuración.

Las pruebas con este simulador sirvieron para comprobar que el nodo rosaria disponía de la funcionalidad adecuada, así como para realizar pruebas con el nodo de teleoperación y dead reckoning (Figura 8.1).

Por otro lado, las limitaciones de este simulador son evidentes. No existe posibilidad de simular otros sensores incorporados al robot, la integración de ROS se realiza con una librería intermedia y la más importante, no puede simularse un entorno en tres dimensiones.

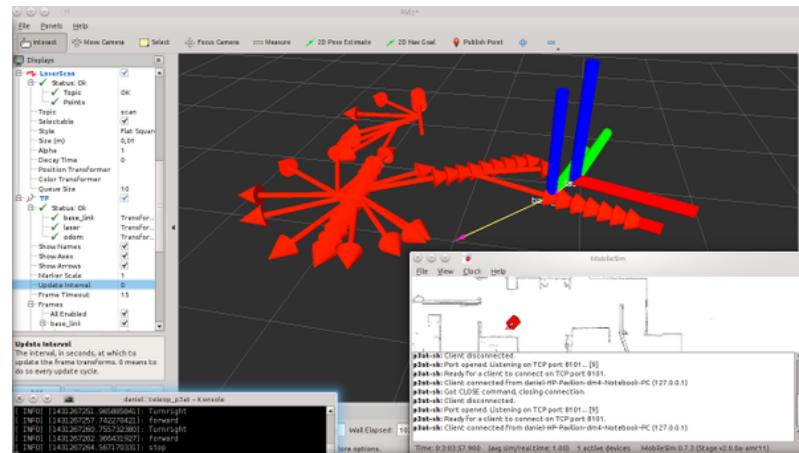


Figura 8.1: MobileSim junto con RViz funcionando con teleoperación.

## 8.2 Simulación con Gazebo

El simulador Gazebo permite realizar configuraciones más elaboradas y su integración con ROS es completa a pesar de que existen ciertas dificultades en su configuración.

En este entorno podemos simular el robot Pioneer 3 AT y dotarle de los sensores necesarios mediante plug-ins desarrollados que simulan los diferentes sensores y actuadores.

### 8.2.1 Modelado del robot en el simulador

Gazebo es capaz de simular robots definidos mediante archivos URDF, donde se indica cada tipo articulación y eslabón del robot. Además existen archivos de propiedades de los materiales y características específicas de gazebo que se definen a parte.

A continuación se hace un breve descripción de los archivos utilizados y su función<sup>1</sup>:

- **pioneer3at.xacro:** Es el archivo principal donde se define el modelo del robot mediante URDF y se llama a los plug-ins de los sensores y actuadores y los demás archivos xacro.
- **materials.xacro:** Se definen propiedades de los materiales de cada parte del robot.
- **pioneer3at\_wheels.xacro:** Macro para definir las ruedas del robot.
- **pioneer3at\_pilars.xacro:** Macro para definir las barras de sujeción del robot.

<sup>1</sup> La configuración de Gazebo puede encontrarse en: *pioneer\_utils/gazebo*

- **pioneer3at.gazebo:** Define funcionalidades adicionales de gazebo. Aquí se definen los plug-ins a utilizar como *skid\_steer\_drive\_controller* para el movimiento del robot o *kinect\_camera\_controller* para simular el sensor Kinect.
- **pioneer3at.world:** Es un archivo específico del simulador que guarda una descripción del mundo virtual. En este caso se trata de un mundo sin objetos.
- **pioneer3at\_gazebo\_world.launch:** Archivo principal para lanzar el simulador. En él se lanza el mundo virtual (configurado para utilizar *willowgarage\_world*), el modelo del robot creado y el nodo *robot\_state\_publisher* que realiza la publicación de transformadas entre los diferentes ejes de coordenadas en base al modelo de nuestro robot.

La definición URDF es la más importante ya que configura los parámetros del robot como el peso de cada parte, el material, el momento de inercia...

A continuación se muestra un fragmento de *pioneer3at.xacro* donde se describe el elemento que conforma la parte superior del robot y su “articulación estática”(fixed) con el chasis:

```

1      <!-- Top -->
2      <link name="top_plate">
3          <inertial>
4              <mass value="0.1"/>
5              <origin xyz="-0.025 0 -0.223"/>
6              <inertia ixx="1.0" ixy="0.0" ixz="0.0"
7                  iyy="1.0" iyz="0.0"
8                  izz="1.0"/>
9          </inertial>
10         <visual name="top_visual">
11             <origin xyz="0 0 0" rpy="0 0 0"/>
12             <geometry name="pioneer_geom">
13                 <mesh filename="package://p2os_urdf/meshes/p3at_meshes/top.stl
14                     "/>
15             </geometry>
16             <material name="TopBlack">
17                 <color rgba="0.038 0.038 0.038 1.0"/>
18             </material>
19         </visual>
20         <collision>
21             <origin xyz="0 0 0" rpy="0 0 0"/>
22             <geometry>
23                 <box size="0 0 0"/>
24             </geometry>
25         </collision>
26     </link>
27
28     <joint name="base_top_joint" type="fixed">
29         <origin xyz="0.003 0 0.274" rpy="0 0 0"/>
30         <parent link="base_link"/>
31         <child link="top_plate"/>
32     </joint>

```

Código 8.1: Fragmento de la configuración URDF del robot.

2

La parte gráfica recae en los elementos ”mesh”<sup>3</sup>: Objetos definidos por mallas en formato .stl generados con un programa de modelado en tres dimensiones. Con las dimensiones de esos archivos también podemos simplificar el modelado de colisión para cada pieza.

<sup>2</sup> Fuente: *pioneer\_utils/gazebo/pioneer3at.xacro*

<sup>3</sup> Los diseños 3D se encuentran en: *pioneer\_utils/gazebo/meshes*

Este archivo con la definición del robot se carga junto con el mundo virtual y nodos auxiliares para simular el robot e iniciar Gazebo. Esto se recoge en el archivo *pioneer3at\_gazebo\_world.launch*: mostrado a continuación.

```

1 <launch>
2
3     <!-- these are the arguments you can pass this launch file, for example paused:=true -->
4     <arg name="paused" default="false"/>
5     <arg name="use_sim_time" default="true"/>
6     <arg name="gui" default="true"/>
7     <arg name="headless" default="false"/>
8     <arg name="debug" default="false"/>
9
10    <!-- We resume the logic in empty_world.launch, changing only the name of the world to be
11        launched -->
12    <include file="$(find gazebo_ros)/launch/willowgarage_world.launch">
13    </include>
14
15    <!-- Load the URDF into the ROS Parameter Server -->
16    <param name="robot_description"
17          command="$(find xacro)/xacro.py $(find pioneer_utils)/gazebo/pioneer3at.xacro" />
18
19    <!-- Run a python script to the send a service call to gazebo_ros to spawn a URDF robot -->
20    <node name="urdf_spawner" pkg="gazebo_ros" type="spawn_model" respawn="false" output="screen"
21        args="-urdf -model pioneer3at -param robot_description"/>
22
23    <!-- publish all the frames to TF -->
24    <node name="robot_state_publisher" pkg="robot_state_publisher" type="state_publisher">
25        <param name="publish_frequency" value="50"/> <!-- Hz -->
26    </node>
27
28    <!-- Launch kinect and depthimage_to_laser node -->
29    <include file="$(find pioneer_utils)/sensors/kinect_to_laser_low.launch"/>
30
31    <!-- Launch kinect and depthimage_to_laser node -->
32    <include file="$(find pioneer_utils)/sensors/kinect_to_laser_long.launch"/>
33
34    <!-- Launch kinect and depthimage_to_laser node -->
35    <include file="$(find pioneer_utils)/sensors/kinect_to_laser.launch"/>
36
37 </launch>
```

Código 8.2: Launchfile para lanzar Gazebo con el modelo del robot y sus sensores.

4

Las pruebas con Gazebo fueron realizadas gracias a la correcta configuración de todos estos archivos para los cuales no existía una documentación unificada debido al cambio de versiones tanto de Gazebo como de ROS. Se tomaron como punto de partida las siguientes referencias \*\*REFERENCIAS\*\*.

---

<sup>4</sup> Fuente: *pioneer\_utils/gazebo/pioneer3at\_gazebo\_world.launch*

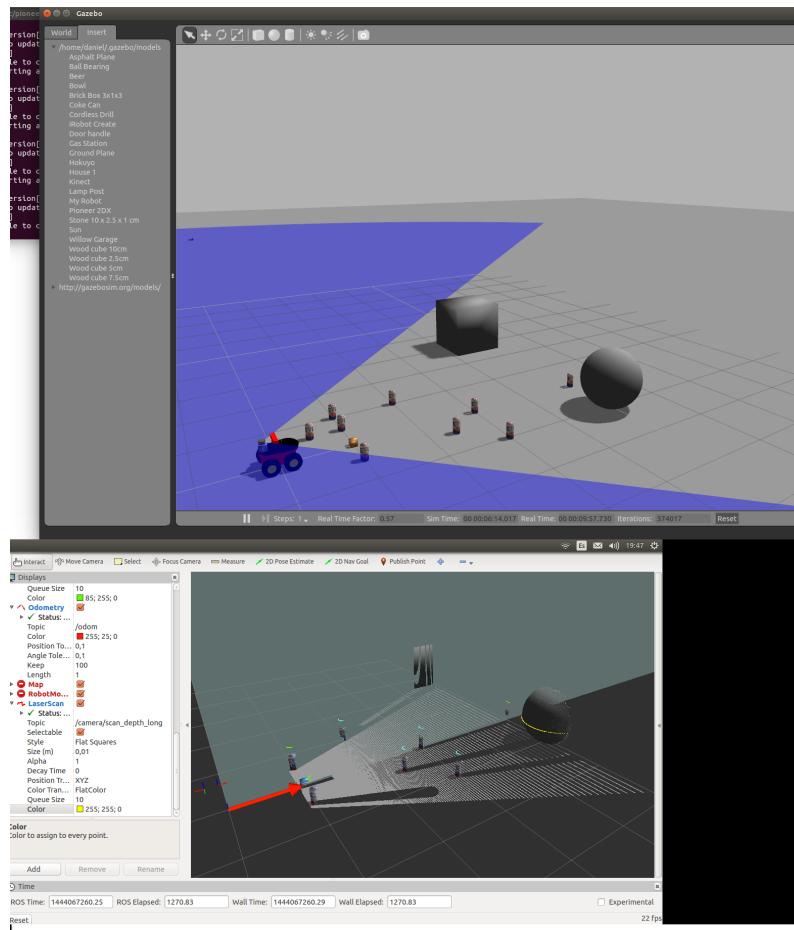


Figura 8.2: Simulación en Gazebo y visualizado de datos en RViz.

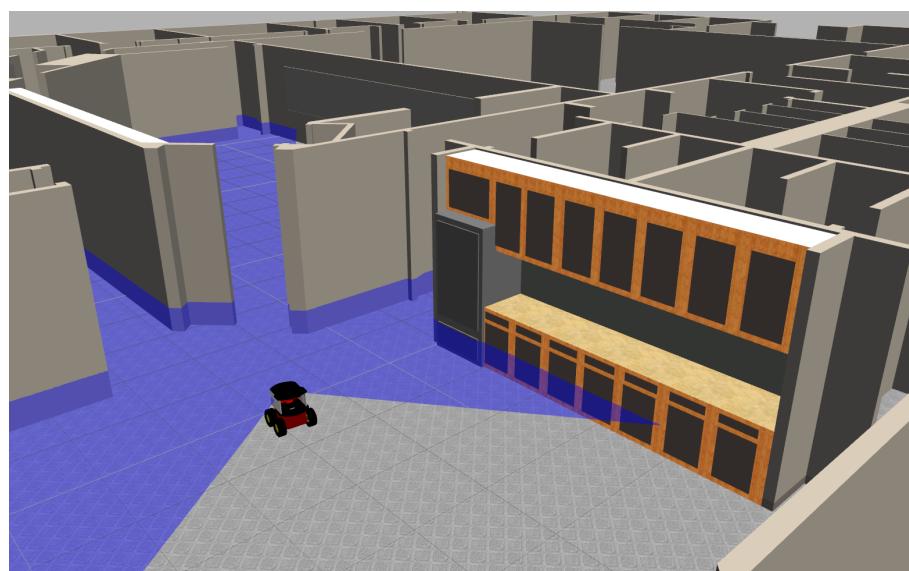


Figura 8.3: Pioneer 3 AT simulado en el mapa Willow Garage.

### 8.2.2 Pruebas simuladas

La ventaja de disponer del simulador Gazebo funcionando con el modelo de nuestro robot permitió que el robot evolucionase más rápido debido a que los cambios se probaban de manera inmediata y que puedieran probarse otras configuraciones del robot, validarlas y finalmente implementarlo en el robot real.

Con la ayuda de Gazebo se han podido probar todas las configuraciones de navegación, el funcionamiento de cada nodo y el intercambio de datos entre ellos.

#### SLAM

Las pruebas de SLAM se realizaron con el ya mencionado paquete *gmapping*, funcionando de la manera habitual.

Para comprobar su validez, se dispuso al robot en el mundo "Willow Garage" que simula un entorno de oficinas, similar al entorno real del laboratorio. El objetivo principal fue comprobar que el algoritmo de mapeado funcionaba correctamente y si se conseguía cerrar el mapa realizando un bucle completo.

Para esta prueba se utilizó el nodo de mapeado y el de teleoperación y se guió al robot por una parte del entorno realizando diversos bucles (Figura 8.4), en los que se observa que no existe distorsión en paredes paralelas y que el mapa no se encuentra solapado.

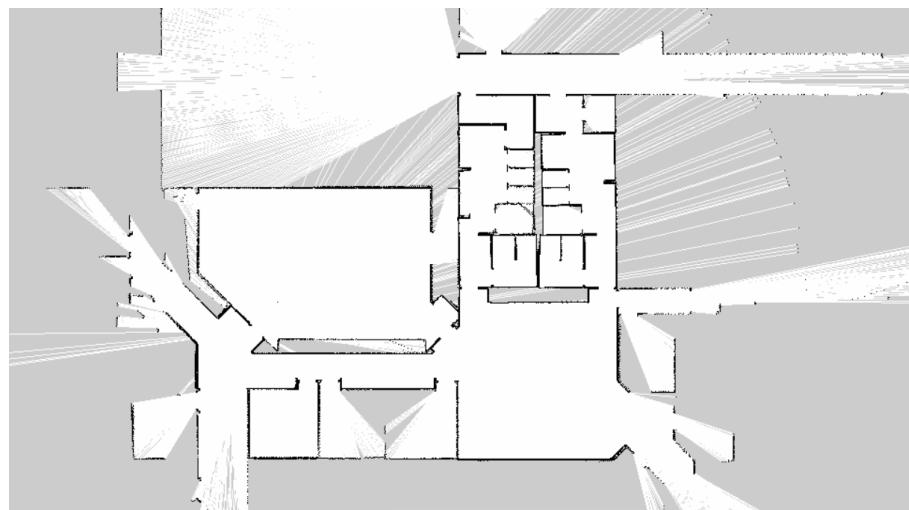


Figura 8.4: Prueba de SLAM en el simulador Gazebo.

Indicar que este fue el mapa base utilizado para la navegación de sucesivas pruebas con Gazebo en las cuales el nodo AMCL situó correctamente al robot en el entorno virtual, por lo que validación del mapa generado es correcta.

### Navegación con mapa

Las navegaciones con mapa en el simulador fueron determinantes para realizar una configuración más elaborada de ambos costmaps debido a los problemas con el borrado de los obstáculos (ver Subsección ).

En un principio se valoró la posibilidad de utilizar el sensor Kinect tan solo para obstáculos locales y el sensor láser para obstáculos globales, sin embargo se descartó ya que el robot trataba de seguir una trayectoria global incorrecta que no contemplaba los obstáculos bajos (Figura), con las complicaciones de control que eso supone para el planificador de trayectoria local.

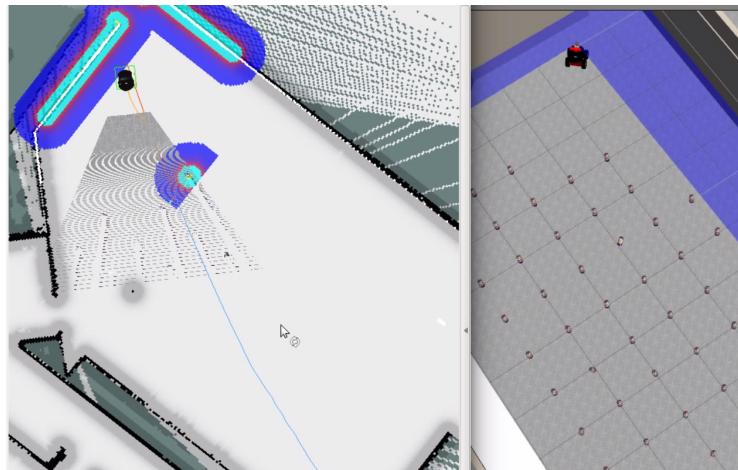


Figura 8.5: Trayectoria global erronea.

Esto determinó, junto con las características especiales del sensor Kinect, que los sensores fueran recolocados para la configuración final del robot y que se añadiesen capas de obstáculos diferenciadas para cada sensor.

Pruebas posteriores con la nueva configuración y obstáculos bajos determinaron la configuración correcta. Además se configuró un cálculo de trayectoria global repetitivo, de tal modo que el planificador global genera trayectorias actualizadas a medida que el robot incorpora los obstáculos al mapa. Esto ayuda al planificador local de trayectoria y en definitiva a que el robot realice menos maniobras.

### Navegación reactiva

La navegación reactiva es una configuración menor de la anterior, por lo que no supuso un desarrollo más elaborado en las pruebas realizadas.

Consistieron en realizar navegación mandando al robot hacia varios puntos de meta y comprobar si se quedaba atascado en algún momento.

Las pruebas determinaron que el robot mostraba el mismo comportamiento en la navegación pero existían limitaciones como la distancia a la que pueden encontrarse



Figura 8.6: Navegación con mapa final.

los puntos de meta (puntos más cercanos al robot debido a la ausencia de mapa) o solapamientos y giros en el mapa global si este era demasiado grande.

Como es normal en una navegación reactiva, el robot se desplaza siguiendo la trayectoria más corta en base a la información que sus sensores captan en ese momento, por lo que suceden casos como en la figura \*TAL\*. A pesar de ello, gracias a la información de los obstáculos que queda retenida en el mapa global, el planificador recalcula.

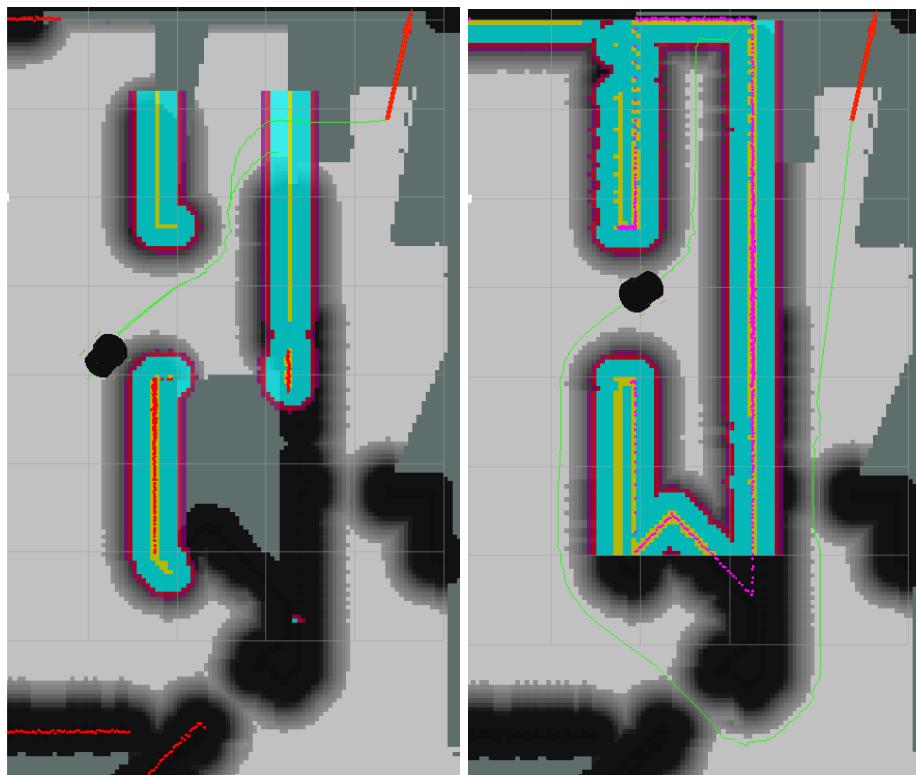


Figura 8.7: Navegación con mapa final.

