

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y
Automática
2017/2018

Trabajo Fin de Grado
**Calibración de los sistemas
electromecánicos para habilitar el
control de estabilidad del robot
humanoide TEO**

Aitor González Martínez de la Casa

Tutor
Juan Miguel García Haro
Leganés, Septiembre de 2018



[Incluir en el caso de interés en su publicación en el archivo abierto]
Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento - No Comercial - Sin Obra Derivada**

Índice

Índice de figuras	4
Índice de tablas	7
1. Introducción	10
1.1. Motivaciones y origen del proyecto	11
1.2. Objetivos	11
1.3. Marco regulador	11
1.4. Entorno socio-económico	12
2. Estado del arte	15
2.1. Origen de la robótica	15
2.1.1. Tipos de robots	15
2.2. Evolución de los Robots Humanoides	19
2.3. Locomoción bípeda	24
2.4. Zero Moment Point (ZMP)	29
3. Descripción del sistema	33
3.1. Robot humanoide TEO	33
3.2. Sensores fuerza-par	35
3.2.1. JR3 50M31A y 85M35A	35
3.2.2. Adquisición de datos	36
3.2.3. Programa de adquisición de datos	37
3.3. Unidad de medida inercial (IMU)	39
3.3.1. Xsens MTi-28A53G35	39
4. Estudio de la estabilidad	43
4.1. Modelo Péndulo Invertido Lineal	43
4.1.1. LIPM aplicado al robot humanoide TEO	47
4.1.2. DLIPM: mejora del modelo del péndulo invertido simple . . .	48
4.2. Modelo cart-table	49
4.3. Equivalencia de modelos	51
4.4. Estrategias de control	52
5. Estudio de la respuesta de los sensores del robot humanoide TEO y la aplicación de su información al control del equilibrio	55
5.1. Estudio de la respuesta de los sensores F/T	55
5.1.1. Descripción de la metodología experimental	55
5.1.2. Resultados experimentales	57
5.1.3. Modelo Péndulo Invertido Lineal Dinámico (DLIPM)	62
5.1.4. Estudio de la respuesta del sistema	63
6. Conclusiones y trabajos futuros	67
Referencias	68

Índice de figuras

1.1.	Robot humanoide	10
2.1.	Robot Industrial ABB	16
2.2.	Mars Pathfinder Rover Sojourner	17
2.3.	Robots antropomórficos	17
2.4.	Robots zoomórficos	18
2.5.	Robot HANDLE	18
2.6.	Armadura diseñada por Leonardo Da Vinci	19
2.7.	Trompetista mecánico	20
2.8.	Robot Elektro	20
2.9.	Robots Waseda Legged	21
2.10.	Waseda's Anthropomorphic Pneumatically-activated pedipulators .	21
2.11.	Robots antropomórficos inteligentes WAseada roBOT	22
2.12.	De izquierda a derecha, E0 hasta ASIMO	22
2.13.	HRP-2	23
2.14.	ATLAS	23
2.15.	Centro de Masas del robot humanoide TEO(en color rojo)	24
2.16.	Polígono de soporte	24
2.17.	ZMP	25
2.18.	Evolución del CoP durante el paso	25
2.19.	Pivote del Momento Centroidal (CMP)	26
2.20.	CoM, Polígono de soporte y ZMP	27
2.21.	Representación gráfica del paso o caminata	28
2.22.	Representación de fuerzas y momentos que actúan sobre el pie de apoyo	29
2.23.	Determinación del ZMP	31
2.24.	Relación entre ZMP, FZMP y CoP	31
3.1.	Diagrama articulaciones TEO	33
3.2.	Esquema comunicaciones TEO	34
3.3.	Diagrama comunicaciones con PC	34
3.4.	Sensor fuerza-par JR3 85M35A	36
3.5.	Tarjeta de adquisición de datos JR3	36
3.6.	Diagrama comunicaciones con PC	38
3.7.	IMU	39
3.8.	Cable RS-232	41
4.1.	Plano Anatómico Sagital	43
4.2.	Modelo Péndulo Invertido Lineal	44
4.3.	Modelo Péndulo Invertido Lineal 3D (3DLIPM)	45
4.4.	Modelo LIPM con un sensor F/T entre el tobillo y la suela	48
4.5.	Modelo Cart-Table	49
4.6.	Cálculo del ZMP. a) Modelo ficticio, b) Modelo real	50
4.7.	Estrategias de balance	52
5.1.	Control de posición básico del ZMP usando el modelo LIPM	56
5.2.	Diagrama de flujo del programa	57
5.3.	Evolucion ZMP modelo LIPM	58
5.4.	Evolución ZMP modelo LIPM para ZMPref = 5mm	59

5.5. Evolución ZMP modelo LIPM para ZMPref = 5mm	60
5.6. Evolución ZMP modelo LIPM para ZMPref = 5mm	60
5.7. Evolución ZMP modelo LIPM para ZMPref = 5mm	61
5.8. Evolución ZMP modelo LIPM para ZMPref = 5mm	61
5.9. Evolución ZMP modelo LIPM para ZMPref = 5mm	62
5.10. Diagrama del desarrollo experimental del nuevo modelo	64
5.11. Plano de desarrollo de los experimentos del robot TEO	64
5.12. Evolucion ZMP modelo DLIPM	65

Índice de tablas

1.1. Presupuesto	13
3.1. Modelos y características de los sensores F-T. [JR3 Inc.]	35
3.2. Características sensor IMU MTi-28A [Xsens]	40
5.1. Batería de experimentos	59

Resumen

En el presente documento se va realizar el estudio de la estabilidad de robots humanoides utilizando los métodos de péndulo invertido y Cart-table para calcular el Punto de Momento Cero (ZMP). Todos los experimentos han sido realizados con el robot humanoide TEO (Task Environment Operator) del grupo de investigación RoboticsLab, en el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid.

Los datos para realizar dicho estudio se obtenían de los sensores de fuerza-par situados en los tobillos, para el modelo de péndulo invertido, y la Unidad de Medida Inercial (IMU) situada en el centro del robot, para el modelo Cart-table, mediante datos de aceleraciones lineales. Para realizar los experimentos los programas utilizados fueron QtCreator, que es un IDE (entorno de desarrollo integrado) multiplataforma para programar en C++, y Python, que es un lenguaje de programación interpretado cuyo objetivo es simplificar el código del programa.

Dicho proyecto consiste en someter al robot a diferentes inclinaciones para ajustar su posición de equilibrio haciendo uso de los modelos anteriormente descritos, utilizando para ello un filtro paso bajo para reducir el ruido de las medidas, y un controlador PID, que compara el estado actual con el deseado y ofrece una salida para el ZMP o punto de equilibrio del robot que se ajuste al que debería tener en la realidad.

1. Introducción

En los últimos años, la evolución en el campo de la industria ha sido tan grande que ha llegado al punto que se ha hecho necesario el desarrollo de robots para poder realizar las tareas de manera más eficaz, eficiente y segura. Estos robots pueden tener diferente apariencia y función según el ámbito al que se apliquen, desde robots industriales hasta robots para las tareas domésticas. En el campo industrial los robots pueden ser más simples ya que el entorno es principalmente estático, las tareas a desarrollar son repetitivas y automáticas, y apenas hay interacción humana.

Pero no todos los entornos reúnen las condiciones ideales de ser estáticos y repetitivos. Por esta razón surgió la necesidad de crear robots que fueran capaces de trabajar en entornos dinámicos siendo capaces de desarrollar tareas complejas e interactuar con los seres humanos y su entorno. De esa idea de interacción humana surgieron los robots humanoides, con forma humana e inteligencia artificial, que les permite desarrollar un comportamiento y acciones más parecidas a las de los humanos. Pero para llevar a cabo esas acciones es necesario un control ya que la posibilidad de moverse trae consigo el problema de la estabilidad.



Figura 1.1: Robot humanoide

Evitar la pérdida de equilibrio del robot durante las fases de posición estática o caminata bípeda es una tarea compleja que está relacionada con el control.

Además, pueden aparecer perturbaciones que dificulten el equilibrio. Dichas perturbaciones pueden surgir de diversas fuentes como pueden ser un empujón o un terreno irregular. El ser humano es capaz de corregirlas inconscientemente moviendo el cuerpo o cualquier articulación. Este movimiento no lo realizan los robots por sí solos por lo que para lograrlo éstos deben imitar nuestros patrones a través de la programación que se les ha proporcionado para estabilizarse por sí solos.

1.1. Motivaciones y origen del proyecto

En la actualidad uno de los campos con mayor proyección en la investigación dentro del campo de la robótica es el de crear un robot capaz de desenvolverse por sí solo en el entorno de los seres humanos. De esta idea nacen los robots humanoides, robots con apariencia de ser humano que con inteligencia artificial pretenden mimetizar nuestros comportamientos para desenvolverse en entornos similares al nuestro.

La investigación ha avanzado mucho en los últimos años debido al avance tecnológico en el que nos encontramos.

Pero éstos tienen un problema, la estabilidad al realizar movimientos. Han surgido diversos estudios acerca de aproximarse lo máximo posible a la idea de estabilización del robot, pero dichos estudios poseen diferentes salidas debido a las interferencias de los sensores y el entorno.

De aquí surgió la idea del actual proyecto, en el que se pretende mejorar la respuesta de los sensores, reduciendo el error, ante estímulos externos para así poder aumentar la estabilidad del robot humanoide TEO.

1.2. Objetivos

Este proyecto trata sobre el estudio de estabilidad del robot humanoide TEO haciendo uso de la información recibida de los diferentes sensores que posee, tanto los de fuerza-par como el inercial.

Los objetivos del presente trabajo son:

- Realizar un estudio de estabilidad a través de los diferentes modelos existentes, como son el modelo de péndulo invertido y el cart-table.
- Desarrollar un control que reduzca el error del modelo de péndulo invertido y así conseguir que el ZMP práctico y el ZMP teórico coincidan.
- Desarrollar un modelo predictivo que actúe ante perturbaciones externas mediante el uso del sensor inercial del robot TEO.

1.3. Marco regulador

Debido al aumento tanto de la tecnología como de la inteligencia artificial en nuestras vidas, las grandes organizaciones gubernamentales se han visto obligadas a redactar una serie de leyes que regulen la convivencia de los robots y los humanos. Se puede considerar como precursor de las normativas a Isaac Asimov, quien

estableció las tres leyes principales que todo robot debe cumplir [1]

1. Un robot no hará daño a un ser humano, ni permitirá con su inacción que sufra daño.
2. Un robot debe obedecer las órdenes dadas por un ser humano excepto si éstas entran en conflicto con la 1^a ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia en la medida en la que la protección no entre en conflicto con la 1^a y la 2^a ley.

Debido a la continua implantación de robots en el sector industrial y su interacción con seres humanos en un mismo espacio de trabajo, se redactaron una serie de leyes, entre las que se encuentran:

1. UNE-EN ISO 10218-1:2012 Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots industriales. Parte 1: Robots. (ISO 10218-1:2011).
2. UNE-EN ISO 10218-2:2011 Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots industriales. Parte 2: Sistemas robot e integración. (ISO 10218-2:2011).

Estas leyes fueron concebidas para proporcionar unas pautas de seguridad en entornos en los que robot y humano comparten el mismo espacio de trabajo.

Fuera del ámbito industrial, la Unión Europea ha propuesto una serie de leyes para, en un futuro, poder regular la convivencia de robots y seres humanos en cualquier entorno:

1. “Los robots deberán tener un interruptor de emergencia”
2. “Los robots no podrán hacer daño a los seres humanos”
3. “No podrán generarse relaciones emocionales con los robots”
4. “Los que sean más grandes deberán tener un seguro obligatorio”
5. “Derechos y obligaciones para los robots”
6. “Tendrán la obligación de pagar impuestos”

1.4. Entorno socio-económico

En este apartado se pretende mostrar un presupuesto general de dicho proyecto. Para llevarlo a cabo se han tenido en cuenta tanto los materiales utilizados como

la mano de obra por parte de los participantes.

COSTE MATERIAL				
Ítem	Descripción	Coste/ud (€/ud)	Ud	Coste (€)
1	Ordenador Acer Aspire E1-571 - Procesador Intel Core i3-2328M (2,2GHz, 3MB L3 cache) - Memoria RAM 6 DDR3 - Disco duro 500GB - Monitor, Conexión ethernet y otros	899	1	899
2	Sistema Operativo Linux (Licencia gratuita)	-	-	-
3	Programas (Licencia gratuita) - Python - Qt Creator	-	-	-
TOTAL				899€
COSTE LABORAL				
Ítem	Descripción	Coste/h (€/h)	Horas	Coste (€)
1	Tiempo dedicado proyectante - Desarrollo de algoritmos (pruebas, programación,...) - Memoria	15 15 15	370 250 120	5550 3750 1800
2	Tiempo tutorización	30	80	2400
TOTAL				7950€

Tabla 1.1: Presupuesto

2. Estado del arte

2.1. Origen de la robótica

La palabra “Robótica” fue acuñada por Isaac Asimov para describir la ciencia que se encarga de estudiar la tecnología de los robots. Procede de las palabras checas robota (trabajo forzado) y robotnik (sirviente) [2].

El término “robot”, que procede de la palabra robota, se popularizó gracias a la obra literaria Rossum’s Universal Robot (R.U.R.), escrita por Karel Čapek en 1920 [3].

Según la definición de la Organización Internacional de Estándares (ISO) se considera un robot como un:

“Mecanismo accionado programable en dos o más ejes con un gradio de autonomía, moviéndose dentro de su entorno, para realizar las tareas previstas” [4].

A la hora de hablar del concepto de robótica en general, hay que distinguir entre robótica INDUSTRIAL y robótica de SERVICIO. Esta distinción es fundamental a la hora de su desarrollo, fabricación y comercialización.

Según la norma ISO 8373, la definición de robótica INDUSTRIAL es la siguiente:

“Manipulador multifuncional, controlado automáticamente, reprogramable en tres o más ejes, que puede estar fijo o móvil para uso en aplicaciones de automatización industrial”.

En cuanto a lo que respecta a la robótica de SERVICIO, el Comité ISO TC 184/SC2 lo define como:

“Todo tipo de robot que no es industrial”.

A su vez, la IFR proporciona la siguiente definición:

“Robot que opera de forma parcial o totalmente autónoma al servicio del bienestar de los seres humanos y de equipamientos, excluyendo operaciones manufactureras” [5].

2.1.1. Tipos de robots

Resulta complicado establecer una clasificación exacta de los robots debido a la gran cantidad de ellos que existe, por lo que se pueden clasificar de forma más general según su arquitectura.

1. Poliarticulados

A este grupo pertenecen los robots cuya característica común es el sedentarismo, aunque pueden ser guiados excepcionalmente para efectuar desplazamientos limitados, y cuya estructura se basa en el movimiento de sus elementos terminales para operar en entornos de trabajo fijos, con uno o más sistemas de coordenadas y con un número determinado de grados de libertad. En este grupo se encuentran principalmente los llamados Robots Industriales, como se muestra en la figura (1.1), diseñados para operar en entornos repetitivos y sin interacción humano-robot. También pertenecen los manipuladores y los Robots cartesianos, empleados para abarcar amplias zonas de trabajo, actuar sobre diferentes objetos o reducir el espacio ocupado en el suelo.



Figura 2.1: Robot Industrial ABB

2. Móviles

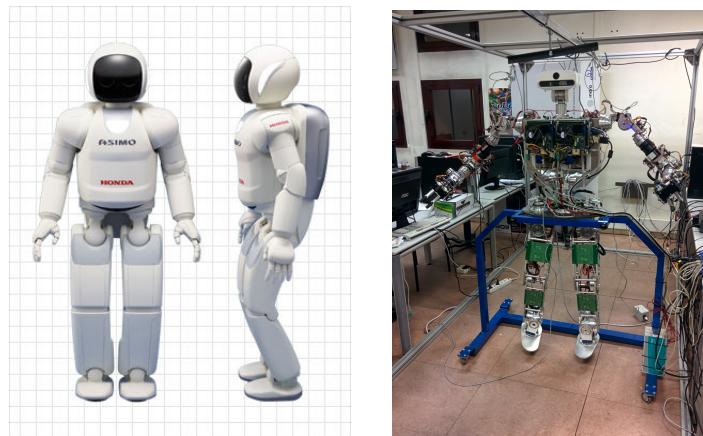
Son robots con capacidad de desplazarse, ya sea mediante ruedas o cualquier plataforma que permita dicha característica, gracias a un sistema motor de tipo rodante. Pueden ser guiados o autónomos (se guían por la información recibida del exterior mediante un sistema de sensores integrado). Estos robots se encargan normalmente de transportar piezas de un punto a otro de la cadena de producción, guiados mediante pistas materializadas a través de la radiación electromagnética de circuitos empotrados en el suelo, o a través de bandas detectadas fotoeléctricamente, otros pueden sortear obstáculos y están dotados de un nivel relativamente elevado de inteligencia.



Figura 2.2: Mars Pathfinder Rover Sojourner

3. Antropomórficos

Son robots que tratan de imitar parcial o totalmente las acciones y el comportamiento de los seres humanos. Una de las acciones más complejas de éstos es la locomoción bípeda, sobre la que se centra este proyecto y la mayoría de los trabajos en la actualidad, por lo que se concentran en áreas como la investigación y el estudio. El problema que surge es el control dinámico en tiempo real y el mantenimiento simultáneo del equilibrio del robot en dicho proceso.



(a) Robot ASIMO

(b) Robot TEO

Figura 2.3: Robots antropomórficos

4. Zoomórficos

Son aquellos cuyos sistemas de locomoción imitan a los animales principalmente. Este grupo se podría clasificar en: caminadores y no caminadores.

El grupo de los caminadores es el que más desarrollado está, ya que pueden tener aplicaciones en muchos campos como puede ser el desarrollo

de vehículos todoterreno, controlados o autónomos, capaces de avanzar por terrenos con mucho desnivel y accidentados.

Por el contrario, el grupo de los no caminadores es muy escaso y está poco evolucionado. Se han realizado diversos experimentos en Japón con robots de este tipo constituidos por segmentos cilíndricos biselados acoplados axialmente entre sí, capaces de realizar movimientos relativos de rotación.



(a) Robot caminador ANYmal

(b) Serpiente Robot Modular no caminador

Figura 2.4: Robots zoomórficos

5. Híbridos

A este grupo pertenecen aquellos Robots que posean en su estructura una combinación de las anteriores ya expuestas, bien sea por conjunción o por yuxtaposición [6].

Por ejemplo, un dispositivo con ruedas y con brazos, siendo características de los Robots móviles y de los androides al mismo tiempo.



Figura 2.5: Robot HANDLE

2.2. Evolución de los Robots Humanoides

El desarrollo de los robots humanoides ha sido largo y complejo.

Hubo que esperar al año 1495 para tener los primeros registros del que posiblemente sea el primer robot humanoide, diseñado y construido por Leonardo da Vinci. Se trataba de un robot mecánico, un guerrero vestido con una armadura, que podía realizar movimientos similares a los de los seres humanos como sentarse, mover los brazos y girar la cabeza y el cuello [7].



Figura 2.6: Armadura diseñada por Leonardo Da Vinci

El siglo XVIII fue una época prolífica para el desarrollo de robots autónomos. En 1773, Pierre y Henry Louis inventaron la primera máquina autónoma capaz de escribir.

Pero cuando empieza realmente el desarrollo de los robots humanoides fue a partir del siglo XIX. Uno de los primeros fue el trompetista mecánico, construido por Fridrich Kaufmann en 1810, que contenía un tambor con muescas que usaba para activar algunas válvulas que ayudaban a pasar el aire a través de doce lenguas, lo que producía un tipo de sonido modulado que a su vez pasaba por una trompeta, para hacerla sonar. En 1865 John Brainerd inventó el hombre de vapor, movido por una máquina de vapor que tiraba de unos carros. En 1855 Frank Reade Junior construyó al llamado Hombre Eléctrico, una versión electrificada del hombre de vapor.

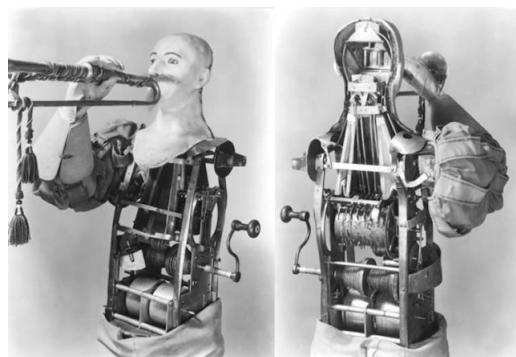


Figura 2.7: Trompetista mecánico

A partir del siglo XX el número de robots humanoides fue aumentando y evolucionando. Uno de los primeros fue ELEKTRO, desarrollado por la sociedad Westinghouse en 1938, un robot más cerca del concepto de humanoide que podía caminar controlado por comandos de voz, y hablaba gracias a un tocadiscos de 78 rpm. Más tarde se le unió “Sparko”, un perro robot capaz de sentarse, ladrar y suplicar.

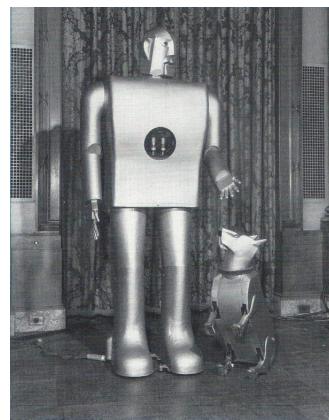


Figura 2.8: Robot Elektro

Durante las décadas de los 60's a los 90's aparecieron numerosos robots bípedos. El profesor Kato del equipo robótico de la Universidad de Waseda en Japón desarrolló varias familias de robots bípedos. La primera fue llamada Waseda Legged (WL), que se caracterizaba por ser robots compuestos de sólo dos piernas. En 1969, con la aparición del músculo artificial de goma, desarrollaron la serie WAP (Waseda's Anthropomorphic Pneumatically-activated pedipulators), activados mediante el control de dichos músculos. No fue hasta el modelo WAP-3 que consiguieron que el robot bípedo se desplazara en 3 dimensiones, ya que los dos primeros modelos sólo se movían en un plano.

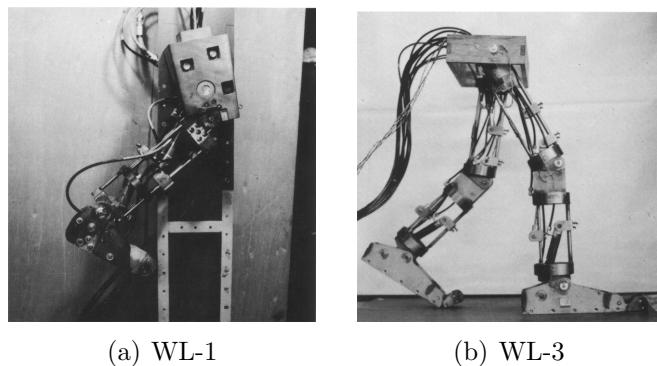


Figura 2.9: Robots Waseda Legged

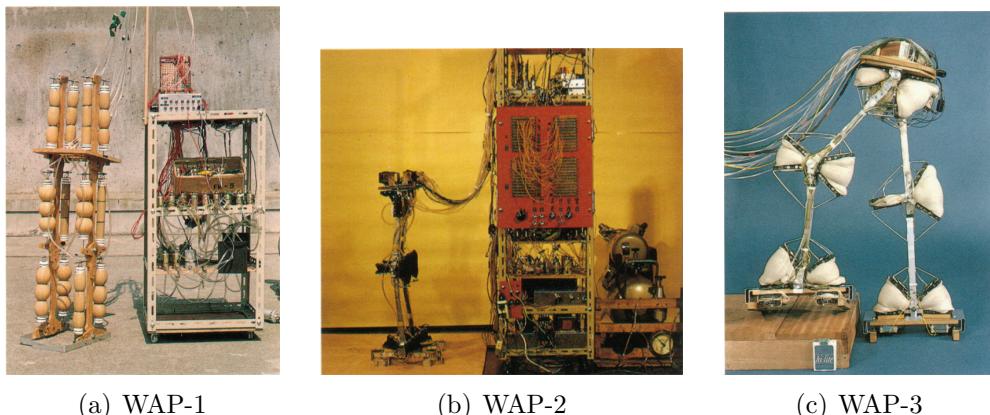


Figura 2.10: Waseda's Anthropomorphic Pneumatically-activated pedipulators

Ya en 1970, con los avances en la investigación de robots antropomórficos inteligentes, aparecieron los primeros robots con torso y piernas, pareciéndose cada vez más a los seres humanos. De estos avances se desarrollaron los robots de la familia WABOT (WAseida roBOT), basados en sistemas de control de extremidades, visión y sistemas de conversación. El WABOT-2 incluso era capaz de leer partituras y tocar un teclado.

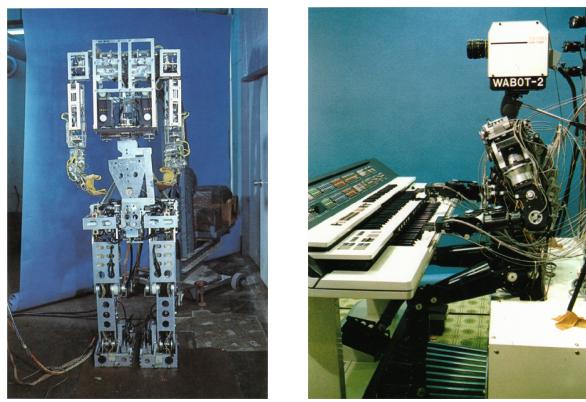


Figura 2.11: Robots antropomórficos inteligentes WAseda roBOT

Unos años más tarde, en 1996 se desarrolló la familia de robots WABIAN, que se caracterizaban por utilizar motores eléctricos, logrando la misma velocidad de paso que un humano [8].

En Japón la compañía HONDA llevaba desarrollando robots bípedos desde 1986. Primero fueron del modelo E0 al E6, para pasar a los P1 a P3 y terminando por el robot humanoide más inteligente llamado ASIMO, que fue desarrollado en el 2000.



Figura 2.12: De izquierda a derecha, E0 hasta ASIMO

Dos años más tarde, bajo el Ministerio de Económicas, Comercio e Industria de Japón, se desarrolló el Proyecto Humanoide Robot (HRP), con el HRP-2 a la cabeza de la tecnología en esos años.



Figura 2.13: HRP-2

En la actualidad, los robots humanoides están muy avanzados, pudiendo incluso correr y mantener el equilibrio. Un ejemplo de ello lo tenemos en ATLAS, desarrollado en 2013 por Boston Dynamics, capaz de caminar por terrenos irregulares sin perder el equilibrio, cargar objetos pesados, e incluso recientemente, dar saltos.



Figura 2.14: ATLAS

2.3. Locomoción bípeda

Para hablar de locomoción bípeda o caminata, primero hay que hacer una introducción de una serie de conceptos para poder entender mejor este movimiento.

- Centro de Masas (CoM): es el punto en el que se concentra toda la masa del sistema y sobre el que actúa la resultante de todas las fuerzas que afectan al sistema [9].

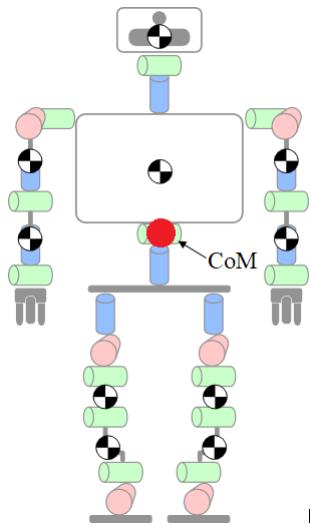


Figura 2.15: Centro de Masas del robot humanoide TEO(en color rojo)

- Polígono de soporte: se trata del área de contacto de los puntos de apoyo con el suelo. Puede ser simple, con un pie, o doble, con los dos pies.

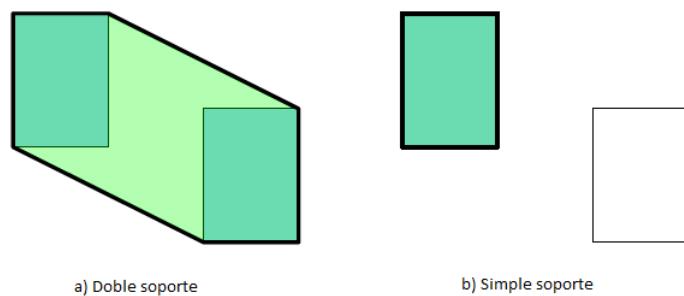
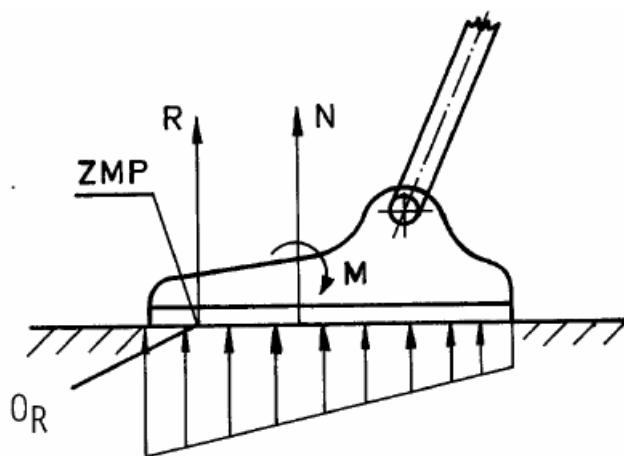
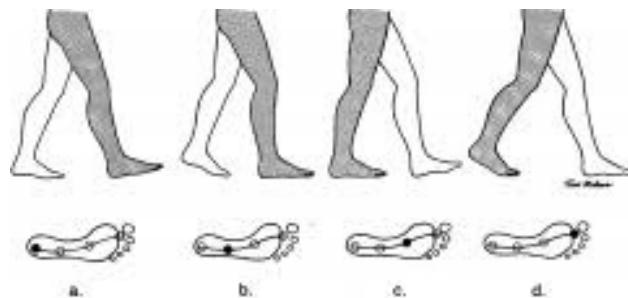


Figura 2.16: Polígono de soporte

- Punto de Momento Cero (ZMP): Según Vukobratović [19], es el punto en el cual la suma de momentos es igual a 0.

**Figura 2.17:** ZMP

- Centro de Presión (CoP): Punto en el polígono de soporte donde actúa la suma total de las fuerzas de contacto R , causando una fuerza pero no un momento.

**Figura 2.18:** Evolución del CoP durante el paso

- Pivote del Momento Centroidal (CMP): