

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE PUEBLA

Programa Académico de Ingeniería en Informática



“IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE LOCOMOCIÓN
BÍPEDA EN UN ROBOT CON MORFOLOGÍA HUMANA”

PROTOCOLO DE TESIS NUMERO

RAYMUNDO GABRIEL MARTÍNEZ CRUZ

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE PUEBLA

Programa Académico de Ingeniería en Informática



“IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE LOCOMOCIÓN
BÍPEDA EN UN ROBOT CON MORFOLOGÍA HUMANA”

RAYMUNDO GABRIEL MARTÍNEZ CRUZ

PROTOCOLO DE TESIS

COMITÉ EVALUADOR

DR. ANTONIO BENÍTEZ RUÍZ

ASESOR

DR. JORGE DE LA CALLEJA MORA

SINODAL

DRA. MARÍA AUXILIO MEDINA NIETO

SINODAL

Índice

1. Planteamiento del problema de investigación	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivo general	5
1.3. Objetivos específicos	5
1.4. Justificación	5
1.5. Contribuciones esperadas	5
1.6. Cronograma de actividades	6
1.7. Recursos de hardware y software	8
1.7.1. Recursos de hardware	8
1.7.2. Recursos de software	8
1.8. Alcances y limitaciones	8
2. Marco teórico	9
2.1. Herramientas matemáticas para la localización espacial	10
2.1.1. Representación de la posición	10
2.1.2. Representación de la orientación	11
2.1.3. Matrices de transformación homogénea	12
2.1.3.1. Traslación	13
2.1.3.2. Rotación	14

2.2. Robots	16
2.2.1. Robots manipuladores	16
2.3. Cinemática, dinámica y control de robots	18
2.3.1. Cinemática de robots	18
2.3.1.1. Cinemática directa	19
2.3.1.2. Cinemática Inversa	20
2.3.2. Dinámica de robots	22
2.3.2.1. Dinámica directa	23
2.3.2.2. Métodos de solución	24
2.3.3. Control de robots	25
2.4. Representación de un robot con morfología humana (humanoide)	26
2.5. Fases del caminado	26
2.5.1. Fase de soporte único	28
2.5.2. Fase de soporte doble	29
2.5.3. Fase de postura (stance phase)	29
2.5.4. Fase de balanceo (swing phase)	30
2.6. Trabajos relacionados	30
3. Cinemática	41
3.1. Cinemática directa	41
3.2. Cinemática inversa	43
3.2.1. Método Geométrico	43
3.2.2. Modelo Diferencial (Matriz Jacobiana)	45
3.2.2.1. Jacobiana geométrica	47
4. Dinámica	53
4.1. Modelo dinámico de la estructura de un Robot rígido	55

<i>ÍNDICE</i>	III
4.2. Modelado mediante la formulación de Newton-Euler	57
4.2.1. Algoritmo computacional para el modelo dinámico de Newton-Euler	57
5. Resultados	59
5.1. Análisis del Modelo	59
5.1.1. Obtención de los parámetros	61
5.2. Cinemática Directa	62
5.3. Cinemática Inversa	65
5.3.1. Método geométrico	65
5.3.2. Método diferenciable (Jacobiano)	66
6. Conclusiones	73
A. Convención Denavit-Hartenberg	75
Bibliografía	80

Capítulo 1

Planteamiento del problema de investigación

1.1. Introduccion

La informática es la ciencia que se dedica al estudio de los fundamentos teóricos de la información y la computación, sus campos se pueden clasificar de diversas maneras, una clasificación muy conocida es la ACM *Computing Classification System* elaborado por la *Association for Computing Machinery*.

Dentro de la rama de inteligencia artificial se encuentra la robótica. La robótica está relacionada con el estudio de aquellos mecanismos que pueden ser utilizados para ayudar a los humanos en la realización de alguna tarea en específico [25].

Una de las características más importantes de los robots tienen que ver con su estructura mecánica. Los robots pueden ser clasificados como robots con base fija (como es el caso de algunos manipuladores) y aquellos que tienen una base móvil [19]. Así, estos tipos de robots se pueden clasificar de la siguiente manera:

Clase	Tipo
Robots	Cartesiano

manipuladores

Clase	Tipo
	Cilíndrico Esférico SCARA Antropomorphic
Robots móviles	Ruedas móviles Patas móviles Locomoción de seguimiento Locomoción ondulatoria

Tabla 1.1: Clasificación de los robots.

La robótica industrial es la disciplina que estudia el diseño, control y aplicaciones en la industria. Esta tecnología ha llegado ya a un nivel de madurez.

Por otra parte, el concepto de robótica avanzada se refiere al estudio de robots con ciertas características de autonomía y que operan en entornos poco estructurados, es decir, que no se conocen con anticipación las características geométricas o físicas de los ambientes en donde trabajan.

La robótica avanzada existe para atender aplicaciones que van de la necesidad de autómatas que reemplacen algunas actividades riesgosas de los humanos (robots de campo), hasta los autómatas que mejoren la calidad de vida de las personas (robots de servicio).

Los robots de servicio son también empleados para aplicaciones civiles como los sistemas de navegación inteligente o como guías móviles en museos. En muchos países

se está investigando el impacto en los mercados de los robots de servicio que puedan cohabitar con los humanos desde los inicios de la vida.

La tecnología está lista para transformarse en prototipos de productos comerciales que brinden cierto grado de autonomía a las personas con cierta discapacidad como lo son sillas de ruedas autónomas, ayudantes para levantarse, la alimentación y rehabilitación de personas parapléjicas, etc. En perspectiva, robots que cumplan con todas las funciones de un mesero, de un asistente y de un sistema de cuidado médico con módulos telemáticos que permitan el desarrollo del servicio en el hogar (domótica).

Otro amplio segmento del mercado está enfocado al entretenimiento, donde los robots son usados como compañeros de juego para niños y compañeros de vida para ancianos tales como los robots con morfología humana (tabla 1.2) y robots mascota.

Robot	Descripción
ROBOVIE-NANO	Robot bípedo con morfología humana
TAIZO	Robot bípedo con morfología humana para el acondicionamiento físico
KOBIAN	Robot bípedo con morfología humana con expresiones corporales
HUBO	Robot bípedo con morfología humana desarrollado por KAIST (Korea)
ASIMO	Robot bípedo con morfología humana desarrollado por Honda (Japón)
ROBONAUT	Robot con morfología humana (tronco, brazos y cabeza) desarrollado por NASA y GM (E.E.U.U.)
MAIDO KUN	Proyecto para 2015 por SHOLA

Robot	Descripción
ROBONAT 2	Proyecto para 2020 por NASA y GM

Tabla 1.2: Ejemplos de robots con morfología humana.

Finalmente se cree que los robots se comercializarán en todo el mundo y tendrán el impacto como las computadoras personales o los televisores en su momento.

Los algoritmos de inteligencia artificial para el desarrollo de comportamientos básicos y complejos para robots móviles, en particular para robots con morfología humana requieren de algoritmos de una complejidad mayor.

Por otra parte, desarrollar un robot con morfología humana y locomoción bípeda como el creado por Honda (ASIMO) en 2004, desde su concepción hasta su implementación se llevó casi 2 décadas y cerca de 300 millones de dólares.

Actualmente la carrera por la conquista del espacio entre japoneses y norteamericanos se centra en llevar a la luna a robots con morfología humana de locomoción bípeda. En el caso de Japón en particular la asociación de empresas orientadas a desarrollar tecnología espacial SHOLA por sus siglas en inglés tienen el proyecto de llevar a la luna el primer robot bípedo llamado MAIDO KUN en 2015 con un presupuesto de un billón de yenes, por otra parte la NASA y la General Motors tienen como proyecto enviar su propio robot bípedo para el 2020 llamado ROBONAUT 2.

Estos proyectos nos muestran la complejidad de desarrollar robots con morfología humana de locomoción bípeda.

Teniendo un panorama general de donde se encuentran ubicados los robots con morfología humana y el impacto socioeconómico y cultural que llegarán a tener los

robots de servicio, se plantea el desarrollo de un algoritmo de locomoción bípeda en un robot con morfología humana como proyecto de investigación.

1.2. Objetivo general

Desarrollar un algoritmo de locomoción bípeda para un robot con morfología humana.

1.3. Objetivos específicos

- Describir el proceso de la locomoción bípeda humana y documentarlo.
- Implementar el algoritmo locomoción bípeda humana para un robot bípedo.
- Simular el proceso de locomoción bípeda en un ambiente virtual.
- Realizar pruebas en la plataforma bioloid premium kit y documentarlas.

1.4. Justificación

Una de las actividades prioritarias en los robots bípedos es lograr que un robot con morfología humana camine. En la simulación se puede reducir las restricciones físicas, pero aún hay mucho trabajo en el desarrollo de algoritmos capaces de lograr que un robot bípedo camine y corra.

1.5. Contribuciones esperadas

- Un análisis cinemático de las piernas de la plataforma bioloid premium kit.

- Un análisis dinámico de las piernas de la plataforma bioloid premium kit.
- Un entorno gráfico para la simulación del caminado del robot.
- Un conjunto de pruebas en la plataforma bioloid premium kit.

1.6. Cronograma de actividades

Las actividades que se llevarán a cabo para el presente proyecto de investigación se llevara a cabo en 3 cuatrimestres los cuales se encuentran detallados en las tablas 1.3, 1.4 y 1.5

Septiembre - Diciembre 2011															
Actividad	Semanas														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Revisión del estado del arte	*	*	*	*	*										
Revisión del proceso de locomoción bípeda						*									
Revisión del problema de cinemática directa							*	*							
Revisión del problema de cinemática inversa									*	*	*				
Probar la cinemática directa en el actor digital											*	*	*	*	*
Elaboración del documento final	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tabla 1.3: Cronograma de actividades para el 3er cuatrimestre de 2011.

ENERO - ABRIL 2012															
Actividad	Semanas														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Probar la cinemática inversa en el actor digital	*														
Revisión de la dinámica directa		*	*	*	*										
Probar la dinámica directa en el actor digital						*	*								
Revisión de la dinámica inversa							*	*	*	*					
Probar la dinámica inversa en el actor digital											*	*			
Implementación del algoritmo de caminado													*	*	*
Elaboración del documento final	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tabla 1.4: Cronograma de actividades para el 1er cuatrimestre de 2012.

MAYO - AGOSTO 2012															
Actividades	Semanas														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Simulación del algoritmo de caminado	*	*	*												
Hacer pruebas en la plataforma física				*	*	*	*	*	*	*	*	*			
Análisis de resultados						*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Elaboración del documento final	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tabla 1.5: Cronograma de actividades para el 2do cuatrimestre de 2012.

1.7. Recursos de hardware y software

Para el desarrollo de este proyecto, se requieren los recursos siguientes:

1.7.1. Recursos de hardware

- Equipo de cómputo con tarjeta de gráficos de 1Gb.
- Robot bípedo (Bioloid Premium Kit)

1.7.2. Recursos de software

- Lenguaje de programación C
- Librería de gráficos Open GL
- Entorno de desarrollo Dev-C++
- Simulador - Plataforma GEMPA
- Simulador de Cadenas Articuladas
- Simulador de Actor Digital

1.8. Alcances y limitaciones

- Aplicación de cinemática y dinámica directa e inversa, para la implementación del algoritmo de locomoción bípeda en un actor virtual.
- Aplicación de cinemática y dinámica directa e inversa, para la implementación del algoritmo de locomoción bípeda en un robot de morfología humana.

Capítulo 2

Marco teórico

A lo largo de este capítulo se observara como las bases físicas y matemáticas aplicadas a un sólido rígido se pueden aplicar a una agrupación de estos mismos unidos entre sí para formar una cadena.

Debido a que se requiere saber donde se encuentra cada uno de los elementos de una cadena de sólidos rígidos en un sistema coordinado espacial, se inicia con un conjunto de herramientas matemáticas que nos permiten la localización espacial (posición y orientación).

Se muestra que un conjunto o cadena se sólidos rígidos unidos entre sí, pueden formar un robot manipulador y que para el análisis del movimiento de dichas cadenas se muestra una breve introducción a la cinemática y dinámica directa e inversa.

Posteriormente, se da una breve descripción de que es un robot humanoide y las fases de caminado.

Finalmente se muestra un conjunto de trabajos relacionados.

2.1. Herramientas matemáticas para la localización espacial

La definición completa del movimiento de un objeto en el espacio necesita de algoritmos basados en funciones matemáticas. Las matemáticas proveen de herramientas para describir los movimientos espaciales y demás atributos de los manipuladores [6].

La manipulación de piezas llevada a cabo por un robot implica el movimiento espacial de su extremo [1]. Para que pueda recoger una pieza, es necesario conocer la posición y la orientación de dicha pieza con respecto a la base del robot (figura 2.1).

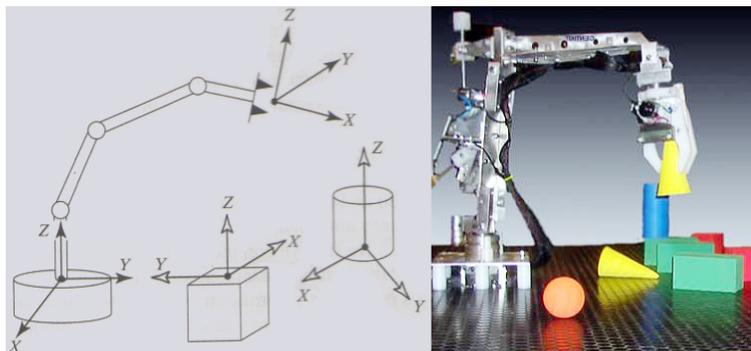


Figura 2.1: Robot manipulador

2.1.1. Representación de la posición

Para localizar un sólido rígido en el espacio es necesario contar con una herramienta que permita la localización espacial de sus puntos [1]. Con el uso de planos bidimensionales o tridimensionales se pueden usar sistemas de coordenadas cartesianas, polares, cilíndricas y esféricas (figura 2.2).

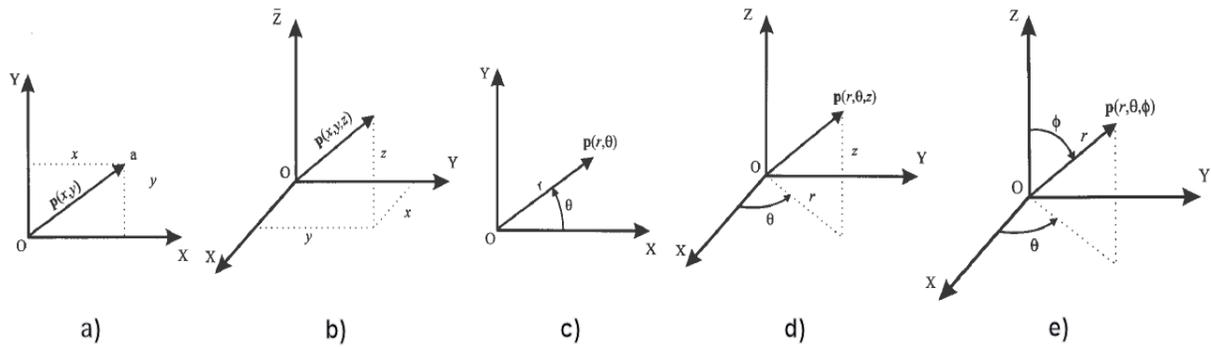


Figura 2.2: Representación de un vector en coordenadas cartesianas de a) 2 dimensiones y b) 3 dimensiones, c) coordenadas polares, d) coordenadas cilíndricas y e) coordenadas esféricas [1].

2.1.2. Representación de la orientación

Un punto queda totalmente definido en el espacio a través de los datos de su posición. Sin embargo en el caso de un sólido rígido, se debe de definir también su orientación con respecto a un sistema de referencia.

Para definir la orientación de un sólido rígido, se adjunta un sistema de coordenadas al sólido rígido y luego se hace una descripción de este sistema de coordenadas relativo al sistema de referencia.

Los métodos para representar la descripción de la orientación son [1]:

- Matrices de rotación
- Ángulos de Euler
- Par de rotación
- Cuaternios

2.1.3. Matrices de transformación homogénea

Los métodos de representar la posición o la orientación no permiten por sí solos una representación conjunta de la posición y de la orientación (localización) por lo cual se introdujeron las coordenadas homogéneas.

La representación mediante coordenadas homogéneas de la localización de sólidos rígidos en un espacio n-dimensional se realiza a través de coordenadas de un espacio (n+1)-dimensional, de tal forma que un vector $p(x,y,z)$ vendrá representado por $p(aw,bw,cw,w)$, donde w tiene un valor arbitrario y representa un valor de escala.

$$P = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} aw \\ bw \\ cw \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ 1 \end{pmatrix}$$

Figura 2.3: Representación en coordenadas homogéneas mediante el vector columna.

A partir de la definición de las coordenadas homogéneas surge el concepto de matriz de transformación homogénea T que representa la transformación de un vector de coordenadas homogéneas de un sistema de coordenadas a otro.

$$T = \begin{pmatrix} R_{3x3} & p_{3x1} \\ f_{1x3} & w_{1x1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Rotacion & Traslacion \\ Perspectiva & Escalado \end{pmatrix}$$

Figura 2.4: Matriz de transformación homogénea T .

De la figura anterior se define:

- Submatriz R_{3x3} que corresponde a una matriz de rotación.
- Submatriz p_{3x1} que corresponde al vector de traslación.

- Submatriz f_{1x3} que representa una transformación de perspectiva.
- Submatriz w_{1x1} que representa un escalado global.

Si se considera la transformación de perspectiva nula y el escalado global unitario, la matriz homogénea T resulta de la forma que se muestra en la figura 2.5 que representa la orientación y posición de un sistema $O'UVW$ rotado y trasladado con respecto al sistema de referencia $OXYZ$.

$$P = \begin{pmatrix} R_{3x3} & p_{3x1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Rotacion & Traslacion \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 2.5: Matriz de transformación homogénea T con perspectiva nula y escalado unitario.

Una matriz de transformación homogénea se puede aplicar para:

1. Representar la posición y orientación de un sistema girado y trasladado $O'UVW$ con respecto a un sistema fijo de referencia $OXYZ$, que es lo mismo que representar una rotación y traslación realizada sobre un sistema de referencia.
2. Transformar un vector expresado en coordenadas con respecto a un sistema $O'UVW$, a su expresión en coordenadas del sistema de referencia $OXYZ$.
3. Rotar y trasladar un vector con respecto a un sistema de referencia fijo $OXYZ$.

2.1.3.1. Traslación

La traslación de un objeto consiste en moverlo a cierta distancia, en una dirección determinada como lo muestra la figura 2.6[27].

La matriz de traslación T correspondiente es:

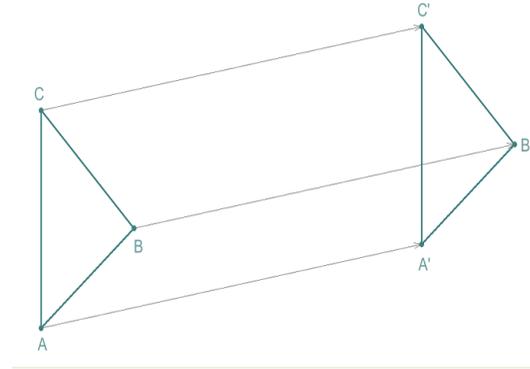


Figura 2.6: Traslación de un objeto en el espacio tridimensional.

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

2.1.3.2. Rotación

La rotación es una transformación lineal que conserva la norma (i.e., son isométricas) en espacios vectoriales en los que se ha definido una operación de producto interior y cuya matriz tiene la propiedad de ser ortogonal y de determinante igual a 1 positivo o negativo. Geométricamente una rotación en el plano representa una transformación o giro de una figura en torno a un punto fijo.

La principal ventaja de las matrices homogéneas reside en su capacidad de representación conjunta de posición y orientación. Esta representación se realiza utilizando al mismo tiempo la matriz de rotación $R_{3 \times 3}$ y el vector de traslación $p_{3 \times 1}$ en una misma matriz de transformación homogénea.

De acuerdo a que una matriz homogénea sirve, entre otras cosas, para representar rotaciones y traslaciones sobre un sistema de referencia. Una transformación más com-

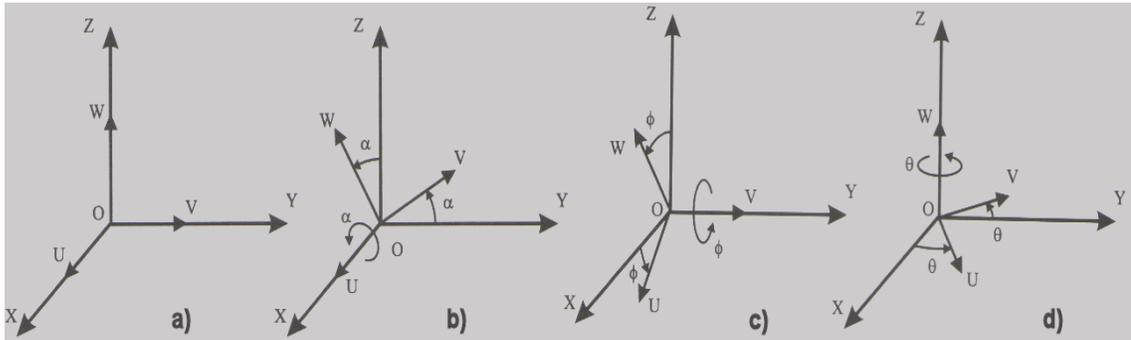


Figura 2.7: Representación gráfica de a) dos planos que coinciden en el origen y en las direcciones de sus ejes. Se observa como queda gráficamente el plano $O'UVW$ al girar sobre b) girar sobre el eje X, c) girar sobre el eje Y y d) girar sobre el eje Z.

$$R(x, \alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\text{sen } \alpha & 0 \\ 0 & \text{sen } \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 2.8: Rotación sobre X, α grados [1].

$$R(y, \phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \text{sen } \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\text{sen } \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 2.9: Rotación sobre Y, ϕ grados [1].

$$R(z, \theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \text{sen } \theta & 0 & 0 \\ -\text{sen } \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 2.10: Rotación sobre Z, θ grados [1].

pleja podría descomponerse en la aplicación consecutiva de transformaciones simples (giros básicos y traslaciones). Es decir, $T_C = T_1 T_2 T_3 \dots T_n$, sin olvidar que el producto de matrices no es conmutativo.

2.2. Robots

Existen diversas clasificaciones acerca de los robots, pero en la actualidad los robots se pueden agrupar en dos familias: los robots de servicio y los robots industriales. Los primeros realizan tareas para beneficiar a los humanos, y los industriales tienen como objetivo la automatización dentro de la industria. Dentro de los industriales tenemos al robot manipulador, uno de los más utilizados en la industria para realizar procesos de ensamblado.

2.2.1. Robots manipuladores

Los robots manipuladores consisten de sólidos rígidos conocidos también como vínculos o eslabones, como se observa en la figura 2.11, los eslabones están conectados por articulaciones que permiten el movimiento relativo de los eslabones adyacentes.

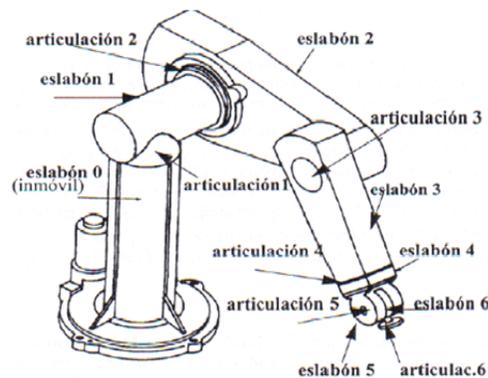


Figura 2.11: Robot PUMA 562. Enumeración de eslabones y articulaciones

Estas articulaciones generalmente se instrumentan con sensores de posición, los cuales permiten medir la posición relativa de los eslabones adyacentes. En el caso de las articulaciones giratorias o angulares, estos desplazamientos se conocen como ángulos articulados y las articulaciones deslizantes o prismáticas se les llama desplazamiento de la articulación (figura 2.12).

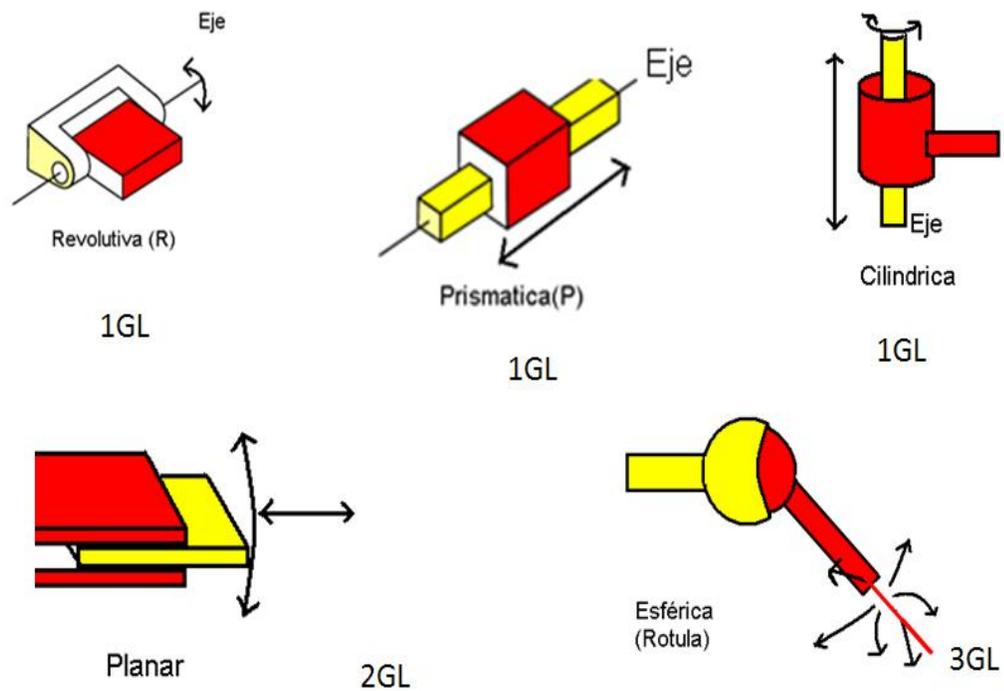


Figura 2.12: Tipos de articulaciones [3, 13].

De acuerdo con el tipo de articulación se usa como unidad de medida el ángulo en torno a la base a la cual gira y es denotado por θ , y en algunos otros el desplazamiento en torno a su eje y es denotado por d . Una articulación puede tener más de 1 GL (grao de libertad).

EL número de grados de libertad algunas veces coincide con el número de eslabones que se contiene en el robot manipulador, sin embargo en la mayoría de robots manipuladores el número de grados de libertad es mayor al número de eslabones [10].

2.3. Cinemática, dinámica y control de robots

La cinemática y dinámica de un sólido rígido no representa problemas analíticos importantes, al ser un sistema muy sencillo. Sin embargo, al ir uniendo sólidos rígidos en un sistema mecánico resulta que en lugar de seguir siendo sencillos, se vuelven complejos. Los problemas básicos a resolver son los cinemáticos y dinámicos, tanto directos como inversos, que en la práctica necesitan algún tipo de control para ser implementados [23].

Muchos sistemas robotizados están formados por un conjunto de cadenas abiertas de sólidos rígidos acopladas mediante un cuerpo común, que normalmente es una base considerada como sistema de referencia inercial. Estos sistemas se le conocen comúnmente como sistemas con topología de árbol.

2.3.1. Cinemática de robots

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia, es decir, se encarga de la descripción analítica del movimiento espacial del robot en función del tiempo. La cinemática puede ser directa o inversa (figura 2.13).



Figura 2.13: Relación entre cinemática directa e inversa [1].

2.3.1.1. Cinemática directa

Un problema básico en el estudio de la manipulación mecánica se conoce como cinemática directa, que es el problema geométrico de calcular la posición y orientación del efector final del manipulador con respecto a un sistema de referencia fijo en un plano cartesiano (X, Y, Z), en donde se conoce el valor de cada ángulo de los eslabones ($\theta_1, \theta_2, \theta_3 \dots \theta_n$) con respecto a otro, así como la estructura geométrica de cada eslabón (figura 2.14).

Algunos métodos que dan solución a la cinemática directa son:

- Matrices de transformación homogénea
- Convención de D-H
- Uso de cuaterniones

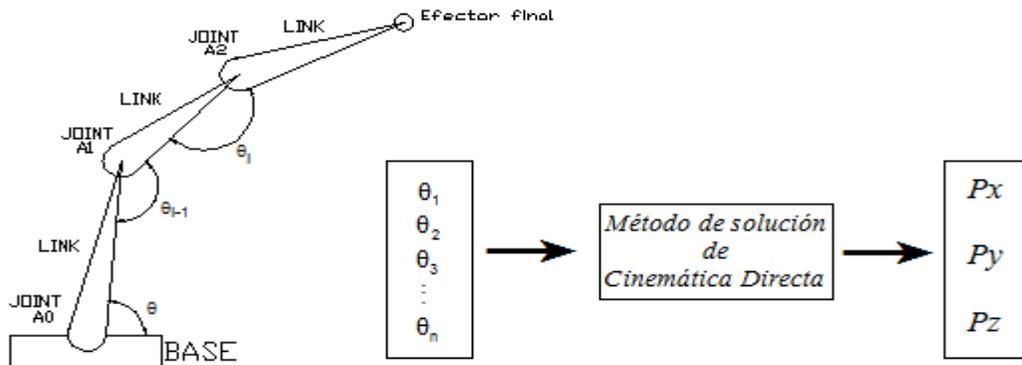


Figura 2.14: Proceso de cálculo de la cinemática directa [20]

- Convención Denavit-Hartenberg (D-H)

En 1955 Denavit y Hartenberg propusieron un método sistemático para describir y representar la geometría espacial de los elementos de una cadena cinemática con

respecto a un sistema de coordenadas fijo, este método hace uso de una matriz de transformación homogénea de 4×4 , la cual describe la relación entre dos elementos de la cadena cinemática [2].

Haciendo uso de la metodología de D-H es posible pasar de un eslabón al siguiente mediante 4 transformaciones básicas, en donde dichas transformaciones dependen de las características del eslabón al que se aplica. Las transformaciones básicas son una sucesión de rotaciones y translaciones que hacen que se relacione un elemento i con el $i + 1$. Los pasos de la convención D-H se puede ver en el ANEXO 1.

2.3.1.2. Cinemática Inversa

El problema cinemático inverso trata de obtener los ángulos ($\theta_1, \theta_2, \theta_3 \dots \theta_n$) de cada articulación en base a una posición (X, Y, Z) del efector final (figura 2.15), la obtención de los ángulos es más complejo y necesita mayor capacidad computacional para poder realizar los cálculos necesarios, además de que a mayor número de eslabones en la cadena de sólidos rígidos, incrementa el número de soluciones que se pueden obtener, volviéndose en un problema cíclico. Este problema puede tener muchas soluciones, una única solución o ninguna (por ser un problema complejo) [31].

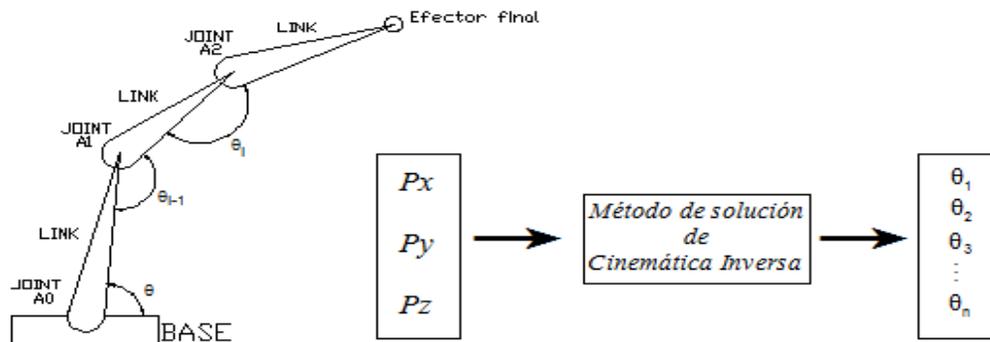


Figura 2.15: Proceso de cálculo de la cinemática inversa [20]

Las soluciones a la cinemática inversa se dividen en dos clases las cuales son:

- Soluciones cerradas: Se basan en identidades geométricas, muchas veces son soluciones empíricas o de aprendizaje. Esto permite que se resuelva con cálculos rápidos y eficientes.

Ventajas

- Para hacer uso de los sistemas robóticos se necesita resolver el problema cinemática en tiempo real
- La solución a la cinemática inversa no tiene una única solución, en estos casos una solución cerrada permite incluir reglas y restricciones que aseguren que el la solución obtenida sea la más adecuada.

Algunas de las soluciones cerrada a la cinemática inversa son:

- Método geométrico.- este procedimiento es usado para robots de pocos grados de libertad, o para el caso en que solo se consideran los primeros grados de libertad dedicados a posicionar el efector final
- Desacoplo cinemático.- es usado en robots de 6 GL, donde la resolución es dividida en 2 partes (posición y orientación), dedicando así los primeros 3 GL para posicionar los primeros 3 GL y los últimos 3 para la orientación del mismo.
- Matrices de transformación homogénea inversa.- se trata de obtener el modelo cinemático inverso de un robot a partir del conocimiento de un modelo directo; es decir, suponiendo que se conocen las relaciones que expresan el valor de la posición y orientación del extremo en función de las coordenadas articulares.

- Soluciones numéricas: se basan en algoritmos iterativos para simplificar un sistema de ecuaciones, que se aplican hasta encontrar la convergencia deseada. Se aplican a sistemas de muchos GL, ya que para este tipo de sistemas las soluciones cerradas son muy complicadas. Una solución numérica a la cinemática inversa es:
 - Matriz Jacobiana.- establece relación entre las velocidades de las articulaciones y el efector final

2.3.2. Dinámica de robots

La dinámica de manipuladores consiste en establecer las fuerzas que deben ser aplicadas en las articulaciones para lograr ciertas posiciones, velocidades y aceleraciones. Esto representa uno de los puntos más complicados en la robótica, pero es preciso para [2]:

- Simulación del movimiento del robot.
- Diseño y evaluación de la estructura mecánica.
- Dimensionamiento de los actuadores.
- Diseño y evaluación del control del robot.

