



Universidad
de Huelva



Universidad de Huelva

GRADO EN INGENIERÍA INFORMÁTICA

ROBÓTICA

Memoria Teórica

Autor: Alberto Fernández Merchán



Profesores:

Fernando Gómez Bravo

Rafael López de Ahumada Gutiérrez

Asignatura: Robótica

Año: 2022/23

Índice

1. Introducción a la Robótica	3
1.1. Conceptos Generales	3
1.2. Un poco de historia	3
1.3. Modelado de robots	6
1.3.1. Sistemas Estáticos	6
1.3.2. Sistemas Dinámicos	7
1.4. Sistemas de Control	7
1.4.1. Control de Sistemas Dinámicos en Tiempo Continuo/Discreto	7
1.4.2. Control de Sistemas de Eventos Discretos	7
1.4.3. Estructuras de Control	8
1.5. Sistemas Robóticos	8
2. Actuadores y Sensores	9
2.1. Sensores	9
2.1.1. Tipos de Sensores	9
2.1.2. Características	9
2.1.3. Medidas de desplazamiento y giros	9
2.1.4. Sensores inerciales	10
2.1.5. Sensores de tacto, presencia y proximidad	10
2.1.6. Sensores de posicionamiento global	10
2.1.7. Sensores de fuerza-par:	11
2.1.8. Sensores de velocidad	11
2.1.9. Cámaras:	11
2.2. Actuadores	11
2.2.1. Accionadores eléctricos	11
2.2.2. Accionadores Neumáticos e Hidráulicos	12
3. Robots Articulados	13
3.1. Introducción	13
3.1.1. Representación de Posición y Orientación	13
3.1.2. Fundamentos de Robots Móviles	14
3.1.3. Características y Morfología de los robots manipuladores	16
3.2. Problemas Geométricos y Cinemáticos	16
3.2.1. Problema Cinemático Directo	16
3.2.2. Problema Cinemático Inverso	16
3.2.3. Singularidades	17
3.3. Problemas Dinámicos	17
3.3.1. Modelo Dinámico de un Manipulador	17
3.4. Estrategias de Control	18
3.4.1. Arquitectura de un Manipulador Industrial	18
3.4.2. Estrategias de Control Articular	18
3.5. Programación de Manipuladores	19
3.5.1. Niveles de Automatización y Células de Producción	19
3.5.2. El manipulador dentro de la célula de producción	19
3.5.3. Programación de Robots Industriales	20
4. Robótica Móvil	21
4.1. Introducción	21
4.1.1. Preliminares y Conceptos	21
4.1.2. Tipos de Navegación	22
4.2. Características de los robots móviles	22
4.3. Estrategias de Control	23
4.4. Seguimiento de Trayectorias	23
4.4.1. Algoritmo Pure-Pursuit	24

4.5. Algoritmos de Planificación	24
4.6. Introducción a la Localización	24
4.6.1. Control Reactivo	24
4.6.2. Localización	24
4.6.3. Slam	25

Índice de figuras

1. Esquema de los pájaros de Herón [1]	3
2. Esquema del arquero de Herón [2]	3
3. Pato con aparato digestivo de Vaucanson [3]	4
4. El escriba de Jaquet-Droz [4]	4
5. Phil, the radio dog, de Henri Piraux [5]	5
6. El robot Shakey de Stanford [6]	6
7. Ejemplo de función de tiempo continua	7
8. Ejemplo de función de tiempo discreta	7
9. Esquema de Sistemas Robóticos	8
10. Tabla resumen sobre accionadores	12
11. Matriz de Transformación de Traslación	13
12. Matriz de Transformación de Rotación	13
13. Matriz de Transformación RPY	14
14. Matriz de Transformación Euler-ZYX	14
15. Esquema de un Robot Manipulador	14
16. Articulaciones Giratorias	15
17. Articulaciones Prismáticas	15
18. Articulaciones Cilíndricas	16
19. Articulaciones Planas	16
20. Articulaciones Esféricas	16
21. Esquema de un manipulador industrial	18
22. Estrategias de control articular	18
23. Esquema de robots en línea	19
24. Esquema de un robot servido	19
25. Esquema de un robot en centro	20
26. Esquema de un robot con base móvil	20
27. Esquema de un vehículo diferencial	23

1. Introducción a la Robótica

1.1. Conceptos Generales

Un robot es un dispositivo electrónico y, generalmente, mecánico, que realiza tareas automáticamente ya sea por supervisión humana directa, a través de algún programa o siguiendo un conjunto de reglas generales. Los rasgos generales que caracterizan a un robot son los siguientes:

- Es un objeto que se mueve en la realidad.
- Suelen ser antropomórficos.
- Tienen un computador integrado que permite procesar información.
- Es un sistema autónomo que necesita energía para funcionar.
- Poseen **sensores** y **actuadores** que le permiten interactuar con el entorno.

Las tres ramas de estudio que conforman la robótica son:

- La **microelectrónica**: Se encarga del control de procesos.
- La **mecánica**: Se encarga del movimiento del robot.
- La **informática**: Se encarga del procesamiento de la información.

1.2. Un poco de historia

La historia de la robótica se extiende desde la antigua Grecia (800-900 a.C) con el mito de **Talos**, un gigante de bronce que protegía la ciudad de Creta. Podemos considerar a este gigante como la primera idea de autómatas que concibió la humanidad.

El primer automatista de la historia fue **Herón de Alejandría** que construyó, mediante un sistema de poleas, los pájaros de Herón, un sistema robótico donde había pájaros que bebían de una fuente (Figura 1) junto a un arquero que disparaba a un dragón al elevar una manzana (Figura 2).

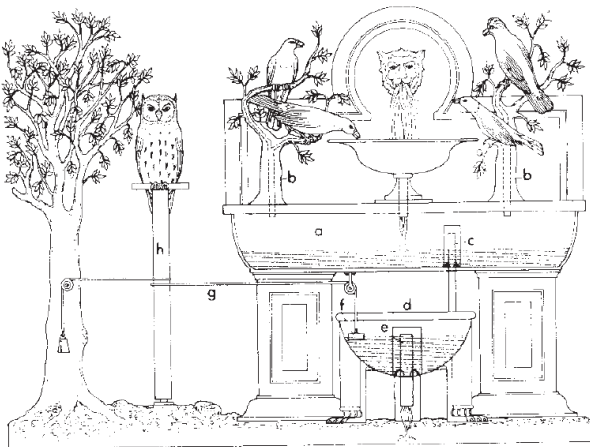


Figura 1: Esquema de los pájaros de Herón [1]

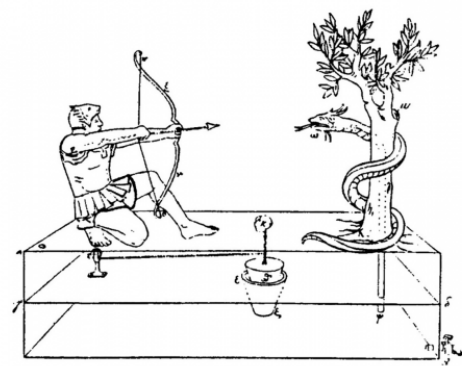


Figura 2: Esquema del arquero de Herón [2]

En la época del renacimiento, **Leonardo Da Vinci** (1452-1519) construye el primer robot móvil y el primer robot humanoide.

Juanelo Turriano (1500-158) fue el relojero de Carlos V y construyó el hombre de palo, un aparato antropomórfico de madera que servía para recaudar limosnas. Tenía la capacidad de mover brazos y piernas.

Jacques Vaucanson (1737-1782) también fue un relojero francés que construyó un autómata llamado *pato con aparato digestivo* (Figura 3) y el *flautista*.

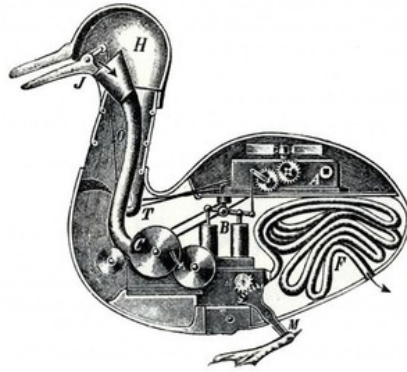


Figura 3: Pato con aparato digestivo de Vaucanson [3]

Pierre Jaquet-Droz (1721-1790) construyó el primer robot programable que era capaz de escribir a mano con una pluma si se le programaba el texto (Figura 4).



Figura 4: El escriba de Jaquet-Droz [4]

Robert Houdin (1805-1871) fue el primer mago en incorporar electricidad a sus trucos de magia.

Con **James Watt** (1736-1819) entra en escena las estructuras de realimentación. Watt introduce el regulador, un mecanismo cuya misión principal es adoptar una posición que controle la mayor o menos acción motora sobre la carga del sistema.

Norbert Wiener (1894-1964) desarrolla los fundamentos de la cibernética construyendo el primer vehículo a motor automático.

Karel Capek (1890-1938) adopta el término **robot** que significaba fuerza del trabajo o servidumbre. En 1920 funda R.U.R (Rossum's Universal Robots).

En 1929, **Henri Piraux** construye *The Radio Dog*, un robot que emitía un ladrido cuando detectaba algún intruso en la casa.

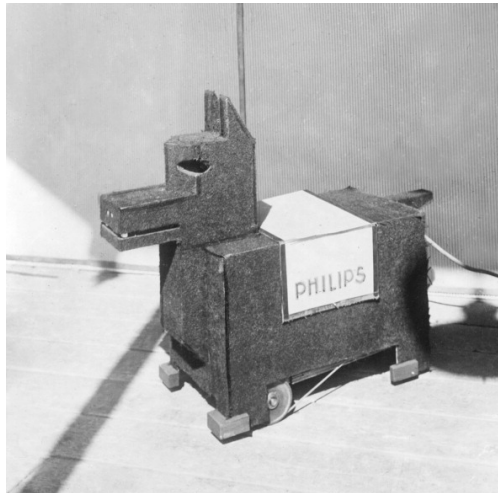


Figura 5: Phil, the radio dog, de Henri Piraux [5]

En 1948, **W. Grey Walter** construye las tortugas Elmer y Elise. Dos robots que eran capaces de percibir el entorno y detectar la escasez de batería para volver a cargarlas.

John Von Neumann (1903-1957) diseña la arquitectura de los ordenadores actuales y, **Konrad Zuse** (1910-1995) termina el primer ordenador controlado por programas funcionales (la Z3) en 1941. Construyó la primera computadora comercializable, la Z4.

Alan Turing (1912-1954) fue el padre de las ciencias de la computación y el precursor de la informática moderna. Proporcionó la formalización de los conceptos de algoritmos y computación. Inventó la **máquina de Turing**.

En 1950, **Claude Elwood Shannon** construyó el primer robot ratón capaz de escapar de un laberinto y aprender el camino. Shannon es el padre de la teoría de la comunicación.

En 1921, Lotfi Zadeh, introduce la teoría de conjuntos difusos (lógica difusa).

En 1954, **George Devol** (1916-2001), concibió la idea de un dispositivo de transferencia programada. Este fue el primer robot programable. En 1959, **Joseph Engelberger** lo construye y se funda la empresa **Unimation** y, posteriormente, **Staubly**.

En la Universidad de Standford se crea al robot **Shakey**, fue el primer robot en ser capaz de razonar acerca de sus propias acciones. Era capaz de identificar objetos mediante análisis de imágenes y obedecer órdenes en lenguaje natural con planificación de tareas.

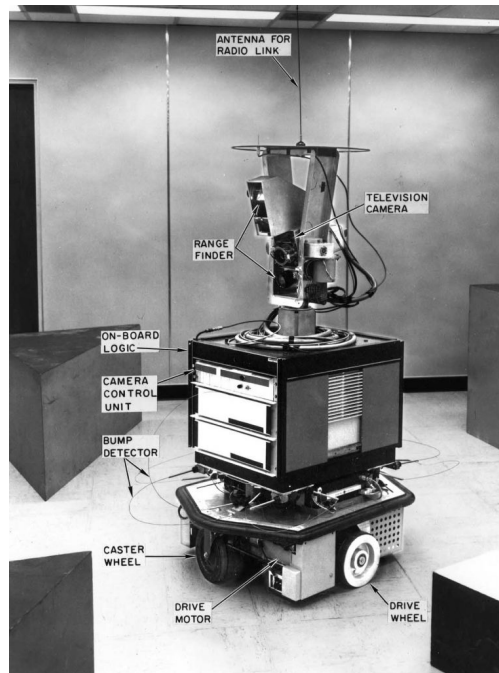


Figura 6: El robot Shakey de Standford [6]

En 1996 se construye el **Sojourner**, un vehículo de seis ruedas diseñado para desplazarse por Marte a un centímetro por segundo.

La empresa Honda construye el robot **ASIMO**, un paso avanzado en los robots móviles.

En 1967, **Sebastian Thrum** construye, para el concurso de *DARPA Challenge*, el primer coche autónomo y el predecesor del coche de *Google Maps*.

1.3. Modelado de robots

Los robots están formados por diferentes características:

- **Capacidad de Movimiento:** Zona de estudio de la cinemática y la dinámica.
 - **Cinemática:** Se encarga del estudio de las velocidades de las distintas partes del robot.
 - **Dinámica:** Se encarga del estudio de la evolución de las velocidades y aceleraciones del robot al interaccionar con el entorno.
- **Control:** Se encarga de que el robot se mueva de manera estable y robusta, es decir, que se mueva a una velocidad determinada, con una dirección concreta y que el sistema sea consistente ante pequeñas variaciones.
- **Capacidades del robot:** Se encarga de resolver problemas específicos.
- **Definición de Tareas:** Se encarga de codificar las tareas, programar al robot y tomar decisiones.,

1.3.1. Sistemas Estáticos

Son sistemas donde el valor de los atributos depende, solamente, del valor de las interacciones externas presentes. Los atributos permanecen constantes si las interacciones externas no cambian.

1.3.2. Sistemas Dinámicos

La mayoría de sistemas reales son sistemas dinámicos. Estos son aquellos en los que el valor de los atributos dependen del valor presente y pasado de las interacciones con el entorno. Los atributos pueden cambiar aún cuando no lo haga el valor de las interacciones.

Existen tres tipos de sistemas:

Sistemas Dinámicos en Tiempo Continuo : En estos sistemas, las magnitudes cambian de forma continua a lo largo del tiempo. Podemos incluir en este tipo de sistemas los sistemas electrónicos analógicos.

Sistemas Dinámicos en Tiempo Discreto : En este tipo de sistemas, la evaluación de las magnitudes es registrada mediante un **sistema de muestreo**. Si el tiempo de muestreo es demasiado grande, el controlado puede volverse inestable.

Sistemas de Eventos Discretos : Las variables que caracterizan estos sistemas son variables binarias. El sistema evoluciona mediante ejemplos.

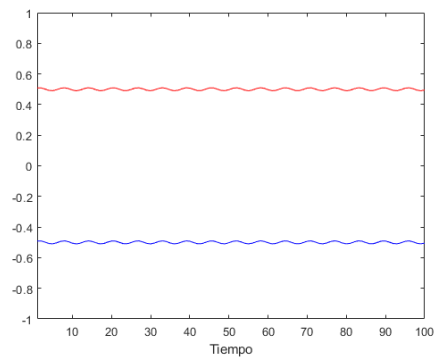


Figura 7: Ejemplo de función de tiempo continua

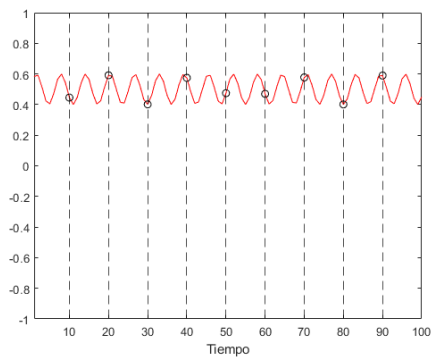


Figura 8: Ejemplo de función de tiempo discreta

Dependiendo del tipo de sistema, utilizaremos una técnica de control u otra.

1.4. Sistemas de Control

1.4.1. Control de Sistemas Dinámicos en Tiempo Continuo/Discreto

Permiten actuar durante un proceso continuo con el fin de que las magnitudes alcancen un cierto valor. A esto se le conoce como **problema de tracking**.

1.4.2. Control de Sistemas de Eventos Discretos

Estos problemas suelen abordarse mediante técnicas de control secuencial. Los sistemas de mando adquieren una estructura secuencial:

- El proceso se divide en una serie de estados (estadíos).
- Cada estado se activa o desactiva de forma secuencial.
- Cada estado activo tiene asociada una serie de acciones.

En este tipo de problemas se utilizan grafos de transición, redes de Petri...

En muchas ocasiones, en el control de procesos se ven involucradas magnitudes de naturaleza continua y magnitudes de naturaleza discreta. En estos casos, es necesario aplicar estrategias de **control híbrido**, que combinan las dos técnicas vistas anteriormente. Este tipo de técnicas híbridas se utilizan para el control de robots y sistemas autónomos.

1.4.3. Estructuras de Control

Existen dos estructuras básicas de control: las estructuras en bucle abierto y las estructuras en bucle cerrado.

Estructuras de Control en bucle Abierto : En este tipo de estructuras, el bloque de control actúa sobre el sistema de acuerdo a unos objetivos previamente establecidos. Estos sistemas se utilizan en pocas ocasiones, ya que, aunque tengamos los cálculos precisos, siempre puede haber perturbaciones que hacen que el comportamiento del sistema no sea el deseado. Lo más probable en estos sistemas es que, en la caja negra, haya un bucle cerrado.

Estructuras de Control en bucle Cerrado : En este tipo de sistemas, el controlador considera la salida, modificando, en función de ella, la acción a realizar sobre el sistema. Este tipo de sistemas presentan una **estructura de realimentación** y pueden ser analizados utilizando técnicas de dinámica de sistemas.

A la hora de programarlo, es necesario tener en cuenta la inercia del movimiento. Para evitar que el giro continúe debido a la inercia, necesitamos un **controlador proporcional**. Existen tres tipos de controladores lineales:

- Controlador Proporcional
- Controlador Proporcional Integral
- Controlador Proporcional Integral Derivativo

1.5. Sistemas Robóticos

Los sistemas robóticos están contruidos sobre un sistema de capas. Se puede resumir con el siguiente esquema.

ESQUEMA GENERAL DE UN SISTEMA ROBÓTICO

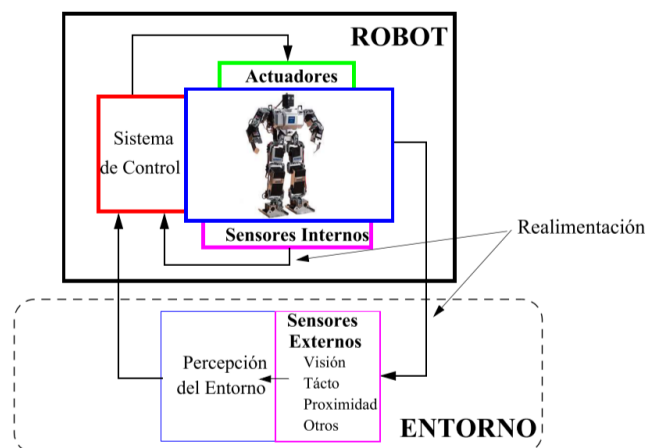


Figura 9: Esquema de Sistemas Robóticos

2. Actuadores y Sensores

2.1. Sensores

2.1.1. Tipos de Sensores

Existen diferentes tipos de sensores:

- **Sensores Propioceptivos:** Se encargan de medir valores internos del robot. Como por ejemplo la velocidad del motor, la carga de la rueda, el estado de la batería...
- **Sensores Exteroceptivos:** Se encargan de medir información del entorno del robot. Como por ejemplo la distancia a objetos, la intensidad lumínica del ambiente...
- **Sensores Pasivos:** Obtienen la energía del ambiente.
- **Sensores Activos:** Emiten su propia energía y miden la reacción. Suelen tener un mejor rendimiento, pero pueden sufrir influencias del entorno.

2.1.2. Características

Las propiedades que caracterizan a los sensores son las siguientes:

- **Rango:** Son los valores mínimos y máximos que son posibles medir.
- **Linealidad:** Es la relación lineal entre la entrada y la salida.
- **Exactitud:** El mayor error esperado entre la señal real y la medida.
- **Histéresis:** La salida del sensor para una determinada entrada varía dependiendo de que la entrada esté aumentando o disminuyendo.
- **Repetitividad:** Es la variación de la salida ante una misma entrada.
- **Resolución:** Es la unidad más pequeña que puede medir el sensor.
- **Saturación:** Una vez pasado un determinado valor de entrada, la salida deja de aumentar para estacionarse en un valor fijo.
- **Zona muerta:** Rango de entrada donde el sensor no es capaz de apreciar la medida.
- **Sensibilidad:** Es la relación entre el cambio de valor en la salida producido por un cambio de valor en la entrada.
- **Ruido:** Nivel de señal que no corresponde con un cambio en la entrada.

2.1.3. Medidas de desplazamiento y giros

Potenciómetros: Conocemos un valor de tensión y medimos como se mueve el émbolo del mecanismo.

Codificadores Rotacionales: Consiste en una luz que atraviesa los huecos de la pantalla y los cuenta. Al circuito de adaptación le llegan pulsos cada vez que recibe luz.

Codificador Absoluto: En todo momento se puede saber la posición de la rueda. Cuando se tratan de muchas más posiciones necesitamos más elementos. Se suelen utilizar en elementos de precisión que giran pocos grados.

Codificador Relativo: Mide como cambia la rueda si gira a la izquierda o a la derecha. Con solo 3 bits se pueden tener más posiciones codificadas (Máquina de Estados). Hay que resetearlo cada vez que se use porque es incremental.

2.1.4. Sensores inerciales

Acelerómetros: Miden las aceleraciones. Se basan en la medida de la fuerza de inercia generada cuando una masa es afectada por un cambio de velocidad. Pueden estar basados en:

- La deformación de un elemento.
- Cambio de características eléctricas.

Giróscopos: Miden la velocidad de rotación. Devuelven una señal proporcional a la velocidad de rotación (efecto Coriolis). Pueden estar basados en principios mecánicos o electrónicos.

Estos sensores se integran en una unidad de medida inercial (IMU).

IMU (Inertial Measurement Unit): Es un dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un aparato utilizando combinaciones de acelerómetros y giróscopos.

El sistema de acelerómetros se encargan de medir la componentes de la velocidad en tres ejes ortogonales, mientras que, por otro lado, el sistema de giróscopos miden la velocidad angular en esos mismos tres ejes.

2.1.5. Sensores de tacto, presencia y proximidad

Tiempo de vuelo: Los sensores ultrasónicos utilizan la velocidad de propagación del sonido. La distancia viajada de un sonido viene dada por: $d = c \cdot t$ donde:

- d : Distancia viajada
- c : Velocidad de propagación de la onda. ($v_{sound} = 0,3 \text{ m/ms}$)
- t : Tiempo de vuelo de la onda.

La calidad de este tipo de sensores depende de:

- Incertidumbres sobre el tiempo exacto de llegada de la señal reflejada.
- La apertura del ángulo del cono de transmisión.
- La interacción con el objetivo.
- La variación de la velocidad de propagación.

Sensores de infrarrojos: La distancia entre el sensor y el objeto se calcula midiendo el intervalo de tiempo entre que se emite el pulso de luz y se recibe el mismo pulso de luz. Por tanto, la distancia a la que se encuentra un objeto se puede medir con: $d = \frac{c \cdot t}{2}$

2.1.6. Sensores de posicionamiento global

Navegación en Exteriores: El GPS funciona mediante una red de 24 satélites en órbita sobre el globo terrestre a 20200km con trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie de La Tierra. El receptor recibe unas señales de los satélites indicando la posición de los mismos y el reloj de cada uno de ellos. En base a estos datos se puede calcular la distancia al satélite.

Utilizando esta información de tres satélites se obtiene la posición mediante la intersección de tres esferas. Sin embargo, la determinación no es precisa. Utilizando un satélite más se puede eliminar el inconveniente de la precisión y puede determinar la posición en 3 dimensiones exacta (latitud, longitud y altitud).

DGPS (Differential GPS): Es un sistema que proporciona a los receptores de GPS correcciones a los datos recibidos de los satélites GPS. La precisión que consigue lograr puede ser dos metros en latitud y longitud y unos 3 metros en altitud.

2.1.7. Sensores de fuerza-par:

Permiten medir las 3 fuerzas y 3 momentos de torsión que actúan en cada momento sobre el punto a estudiar. Se suele usar para medir la medida de esfuerzos en la industria automovilística, en aeronáutica...

2.1.8. Sensores de velocidad

Sensores de efecto Doppler: Se basan en emitir una señal luminosa o sonora y medir el cambio de frecuencia de la señal reflejada en el elemento móvil con la señal emitida.

Dinamo tacométrica: Son sensores de velocidad angular los cuales entregan una tensión continua analógica proporcional a la velocidad angular del objeto que gira.

Tacoalternador: Su funcionamiento es similar al de la dinamo tacométrica, solo que trabaja con energía alterna.

2.1.9. Cámaras:

Permiten acceder a imágenes y realizar acciones en función de lo que esté detectando el robot.

2.2. Actuadores

Los actuadores son elementos que generan las fuerzas o pares necesarios para animar la estructura mecánica del robot. Existen dos tipos de accionadores:

2.2.1. Accionadores eléctricos

Se incluyen en este apartado los solenoides o bobinas que producen el desplazamiento de un núcleo de hierro. En general, los actuadores eléctricos más utilizados son los **motores**.

Motores de Corriente Continua con Escobillas: Utilizan el principio electromagnético para conseguir un giro.

Motores de Corriente Continua sin Escobillas: En estos motores, el circuito por donde pasa la corriente está situado en el estator y el imán permanente está en el rotor. Para conseguir el giro continuado, se realizan varios bobinados que excitan mediante circuitos conmutadores. Este tipo de motores están indicados para aplicaciones con un bajo mantenimiento.

Motores paso a paso: Se puede mover un paso por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde 90° hasta 1.8° . Poseen la propiedad de poder quedar enclavados en una posición o estar totalmente libres. Toda la conmutación debe ser externamente manejada por un controlador.

Servomotores: Llevan un circuito electrónico que permite detectar la posición del motor. Con una señal eléctrica se puede definir un ángulo de giro. Se utiliza para orientar articulaciones en un robot ya que no son buenos para hacerlos rotar completamente.

2.2.2. Accionadores Neumáticos e Hidráulicos

Suelen utilizarse cuando es necesaria una potencia mayor que la que puede suministrar un motor. El principio de funcionamiento es igual. Los accionadores neumáticos permiten trabajar a velocidades más altas mientras que los hidráulicos permiten generar fuerzas mayores.

El mayor problema con los accionadores neumáticos es la compresibilidad del aire, que hace complejo el control continuo de posición. Se suelen utilizar en mecanismos de tipo pinza. Por otro lado, en los accionadores hidráulicos es más sencillo el control continuo de posición, sin embargo, presentan problemas respecto al mantenimiento para prevenir fugas del líquido.

En resumen, podemos decir que:

<i>Accionadores Eléctricos</i> <i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
<ul style="list-style-type: none">•Rápidos y precisos•Posibilidad de aplicar varias técnicas de control•Más económicos•Tiempos de respuesta rápidos	<ul style="list-style-type: none">•Altas velocidades implican bajo par• Necesidad de engranajes•No adecuados en atmósferas inflamables•Sobrecalentamiento en condiciones de parada•Coste alto en motores grandes
<i>Accionadores Neumáticos</i> <i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
<ul style="list-style-type: none">•Más económicos•Alta velocidad de accionamiento•No contaminan	<ul style="list-style-type: none">• Compresibilidad del aire: limita el control y la precisión• Mala precisión con cargas•Necesidad de instalación adicional
<i>Accionadores Hidráulicos</i> <i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
<ul style="list-style-type: none">•Relación potencia-peso muy buena•Muy buen servo control•Trabajo en paro sin problemas•Adecuado en atmósferas inflamables	<ul style="list-style-type: none">• Instalación hidráulica costosa• Necesidad de mantenimiento, fugas de aceite• Problemas de miniaturización•Necesidad de instalación adicional

Figura 10: Tabla resumen sobre accionadores

3. Robots Articulados

3.1. Introducción

3.1.1. Representación de Posición y Orientación

Los algoritmos de posicionamiento global (GPS) no son totalmente exactos a la hora de calcular la posición de un cuerpo. Es por esto que son necesarios otros algoritmos para reducir el error que nos da el mecanismo mencionado anteriormente.

A la hora de calcular la posición de un punto podemos hacerlo en diferentes sistemas de referencias. Sin embargo, es relativamente sencillo transformar las coordenadas desde un sistema de referencia a otro utilizando la multiplicación de las matrices que los definen.

Utilizando **matrices de transformación** podemos obtener las coordenadas del punto P en el sistema de referencia A a partir de las coordenadas de P en el sistema de referencia B:

$${}^A P = {}^A D + {}^A R \cdot {}^B P \quad (1)$$

Existen **transformaciones básicas** que se realizan en referencia a los ejes coordenados:

- *Tras*(Y, a): Movimiento de traslación a posiciones en el eje Y (Figura 11).
- *Rot*(Z, θ): Movimiento de rotación θ radianes sobre el eje Z (Figura 12).

También existen otras matrices de transformación como:

- Los **ángulos ROLL** (γ), **PITCH**(β) y **YAW**(α).
- Los **ángulos de Euler** (Z - Y - X).
- Los **ángulos de Euler** (Z - Y - Z).

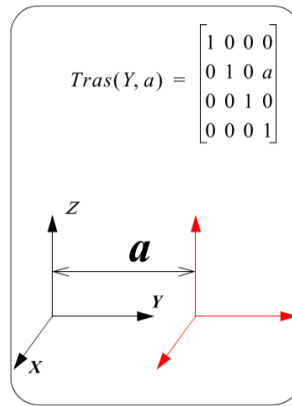


Figura 11: Matriz de Transformación de Traslación

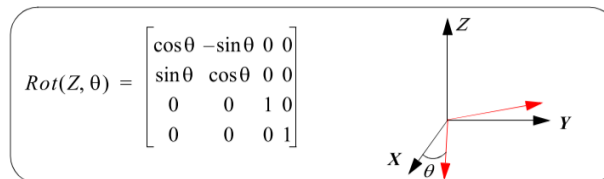


Figura 12: Matriz de Transformación de Rotación

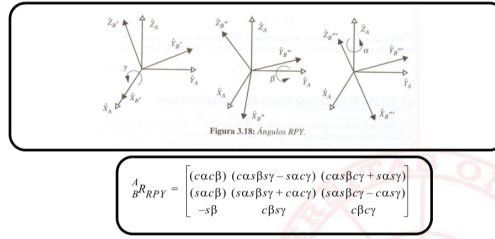


Figura 13: Matriz de Transformación RPY

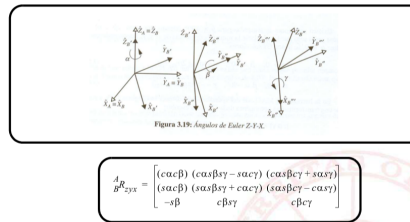


Figura 14: Matriz de Transformación Euler-ZYX

Aunque los ángulos de Euler y los ángulos RPY tengan el mismo resultado final, conceptualmente no son lo mismo. Los ángulos de Euler **premultiplican**, mientras que los ángulos RPY **pos-multiplican**.

3.1.2. Fundamentos de Robots Móviles

Un **robot manipulador** es un mecanismo formado por una cadena de eslabones articulados entre sí. Están destinados al agarre, desplazamiento y manipulación de objetos.

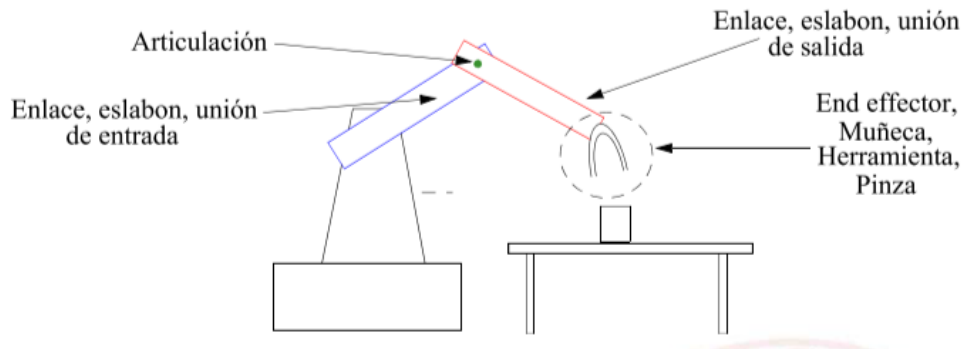


Figura 15: Esquema de un Robot Manipulador

Las principales características de un robot manipulador son:

- **Grados de Libertad:** Son los parámetros que permiten establecer la orientación y posición del elemento final del manipulador.
- **Zonas de trabajo:** Se distinguen distintas zonas: el espacio alcanzable, el área de acceso con orientación de la herramienta final...
- **Capacidad de Carga:** Peso en kilogramos que puede transportar el manipulador.
- **Precisión en la Repetitividad:** Grado de exactitud en la repetición de los movimientos en una tarea programada.
- **Velocidad lineal:** Es la velocidad del movimiento del elemento final.

Las articulaciones del manipulador pueden ser:

■ **Articulaciones Giratorias:**

- **Articulaciones Transversales**
- **Articulaciones Rotacionales**
- **Articulaciones revolución**

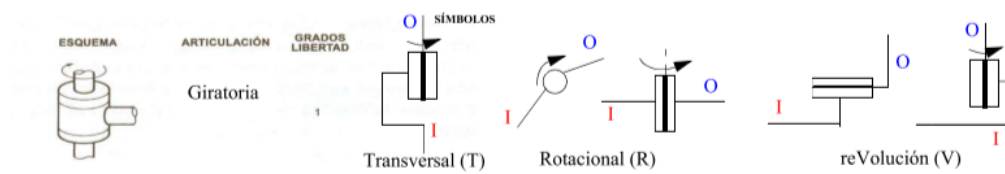


Figura 16: Articulaciones Giratorias

■ **Articulaciones Prismáticas:**

- **Articulaciones Lineales**
- **Articulaciones Ortogonales**

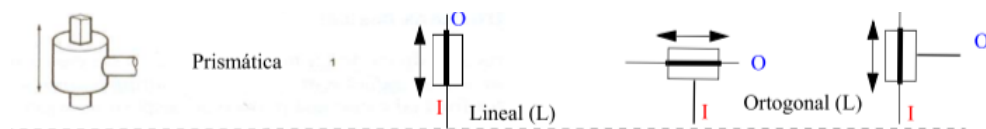


Figura 17: Articulaciones Prismáticas

- **Articulaciones Cilíndricas.**

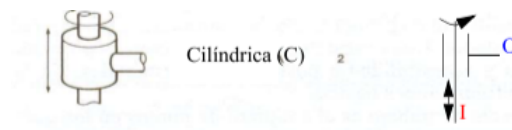


Figura 18: Articulaciones Cilíndricas

- **Articulaciones Planas.**

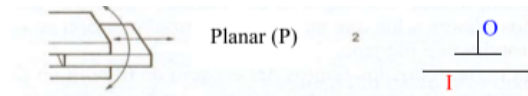


Figura 19: Articulaciones Planas

- **Articulaciones Esféricas.**

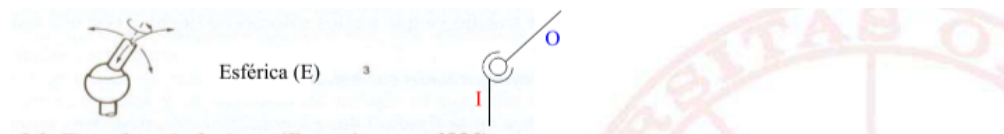


Figura 20: Articulaciones Esféricas

3.1.3. Características y Morfología de los robots manipuladores

Los robots manipuladores tienen 3 partes:

- **Brazo del Manipulador**
- **Muñeca del manipulador**
- **Herramienta (*end effector*)**

Cada articulación del robot manipulador le proporciona **un grado de libertad**. Esto permite configurar libremente la posición en el espacio del robot.

En el plano, un objeto tiene 3 grados de libertad. Para poder moverlo libremente será necesario un manipulador con 3 articulaciones. Sin embargo, en el espacio 3D, necesitamos un manipulador con 6 articulaciones (6 grados de libertad).

3.2. Problemas Geométricos y Cinemáticos

3.2.1. Problema Cinemático Directo

Obtenemos la posición actual del robot mediante las posiciones de las articulaciones y de los brazos. Se utiliza la metodología de **Deravitt-Hatenberg** en la que se comienza a enumerar los enlaces por 0 y las articulaciones por 1.

3.2.2. Problema Cinemático Inverso

Calcula los ángulos para llegar a una posición dada por una matriz de transformación de un sistema de referencia. Se resuelve mediante diferentes técnicas, pero, normalmente, se utiliza una **solución geométrica** (proporciona la ubicación) combinada con la solución de **Pieper** (proporciona la orientación).

3.2.3. Singularidades

El movimiento de un robot se define mediante puntos de paso. Existen tareas que no se pueden describir de esta forma porque hay configuraciones del robot en las que puede quedar bloqueado. Estas configuraciones se denominan **singularidades** y es importante detectarlas a tiempo.

3.3. Problemas Dinámicos

En los sistemas de control en **bucle abierto** existen perturbaciones que hacen que la aceleración deseada no sea igual a la aceleración real. Por este motivo necesitamos añadir un sistema de retroalimentación para **cerrar el bucle**. Estos sistemas de retroalimentación están formados por un **encoder** y una **dinamo** que permiten regular la aceleración del sistema.

3.3.1. Modelo Dinámico de un Manipulador

El objetivo es encontrar una expresión que proporcione los pares y las fuerzas a aplicar a partir de las aceleraciones y velocidades articulares. La expresión que buscamos es la **matriz de pares**:

$$\begin{bmatrix} \tau \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{d}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -l \cdot m \cdot q_1^2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{d}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -l \cdot m \cdot g \cdot \cos(q_1) \\ m \cdot g \cdot \sin(q_1) \end{bmatrix}$$

donde:

- $\begin{bmatrix} \tau \\ F \end{bmatrix}$: es la **matriz de pares**.
- $\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$: es la **matriz de inercia**.
- $\begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{d}_1 \end{bmatrix}$: es la matriz de aceleraciones.
- $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -l \cdot m \cdot q_1^2 & 0 \end{bmatrix}$: es la **matriz centrífuga y de Coriolis**.
- $\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{d}_1 \end{bmatrix}$: es la **matriz de velocidades angulares**.
- $\begin{bmatrix} -l \cdot m \cdot g \cdot \cos(q_1) \\ m \cdot g \cdot \sin(q_1) \end{bmatrix}$: es la **matriz de gravedad**.

Como necesitamos obtener las aceleraciones $\begin{pmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{d}_1 \end{pmatrix}$, despejamos de la expresión anterior y nos queda:

$$\begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{d}_1 \end{bmatrix} = [I]^{-1} \cdot \left(\begin{bmatrix} \tau \\ F \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -l \cdot m \cdot q_1^2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{d}_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -l \cdot m \cdot g \cdot \cos(q_1) \\ m \cdot g \cdot \sin(q_1) \end{bmatrix} \right)$$

3.4. Estrategias de Control

3.4.1. Arquitectura de un Manipulador Industrial

Los robots manipuladores industriales están formados por varias partes:

- **Interfaz de Usuario:** donde el usuario puede controlar el manipulador de forma externa.
- **CPU:** La unidad de control de procesos que está formada por diferentes módulos:
 - **Planificación:** Se encarga de organizar las acciones del manipulador.
 - **Lectura:** Lee el entorno mediante sensores externos como pueden ser cámaras, controlador célula...
 - **Escritura:** Medio de comunicación con el **controlador célula**.
 - **Controlador:** Controlador principal que da órdenes a los servocontroladores encargados de mover cada una de las articulaciones del manipulador.

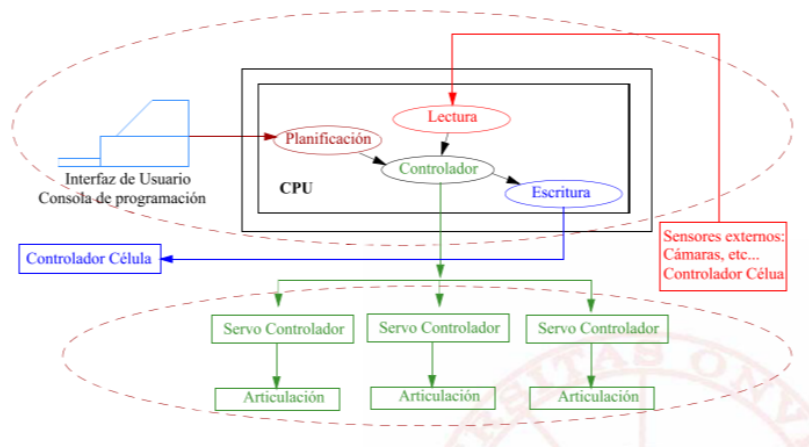


Figura 21: Esquema de un manipulador industrial

3.4.2. Estrategias de Control Articular

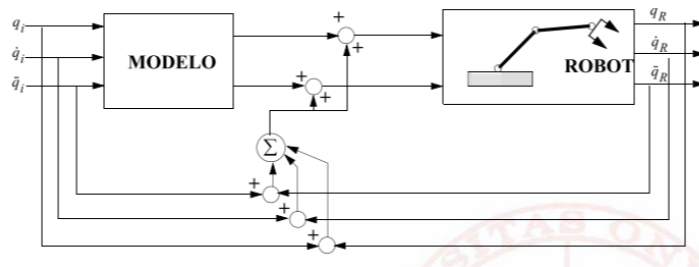


Figura 22: Estrategias de control articular

Al modelo le entran la posición (q_i), la velocidad (\dot{q}_i) y la aceleración (\ddot{q}_i) deseadas y, mediante técnicas de control de bucle cerrado, salen la posición, velocidad y aceleración reales.

3.5. Programación de Manipuladores

3.5.1. Niveles de Automatización y Células de Producción

Existen cinco niveles de automatización:

1. **Nivel de Dispositivo:** Se encarga de los sensores, actuadores y hardware.

En este nivel se implementan los **servocontroladores**. Estos servocontroladores están situados en el interior de la CPU, ya que, en el brazo del manipulador tan solo hay motores y un canal de comunicación.

2. **Nivel de Máquina:** Se encarga de la máquina individual:

En este nivel, el usuario se comunica con el manipulador mediante una **interfaz de usuario** con el protocolo **PROFINET**. Esta interfaz de usuario se llama PLC (Programming Logic Controller).

El PLC se comunica con el robot manipulador mediante un servidor TCP. Si se utilizara un cliente TCP se podría perder información. Es por esto que es común en las industrias utilizar el protocolo **PROFINET** junto con **Ethernet Industrial**.

3. **Nivel de Célula:** Se encarga del grupo de máquinas y célula de producción.
4. **Nivel Planta:** Se encarga de la producción local.
5. **Nivel Empresa:** Se encarga de la gestión corporativa.

3.5.2. El manipulador dentro de la célula de producción

Existen cuatro posiciones del robot manipulador en la célula de producción:

1. **Robots en Línea:**

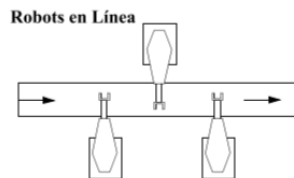


Figura 23: Esquema de robots en línea

2. **Robot Servido:**

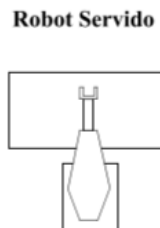


Figura 24: Esquema de un robot servido

3. Robot en Centro:



Figura 25: Esquema de un robot en centro

4. Robots Base Móvil:

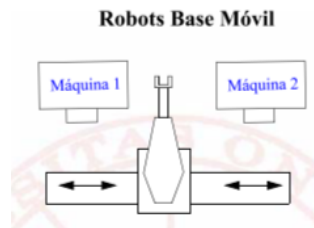


Figura 26: Esquema de un robot con base móvil

3.5.3. Programación de Robots Industriales

Es posible hablar de diferentes niveles de programación:

- **Programación a bajo nivel:** El programa maneja directamente los controladores de las articulaciones accediendo a los valores de los sensores y actuadores de cada articulación.
- **Programación a nivel articular:** El control del movimiento está delegado en elementos incorporados a la arquitectura de control. Reposa en el programa la responsabilidad de planificar las trayectorias en el espacio de trabajo o en el articular.

Es necesario establecer cuáles son los objetivos de manipulación definidos por la tarea y traducir dichos objetivos al espacio articular aplicando las técnicas de cálculo del problema cinemático inverso o del inverso del jacobiano.

- **Programación a nivel superior:** El sistema de control provee de funciones que permiten que el programa se dedique a especificar la tarea a realizar de una forma más o menos abstracta. En estos programas se indica paso por paso las diferentes acciones que el robot manipulador deberá realizar durante su funcionamiento. Existen varios criterios para clasificar los métodos de programación:
 - **Programación por guiado:** Consiste en hacer realizar al robot, o a una maqueta del mismo, la tarea, registrando las configuraciones adoptadas para repetirlas posteriormente de forma automática. Puede ser **pasivo directo**, en el caso de que lo mueva una persona, o **pasivo indirecto**, en el caso en el que el manipulador sea de difícil acceso.
 - **Programación textual:** Este método permite indicar al robot la tarea a realizar a través de un lenguaje de programación específico. Se puede clasificar en tres niveles:
 1. **Nivel Robot:** Las órdenes se refieren a los movimientos a realizar por el robot. Es la que más se suele utilizar actualmente (por ejemplo VAL II y V+).
 2. **Nivel Objeto:** Las órdenes se refieren al estado en que deben ir quedando los objetos.
 3. **Nivel Tarea:** Las órdenes se refieren al objetivo a conseguir.

4. Robótica Móvil

4.1. Introducción

La robótica móvil se basa en la arquitectura GNC (Guidance, Navigation and Control). Esta arquitectura aporta al sistema la configuración y la posición del manipulador.

La robótica móvil se aplica en multitud de campos como la exploración, la manufacturación, cuidados, etc.

Lo primero que hay que definir a la hora de aplicar la arquitectura GNC es la **misión** que debe cumplir el robot. Dicha misión puede ser de mapeo, de búsqueda, de rescate... Las misiones están formadas por **objetivos** y cada objetivo por varias **tareas**. A su vez, estas tareas pueden estar divididas en **sub-objetivos** y **sub-tareas** hasta llegar a una **tarea básica** que es sencilla de programar.

Nosotros nos encargaremos de realizar la tarea de **navegación sin colisiones en entornos desconocidos**, también abarcaremos el **mapeado** de dichos entornos y **planificaremos** las trayectorias en entornos ya conocidos.

4.1.1. Preliminares y Conceptos

Antes que nada, necesitaremos definir algunos conceptos:

- **Configuración:** Es la especificación de la posición de cada uno de los puntos de un objeto arbitrario. Normalmente, la configuración de un sólido rígido se determina mediante la posición y orientación de cierto sistema de referencia solidario al objeto.
- **Robot:** Es un objeto rígido móvil al cual se le asocia un sistema de coordenadas solidario a él.
- **Sistema de Referencia:** Consideramos que el robot ocupa un conjunto compacto del espacio euclídeo determinado por las variables de configuración.
- **Parámetros de Configuración:** Conjunto de valores que describen las relaciones de traslación y orientación entre el sistema de referencia global y los sistemas de referencia locales a los objetos.
- **Variables generalizada o Variables de configuración:** Conjunto mínimo de magnitudes que permiten determinar la configuración del sistema.
- **Espacio de Configuración:** Espacio formado por todas las configuraciones posibles del robot.
- **Espacio de Trabajo:** Subconjunto del espacio de configuración que puede ser ocupado por el robot en unas circunstancias especiales determinadas.
- **Variables de Configuración vs. Variables de Estado:** Las variables de estado representan el menor conjunto posible de magnitudes que permiten describir la situación actual y evolución del sistema. En un modelo dinámico, estas variables no coinciden. Sin embargo, en un sistema cinemático sí lo hacen.
- **Ruta:** Es una secuencia ordenada de puntos del espacio de trabajo que representan metas intermedias entre la configuración inicial y la final.
- **Camino:** Es una función continua que interpola la secuencia de objetivos definidos por una ruta. Solo tiene sentido de hablar de caminos cuando son **admisibles**. Un camino es admisible cuando las configuraciones pueden ser alcanzadas sin colisión y sin violar las restricciones cinemáticas.
- **Trayectoria:** Es un camino con un perfil cinemático asociado.
- **Inversor:** Punto de la trayectoria donde la velocidad lineal cambia de signo.
- **Maniobra:** Concatenación de trayectorias separadas por inversores.
- **Maniobra Restringida:** Trayectoria donde solo cambian los valores de ciertas variables de configuración al final. El resto de variables permanecen iguales a los valores iniciales.

Existen diferentes tipos de restricciones que debemos tener en cuenta a la hora de utilizar un robot móvil:

- **Restricciones Geométricas:** El espacio de trabajo se ve limitado por objetos rígidos o móviles que ocupan una parte del espacio de configuración.
- **Restricciones Cinemáticas:** Estas restricciones son intrínsecas al sistema. Impiden que la velocidad pueda tomar cualquier valor.

4.1.2. Tipos de Navegación

Existen tres tipos de navegación:

- **Navegación Planificada:** Utilizan algoritmos de **control planificado** que permiten seguir un camino o trayectoria previamente planificado. Existen dos clases:
 - **Planificación Global:** Planifica la ruta que lleva al robot a cada una de las configuraciones determinadas por una tarea. Se genera un camino admisible aproximado.
 - **Planificación Local:** Resuelve los conflictos particulares de la planificación global. Modifica el camino en función de la realimentación sensorial.
- **Navegación Reactiva:** Controla el movimiento del robot en función de la información sensorial adquirida del entorno. Requiere sensores de proximidad y mecanismos para encontrar mapas locales.
- **Navegación Topológica:** No tiene en cuenta el espacio métrico para ubicar al robot. El mapa se realiza a un elevado nivel de abstracción y se representa como un grafo de conectividad. Requiere técnicas sensoriales de extracción de características, navegación reactiva y planificación métrica local.

4.2. Características de los robots móviles

Asumiremos que el robot se mueve en un plano con un ángulo θ determinado. El movimiento de cualquier sólido rígido en el plano se puede considerar compuesto por:

- Un punto en el plano del objeto.
- Velocidad angular del objeto alrededor del punto.

Para caracterizar el movimiento del robot necesitaremos entonces conocer la velocidad lineal $\left(\vec{v} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \right)$ y la velocidad angular $\left(\vec{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \right)$. Estos vectores se pueden expresar en diferentes sistemas de referencia, pero, normalmente, se expresan en el sistema de referencia local del robot. Por lo que los valores quedarían:

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} v_x = v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \vec{\omega} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_z = \omega \end{bmatrix}$$

Computacionalmente se suele utilizar una estructura llamada **Twistor** que es, simplemente, una matriz de vectores. De esta forma los ordenadores pueden realizar los cálculos de forma más sencilla. El twistor que buscamos será: $\begin{bmatrix} \vec{v} \\ \vec{\omega} \end{bmatrix}$.

Nosotros asumiremos que el robot realiza un cambio de velocidad instantáneo. Utilizando el modelo cinemático, podemos obtener la velocidad del robot en función de sus parámetros de control. Para obtener la posición del robot debemos integrar la velocidad con respecto al tiempo:

$$x = \int v \, dt$$

Sin embargo, la velocidad no es una función analítica. Esto nos obliga a integrar numéricamente utilizando algoritmos que aproximan la expresión como, por ejemplo, el método de integración de Euler.

La **odometría** es un algoritmo que considera las velocidades de la rueda y estima la posición en la que se puede encontrar el robot. Este algoritmo utiliza métodos de integración numérica para estimar la posición del robot.

Podemos definir la velocidad lineal de un objeto como $\vec{v} = \vec{\omega} \cdot \vec{R}_c$, siendo \vec{R}_c el radio de giro del objeto respecto del **centro instantáneo de rotación**. Sin embargo, cuando el objeto se mueve en línea recta, este radio se hace infinito y por tanto no podemos computarlo. Por esto se utiliza la **curvatura** ($\rho = \frac{1}{R_c}$).

En los **vehículos diferenciales** el punto central del eje de las ruedas siempre cumple que la velocidad tiene la misma dirección que la componente x del sistema de referencia local.

En estos vehículos existen dos grados de libertad (α_1 y α_2) que son las velocidades de rodado de las ruedas

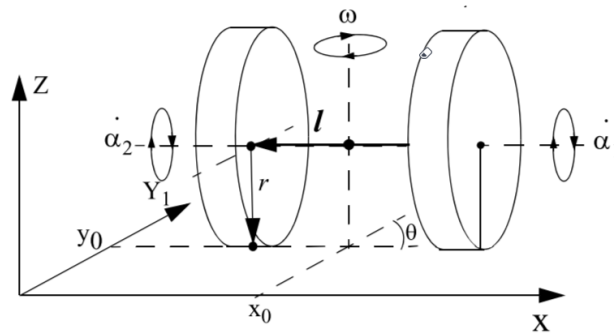


Figura 27: Esquema de un vehículo diferencial

del vehículo. La velocidad del vehículo vendrá dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r \cdot \cos \theta}{2} & \frac{r \cdot \cos \theta}{2} \\ \frac{r \cdot \sin \theta}{2} & \frac{r \cdot \sin \theta}{2} \\ \frac{r}{2 \cdot l} & \frac{r}{2 \cdot l} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1 \\ \dot{\alpha}_2 \end{bmatrix}$$

4.3. Estrategias de Control

Existen dos tipos de estrategias de control sobre robots móviles:

- **Control Atractivo:** El robot converge hacia una configuración determinada.
- **Control Repulsivo:** El robot es repelido de algunas configuraciones.

4.4. Seguimiento de Trayectorias

Dada una trayectoria, se pretende que el robot la siga de la forma más aproximada posible. Existen muchos métodos de seguimiento basados en **teoría de control** no lineal, **control predictivo**, **linealización** del modelo cinemático y métodos geométricos.

Para seguir una trayectoria se debe:

- Especificar la evolución temporal de la posición y de la velocidad.
- Para cada instante de tiempo, se calcula el error en posición y velocidad teniendo en cuenta la posición y velocidad del robot y las planificadas para dicho instante.

4.4.1. Algoritmo Pure-Pursuit

El algoritmo más sencillo es el de **Pure Pursuit**, un método geométrico que permite seguir cualquier tipo de camino o ruta con un error bajo tanto en posición como en orientación.

El algoritmo consiste en obtener, en cada instante, el punto del camino más cercano a la posición actual del vehículo. Dicho punto se calcula escogiendo el punto del camino que dista un valor s de la posición actual del vehículo. Una vez se obtenga el punto, se aplica el algoritmo de control para converger a dicho punto.

4.5. Algoritmos de Planificación

Utilizaremos fundamentalmente el algoritmo **A***. Este algoritmo genera una ruta que, posteriormente, suavizaremos mediante splines.

4.6. Introducción a la Localización

4.6.1. Control Reactivo

Es una metodología que consiste en navegar por un escenario sin conocimiento previo del mapa sin conocimiento de la posición actual. El robot se mueve buscando un objetivo.

No hace falta saber la posición actual, sin embargo, hace falta pasarle al controlador una referencia abstracta (seguir la pared, ir a un sitio con mayor luminosidad...).

La información que proporcionan los sensores debe ser tratada de forma que se pueda obtener una representación del entorno utilizando técnicas de Deep Learning.

Existen dos técnicas de navegación reactiva:

- **Vector de Percepción:** Permite obtener información sobre la dirección donde hay obstáculos o sobre la dirección donde más espacio libre hay.
Una vez se obtenga la dirección deseada, se aplica un algoritmo de control que mantenga perpendicular el vector a la dirección del robot para evitar la colisión.
Se utiliza cuando navega sobre un pasillo o sobre un espacio con una gran cantidad de obstáculos.
- **Ventana dinámica:** El robot realiza una predicción de los diferentes caminos que puede seguir y evalúa cada camino para elegir el que más se aparta de los obstáculos y el más óptimo.
Este mecanismo lo implementa ROS (*Navigation Stack*).

Se utiliza en combinación con el comportamiento planificado utilizando técnicas de inteligencia artificial como, por ejemplo, lógica difusa. La lógica difusa permite aplicar la lógica binaria de una manera que proporciona transiciones suaves, es decir, que en función de la distancia al objetivo se transiciona suavemente.

4.6.2. Localización

Nosotros utilizaremos técnicas de odometría para conocer dónde se encuentra el robot. Es necesario la implementación de algoritmos de posicionamiento para evitar errores de posición.

Para navegar en exteriores se utilizan algoritmos de GPS, estos tienen un error de centímetros.

En interiores se utiliza un mapa. Todos los algoritmos que se crean son variaciones de los siguientes:

- **Filtro de Kalman:** Es un estimador que se basa en pensar que la incertidumbre en la medida es gaussiana. Sin embargo, en la realidad no podemos aproximar la incertidumbre de forma gaussiana. Esta técnica se utiliza en situaciones en las que la varianza es pequeña.
- **Filtro de Partículas:** Es un método basado en simulación (simulaciones de Montecarlo). Obtiene la posición del robot como un valor medio de las partículas más probables de la simulación.
Está implementado en ROS.

Las técnicas de localización fusionan datos de odometría con datos de posicionamiento.

4.6.3. Slam

Las técnicas de SLAM (*Simultaneously localization and mapping*) mueven el robot de forma reactiva conforme va elaborando el mapa. Utilizando filtros de posición puede ampliar el mapa generado con nueva información.

Una vez tiene el mapa generado puede aplicar técnicas de planificación.

Referencias

- [1] “sfproyectoiprobotica.” <https://sfproyectoiprobotica.blogspot.com/p/historia.html>. Accessed: 2022-10-23.
- [2] M. Lebrère, “L’artialisation des sons de la nature dans les sanctuaires à automates d’alexandrie, du iiiie s. av. j.-c. au ier s. apr. j.-c.” <https://journals.openedition.org/pallas/2641?lang=en>. Accessed: 2022-10-23.
- [3] Xataka.com, “Desde el pato de vaucanson a los robots de limpieza: así ha evolucionado la robótica desde sus inicios.” <https://www.xataka.com/n/desde-el-pato-de-vaucanson-a-los-robots-de-limpieza-asi-ha-evolucionado-la-robotica-desde-sus-in>. Accessed: 2022-10-23.
- [4] C. Jobson, “This programmable 6,000-part drawing boy automata is arguably the first computer and it was built 240 years ago.” <https://www.thisiscolossal.com/2013/11/the-writer-automata/>. Accessed: 2022-10-23.
- [5] R. Hoggett, “1928 – phil the radio dog a.k.a. “philidog” – henri piraux (french).” <http://cyberneticzoo.com/precyber/1928-phil-the-radio-dog-a-k-a-philidog-piraux/>. Accessed: 2022-10-23.
- [6] C. Trilnick, “Shakey.” <https://projectoidis.org/shakey/>. Accessed: 2022-10-23.