### Pruebas de resistencia

Para las pruebas de resistencia utilizamos un nodo desarrollado en Python específicamente creado para el caso.

En estas pruebas se consideraron los siguientes aspectos:

- Puntos de meta: Puntos totales repartidos por el mapa que servirán como puntos objetivo a alcanzar por el robot.
- Tiempo total: Tiempo total de la prueba.
- Metas enviadas: Número total de puntos de meta que se han enviado como objetivo al robot durante la prueba.
- Metas alcanzadas: Número de metas a las que ha conseguido llegar el robot.
- Tasa de metas alcanzadas: Tanto por ciento de las metas alcanzadas respecto de las enviadas.
- Distancia total: Distancia total recorrida, considerando obstáculos intermedios y maniobras o replanificación de trayectorias del robot.
- Nº de choques: Número de obstáculos con los que el robot ha chocado (si los hubiera).

Las pruebas de resistencia se realizaron en el modo de navegación con mapa, el entorno virtual fue el mundo "Willow Garage" se utilizaron un total de 9 puntos de meta como objetivo, distribuidos de manera aleatoria (dentro de habitaciones, pasillos, salas grandes...) a distancias largas. Cabe señalar que no existe ningún tipo de obstáculo móvil implicado en estas pruebas.

#### Primera prueba

Prueba inicial sin obstáculos adicionales en el entorno.

Puntos de meta	9
Tiempo total	20 minutos
Metas enviadas	18
Metas alcanzadas	18
Tasa metas alcanzadas	100 %
Distancia total	275.2 metros
Nº de choques	0

Tabla 8.1: Primera prueba de resistencia simulada.

La navegación del robot fue correcta durante toda la prueba.

### Segunda prueba

Segunda prueba más larga y con obstáculos adicionales en el entorno.

Puntos de meta	9
Tiempo total	56 minutos
Metas enviadas	29
Metas alcanzadas	22
Tasa metas alcanzadas	75 %
Distancia total	354.6 metros
Nº de choques	0

Tabla 8.2: Segunda prueba de resistencia simulada.

La prueba finalizó debido a que el robot quedó inmovilizado por encontrarse demasiado cerca de una pared frontal y otra lateral. El incremento de tiempo a pesar de no haber recorrido muchos más metros respecto de la prueba anterior se debe a las esperas por reintento en alcanzar las metas fallidas.

A pesar de todo el robot no colisiona con ningún obstáculo.

### Tercera prueba

Tercera prueba con las mismas características que la anterior. El objetivo de esta prueba era recorrer una distancia total más larga sin colisión.

Puntos de meta	9
Tiempo total	23 minutos
Metas enviadas	18
Metas alcanzadas	15
Tasa metas alcanzadas	83 %
Distancia total	488.8 metros
Nº de choques	0

Tabla 8.3: Tercera prueba de resistencia simulada.

Las metas no alcanzadas se produjeron por un exceso de tiempo en alcanzarlas, saltando el timeout y abortando la meta objetivo.

Esta prueba nos ofrece resultados de que los planificadores responden bien en el cálculo de trayectorias hacia puntos de meta alejados.

## 8.3 Pruebas reales

Las pruebas reales se llevaron a cabo en el robot con su configuración hardware y configuración del sistema final. Todos los nodos se ejecutan en el ordenador integrado Intel NUC y se utiliza un ordenador cliente para visualizar datos o teleoperar el robot en caso necesario.

Las pruebas de navegación con y sin mapa se han omitido debido a que los resultados fueron correctos y no se observaron grandes diferencias respecto a los

resultados obtenidos en el simulador.

### 8.3.1 SLAM

Las pruebas reales de SLAM se realizaron en la planta baja y el aparcamiento de la universidad, ya que era de los pocos lugares donde podía realizar un bucle completo.

Para realizar estas pruebas se utilizó al robot en modo de seguimiento y al mismo se realizó el mapeado. Indicar que no existe interferencias en este modo ya que la persona que sirve de guía se encuentra frente al robot y solo es detectada por el sensor Kinect, de tal modo que el sensor láser es el encargado de mapear el entorno sin perturbaciones.

En la figura 8.8 se muestra el resultado de la primera prueba.

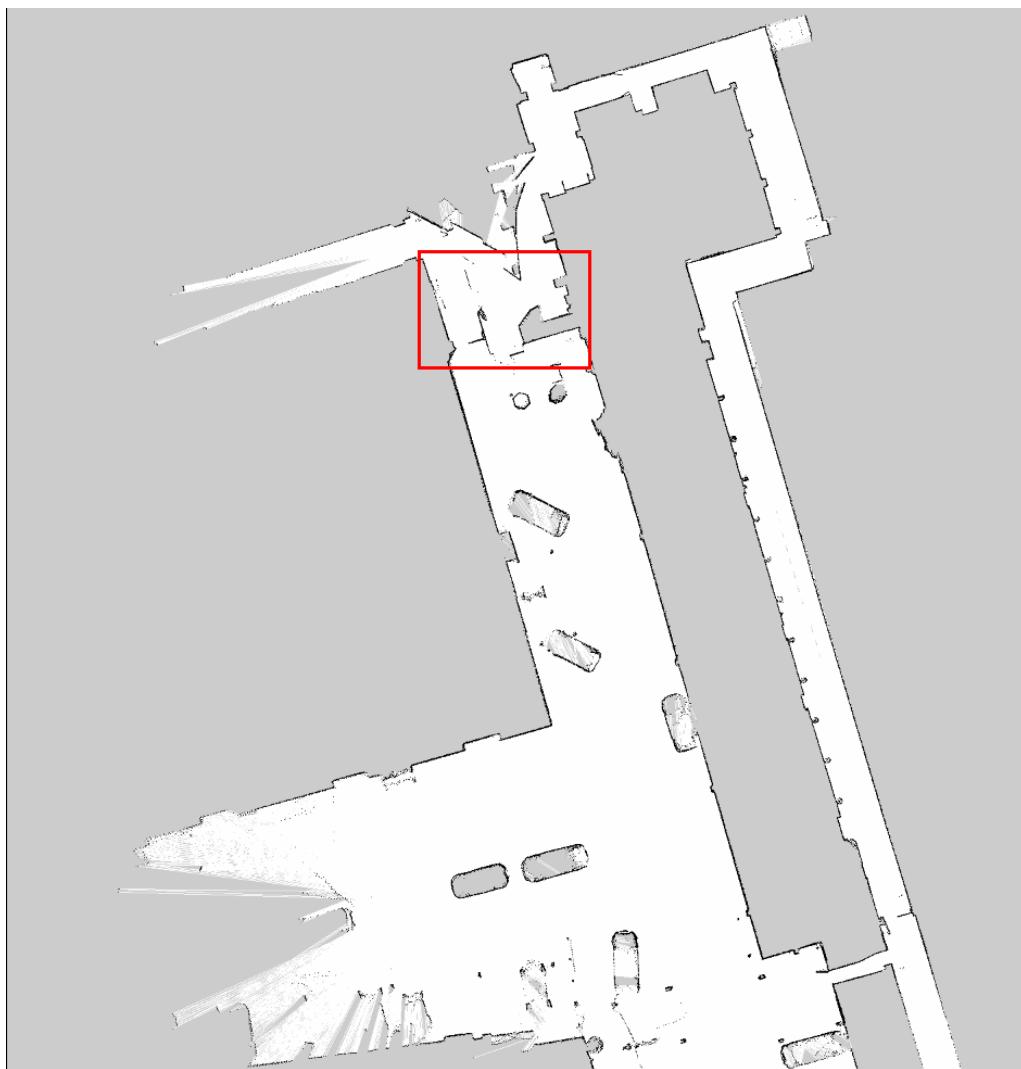


Figura 8.8: Mapa con la primera prueba de SLAM<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Fuente: *pioneer\_utils/maps/slam\_real1.pgm*

El área recuadrada en color rojo indica la zona donde se cerró el bucle y se aprecian ciertas discrepancias en las paredes y un ligero desvío hacia la derecha. Parte de este efecto es debido a que el bucle a cerrar es demasiado grande para esta prueba y a que el robot se desplazó realizando un recorrido sinuoso por el área del parking (se aprecia que se cubrió gran parte del mismo sin ser algo necesario para la prueba), con lo que el error de la odometría pudo haberse visto incrementado.

Debido a estos resultados se decidió realizar una segunda prueba de SLAM en las mismas condiciones pero guiando al robot de una manera más directa a lo largo del bucle (sin giros adicionales).

En la figura 8.9 puede apreciarse el resultado de la segunda prueba con el cierre del bucle en la zona recuadrada en rojo. Esta vez el resultado es mejor, ya que no existen grandes discrepancias y el robot es capaz de situarse sin problemas. Tan solo se aprecia una pared exterior duplicada en ángulo, fruto del cierre del mapa.

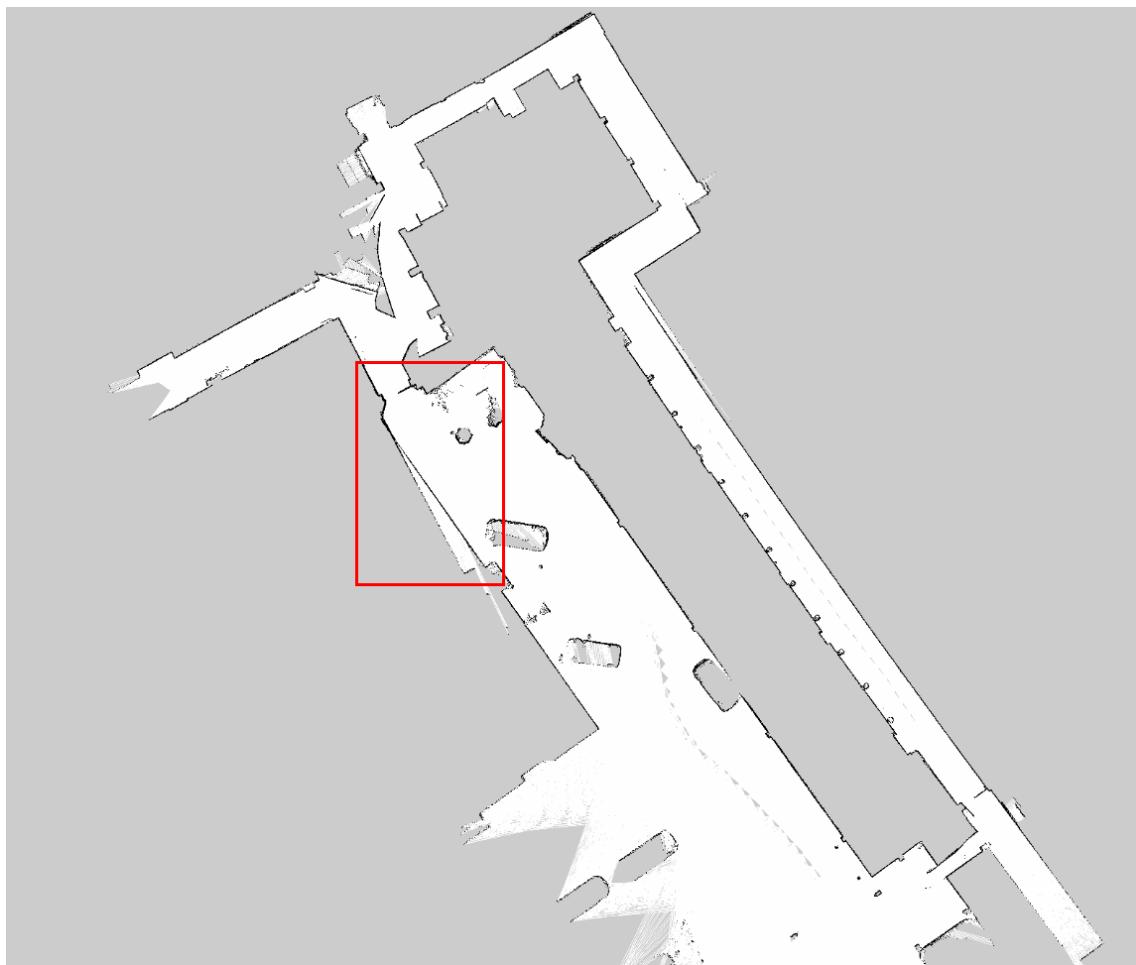


Figura 8.9: Mapa tras la segunda prueba de SLAM<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Fuente: *pioneer\_utils/maps/slam\_real1.pgm*

### 8.3.2 Prueba de resistencia

Las pruebas de resistencia se llevaron a cabo en las instalaciones de la planta baja de la universidad.

Se han llevado a cabo mediante el nodo de resistencia creado para el caso y utilizando diversos puntos dentro del mapa "floor\_zero-map"<sup>7</sup> que abarca las zonas indicadas.

El objetivo primordial de las pruebas es que el robot sea capaz de navegar sin ningún tipo de intervención humana, ya que invalidaría el concepto de robot autónomo.

#### Primera prueba

Primera prueba real desarrollada en el laboratorio con obstáculos y personas en movimiento.

Puntos de meta	7
Tiempo total	44 minutos
Metas enviadas	91
Metas alcanzadas	56
Tasa metas alcanzadas	61 %
Distancia total	-
Nº de choques	0

Tabla 8.4: Primera prueba de resistencia real<sup>8</sup>.

Los resultados de la primera prueba no reflejan una navegación buena del robot, sin embargo esto es debido a la existencia de obstáculos prominentes no incluidos en el mapa del laboratorio que generaban distorsión en AMCL provocando que el robot quedase mal situado en el mapa. Estos obstáculos generaban a su vez un pasillo estrecho a través del cuál el planificador en ocasiones no era capaz de trazar una trayectoria correcta hasta la meta.

A pesar de ello el robot no colisionó con ningún tipo de obstáculo.

#### Segunda prueba

Segunda prueba de mayor recorrido, con obstáculos adicionales en el entorno y personas en movimiento. El objetivo de la prueba era medir la total movilidad del robot en el laboratorio.

La prueba finalizó por falta de batería en el robot, sin embargo no puede considerarse que ese tiempo sea la duración de la misma en navegación con el robot ya que no se encontraba al 100 % (aproximadamente la duración es de 2 horas y media).

Las metas no alcanzadas se produjeron por obstáculos móviles (personas en movimiento) bloqueando el paso del robot (imposible llegar a la meta físicamente).

<sup>7</sup>Fuente: *pioneer\_utils/maps/floor\_zero-map.pgm*

<sup>8</sup>La distancia total recorrida no pudo contabilizarse debido a un error en la configuración del nodo.

Puntos de meta	7
Tiempo total	57 minutos
Metas enviadas	141
Metas alcanzadas	114
Tasa metas alcanzadas	80 %
Distancia total	1119.5 metros
Nº de choques	4

Tabla 8.5: Segunda prueba de resistencia real.

También se produjeron metas abordadas por riesgo de colisión (el robot había quedado situado muy cerca de las patas de una mesa).

Los choques fueron roces leves de las ruedas con obstáculos bajos. Esto es debido a que el planificador ajusta mucho la trayectoria para que el robot pueda navegar por lugares estrechos.

### 8.3.3 Aspectos de la navegación

Tras las pruebas realizadas, analizando los resultados y observando el comportamiento general de todo el sistema robótico podemos decir que existen algunas limitaciones en la navegación y aspectos que no se tienen en cuenta por las características del robot.

- **En cuanto a la navegación:**

Existen limitaciones en cuanto a rampas, ya que este modo de navegación no tiene en cuenta la inclinación del robot para saber si este se encuentra desplazándose por un plano inclinado. Por otro lado tampoco es posible distinguir cambios por debajo del plano de navegación como agujeros, escalones... Estos dos aspectos se deben principalmente a que la navegación se realiza puramente en dos dimensiones.

No obstante, el sistema sí es capaz de absorber pequeñas rampas en las que los sensores no reciban excesivas interferencias con el cambio de plano y siempre que el robot no realice muchos giros para no comprometer la localización debido a una mala lectura de la odometría.

- **En cuanto a las características del robot:**

Ciertos obstáculos bajos no son detectados por los sensores debido a que el robot es capaz de superarlos sin problemas, es por ello que no se ha incidido en detectarlos.

Obstáculos de materiales transparentes, como puertas de cristal, no son detectadas por ninguno de los dos sensores debido a su naturaleza infrarroja, por tanto se definen este tipo de obstáculos como caso límite para el sistema robótico.

## **Capítulo 9**

# **Conclusiones**

Se presentan a continuación las conclusiones...

### **9.1 Conclusión sobre la metodología**

### **9.2 Conclusión sobre los resultados**

Una vez finalizado el proyecto...

### **9.3 Desarrollos futuros**

Un posible desarrollo...



# Apéndice



# Apéndice A

## Configuración del sistema

En este apéndice se resume de manera simplificada y muy enfocada la configuración completa del sistema robótico objeto de este trabajo, tanto la parte referente al software de robot como la parte destinada a la configuración hardware de todos los equipos que incorpora.

### A.1 Configuración del espacio de trabajo

En ROS el espacio de trabajo es el lugar donde se realiza el desarrollo software de los paquetes ROS. Este en torno de trabajo es capaz de gestionar la correcta compilación de los nodos.

El espacio de trabajo es el determinado por la herramienta Catkin. A partir de la versión Indigo de ROS, casi todos los paquetes se encuentran adaptados al entorno Catkin y funcionan de manera casi inmediata.

A continuación se describen los pasos para crear un espacio de trabajo Catkin (extraídos del tutorial \*TAL\*) y los pasos para clonar el repositorio de GitHub que aloja el código.

Tras instalar ROS en el equipo deseado, instalamos Catkin:

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

Código A.1: Instalación y workspace de Catkin

A continuación inncluimos el directorio de desarrollo para que sea reconocido por ROS a la hora de buscar dependencias:

```

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

```

Código A.2: Source al setup de nuestro entorno Catkin

### A.1.1 Instalación de las librerías

Para clonar el desarrollo software de este proyecto bastaría con clonar el repositorio de GitHub en el que se ha trabajado en este proyecto [https://github.com/danimtb/pioneer3at\\_ETSIDI](https://github.com/danimtb/pioneer3at_ETSIDI) en nuestra carpeta `~/catkin_ws/src`.

```

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

```

Fuente: [https://github.com/danimtb/pioneer3at\\_ETSIDI](https://github.com/danimtb/pioneer3at_ETSIDI)

Código A.3: Clonado del repositorio *pioneer3at\_ETSIDI*

Sin embargo, es recomendable que si se desea realizar algún desarrollo posterior, se realice un fork en GitHub de este proyecto (Figura \*TAL\*) y se clone el repositorio propio.

**\*\*Captura de pantalla del repo github\*\***

De esta forma podemos guardar los cambios realizados en el repositorio de la persona que hace la modificación, con la intención de incorporar los cambios más tarde al repositorio de desarrollo principal ([https://github.com/danimtb/pioneer3at\\_ETSIDI.git](https://github.com/danimtb/pioneer3at_ETSIDI.git)) mediante Pull Request.

**\*\*figura pull request\*\***

### A.1.2 Gestión de las dependencias

ROS se vale de la información almacenada en la definición de cada uno de sus paquetes en *package.xml* y gestionar algunas dependencias de librerías, para lo cual se sirve de la herramienta rosdep **\*\*referencia\*\*** creada por los desarrolladores de ROS para este propósito.

Para comenzar a utilizarla inicializamos rosdep y actualizamos las dependencias:

```

1 $ sudo rosdep init
2 $ rosdep update

```

Código A.4: Inicializando la herramienta *rosdep*.

A continuación se describen los pasos necesarios para instalar las dependencias de cada sección:

- Navegación: Instalamos los paquetes adicionales para realizar la navegación y mapeo (Capítulo 6).

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

Código A.5: Instalando los paquetes de navegación mapeo.

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

```
1 $ rosdep install rosaria
```

Código A.6: Instalando las dependencias de rosaria.

Para el reconocimiento de los comandos de voz utilizamos el paquete *pocketsphinx*:

- *pocketsphinx*: Instalamos los paquetes de conversión a texto y buscamos las dependencias del paquete.

```
1 $ sudo apt-get install gstreamer0.10-gconf
2 $ rosdep install pocketsphinx
```

Código A.7: Instalando las dependencias de *pocketsphinx* y *gstreamer*.

Es posible que necesitemos las dependencias añadir de *audio\_capture*.

```
1 $ rosdep install audio_capture
```

Código A.8: Instalando las dependencias de *audio\_capture*.

Para el audio (sintetizado de voz) utilizamos el nodo *sound\_play*, por lo que debemos instalar sus dependencias.

- *sound\_play*: Nodo para el sintetizado de voz y reproducir sonidos.

```
1 $ rosdep install sound_play
```

Código A.9: Instalando las dependencias de *sound\_play*.

Una vez disponemos de todos los paquetes y sus respectivas dependencias no debemos olvidarnos de que es necesario compilarlos:

```

1 $ cd ~/catkin_ws
2 $ catkin_make

```

Código A.10: Compilando los paquetes del espacio de trabajo Catkin.

## A.2 Configuración del hardware

En este apéndice se describen algunos ajustes útiles del hardware que se ha utilizado en el proyecto. Esta información es importante para que el sistema robótico desarrollado funcione pero no ha sido incluida dentro del cuerpo de la memoria para no alargar las explicaciones.

En cualquier caso, los procedimientos que a continuación se describen es probable que no sea necesario volver a realizarlos en futuros usos del robot si se mantiene la configuración descrita en este trabajo.

### A.2.1 Calibración de la odometría

La lectura de la posición de los motores del robot se realiza mediante unos encoders situados en el eje de cada motor.

El firmware ARCOS de la placa controladora del robot es actualizable y gestiona los parámetros de calibración de la odometría. Este firmware es actualizable aunque para ello es necesario ponerse en contacto con el fabricante Adept.

Estos parámetros referentes a la odometría son configurables a través de la librería Aria en caso de que no se desee acceder a modificar el firmware del robot.

Los parámetros a considerar son los siguientes:

- TicksMM
- DriftFactor
- RevCount

El nodo de ROS RosAria es capaz de pasar estos parámetros a la placa controladora del robot a través de Aria. Es por ello que podemos configurar dinámicamente estos parámetros del robot cada vez que ejecutamos el nodo. De esta forma evitamos tener que recurrir a Adept y a software específico para modificar los parámetros de ARCOS.

Podemos ver la descripción de estos parámetros en el manual del robot Pioneer 3 AT \*\*referencia\*\*

\*\*IMAGEN DEL MANUAL\*\*

EL procedimiento para calcular cada uno de estos parámetros es el siguiente:

### A.2.2 Ordenador de abordo Intel NUC

#### A.2.3 Sensor Kinect

El sensor Kinect utilizado en el proyecto no dispone de ninguna moficiación específica o modo de funcionamiento especial. Lo referente a su conexiónado ha sido descrito anteriormente en la sección .

Tan solo indicar que puede realizarse una primera toma de contacto a través de la librería *libfreenect*. Una manera rápida de hacerlo es utilizando el gestor de dependencias en C++ biicode **\*\*LINK A BIICODE\*\***, en un sistema operativo Ubuntu siguiendo esta guía **\*\*URL DE BIICODE\*\***.

#### A.2.4 Láser SICK LMS100

El sensor láser LMS100 de la marca Sick es un sensor de ampli rango y largo alcance de tipo industrial.

El fabricante Sick ofrece un software propietario llamado SOPAS Ingineering Tool que permite acceder a la configuración interna del sensor. Este software tan solo puede utilizarse bajo el sistema operativo Microsoft Windows, en concreto ha sido utilizado con Windows 7.

Para instalarlo hay que recurrir a la web del fabricante: **\*\*COMPLETAR\*\***

Para configurar el dispositivo debemos enchufarlo a un puerto Ethernet de un ordenador con el software instalado y proporcionarle alimentación.

El puerto ethernet del ordenador debe estar configurado para obtener una IP automática. Una vez aparezca la red como conectada procedemos a abrir el software SOPAS.

**\*\*Imagen del programa\*\***

Automáticamente detectará el dispositivo pero seguramente no podamos acceder a él debido a una dirección IP errónea.

Para ello abriremos el apartado de configuración y seleccionamos "Asignar IP automáticamente" para que nos asigne el rango adecuado.

**\*\*IMAGEN DE DIRECCION IP\*\***

Si queremos una dirección IP de determinado rango, la mejor manera de proceder es asignar al adaptador de red del ordenador una IP manual del rango deseado y realizar el procedimiento anterior.

A partir de aquí podremos conectarnos al láser con el nodo ROS LMS1xx, configurando una IP fija en el adaptador de red ethernet del ordenador al que lo conectemos,

en este caso el ordenador Intel NUC del robot.

- Dirección IP del láser Sick LMS100:
- Dirección IP del adaptador ethernet del ordenador Intel NUC:

Para más información conviene leer el manual que ofrece Sick [SIC09].

## Apéndice B

# Manual de uso del robot

Este apéndice es una guía de funcionamiento del robot Pioneer 3 AT (Petrois) utilizado e implementado al acabar este proyecto fin de grado.

### B.1 Encendido del robot

El robot se enciende mediante un interruptor situado en su parte trasera, el cual proporciona alimentación general a todos los sistemas.

Adicionalmente es necesario encender el ordenador de abordo Intel NUC mediante su correspondiente botón y el altavoz frontal del robot, para lo cual será necesario tener activada la alimentación auxiliar 2 (AUX 2) en el panel de control.

\*\*DESCRIPCION ENCENDIDO INTEL NUC\*\*

### B.2 Panel de control y parada de emergencia

El panel de control del robot se sitúa en su lateral derecho. Aquí disponemos de una serie de botones, indicadores luminosos, acústicos y conexiones.

A continuación se describe cada uno de los elementos de la figura B.1:

- Pulsador MOTORS: Encargado de habilitar y deshabilitar los motores del robot. La activación de los mismos puede realizarse a través de software. Es necesario pulsar este botón para rearmar el robot cuando se pulsa la seta de emergencia. Si se pulsa una vez más el robot realiza una secuencia de movimientos para comprobar que los motores funcionan correctamente.
- Pulsador RESET: Resetea la placa controladora del robot. El robot queda su estado inicial, tal y como si lo acabásemos de encender. Al pulsar este botón se interrumpe cualquier comunicación con la placa de control.



Figura B.1: Panel de control del robot Petrois.

- Pulsador AUX 1: Habilita la alimentación 1 de la placa de alimentación. No se encuentra en uso.
- Pulsador AUX 2: Habilita la alimentación 2 de la placa de alimentación. Es necesario tenerlo habilitado para que el altavoz frontal del robot funcione.
- LED PWR: Indica el estado de los motores.
- LED STATUS: Indica el estado del robot.
- LED BATERY: Indica el estado de carga de la batería.
- LEDs AUX 1 y AUX 2: Indica si las alimentaciones auxiliares se encuentran activas.
- LEDs RX y TX: Muestran el estado de la comunicación con la placa de control.
- SERIAL: Puerto RS-232 que comunica con la placa de control. Puede ser utilizado para conectar un ordeandor externo directamente la placa de control del robot.

Muchos de los estados anteriores se indican mediante una señal acústica. El reseño de la placa tiene un sonido característico al igual que cuando se pierde la conexión con la placa de control.

El pulsador de emergencia se encuentra en la parte superior del robot y es de vital importancia cuando el robot se mueve de manera descontrolada, choca o está en peligro la integridad de una persona o del propio robot. Es por ello que se recomienda su uso siempre que se encuentre en una situación de las anteriores.

\*\*Imagen de la seta de emergencia\*\*

Al pulsar la seta de emergencia ésta quedará enclavada y el robot dará una señal acústica continua indicando que se encuentra en parada. En este punto los motores quedan deshabilitados y las ruedas del robot pueden moverse libremente.

Para rearmar el robot basta con devolver la seta de emergencia a su posición original girando levemente la misma en el sentido de las flechas. Después es necesario pulsar el botón MOTORS para volver a habilitar los motores.

Cabe indicar que la comunicación de cualquier ordenador con la placa de control del robot no se interrumpe, por lo que al rearmar el robot es posible que éste continúe con los movimientos previos a la parada de emergencia. Asegúrese de que las consignas de movimiento son las correctas y ponga especial precaución cuando realice el rearmado del robot.

Para información más extensa y detallada se recomienda leer la guía de usuario ofrecida por el fabricante **\*\*REFERENCIA\*\***.

### B.3 Conexión mediante un ordenador externo vía Wifi

Al encender el ordenador Intel NUC, éste está configurado para generar directamente un HotSpot Wifi o red Ad-hoc con el nombre "P3AT". Esta red Wifi maneja direcciones IP en el rango 10.42.0.X por lo que es recomendable conectarse a ella con una IP fija que esté dentro de ese rango. SU contraseña es "pioneer3at"

Si se está ejecutando el nodo MASTER en el ordenador Intel NUC, éste estará configurado con la IP 10.42.0.1. Para indicar que queremos conectarnos a un nodo MASTER que se ejecuta en otra máquina debemos editar el script *.bashrc* del ordenador externo, que se ejecuta siempre que abrimos una terminal.

Para editararlo, abrimos la terminal y escribimos:

```
1 $ gedit ~/.bashrc
```

Código B.1: Abriendo el *.bashrc*.

Una vez abierto, al final del archivo añadimos las siguientes dos líneas:

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

Código B.2: Añadiendo las direcciones IP al *.bashrc*.

La primera línea indica la IP fija con la que el ordenador externo se conecta a la red Ad-hoc del Intel NUC. Modificar la IP y escribir la IP del ordenador externo. La dirección IP del MASTER es la dirección que está configurada en el Intel NUC y a la que tratarán de conectarse los nodos cuando se lancen desde el ordenador externo.

Este procedimiento está hecho igual en el Intel NUC pero indicando tan solo que la IP de ese equipo es **ROS\_IP=10.42.0.77**.

## B.4 Acceder a la placa de alimentación

Fusible

## B.5 Cargar las baterías del robot

El robot Pioneer 3 AT dispone de un pack de 3 baterías estancas de plomo-ácido a 12 voltios. Estas baterías suministran alimentación a todos los sistemas del robot y proporcionan una autonomía aproximada de 2 horas de funcionamiento.

El acceso a las baterías se encuentra en el interior del chasis del robot y son accesibles mediante una trampilla trasera.

\*\*IMAGEN\*\*

La carga de las baterías se realiza con el adaptador de la figura \*\*TAL\*\* a través del conector de carga situado junto al interruptor de alimentación general.

\*\*Imagen del cargador\*\*

No ha podido estimarse el tiempo de carga completo, sin embargo el propio cargador incorpora un indicador luminoso que muestra el estado de carga de las baterías.

## B.6 Ordenador interno del Pioneer 3 AT

EL ordenador interno del robot Pioneer 3 AT se encuentra en desuso.

Todos los controles necesarios para acceder al ordenador están disponibles a través del panel situado en el lateral izquierdo del robot.

En este lateral encontramos elementos adicionales como la antena de conexión wifi del ordenador interno y el acceso a los puertos USB y Jacks de micrófono y auriculares.

### **IMPORTANTE:**

Originalmente este ordenador se encontraba conectado a la placa controladora del robot de manera interna a través el puerto COM1 (Accesible en el interior del robot). En su lugar se conectó el convertidor de RS-232 a USB utilizado con el ordeandor Intel NUC, por lo que el ordenador interno se encuentra desconectado del robot.

### **IMPORTANTE:**

Uno de los ventiladores internos situado en la parte frontal derecha del robot fue desconectado debido a su elevado ruido y su encendido permanente. En caso de utilizar el ordenador interno del robot es posible que sea necesario volver a conectarlo. Sin



Figura B.2: Panel del ordenador interno (lateral izquierdo) del robot Petrois.

embargo no existe riesgo de sobrecaentamiento ya que el propio ordenador dispone de un ventilador adicional que se pone en marcha al encenderlo.



## Apéndice C

# Información y documentos ONLINE

En este apéndice se muestra información adicional de todo tipo referente al proyecto y a los materiales utilizados.

### C.1 Repositorio de código

Como se ha descrito anteriormente, el repositorio de código desarrollado en ente proyecto se encuentra almacenado en GitHub. Puede consultarse su linea de tiempos, commits e incluso realizar preguntas en el apartado de Issues.

[https://github.com/danimtb/pioneer3at\\_ETSIDI](https://github.com/danimtb/pioneer3at_ETSIDI)

\*\*Imagen del repositorio\*\*

En él podrá encontrar una pequeña guía *Readme* actualizada con información sobre las utilidades que ofrece el repositorio y en concreto el desarrollo realizado en el paquete *pioneer\_utils*, donde se encuentra la mayoría del desarrollo.

#### C.1.1 Readme

Copia del documento *Readme* del repositorio.

\*\*COPIA\*\*

### C.2 Preguntas en ROS Answers y Github

Pregunta del láser Preguntal del Intel Nuc

Issue cleapath robotics

### C.3 Multimedia

Colección de vídeos:

- Vídeos de este proyecto:
- Vídeos de antiguos proyectos:

Imágenes:

- Imágenes de este proyecto:
- Imágenes de antiguos proyectos:

### C.4 Memoria del trabajo

La memoria del trabajo ha sido desarrollada en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, bajo el editor *TexStudio* en un ordenador con sistema operativo GNU/Linux Ubuntu 14.04 LTS.

Su desarrollo ha sido puesto bajo un controlador de versiones y alojado en el siguiente repositorio de github:

[https://github.com/danimtb/TFG\\_pioneer3at](https://github.com/danimtb/TFG_pioneer3at)

En el propio repositorio se encuentran las figuras utilizadas y los archivos .tex, donde se ha escrito el mismo, y la bibliografía empleada.

El documento PDF compilado de L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X puede consultarse en el siguiente enlace:

[https://github.com/danimtb/TFG\\_pioneer3at/TFG.pdf](https://github.com/danimtb/TFG_pioneer3at/TFG.pdf)

# 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](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].
- [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<sup>+</sup>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<sup>+</sup>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<sup>+</sup>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](http://internacional.elpais.com/internacional/2011/03/12/actualidad/1299884402_850215.html), 2011. [Online, consultado 21 de Junio de 2015].
- [PB15] Jose Pardeiro Blanco. Algoritmos de planificación de trayectorias basados en Fast Marching Square. Master's thesis, 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<sup>+</sup>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](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](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<sup>+</sup>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](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].