Los manipuladores robóticos son fuertes dispositivos rígidos con motores potentes, fuertes sistemas de engranaje, etc. Para tareas poco exigentes es posible simular y aplicar la fuerza necesaria para obtener una velocidad requerida. Pocos robots regularmente son llevados al límite, donde el modelo dinámico se vuelve importante, ya que este permitirá reducir considerablemente la vida operativa y los altos costos de mantenimiento.

La dinámica del robot consiste en establecer ecuaciones del movimiento ya que estas definen su comportamiento dinámico. El análisis de la estructura del manipulador, y

el diseño de algoritmos de control nos permite contar con un modelo dinámico para la simulación. La simulación del movimiento del manipulador permite analizar estrategias y técnicas de control de movimiento sin la necesidad de utilizar un sistema real (físico).

El análisis del modelo dinámico puede ser útil para el diseño mecánico de los prototipos, así como, para el cálculo de las fuerzas y pares de torsión requeridos para la ejecución de los movimientos típicos que es útil para el diseño de juntas, transmisiones y actuadores [19].

Existen dos problemas que se desean resolver que están relacionados con la dinámica de un manipulador: Dinámica directa y dinámica inversa (figura 2.16).



Figura 2.16: Relación entre la dinámica directa e inversa

2.3.2.1. Dinámica directa

La dinámica directa se refiere al cálculo de las aceleraciones en el robot, una vez que se han aplicado fuerzas a cada una de las articulaciones, es decir, para $t > t_0$, determinar la aceleración de la articulación $\ddot{q}(t)$ (y por lo tanto $\dot{q}(t)$, $q(t)$) a partir de las fuerzas de la articulación dada $q(t)$ y las posibles fuerzas del efector final $h_e(t)$, antes las posiciones iniciales $q(t_0)$ y velocidades $\dot{q}(t_0)$ son conocidas (estado inicial del sistema). Es decir, la dinámica se encarga de proporcionar un punto de trayectoria q , \dot{q} , \ddot{q} . y se requiere encontrar el vector necesario de momentos de torsión de la articulación τ .

Resolver el problema de dinámica directa es útil para la simulación del manipulador. La dinámica directa permite el movimiento del sistema real que se describirá en términos de las aceleraciones de la articulación, cuando un conjunto de fuerzas asignadas a una articulación es aplicada al manipulador; la velocidad de la articulación y posiciones pueden ser obtenidas por la integración de un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales.

2.3.2.2. Métodos de solución

Los métodos de Lagrange y de Newton-Euler permiten encontrar una aproximación de la relación de la forma de la estructura y los torques de las articulaciones, así como, las fuerzas del efector final [19].

- Método de Lagrange Las ecuaciones de Lagrange permiten describir el comportamiento físico de un cuerpo, a través de técnicas basadas en el tratamiento de los sistemas mecánicos. Se basa en el principio de conservación de energía.

Las ventajas que se tienen con el método de Lagrange son [19]:

- Es un método sistemático y de rápida comprensión.
 - Proporciona las ecuaciones de movimiento para el análisis que contiene la matriz de inercia, la matriz de las fuerzas centrífugas y la de Coriolis, así como, el vector de fuerzas gravitacionales.
 - Es efectivo si se quiere incluir efectos mecánicos más complejos como la deformación de unión flexible.
- Método de Newton-Euler

El método Newton - Euler es una forma de determinar las ecuaciones dinámicas que rigen el movimiento de un robot. El campo de la dinámica se refiere a la

relación entre el movimiento de los cuerpos y sus causas, las fuerzas que actúan sobre los cuerpos y las propiedades de los cuerpos (sobre todo en masa y momento de inercia) que influyen en ese movimiento.

En general el propósito del método Newton-Euler es determinar los torques (τ) que son requeridos para lograr el movimiento deseado en un robot. Más específicamente, si se tiene un joint con trayectoria $\theta(t)$ que describe la posición y velocidades para una cierta trayectoria, luego el método Newton-Euler, el cual puede permitir calcular el $\tau(t)$ correspondiente en un mundo ideal (sin fricción o cualquier otro disturbio para el movimiento).

El método Newton - Euler tiene una ventaja fundamental [19]:

- Es un método inherentemente recursivo que es computacionalmente eficiente.

2.3.3. Control de robots

En cuanto al control de cadenas de sólidos rígidos, los robots necesitan un sistema que permita resolver el problema dinámico inverso, incluso ante la presencia de perturbaciones y errores de modelado. Existen dos paradigmas básicos en la robótica: el control en el espacio de las articulaciones y el control en el espacio de trabajo.

La unidad de control tiene tres funciones:

1. Informar. Consiste en recolectar y procesar la información proporcionada por los sensores del robot.
2. Decidir. Consiste en la planificación del movimiento geométrico de la estructura.
3. Comunicar. Consiste en la organización de la información entre el robot y su entorno.

2.4. Representación de un robot con morfología humana (humanoide)

Un robot con morfología humana es un sistema mecánico bastante complejo ya que se puede ver como un conjunto de cadenas de sólidos rígidos independientes que se ven afectadas unas con otras por estar relativamente unidas en un punto.

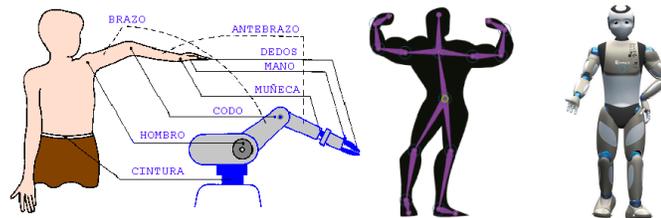


Figura 2.17: Grados de libertad de un cuerpo rígido libre de moverse en el espacio

Los fundamentos matemáticos desarrollados con anterioridad se pueden extender al análisis de robots humanoides, aunque éstos tienen particularidades mecánicas que los alejan del concepto más tradicional de sistema mecánico con topología de árbol, principalmente porque la base de las cadenas abiertas de sólidos rígidos no es inercial, esto es, la base (i.e., el tronco del humanoide) es libre, lo que introduce restricciones de equilibrio importantes [23].

2.5. Fases del caminado

El caminado del ser humano es un proceso de locomoción bastante complicado, debido a que cada individuo tiene su manera particular de hacerlo. El movimiento ocurre en tres planos como se muestra en la figura 2.18

Durante este desplazamiento cada parte del cuerpo tiene un movimiento específico que colabora a mantener el equilibrio y a que desplazarse erguidos sea posible. Sin

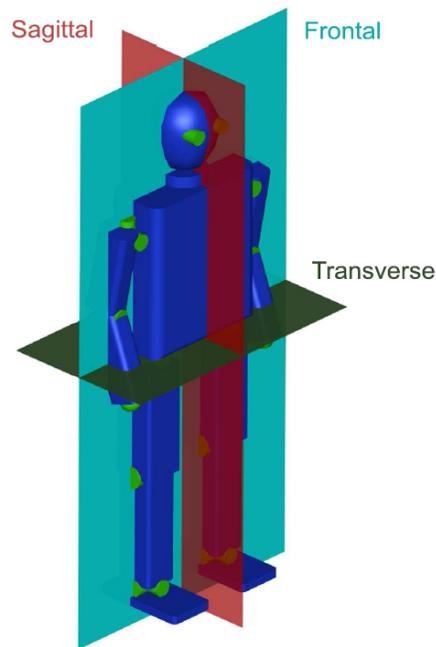


Figura 2.18: Planos del movimiento humano.

embargo, por más particular e individual que sea el caminar de una persona, existen ciertas fases que son reconocibles y que se pueden generalizar [5]. Lo primero que hay que entender es que el caminar es un proceso cíclico, por lo tanto repetitivo, razón por la cual es posible dividirla en fases. La manera como se determinan las fases que componen el proceso, depende de la forma como se esté analizando el proceso de caminar: a) Se puede analizar haciendo referencia a todo el cuerpo y como es soportado por cada pierna, o b) se puede analizar el movimiento que realiza cada pierna por separado. La figura 2.19 representa lo anterior.

a) Haciendo referencia a todo el cuerpo y como es soportado por cada pierna: Al analizar el proceso de esta manera, se tiene que el ciclo del caminar consta de 2 fases en realidad: fase de soporte doble (double support phase) y fase de soporte único (single support phase). El soporte único es realizado tanto por la pierna derecha como por la

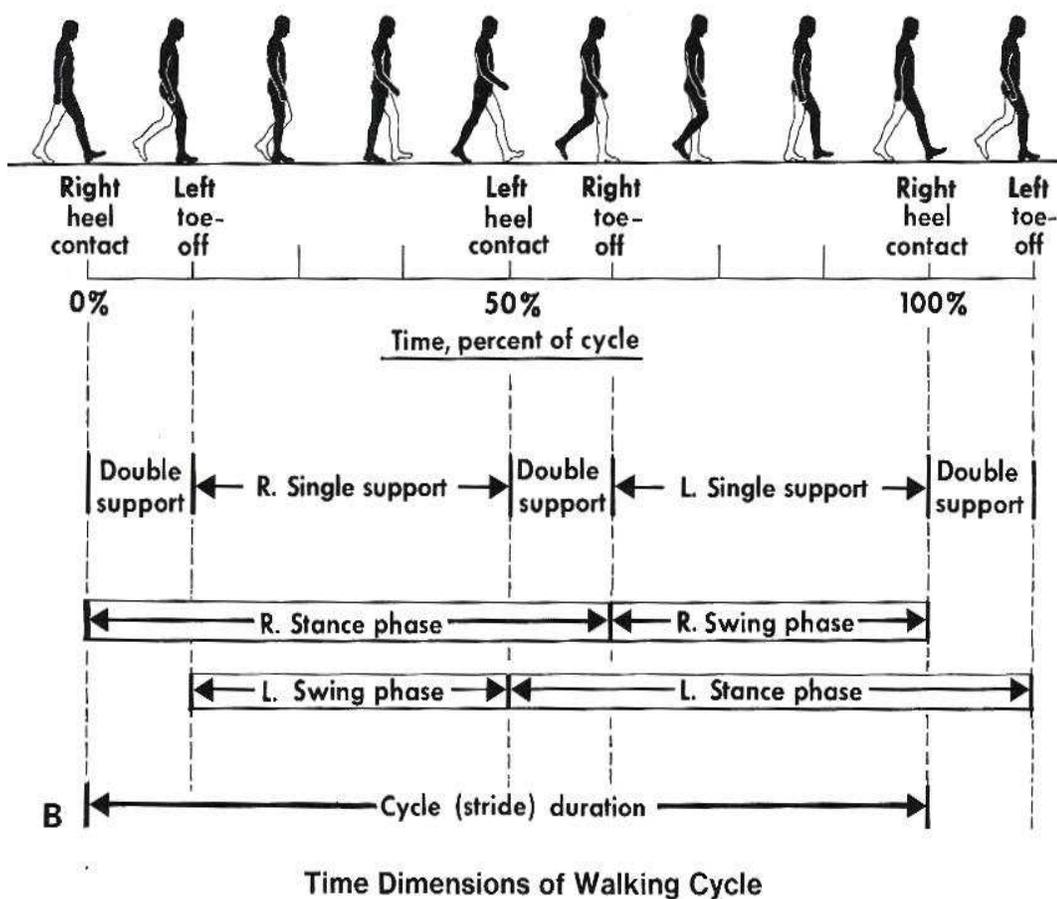


Figura 2.19: Fases del caminado del ser humano (vista posterior).

izquierda, lo que se identifica como soporte único derecho y soporte único izquierdo [5].

2.5.1. Fase de soporte único

Durante esta fase, el pie al que se le hace referencia del soporte, es el que se encuentra apoyado sobre el suelo y relativamente estacionario. Es el encargado de mantener el peso del cuerpo, de ahí su nombre de soporte. El comienzo de esta fase se puede distinguir cuando la otra pierna (la que no va a hacer el soporte) deja el suelo siendo los dedos del pie lo último en estar en contacto con el suelo, y termina cuando esa misma pierna vuelve a tocar el suelo por medio del talón [5] (figura 2.20).

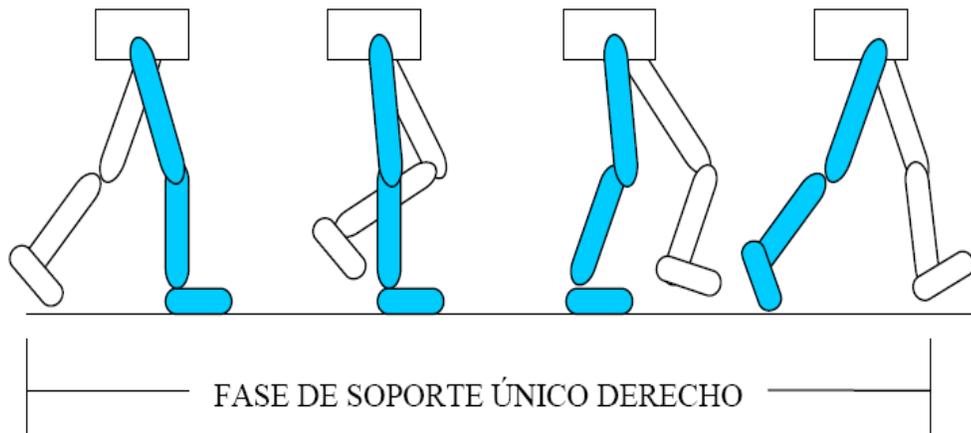


Figura 2.20: Fase de Soporte Único Derecho [5].

2.5.2. Fase de soporte doble

Se caracteriza porque los dos pies se encuentran en contacto con el suelo compartiendo el soporte del cuerpo. El comienzo de esta fase se reconoce cuando el talón de una pierna toca por primera vez el suelo y termina cuando los dedos del pie de la otra pierna se despegan del suelo. La duración de esta fase es bastante corta, pero indispensable ya que durante ella se hace el traspaso del soporte del cuerpo de una pierna a otra (figura 2.21).

Al analizar el proceso de esta manera, se debe tener en cuenta que cada pierna es vista como un proceso independiente, por lo tanto estaría dividido en fase de postura (stance phase) y fase de balanceo (swing phase). Cada una de estas fases se encuentra para las 2 piernas respectivamente.

2.5.3. Fase de postura (stance phase)

Esta fase representa el periodo de tiempo durante el cual la pierna analizada se encuentra en contacto con el suelo. Comienza cuando su talón toca el suelo y termina

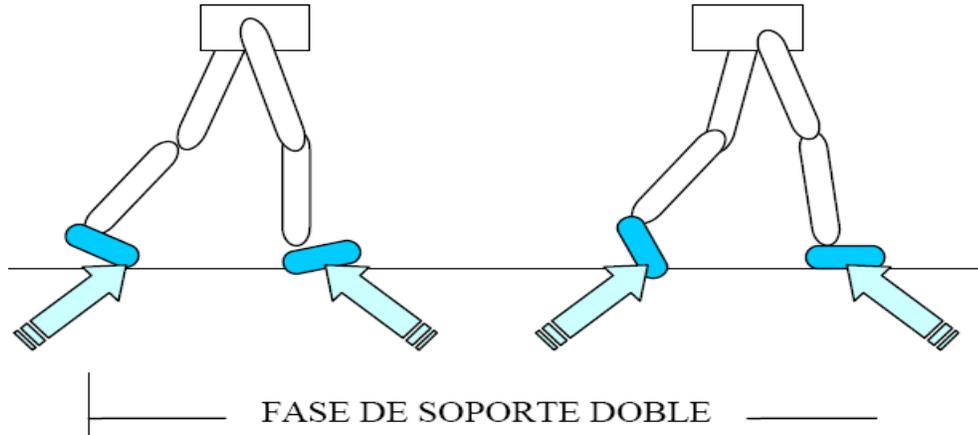


Figura 2.21: Fase de Soporte Doble [5].

cuando los dedos del pie se despegan del suelo.

2.5.4. Fase de balanceo (swing phase)

Esta fase se distingue porque es el periodo de tiempo durante el cual la pierna analizada se encuentra en el aire balanceándose hacia el frente. Luego de haber analizado el caminado humano y haber realizado una descripción general, es necesario abordar ciertos conceptos básicos sobre robótica ya que para lograr los objetivos propuestos se deben describir las piernas como una cadena articulada que implica un tratamiento de los temas fundamentales de esta área.

2.6. Trabajos relacionados

Seward et al. [30] hacen un análisis de la factibilidad de construir un robot con morfología humana tomando en cuenta las capacidades estructurales, la fuerza y la energía del ser humano. Con la tecnología de los años 90's concluyen que si es posible llevar a cabo dicho proyecto y obtienen parámetros en terminos de masas.

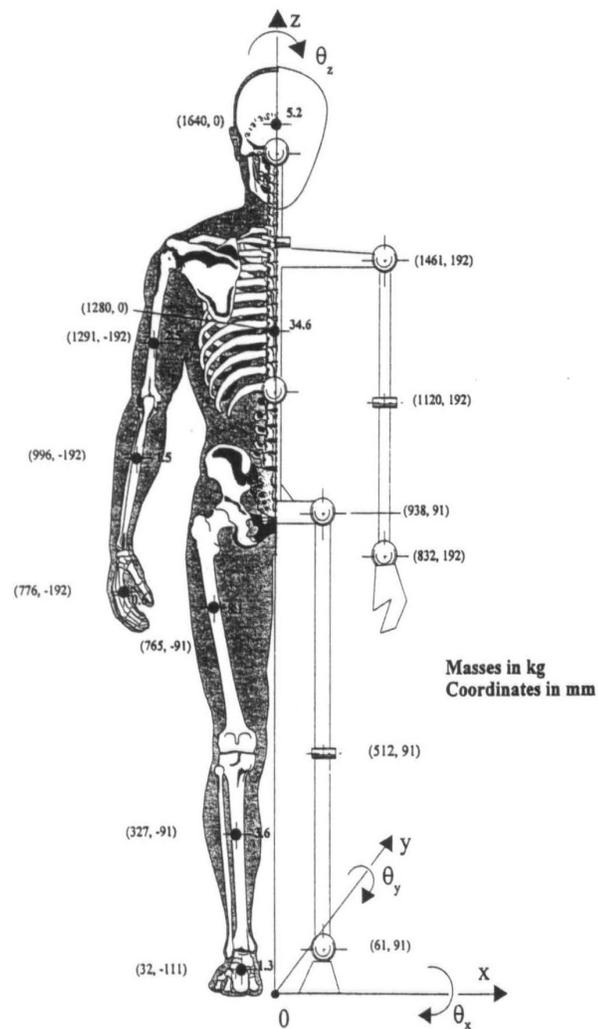


Figura 2.22: Masa y centro de gravedad de los miembros y coordina las articulaciones (vista posterior) [30].

Los robots bípedos tienen una mayor movilidad que los robots que cuentan con ruedas, especialmente cuando los movimientos son sobre ambientes sinuosos, ambientes con escalones como las escaleras y en ambientes con obstáculos.

Un tema de mucha importancia e interés de estudio ha sido el de la síntesis de los patrones del caminado.

Muchos problemas relacionados con la estabilidad [22, 8], diseño y aplicación de

robots [17, 12] y análisis dinámicos han sido estudiado.

En 1979, Zarrugh et al. [36] investigaron los patrones de caminado para un robot bípedo mediante el registro de datos cinemáticos humanos.

La clase de robots que presentan un caminado pasivo y dinámico fue introducido a finales de los 80's por Mc Geer [32] donde toma de inspiración el desarrollo de aeroplanos. El desarrolló de manera satisfactoria un prototipo de piernas rectas y uno con rodillas de dos dimensiones que eran capaces de caminar en pendientes de manera suave y elegante con la limitante de las caídas hacia alguno de los lados ya que caminaba hacia adelante.

En 1998, Huang et al. [11] proponen un método para la planificación de los patrones de locomoción de un robot de morfología humana, teniendo en cuenta las restricciones del ambiente y las trayectorias de las piernas. Propusieron un movimiento de cadera de dos parámetros que le permitía tener una mayor estabilidad.

En 1990, Zheng [35] propuso un esquema para subir superficies inclinadas. mediante el uso de sensores de fuerza colocados en los pies donde el cambio del tipo de superficie pueda ser detectada y entonces compensar la inclinación generando los movimientos apropiados en los motores.

En 2001, Collins et al. [4] desarrollaron un dispositivo (figura 2.23) que les permitió experimentar sobre el caminado pasivo y dinámico, donde usaron un diseño parecido al de McGeer [33] implementando un par de brazos que se mueven como si fueran otro par de piernas donde a diferencia de Mc. Geer que lo hizo en dos dimensiones, Collins lo hizo para 3 dimensiones concluyendo que si es posible hacer una máquina que camine como los humanos.

En 2002, Kajita et al. [15] para el análisis del caminado en tiempo real de un robot bípedo analizaron la dinámica de un péndulo invertido en tres dimensiones en donde propusieron un algoritmo para la generación de patrones de caminado. Experimentarán



Figura 2.23: Robot con 2 piernas y rodillas. En su artículo hacen notar en la imagen izquierda el brazo derecho gira hacia adelante mientras que la pierna izquierda gira hacia adelante.

con el robot bípedo HRP-2L usando un gamepad como entrada para darle dirección y velocidad al robot (figura 2.24).

En 2003, Kuorki et al. [18] diseñaron un software que permite generar movimientos de brazos y pernas a través de un editor tridimensional (figura 2.25). La parte más importante es el motor generador de movimiento además de que una vez que se genera el movimiento se puede exportar a un dispositivo para poderse ejecutar en el robot de entretenimiento SDR-4X.

En 2004, Endo et al. [7] analizan y diseñan un nuevo enfoque para el control de la locomoción bípeda. Argumentan que ZMP es un enfoque de orden fisiológico y que no corresponden a un modelo humano ya que la forma en como camina un humano tiene que ver con aspectos biológicos y proponen un nuevo elemento a tomar en cuenta como lo es el oscilador neural. El oscilador neural fue formulado originalmente por Matsuoka y

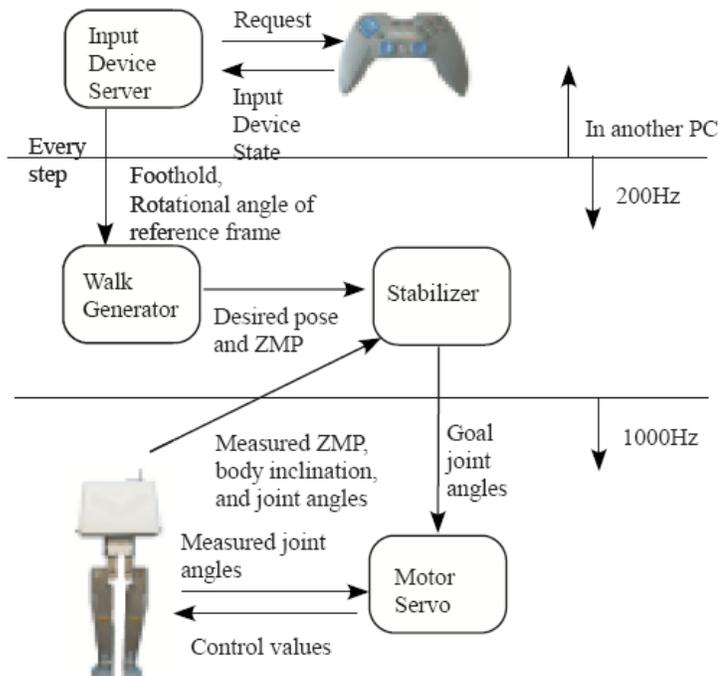


Figura 2.24: Sistema de control para la generación de caminado a través de un gamepad.

lo usan comúnmente para el modelo de control CPG (Generador de patrones central por sus siglas en inglés). Endo et al. proponen un nuevo oscilador neural que no este basado en que el CPG este conectado directamente a cada joint como si fuese un musculo sino que se trabaje en la forma del movimiento. Hacen un comparativo de los resultados simulados y los que físicamente obtuvieron en su robot (figura 2.26).

En 2004, Jung-Hoon and Jun-ho [14] desarrollaron una tecnica de caminado que consta de tres etapas para el caminado dinámico de un robot con morfología humana. Dicha plataforma es la KHR-1 (figura 2.27). Analizan el enfoque del péndulo invertido en ZMP y determinan que existe un error introducido por la vibración cuando una pierna es apoyada sobre el piso por lo que proponen una solución que consta de tres pasos que son: El controlador de la amortiguación, el de la orientación y el de posición del aterrizaje. (figura 2.28).

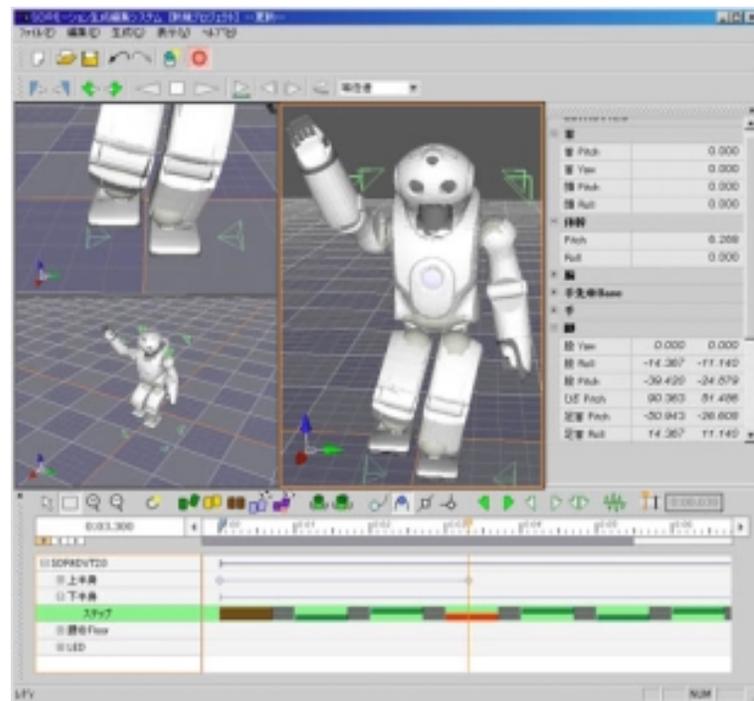


Figura 2.25: Editor de trayectoria del pie.

En 2004, Vokobrativic and Borovac [21] por el echo de que en ese año se celebraban el 35 aniversario de vida del enfoque del ZMP (Zero Moment Point) hacen un análisis de su importancia y de su utilidad en los diseños de control de locomoción a lo largo de esos 35 años y concluyen que no solamente ha sido de gran importancia, sino que seguira siendo una parte muy importante hacia futuro.

En 2006, Kajita et al. [16] implementan un generador de patrones de caminado para un robot bípedo el cual permite contar con un controlador ZMP (Zero Moment Point) adicional teniendo como resultado una mayor velocidad en el caminado.

En 2006, Wongsuwarn and Laowattana [9] presentan un nuevo enfoque en el control de la locomoción en un robot bípedo basado en un enfoque de sistema Neuro-Difuso implementandolo en el robot FHR-1 (figura 2.30) teniendo como resultado un algoritmo funcional.

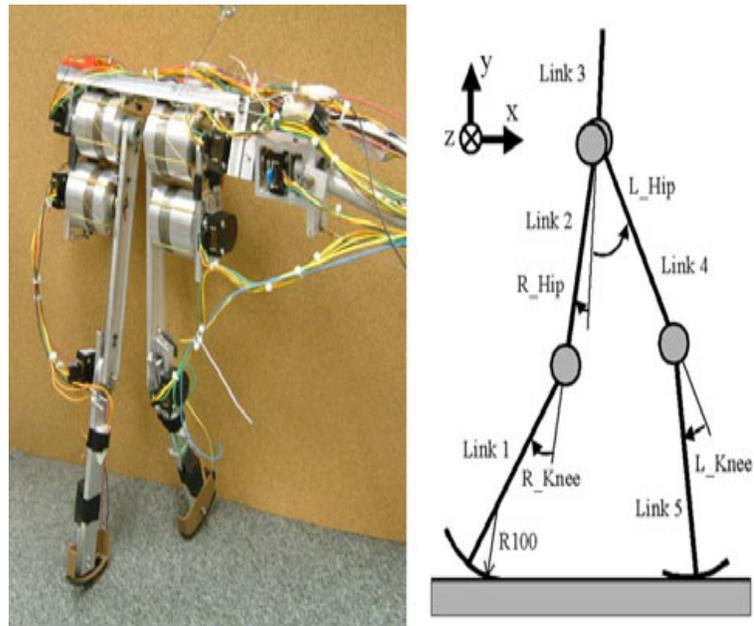


Figura 2.26: Robot donde se efectuaron experimentos de los algoritmos de control basados en un oscilador neural.

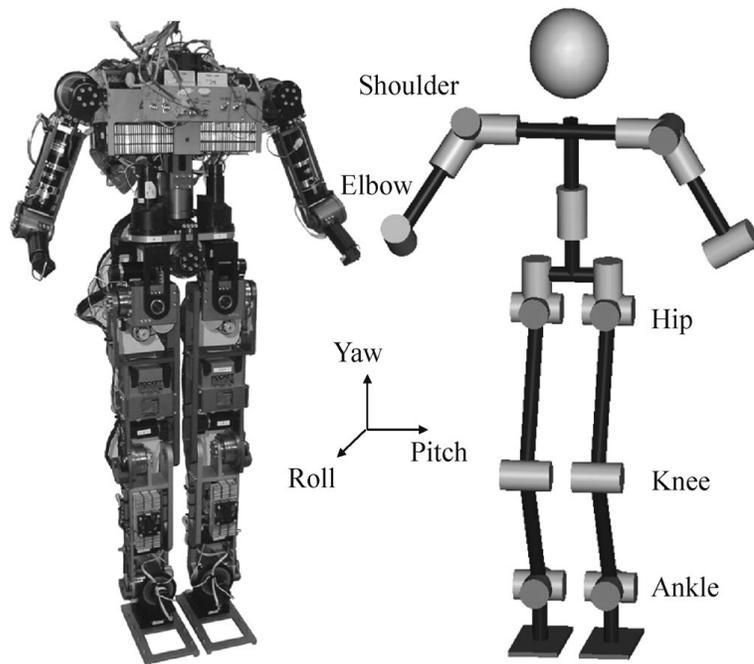


Figura 2.27: Fotografía y estructura de las articulaciones del robot KHR-1.

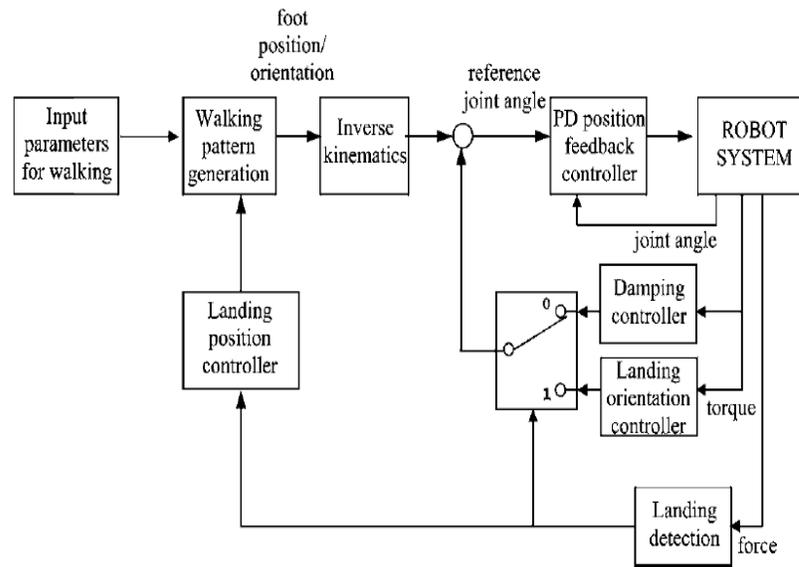


Figura 2.28: Diagrama de bloques de el control de caminado dinámico.

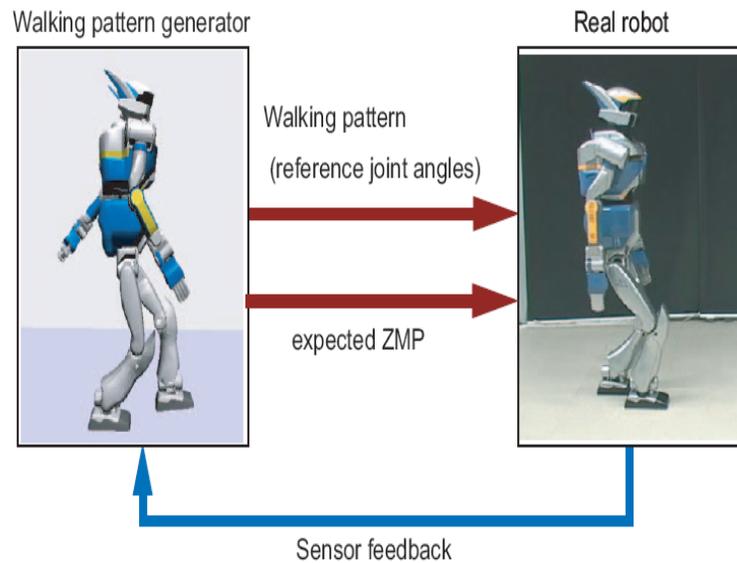


Figura 2.29: Esquema de control con retroalimentación.

En 2009, Picado et al. [26] presentan un nuevo enfoque en el control de la locomoción en un robot bípedo basado en un enfoque biológico con el uso de algoritmos

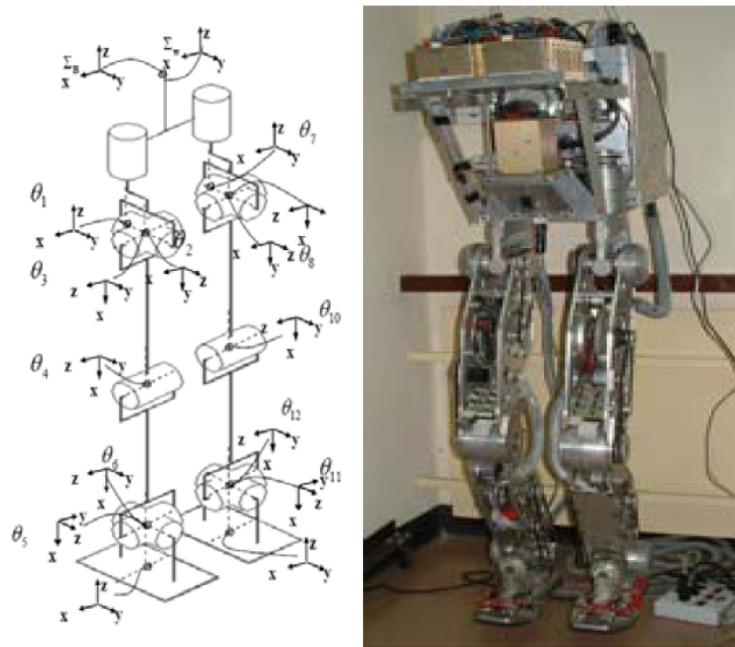


Figura 2.30: Fotografía y esquema de articulaciones del robot FHR-1.

genéticos (figura 2.31) el cual esta basado en las series de Fourier para la trayectoria de las articulaciones. Este trabajo se realizo solamente simulado usando 12 osciladores de simple frecuencia para la generación de parámetros de entrada para algoritmo genético.

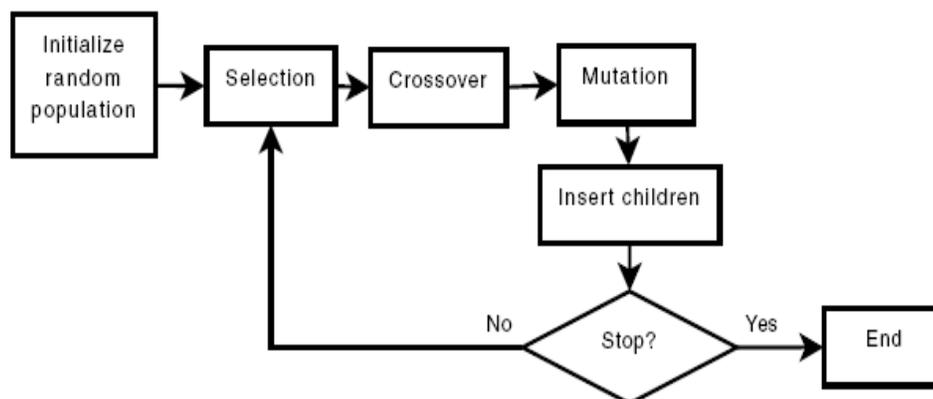


Figura 2.31: Esquema general de un algoritmo genético.

En 2009, Anderson and Hodgins [28] con el uso del robot humanoide Sarcos Premium (figura 2.32) desarrollaron un control para el balance de su estructura orientado a adaptar los torques y evitar que se caiga ante perturbaciones externas o errores del modelado desarrollando técnicas de adaptación.



Figura 2.32: Robot humanoide sarcos premium.

En 2011, Perrin et al. [24] presentan un nuevo enfoque de generación de patrones de caminado para una plataforma bípeda que se llama half-steps que es la reducción dimensional del problema mediante la parametrización del espacio tridimensional enfocándose a la plataforma HRP-2 (figura 2.24). Hasta ese momento solo contaban con la simulación. Por otra parte, Mojtaba [29] nos presenta un algoritmo de control para la locomoción bípeda usando algoritmos genéticos como generador central de patrones en su modelo oscilador neural para el aprendizaje. Dicho modelo se puede ver en la figura 2.33

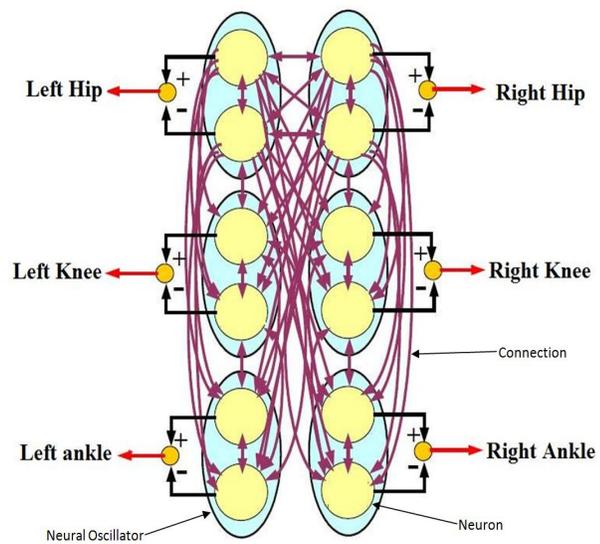


Figura 2.33: Cada neurona esta conectada a las demás neuronas. El oscilador neural consiste de 12 neuronas.

Capítulo 3

Cinemática

La cinemática estudia la descripción analítica del movimiento de los cuerpos en el espacio sin importar las fuerzas que lo causan [1].

Existen dos enfoques para abordar la cinemática del robot, el primero de ellos se conoce como enfoque cinemático directo, y consiste en determinar cuál es la posición y orientación del efector final del robot con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia con respecto a los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot. El segundo denominado enfoque cinemático inverso que resuelve la configuración que debe adoptar el robot (los valores para cada una de sus articulaciones) conociendo la posición y orientación del efector final [6].

3.1. Cinemática directa

La cinemática directa aborda el problema geométrico de calcular la posición y orientación del efector final del manipulador con respecto a un sistema de referencia fijo en un plano cartesiano (X, Y, Z) , en donde se conoce el valor de cada ángulo de los eslabones $(\theta_1, \theta_2, \theta_3 \dots \theta_n)$ con respecto a otro, así como la estructura geométrica de cada eslabón.

Dado que la convención Denavit-Hartenberg(D-H) un método sistemático para describir y representar la geometría espacial de los elementos de una cadena cinemática con respecto a un sistema de coordenadas fijo. Este método hace uso de una matriz de transformación homogénea de 4x4 (3.1), la cual describe la relación entre dos elementos consecutivos de la cadena cinemática [2].

$${}_{i-1}A^i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{(i-1)} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{(i-1)} & \cos\theta_i \cos\alpha_{(i-1)} & -\sin\alpha_{(i-1)} & -\sin\alpha_{(i-1)}d_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{(i-1)} & \cos\theta_i \sin\alpha_{(i-1)} & \cos\alpha_{(i-1)} & \cos\alpha_{(i-1)}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 3.1: Matriz homogénea D-H

Cómo los parámetros D-H son los que definen el paso de un sistema de referencia al siguiente sistema a travez de una articulación, estos parámetros sólo dependen de las características geométricas de cada elemento y de las articulaciones que les unen con los elementos anterior y posterior. Así para obtener la ubicación espacial con respecto al sistema de referencia global se realiza una multiplicación de las matrices de transformación D-H de cada uno de los elementos o eslabones que comprende la cadena cinemática.

$$T = A_0^1 * A_1^2 * A_2^3 \dots * A_{n-1}^n \quad (3.1)$$

Es importante recordar que el producto de matrices no es conmutativo y en la base o el lugar donde inicia la cadena cinemática se define el sistema de referencia global.

3.2. Cinemática inversa

El problema cinemático inverso trata de obtener los ángulos $(\theta_1, \theta_2, \theta_3 \dots \theta_n)$ de cada articulación en base a una posición (X, Y, Z) del efector final, la obtención de los ángulos es más complejo y necesita mayor capacidad computacional para poder realizar los cálculos necesarios además, de que a mayor número de eslabones en la cadena cinemática incrementa el número de soluciones que se pueden obtener, volviéndose en un problema cíclico. Este problema puede tener muchas soluciones, una única solución o ninguna [31].

Por una parte, existen soluciones cerradas para solucionar el problema del cálculo de la cinemática inversa como lo es el método geométrico.

Así también, hay soluciones de aproximación o numericas como es el uso del modelo diferencial. A continuación se muestran las soluciones antes mencionadas.

3.2.1. Método Geométrico

Primero recordemos que las soluciones cerradas se aplican a sistemas de pocos grados de libertad donde a través de funciones trigonométricas se pueden encontrar cada uno de los ángulos de cada articulación que forma la cadena cinemática.

A manera de ejemplificar el método geométrico vamos a proponer el problema que se muestra en la figura 3.2.

Para este ejemplo primero se obtiene el valor del primer grado de libertad, es decir el ángulo q_1 ,

$$q_1 = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right) \quad (3.2)$$

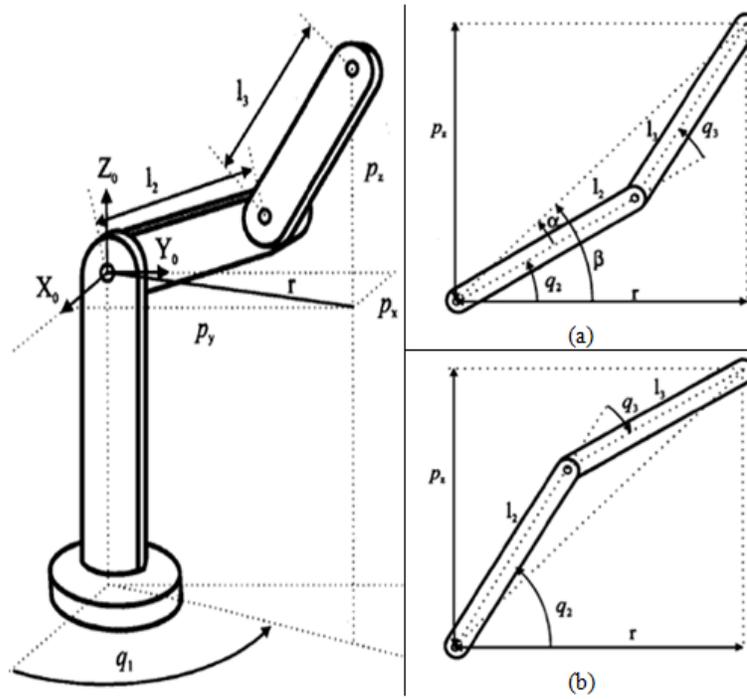


Figura 3.2: Cadena cinemática de tres grados de libertad.

Se aplica la ley de los senos y se tiene que:

$$r_2 = p_x^2 + p_y^2 \tag{3.3}$$

$$r_2 + p_z^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos(q_3) \tag{3.4}$$

Se sustituye la ecuación 3.3 y 3.4 y se obtiene la ecuación 3.5 que representa la posición angular q_3 .

$$\cos(q_3) = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \tag{3.5}$$

Por identidad trigonométrica, el seno de q_3 se calcula de acuerdo a la ecuación 3.6.

$$\sin(q_3) = \pm\sqrt{1 - \cos^2(q_3)} \quad (3.6)$$

Por lo tanto, q_3 se despeja de tal forma que obtenemos la ecuación 3.7.

$$q_3 = \arctan\left(\frac{\pm\sqrt{1 - \cos^2(q_3)}}{\cos(q_3)}\right) \quad (3.7)$$

Para encontrar el valor del ángulo q_2 se tiene que:

$$q_2 = \beta - \alpha \quad (3.8)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{p_z}{r}\right) = \arctan\left(\frac{p_z}{\pm\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}\right) \quad (3.9)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{l_3 \sin(q_3)}{l_2 + l_3 \cos(q_3)}\right) \quad (3.10)$$

$$q_2 = \arctan\left(\frac{p_z}{\pm\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}\right) - \arctan\left(\frac{l_3 \sin(q_3)}{l_2 + l_3 \cos(q_3)}\right) \quad (3.11)$$

3.2.2. Modelo Diferencial (Matriz Jacobiana)

El modelado cinemático de un robot busca las relaciones entre las variables articulares y la posición y orientación del extremo o efector final. En esta relación no se tienen en

cuenta las fuerzas o pares que actúan sobre el (actuadores, cargas fricciones, etc.) y que pueden originar el movimiento del mismo. Sin embargo, si incumbe a la cinemática del robot el conocer la relación entre las coordenadas articulares y las de posición y orientación del extremo, o lo que es equivalente, el efecto que un movimiento diferencial de las variables articulares tiene sobre las variables en el espacio de tarea. Esta relación queda definida por el modelo diferencial. Mediante él, el sistema de control del robot puede establecer que las velocidades debe imprimir a cada articulación (a través de sus respectivos actuadores) para conseguir que el extremo desarrolle una trayectoria temporal concreta, por ejemplo, una línea recta a velocidad constante [1].

Para este y otros fines, es de gran utilidad disponer de la relación entre las velocidades de las coordenadas articulares y las de posición y orientación del extremo del robot. La relación entre ambos vectores de velocidad se obtiene a través de la denominada matriz Jacobiana.

El Jacobiano es comunmente escrito como $J(\mathbf{f}, \mathbf{x})$ y su representación matricial se muestra en la figura 3.3.

$$J(\mathbf{f}, \mathbf{x}) = \frac{d\mathbf{f}}{d\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_N} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_M}{\partial x_1} & \dots & \dots & \frac{\partial f_M}{\partial x_N} \end{bmatrix}$$

Figura 3.3: Matriz Jacobiana.

Existen dos formas de relacionar las velocidades articulares con la posición y orientación del extremo del robot:

- Matriz Jacobiana Analítica relaciona las velocidades articulares con las velocidades del extremo del robot, siendo ésta la posición y orientación expresada en base a sus coordenadas cartesianas y a sus ángulos de Euler

$$(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}) \quad (3.12)$$

- Matriz Jacobiana Geométrica relaciona las velocidades articulares con las velocidades lineal y angular

$$(v_x, v_y, v_z, w_x, w_y, w_z) \quad (3.13)$$

con que se mueve el extremo del robot.

La matriz Jacobiana directa permite conocer las velocidades del extremo del robot a partir de los valores de las velocidades de cada articulación. Por su parte, la matriz Jacobiana inversa permitirá conocer las velocidades articulares necesarias para obtener un vector concreto de velocidades del extremo [1].

3.2.2.1. Jacobiana geométrica

La matriz Jacobiana geométrica relaciona las velocidades articulares con las velocidades lineal (v) y angular (w) del extremo del robot expresada habitualmente en el sistema de referencia de la base del robot. So

Ahora bien, el Jacobiano es un vector derivativo con respecto a otro. Si se tiene una función evaluada en un vector de variables $f(x)$, el Jacobiano es una matriz de derivadas parciales, es decir, una derivada parcial por cada uno de los componentes de los vectores.

La matriz Jacobiana contiene toda la información necesaria para relacionar un cambio en cualquiera de los componentes de x a un cambio en cualquiera de los componentes de f .

Definimos el vector 3.14 para representar un arreglo de una cadena cinemática de M grados de libertad.

$$\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_M] \quad (3.14)$$

También definimos el vector 3.16 para representar un arreglo de N grados de libertad que describen la posición y orientación del efector final en el espacio de trabajo.

$$e = [e_1, e_2, \dots, e_N] \quad (3.15)$$

A manera de ejemplo, se define una cadena cinemática de dos grados de libertad en el espacio referencial de dos dimensiones, donde cada grado de libertad es de tipo rotacional y que se aprecia en la figura 3.4.

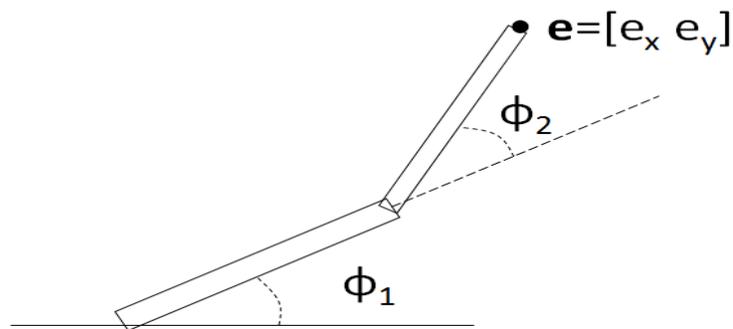


Figura 3.4: Robot con 2 articulaciones rotacionales.

Por tanto la matriz Jacobiana asociada al brazo se muestra en la figura 3.5.

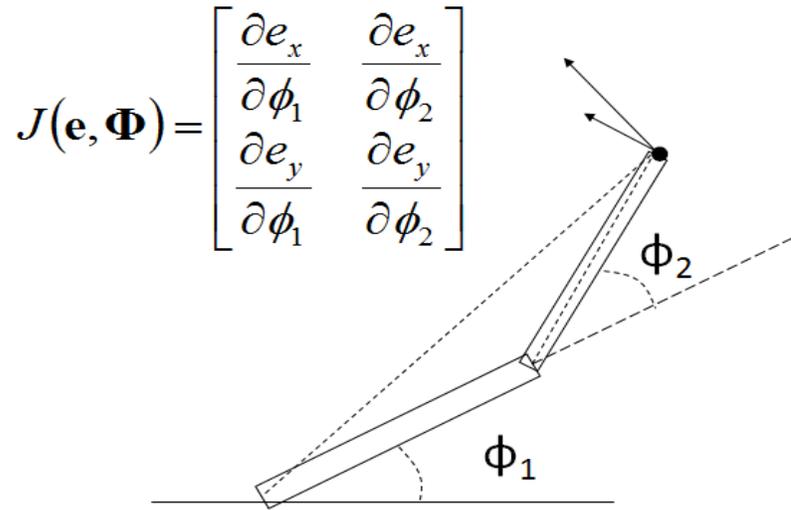


Figura 3.5: Robot con 2 articulaciones rotacionales.

El dominio del Jacobiano $J(e, \Phi)$ varía sobre el dominio de todas las posiciones posibles para Φ . Por tanto, dado un conjunto de posiciones del vector Φ , se pueden calcular de manera explícita cada uno de los componentes.

Se dice que existe un vector $\Delta\phi$ que representa un pequeño cambio en la configuración de la cadena cinemática de modo que 3.16:

$$\Delta e \approx \frac{de}{d\Phi_i} \cdot \Delta\Phi = J(e, \Phi) \cdot \Delta\Phi = J \cdot \Delta\Phi \quad (3.16)$$

$$\Delta e \approx J \cdot \Delta\Phi \quad (3.17)$$

$$\Delta\Phi \approx J^{-1}\Delta e \quad (3.18)$$

Si Φ representa la configuración actual del conjunto de articulaciones y e representa el efector final, entonces definimos a g como un punto alcanzable de e llamado meta. Por lo que debemos elegir un valor para Δe que permita mover el efector lo más próximo a g (ecuación 3.19).

$$\Delta e = g - e \quad (3.19)$$

Se podría esperar que la configuración $\Delta\Phi$ pueda con precisión ubicar exactamente el estado actual del efector en el punto meta deseado, sin embargo esto no sucede. Aun así, se puede aproximar de manera suave eligiendo un pequeño paso definido en la ecuación 3.20)

$$\Delta e = \beta(g - e) \quad (3.20)$$

Como se quiere saber como cambiará la posición en el espacio universal del efector final si rotamos sobre el eje. Por lo tanto, es necesario encontrar el eje y el punto pivote en el espacio universal (ecuaciones 3.21) y 3.22).

$$a'_1 = a_i \cdot w_{i_padre} \quad (3.21)$$

$$r'_1 = r_i \cdot w_{i_padre} \quad (3.22)$$

Recordando que son transformaciones como vectores homogéneos.

Transformación como posición (ecuación 3.23):

$$(r_x \ r_y \ r_z \ 1) \quad (3.23)$$

Transformación como dirección (ecuación 3.24):

$$(a_x \ a_y \ a_z \ 0) \quad (3.24)$$

Ahora solo queda definir como se obtienen las parciales con respecto a cada articulación. De manera gráfica se muestra la imagen figura 3.6. Obteniendo las parciales con respecto a cada articulación como se muestra en la ecuación 3.25.

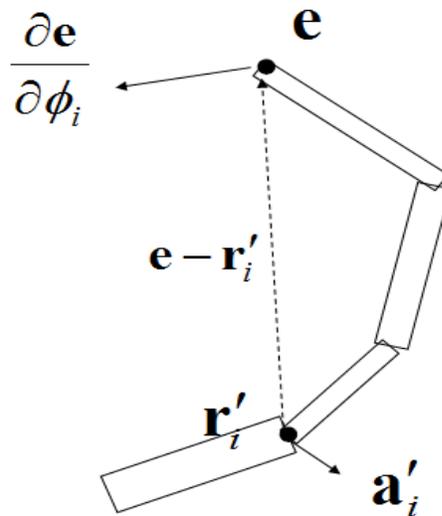


Figura 3.6: Robot con 3 articulaciones rotacionales.

$$\frac{\partial e}{\partial \phi_i} = a'_i x(e - r'_i) \quad (3.25)$$

dónde,

- a'_i : unidad de longitud del eje de rotación en el espacio universal

- r'_i : posición del joint pivote en el espacio universal
- e : posición del efector final el espacio universal

Capítulo 4

Dinámica

La dinámica se ocupa de la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que en él se origina. Por lo tanto, el modelo dinámico de un robot tiene por objeto conocer la relación entre el movimiento del robot y las fuerzas implicadas en el mismo [1].

Esta relación se obtiene mediante el denominado modelo dinámico, que relaciona matemáticamente:

- La localización del robot definida por sus variables articulares o por las coordenadas de localización de su extremo, y sus derivadas: velocidad y aceleración.
- Las fuerzas pares aplicados en las articulaciones (o en el extremo del robot).
- Los parámetros dimensionales del robot, como longitud, masa e inercias de sus elementos.

La obtención de este modelo para mecanismos de uno o dos grados de libertad no es excesivamente compleja, pero a medida que el número de grados de libertad aumenta, el planteamiento y obtención del modelo se complica enormemente. Por este motivo no siempre es posible obtener un modelo dinámico expresado de una forma cerrada, esto es, mediante una serie de ecuaciones, normalmente del tipo diferencial de segundo orden,

cuya integración permita conocer que el movimiento surge al aplicar unas fuerzas o que fuerzas hay que aplicar para obtener un movimiento determinado [1].

El modelo dinámico debe ser resuelto entonces de manera iterativa mediante la utilización de un procedimiento numérico. El problema de la obtención del modelo dinámico de un robot es, por lo tanto, uno de los aspectos más complejos de la robótica, lo que ha llevado a ser obviado en numerosas ocasiones. Sin embargo, el modelo dinámico es imprescindible para conseguir los siguientes fines:

- Simulación del movimiento del robot.
- Diseño y evaluación de la estructura mecánica del robot.
- Dimensionamiento de los actuadores.
- Diseño y evaluación del control dinámico del robot.

Este último fin es evidentemente de gran importancia, pues de la calidad del control dinámico del robot depende la precisión y velocidad de sus movimientos. La gran complejidad ya comentada existente en la obtención del modelo dinámico del robot, ha motivado que se realicen ciertas simplificaciones, de manera que así pueda ser utilizado en el diseño del controlador.

Es importante hacer notar que el modelo dinámico completo de un robot debe incluir no solo la dinámica de sus elementos (barras o eslabones) sino también la propia de sus sistemas de transmisión, de los actuadores y sus equipos electrónicos de mando. Estos elementos incorporan al modelo dinámico nuevas inercias, rozamientos, saturaciones de los circuitos electrónicos, etc. aumentando aun más su complejidad [1].

Por ultimo, es preciso señalar que si bien en la mayor parte de las aplicaciones reales de robótica, las cargas e inercias manejadas no son suficientes como para originar deformaciones en los eslabones del robot, en determinadas ocasiones no ocurre así, siendo

preciso considerar al robot como un conjunto de eslabones no rígidos. Aplicaciones de este tipo pueden encontrarse en la robótica espacial o en robots de grandes dimensiones.

4.1. Modelo dinámico de la estructura de un Robot rígido

La obtención del modelo dinámico de un mecanismo, y en particular de un robot, se basa fundamentalmente en el planteamiento del equilibrio de fuerzas establecido en la segunda ley de Newton, o su equivalente para movimientos de rotación, la denominada ley de Euler:

$$F = m \cdot dv \quad (4.1)$$

$$T = I \cdot d\omega + \omega \cdot I\omega \quad (4.2)$$

Así, en el caso simple de un robot monoarticular como el representado en la figura 5.9, el equilibrio de fuerzas-pares daría como resultado la ecuación 4.3.

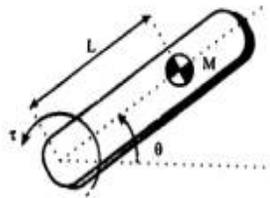


Figura 4.1: Modelo de eslabón con masa concentrada.

$$\tau = I\left(\frac{d^2\theta}{dt^2}\right) + MgL \cdot \cos \theta = ML^2 d^2\theta + MgL \cdot \cos \theta \quad (4.3)$$

En donde se ha supuesto que toda la masa se encuentre concentrada en el centro de la gravedad del elemento, que no existe rozamiento alguno y que no se manipula ninguna carga.

Para un par motor t determinado, la integración de la ecuación anterior, daría lugar a la expresión de $\theta(t)$ y de sus derivadas $d\theta(t)$ y $d^2\theta(t)$, con lo que sería posible conocer la evolución de la coordenada articular del robot y de su velocidad y aceleración.

De forma inversa, si se pretende que $\theta(t)$ evolucione según una determinada función del tiempo, sustituyendo en la ecuación anterior, podría obtenerse el par $\tau(t)$ que sería necesario aplicar. Si el robot tuviese que ejercer alguna fuerza en su extremo, ya sea al manipular una carga o por ejemplo, realizar un proceso sobre alguna pieza, bastaría con incluir esta condición en la mencionada ecuación y proceder del mismo modo.

Se tiene así que del planteamiento del equilibrio de fuerzas y pares que intervienen sobre el robot se obtienen los denominados modelos dinámicos directo e inverso:

- Modelo dinámico directo: expresa la evolución temporal de las coordenadas articulares del robot en función de las fuerzas y pares que intervienen.
- Modelo dinámico inverso: expresa las fuerzas y pares que intervienen en función de la evolución de las coordenadas articulares y sus derivadas.

El planteamiento del equilibrio de fuerzas en un robot real de 5 o 6 grados de libertad, es mucho más complicado. Debe tenerse en cuenta que junto con las fuerzas de inercia y gravedad, aparecen fuerzas de Coriolis debidas al movimiento relativo existente entre los diversos elementos, así como de fuerzas centrípetas que dependen de la configuración instantánea del manipulador.

La obtención del modelo dinámico de un robot ha sido y es objeto de estudio e investigación. Numerosos investigadores han desarrollado formulaciones alternativas,

basadas fundamentalmente en la mecánica Newtoniana y Lagrangiana, con el objeto de obtener modelos manejables por los sistemas de cálculo de una manera más eficiente.

4.2. Modelado mediante la formulación de Newton-Euler

La formulación de Newton-Euler parte del equilibrio de fuerzas 4.1 y pares 4.2.

Un adecuado desarrollo de estas ecuaciones conduce a una formulación recursiva en la que se obtienen la posición, velocidad y aceleración del eslabón i referidos a la base del robot a partir de los correspondientes del eslabón $i-1$ y del movimiento relativo de la articulación i . De este modo, partiendo del eslabón 1 se llega al eslabón n . Con estos datos se procede a obtener las fuerzas y pares actuantes sobre el eslabón i referidos a la base del robot a partir de los correspondientes al eslabón $i+1$, recorriéndose de esta forma todos los eslabones desde el eslabón n al eslabón 1.

El algoritmo se basa en operaciones vectoriales (con productos escalares y vectoriales entre magnitudes vectoriales, y productos de matrices con vectores) siendo más eficiente en comparación con las operaciones matriciales asociadas a la formulación Lagrangiana. De hecho, el orden de complejidad computacional de la formulación recursiva de Newton-Euler es $O(n)$ lo que indica que depende directamente del número de grados de libertad.

4.2.1. Algoritmo computacional para el modelo dinámico de Newton-Euler

1. Asignar a cada eslabón un sistema de referencia de acuerdo a las normas de D-H.

2. Obtener las matrices de rotación ${}^{i-1}R_i$ y sus inversas ${}^iR_{i-1}$
3. Establecer las condiciones iniciales.
4. Obtener la velocidad angular del sistema S_i .
5. Obtener la aceleración angular del sistema S_i .
6. Obtener la aceleración lineal del sistema i .
7. Obtener la aceleración lineal del centro de gravedad del eslabón i .
8. Obtener la fuerza ejercida sobre el eslabón i .
9. Obtener el par ejercido sobre el eslabón i .
10. Obtener la fuerza o par aplicado a la articulación i .

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las experimentaciones realizadas conforme se fueron abordando los problemas cinemático y dinámico para obtener un primer algoritmo de locomoción bípeda en la plataforma Bioloid Premium Kit.

Es importante mencionar que se realizaron pruebas en:

- Microsoft Excel.
- Lenguaje de programación C.
- Actor Digital.
- En la plataforma Bioloid Premium Kit.

5.1. Análisis del Modelo

La plataforma Bioloid Premium Kit configuración tipo A se muestra en la figura 5.1.

En este trabajo solo se toma en cuenta la cinemática de las piernas por lo que se analiza la parte que contiene la cintura, piernas y pies de la plataforma antes mencionada.



Figura 5.1: Plataforma Bioloid Premium kit Configuración tipo A

El modelo cinemático asociado de las articulaciones que conforman las extremidades inferiores de la plataforma se muestran en la figura 5.2.

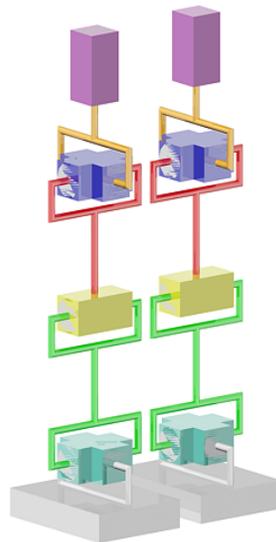


Figura 5.2: Configuración de las piernas de la plataforma bioloid premium kit configuración tipo A

5.1.1. Obtención de los parámetros

Es importante definir como se abordará la solución al problema cinemático asociado a las piernas.

En este caso descomponemos las piernas (figura 5.2) en dos cadenas cinemáticas (pierna derecha e izquierda) de seis grados de libertad.

Haciendo el analisis de la pierna de la plataforma bioloid premium kit (5.3) se obtiene la tabla de parámetros que describen las posiciones relativas de un par de ejes sucesivos pertenecientes a dos sistemas de coordenadas diferentes.

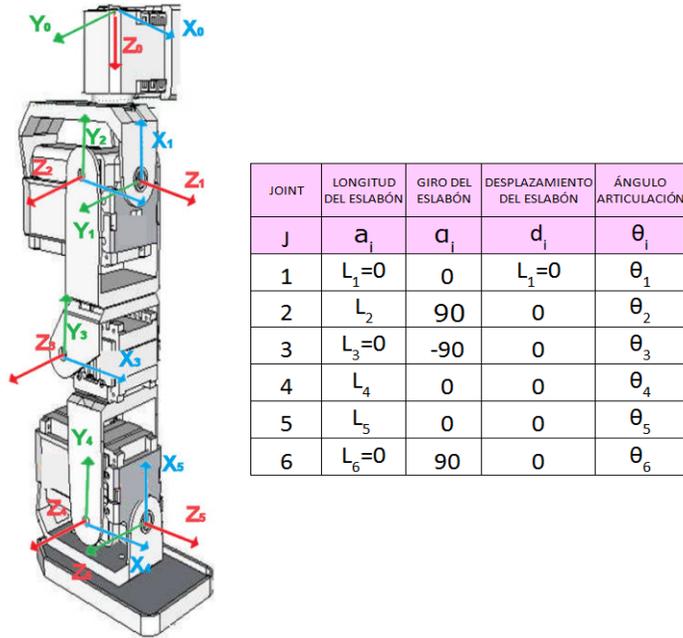


Figura 5.3: Sistemas de referencia asociados a cada articulación de la pierna derecha y tabla de parámetros D-H

5.2. Cinemática Directa

Microsoft Excel es una herramienta que permite trabajar rápidamente con prototipos gráficos. Además, posee gran capacidad para el cálculo de funciones trigonométricas así como para el manejo de operaciones matriciales. Por esta razón, se decidió utilizar esta herramienta para desarrollar y probar el primer prototipo que permita simular el problema cinemático directo con un robot articulado de seis grados de libertad.

Se utilizó una hoja de cálculo en la cual se propusieron un conjunto de vértices para formar un prisma rectangular en R3 proyectandolos en un gráfico en 2-D.

A manera de ejemplo se planteo el siguiente problema: Encontrar la posición y orientación del extremo final de una cadena articulada con 6 grados de libertad (con $n=6$), dónde cada articulación es rotacional y cada eslabón tiene una longitud=4. Cabe señalar que los ejes de rotación de cada articulación son paralelos entre sí.

Representación gráfica	Angulo de cada articulación					
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
Figura a)	0	0	0	0	0	0
Figura b)	10	0	0	0	0	0
Figura c)	30	0	0	0	0	0
Figura d)	30	40	0	0	0	0
Figura e)	30	40	50	0	0	0
Figura f)	30	40	50	60	0	0
Figura g)	30	40	50	60	-80	0
Figura h)	30	40	50	60	-80	-120

Tabla Valores propuestos para los ángulos θ_i de cada articulación.

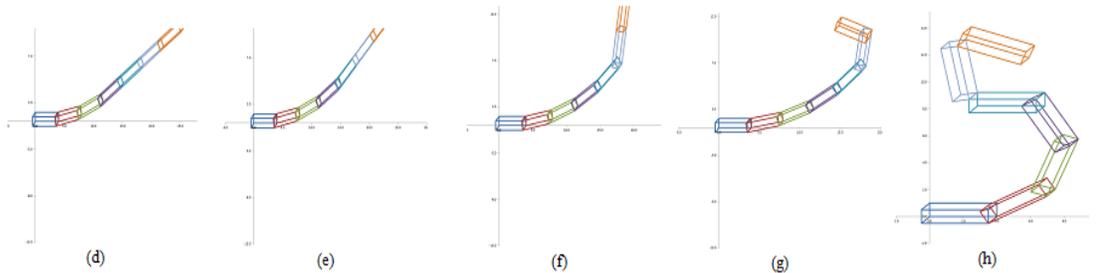


Figura 5.4: Graficación de una cadena de seis grados de libertad y variando los ángulos theta i en la tabla D-H

Se realiza un análisis de la cadena articulada para obtener los parámetros D-H y se obtienen los parámetros estructurales. Donde los d_i son igual a cero debido a que ninguna articulación es prismática, los α_i son igual a cero porque nunca cambia de dirección el eje de rotación dentro de la cadena cinemática y los a_i son igual a cuatro, debido a que es la longitud del eslabón.

Posteriormente se genera el gráfico como se describió y se procede a variar los valores de θ_i para validar si la técnica de cinemática directa propuesta se ejecuta de manera correcta. Para ello se varía el valor de los ángulos en cada una de las articulaciones de la cadena,

Una vez realizado el ejemplo anterior se le aplicaron los ángulos θ_i , de la tabla D-H asociado a la pierna que se mostro en la figura 5.5

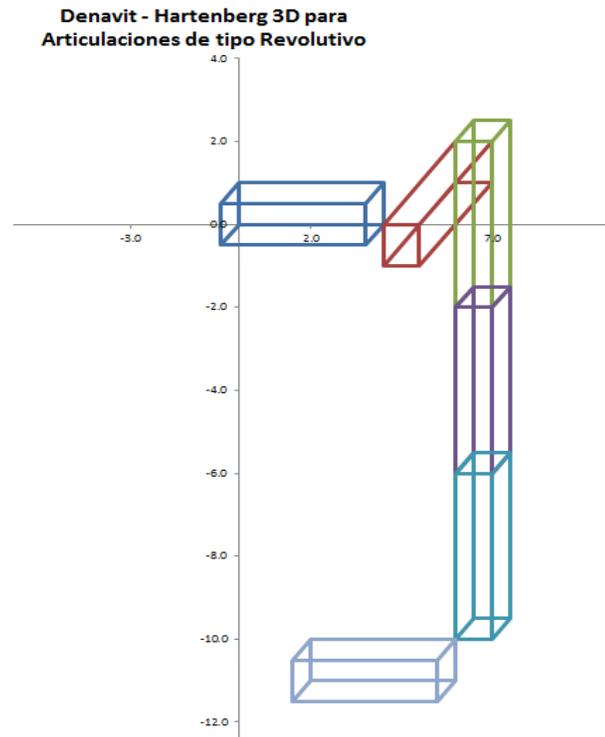


Figura 5.5: Graficación de una cadena de seis grados de libertad con los parámetros de la tabla D-H para θ_i

Ahora bien, se cuenta con el Actor Digital [34] que se muestra en la imagen 5.6

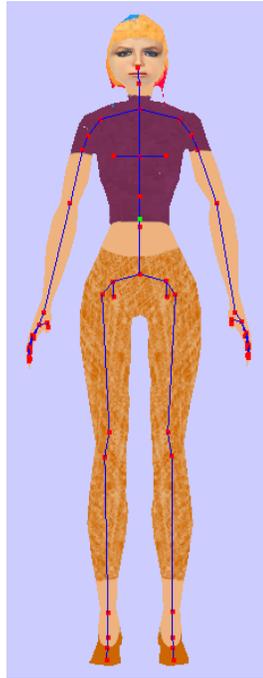


Figura 5.6: Actor Digital

Se compara la extremidad del Actor Digital con la de la plataforma Bioloid Premium Kit configuración tipo A, señalando en la imagen de las piernas del Actor Digital los puntos A que se harán corresponder con los 3 primeros grados de libertad, B que corresponde con el 4to grado de libertad y finalmente el punto C donde se alojaran los ultimos 2 grados de libertad (figura 5.7).

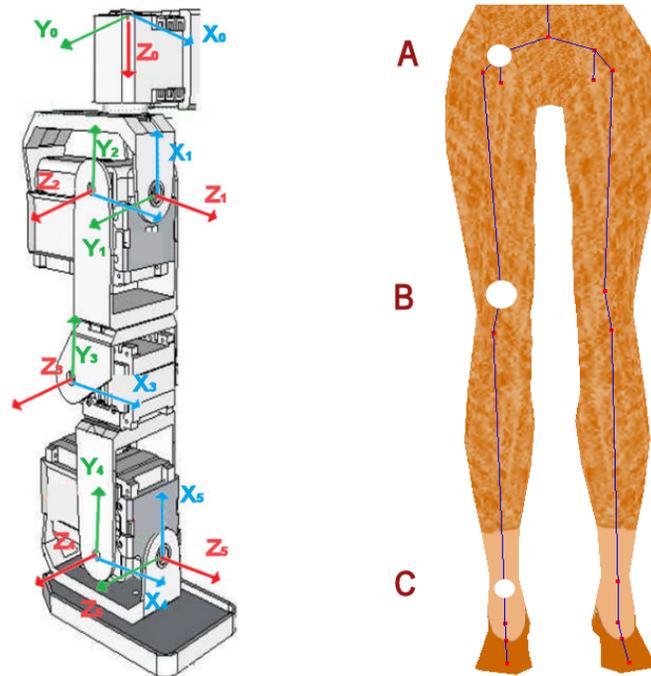


Figura 5.7: Plataforma Bioid Premium Kit configuración tipo A vs Actor Digital

5.3. Cinemática Inversa

A continuación se van a mostrar las experimentaciones realizadas implementando soluciones cerradas como el método geométrico para una cadena articulada de tres grados de libertad y numéricas como el diferenciable ya con el modelo de una pierna que con anterioridad se ha venido mencionando.

5.3.1. Método geométrico

En el capítulo anterior se muestra un ejemplo del problema de cinemática inversa asociado a un mecanismo con tres grados de libertad y su solución con el método geométrico. Es importante que esta es una solución cerrada y que aplica a cadenas cinemáticas de pocos grados de libertad, por lo que se procedió a experimentar dicho método teniendo los resultados mostrados en la figura 5.8.

Representación gráfica	Punto meta del efector final		
	x	y	z
Figura16 a)	6	-2	4
Figura16 b)	-6	-2	4
Figura16 c)	6	-2	1
Figura16 d)	-6	-2 <td 1	
Figura16 e)	-3	-4	-4
Figura16 f)	-3	4	-4
Figura16 g)	-3	0	-4
Figura16 h)	3	0	-4

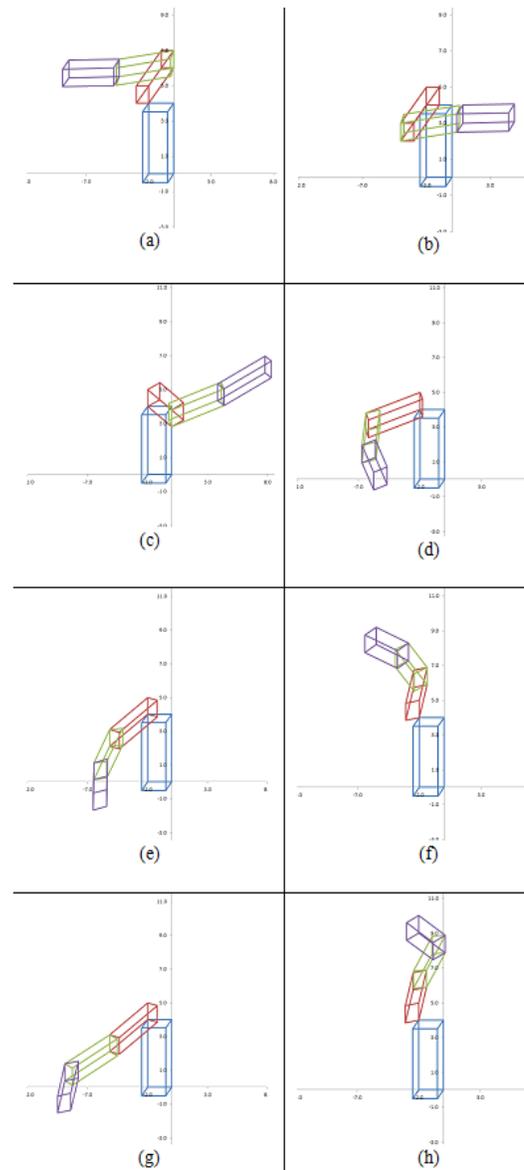


Figura 5.8: Manipulador y solución usando el método geométrico al mecanismo con 3 grados de libertad para encontrar la configuración deseada

5.3.2. Método diferenciable (Jacobiano)

Para mover la pierna de un punto inicial a un punto meta se usó el siguiente pseudo algoritmo:

1. Inicio

2. Inicializa la matriz de los parametros D-H asociados a la cadena de 6GL que compone una de las piernas de la plataforma bioloid premium kit configuración tipo A
3. Inicializa el vector de Joints
 - a) Para $i=1$ a 6GL calcula:
 - 1) Matriz Local
 - 2) Matriz Global
4. Se obtiene la matriz homogénea global asociada al efector final que contiene la posición y orientación con respecto al espacio de referencia global So
5. Definir punto meta al cual debe de ser alcanzado por el efector final
6. Computar mediante el método diferenciable (Jacobiano)
 - a) Mientras no estes lo suficientemente cerca de la meta
 - 1) Calcular $J(e, \Phi)$ para la configuración de articulaciones actual
 - 2) Calcular la inversa de la Matriz Jacobiana J^{-1}
 - 3) Calcular el incremento del efector final hacia el punto meta $\Delta e = \beta(g-e)$
 - 4) Encontrar el incremento en el vector de las articulaciones $\Delta \Phi = J^{-1} \cdot \Delta e$
 - 5) Actualizar el vector de articulaciones $\Delta \Phi = \Phi + \Delta \Phi$
 - 6) Obtener la nueva posicion y orientación del efector final, es decir calcular la cinemática directa con la nueva configuración.
7. Fin

De modo que cada columna de la matriz jacobiana queda definida por las ecuaciones 5.1 , 5.2 ,5.3 ,5.4 ,5.2 y 5.5.

$$J_1 = \begin{bmatrix} Z_0^0 \times P_6^0 \\ Z_0^0 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} Z_1^0 \times P_6^1 \\ Z_1^0 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} Z_2^0 \times P_6^2 \\ Z_2^0 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$J_4 = \begin{bmatrix} Z_3^0 \times P_6^3 \\ Z_3^0 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$J_5 = \begin{bmatrix} Z_4^0 \times P_6^4 \\ Z_4^0 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$J_6 = \begin{bmatrix} Z_5^0 \times P_6^5 \\ Z_5^0 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

dónde,

$$Z_0^0 = A_0^0(1 : 3, 3) = (0, 0, 1) \quad (5.7)$$

$$Z_1^0 = A_1^0(1 : 3, 3) = A_1^0 \quad (5.8)$$

$$Z_2^0 = A_2^0(1 : 3, 3) = A_1^0(q_1) \cdot A_2^1(q_2) \quad (5.9)$$

$$Z_3^0 = A_3^0(1 : 3, 3) = A_1^0(q_1) \cdot A_2^1(q_2) \cdot A_3^2(q_3) \quad (5.10)$$

$$Z_4^0 = A_4^0(1 : 3, 3) = A_1^0(q_1) \cdot A_2^1(q_2) \cdot A_3^2(q_3) \cdot A_4^3(q_4) \quad (5.11)$$

$$Z_5^0 = A_5^0(1 : 3, 3) = A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot A_3^2 \cdot A_4^3 \cdot A_5^4 \quad (5.12)$$

$$P_6^0 = A_6^0(1 : 3, 4) - A_0^0(1 : 3, 4) \quad (5.13)$$

$$P_6^1 = A_6^0(1 : 3, 4) - A_1^0(1 : 3, 4) \quad (5.14)$$

$$P_6^2 = A_6^0(1 : 3, 4) - A_2^0(1 : 3, 4) \quad (5.15)$$

$$P_6^3 = A_6^0(1 : 3, 4) - A_3^0(1 : 3, 4) \quad (5.16)$$

$$P_6^4 = A_6^0(1 : 3, 4) - A_4^0(1 : 3, 4) \quad (5.17)$$

$$P_6^5 = A_6^0(1 : 3, 4) - A_5^0(1 : 3, 4) \quad (5.18)$$

Un ejemplo de la corrida del algoritmo anterior es la que se observa en la figura 5.12 dónde se muestra el pinto inicial del efector final o en nuestro caso la parte final del pie de la plataforma Bioloid.

La simulación se observa en la figura 5.9.

El proceso de caminado en cadenas articuladas de 6GL se observa en la imagen 5.10

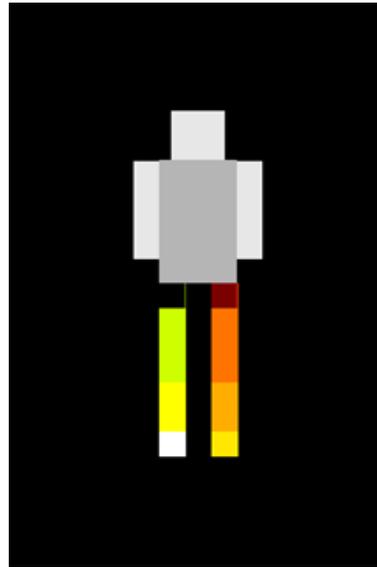


Figura 5.9: Esado inicial de la simulación

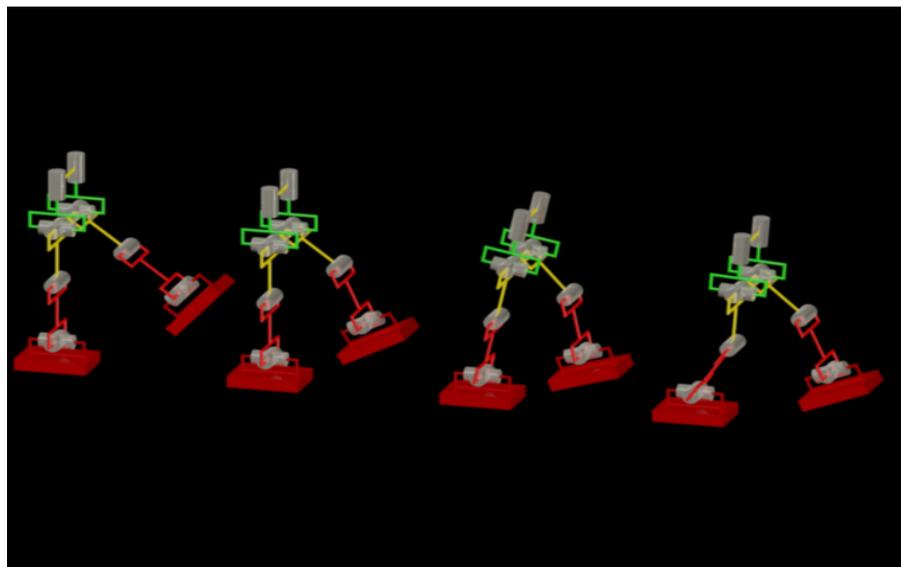


Figura 5.10: Proceso de caminado

Analizando la imagen anterior, se realizando una rutina de control usando el modelo cinemático e inverso donde primero se levanta una pierna, luego se inclina un poco la pierna de apoyo, entonces se apoya la pierna que se encontraba arriba y finalmente se

recoge la pierna que quedó atrás, el proceso se repite lo mismo para la otra pierna. Los resultados se aprecian en la imagen 5.11

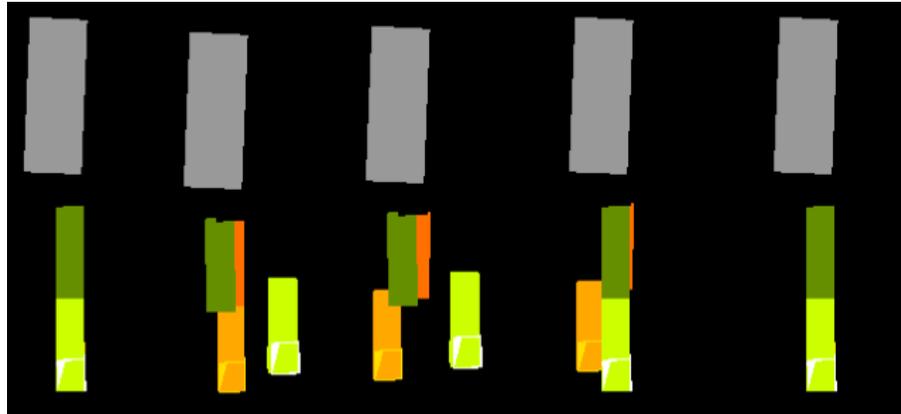


Figura 5.11: Simulación del movimiento de las articulaciones en la generación del movimiento

Las transiciones entre estados ocurren después de un tiempo fijo. Los estilos de locomoción para caminar se modelan con cuatro estados, y para correr sólo con dos. El control por posturas por sí solo no tiene equilibrio intrínseco.

```

Punto Inicial: x=-0.000000   y=-12.000000   z=-4.000000

                JACOBIANO DIRECTO

12.000000    4.000000    0.000000    -0.000000    -0.000000    -12.000000
-0.000000    -0.000000    -0.000000    -4.000000    -4.000000    0.000000
-0.000000    -0.000000    -12.000000    4.000000    8.000000    -0.000000
0.000000     0.000000     1.000000     1.000000     1.000000    -0.000000
-0.000000    -1.000000    -0.000000    -0.000000    -0.000000    -0.000000
1.000000     0.000000     0.000000     0.000000     0.000000     1.000000

                JACOBIANO INVERSO

0.041667     0.000000    -0.000000    -0.000000     0.166667     0.500000
0.000000     0.000000     0.000000     0.000000    -1.000000    -0.000000
0.000000     0.250000    -0.000000     1.000000     0.000000     0.000000
-0.000000    -1.250000    -0.250000    -3.000000     0.000000    -0.000000
0.000000     1.000000     0.250000     3.000000    -0.000000     0.000000
-0.041667     0.000000     0.000000     0.000000    -0.166667     0.500000

                VECTORES DE APROXIMACION

INCREMENTO( 0.000000 , -0.100000 , 0.000000 )
POSICION E( -0.000000 , -12.100000 , -4.000000 )

O1=0.000000
O2=0.000000
O3=-0.025000
O4=0.125000
O5=-0.100000
O6=0.000000

INCREMENTO( 0.000000 , -0.095000 , 0.000000 )
POSICION E( -0.000000 , -12.195000 , -4.000000 )

O1=0.000000
O2=0.000000
O3=-0.023750
O4=0.118750
O5=-0.095000
O6=0.000000

INCREMENTO( 0.000000 , -0.090250 , 0.000000 )
POSICION E( -0.000000 , -12.285250 , -4.000000 )

O1=0.000000
O2=0.000000
O3=-0.022563
O4=0.112813
O5=-0.090250
O6=0.000000

INCREMENTO( 0.000000 , -0.085738 , 0.000000 )
POSICION E( -0.000000 , -12.370988 , -4.000000 )

```

Figura 5.12: Ejecución del algoritmo que calcula la cinemática directa e inversa asociado a la cadena de 6GL correspondientes a la pierna de la plataforma Bioloid Premium kit

Capítulo 6

Conclusiones

Si bien es complicado entender y obtener los parámetros correctos de la convención Denavit-Hartenberg, la matriz de transformación es muy fácil de obtener.

Una transformación con n grados de libertad equivale a n productos matriciales, lo que disminuye el esfuerzo computacional si se usaran simples matrices homogéneas.

La solución al problema cinemático directo una vez teniendo los parámetros Denavit-Hartenberg se facilita.

Como a lo largo de este trabajo se observó, los métodos propuestos funcionaron de manera correcta.

El uso de la convención Denavit-Hartenberg y de matrices homogéneas facilitaron los cálculos y gráficos en Excel.

La solución al problema cinemático inverso con el método geométrico proporciona una solución válida siempre y cuando el destino del efector final sea válido.

Ni los productos matriciales, ni las operaciones trigonométricas en Microsoft Excel representan problemas, de hecho disminuyen el esfuerzo de programarlas en algún otro lenguaje de programación. Sin embargo, los gráficos de las proyecciones del conjunto de vértices que forman a los eslabones en la cadena articulada, representan un problema de apreciación.

Para la implementación del Jacobiano fué necesario el uso de C++ debido a que es un método iterativo.

El modelo diferenciable para solucionar el problema cinemático inverso con el uso de la matriz Jacobiana deométrica para cadenas articuladas de seis grados de libertad logro implementarse de manera favorable.

Para adaptar el actor digital con la convención D-H fué necesaria la creación de modulos que permitieron modificar su modelado.

Apéndice A

Convención Denavit-Hartenberg

A continuación se describe paso a paso y de forma gráfica la determinación de los parámetros D-H. Para ello es necesario que los sistemas se hayan escogido de acuerdo a ciertas normas, las cuales son determinadas por los parámetros de D-H, estas junto con la definición de los 4 parámetros de D-H conforman el siguiente algoritmo para la resolución del problema cinemática directo.

DH1 .Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (último eslabón móvil). Se numerara como eslabón 0 a la base fija del robot, en este caso a tierra y 5 al efector final.(Ver Figura A.1)

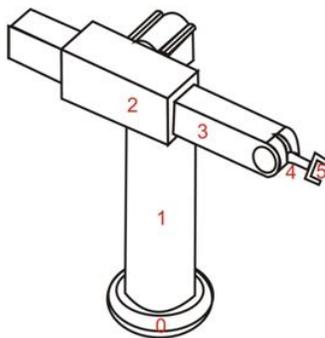


Figura A.1: Aplicación de DH1

DH2 .Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad y acabando en n).para este caso el formado entre la tierra y el elemento 1, y acabando en la n a la formada entre el elemento 4 y el efector final.(Ver Figura A.2)

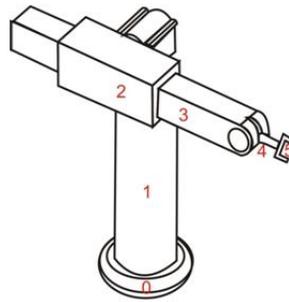


Figura A.2: Aplicacion de DH2

DH3.Localizar el eje de cada articulación. Si esta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.(Ver Figura A.3)

DH4.Para i de 0 a $n-1$, situar el eje Z_i , sobre el eje de la articulación $i+1$. (Ver Figura A.3)

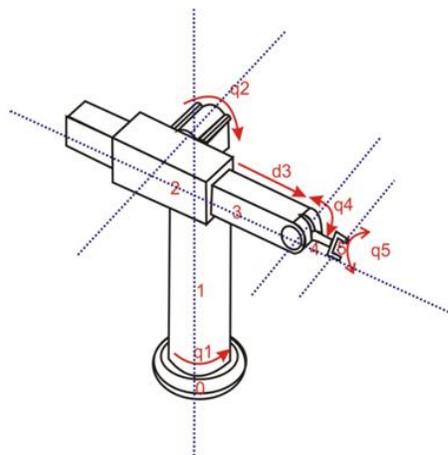


Figura A.3: Aplicacion de DH3 y DH4

DH5. Situar el origen del sistema de la base (S0) en cualquier punto del eje Z_0 . Los ejes X_0 e Y_0 se situaran de modo que formen un sistema dextrógiro con Z_0 . (Ver Figura A.4)

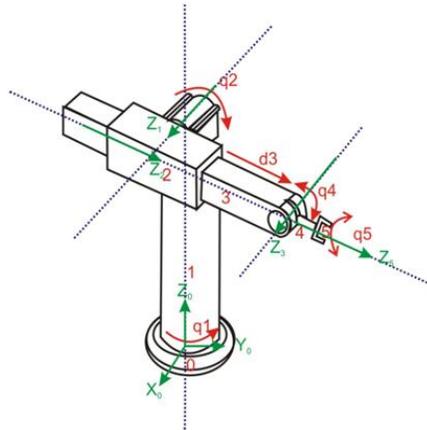


Figura A.4: Aplicacion de DH5

DH6. Para i de 1 a $n-1$, situar el sistema (S_i) (solidario al eslabón i) en la intersección del eje Z_i con la línea normal común a Z_{i-1} y Z_i . Si ambos ejes se cortasen se situaría (S_i) en el punto de corte. Si fuesen paralelos (S_i) se situaría en la articulación $i+1$. (Ver Figura A.5)

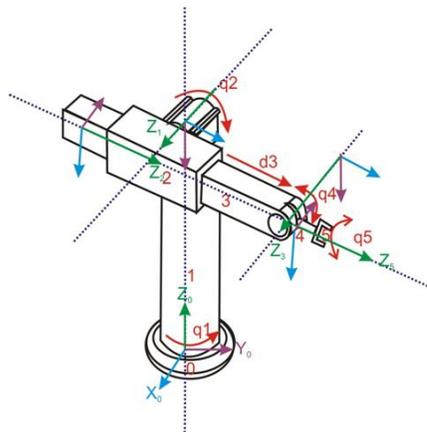


Figura A.5: Aplicacion de DH6

Articulación	θ	d	a	α
1	$q1 + \frac{\pi}{2}$			
2	$q1 + \frac{\pi}{2}$			
3	0			
4	q4			
5	q5			

Tabla A.1: DH10

DH7. Situar X_i en la línea normal común a Z_{i-1} y Z_i . A.6

DH8. Situar Y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con X_i y Z_i . (Ver Figura A.6)

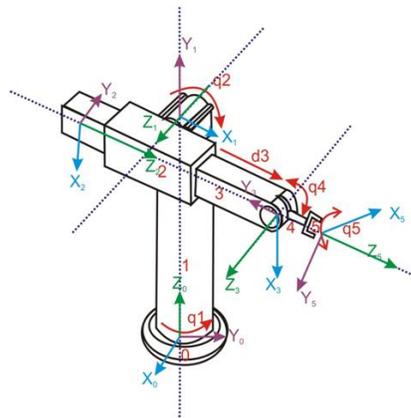


Figura A.6: Aplicacion de DH7 y DH8

DH9. Situar el sistema (S_n) en el extremo del robot de modo que Z_n coincida con la dirección de Z_{n-1} y X_n sea normal a Z_{n-1} y Z_n .

DH10. Obtener \varnothing_i como el ángulo que hay que girar en torno a Z_{i-1} para que X_{i-1} y X_i queden paralelos. Ver tabla A.1

DH11. Obtener d_i como la distancia, medida a lo largo de Z_{i-1} , que habría que desplazar (S_{i-1}) para que X_i y X_{i-1} quedasen alineados. Ver tabla A.2

DH12. Obtener A_i como la distancia medida a lo largo de X_i (que ahora coincidiría con X_{i-1}) que habría que desplazar el nuevo (S_{i-1}) para que su origen coincidiese con

Articulación	θ	d	a	α
1	$q1 + \frac{pi}{2}$	l1		
2	$q1 + \frac{pi}{2}$	l2		
3	0	d3		
4	q4	0		
5	q5	l4+l5		

Tabla A.2: DH11

Articulación	θ	d	a	α
1	$q1 + \frac{pi}{2}$	l1	0	
2	$q1 + \frac{pi}{2}$	l2	0	
3	0	d3	0	
4	q4	0	0	
5	q5	l4+l5	0	

Tabla A.3: DH12

(Si).Ver tabla A.3

DH13.Obtener ai como el ángulo que habría que girar entorno a Xi (que ahora coincidiría con Xi-1), para que el nuevo (Si-1) coincidiese totalmente con (Si).Ver tabla A.4

DH14.Obtener las matrices de transformación i-1Ai.

DH15.Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el del extremo del robot $T = 0A1, 1A2... n-1An$.

DH16.La matriz T define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido ala base en función de las n coordenadas articulares.

Articulación	θ	d	a	α
1	$q1 + \frac{pi}{2}$	l1	0	$\frac{pi}{2}$
2	$q1 + \frac{pi}{2}$	l2	0	$\frac{pi}{2}$
3	0	d3	0	$-\frac{pi}{2}$
4	q4	0	0	$\frac{pi}{2}$
5	q5	l4+l5	0	0

Tabla A.4: DH13

Bibliografía

- [1] Carlos Balaguer Rafael Aracil Antonio Barrientos Cruz, Luis Felipe Peñín. *Fundamentos de robótica*. Aravaca, Madrid, 1997.
- [2] Moya Pinta Diego armando. *Modelo y análisis cinemático de un robot manipulador esférico industrial aplicando Matlab*. PhD thesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2010.
- [3] Aníbal Ollero Baturone. *Robótica: Manipuladores y robots móviles*. Number 1. Barcelona, España, 2001.
- [4] Wisse M. Collins S. and Ruina A. A three dimensional passive-dinamyc walking robot with two legs and kness. *The intyernational journal of robotics research*, 20(7):607–615, July 2001.
- [5] Chacon J. Gonzalez J. Rey J. Contreras J., Talamantes E. and Araiza C. Diseño y construcción de un robot bípedo. *Revista Internacional de Educación en Ingeniería*, 1(1):1–14, 2008.
- [6] John J. Craig. *Fundamentos de robótica*. Mexico, 3ed edition, 2006.
- [7] Nakanishi J. Endo G., Morimoto J. and Cheng G. An empirical exploration of a neural oscillator for biped locomotion control. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automations*, 3:3036–3042, April 2004.

- [8] Hemami H. Gubina F. and McGhee R. B. On the dynamic stability of biped locomotion. *IEEE Trans. Bio-Med. Eng*, BME-21,(2):102–108, 1974.
- [9] Wongsuwarn H. and Loawattana D. Neuro-fuzzy algorithm for a biped system. *International journal of applied mathematics and computer sciences*, 3(4):195–201, 2006.
- [10] J. M. McCarthy Haijun Su, Peter Dietmaier. Trajectory planning for constrained parallel manipulators. Technical report, Robotics and Automation Laboratory, UCI.
- [11] Kajita S. Kaneko K. Arai H. Koyachi N. Huang Q., Kazuhito Y. and Tanic K. Planning walking patterns for a biped robot. *IEEE Transaccions on robotics and automation*, 17(3):280–289, 2001.
- [12] Hodgins J. and Raibert M. Adjusting step length for rough terrain locomotion. *IEEE Trans. Robot Automat*, 7:289–298, 1991.
- [13] Reza N. Jazar. *Theory of Applied Robotics Kinematics, Dynamics, and Control*. Melbourn, Australia, second edition edition, 2006.
- [14] Jun-Ho O. Jung-Hoon K. Realization of dynamic walking for the humanoid robot platform khr-1. *Advanced robotics*, 18(7):749–768, December 2004.
- [15] Kanehiro F.-Kaneko K. Fujiwara K. Yokoi K. Kajita, S. and H. Hirukawa. A realtime pattern generator for biped walking. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automations*, 1:31–37, May 2002.
- [16] Kanehiro F.-Kaneko K. Fujiwara K. Yokoi K. Morisawa M. Harada K. Kajita, S. and Hirukawa. Biped walking pattern generator allowing auxiliary zmp control. *Proc. IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, 2:2993–2999, October 2006.

- [17] Ishida T. Kato I., Matsushita S. and Kume K. Development of artificial rubber muscles. *In Proc. Third Int. Symp. External Control of Human Extremities*, pages 565–582, 1970.
- [18] Mikami T. Mayeux P. Miyamoto A. Playter R. Nagasaka K. Raibert M. Nagano M. Kuroki Y., Blank B. and Yamaguchi J. Motion creating system for a small biped entertainment robot. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automations*, 2:1394–1399, October 2003.
- [19] Siciliano B. Sciavicco L. and Villani L. *Robotics: Modelling, Planning and Control*, volume 1 of *Series Editors*. Springer, Verlag, London, 2009.
- [20] Roman Berka Lukeas Barinka. Inverse kinematics - basic methods. Technical report, Dept. of Computer Science and Engineering Technical University.
- [21] Vukobratovic M. Zero-moment point-thirty five years of its life. *International journal of humanoid robotics*, 1(1):157–173, January 2004.
- [22] Vukobratovic M. and Juricic D. Contribution to the synthesis of biped gait. *IEEE Trans. Bio-Med. Eng*, BME-16(1):1–6, 1969.
- [23] Pardos Gotor José Manuel. *Algoritmos de geometría Diferencial para la locomoción y navegación bípedas de robots humanoides aplicacion al robot RH0*. Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, Septiembre 2005.
- [24] Lamiroux F. Perrin N., Stasse O. and Yoshida E. A biped walking pattern generator based on half-steps for dimensional reduction. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automations*, pages 1270–1275, May 2011.
- [25] Rusell S. Norving Peter. *Inteligencia Artificial un enfoque moderno*, volume 1. Pearson educación, S.A., Madrid España, segunda edición edition, 2004.

- [26] Lau N. Reis P. Picado H., Gestal M. and Tome A. Automatic generation of biped walk behavior using genetic algorithms. *Proceedings of IWANN2009*, pages 805–812, June 2009.
- [27] Alberto Gómez Vicente Jesús Moisés Peláez Navarro Emilio González González Ignacio Coloma González Ricardo Ramos, Luis Jiménez de la Fuente. Transformaciones lineales en 3d.
- [28] Anderson S. and Hodgins J. Adaptative torque-based control of a humanoid robot on an unstable platform. *International conference on humanoid robots*, December 2010.
- [29] Mojtaba S. Central pattern generator parameter search for a biped walking robot. *European journal of scientific research*, 57(3):466–477, 2011.
- [30] Bradshaw A. Seward D. W. and Margrave F. Real-time neural network control of a biped walking robot. *Robotica*, 14(4):437–443, 1996.
- [31] Appin Knowledge Solutions. *Robotics*. New Delhi, 2007.
- [32] McGeer T. Passive dynamic walking. *International Journal of Robotics Research*, 9(2):62–82, April 1990.
- [33] McGeer T. Passive walking with knees. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automations*, pages 1640–1645, 1990.
- [34] Ignacio Huitzil Velasco. Cinemática directa para mover las articulaciones de un actor digital. Technical report, Universidad Politécnica de Puebla.
- [35] Zheng Y. and Shen J. Gait book for the sd-2 biped robot to climb sloped surface. *IEEE, Trans. Robot Automat*, 6(1):86–96, 1990.

- [36] M. Y. Zarrugh and C.W. Radcliffe. Computer generation of human gait kinematics. *J. Biomech*, 12:99–111, 1979.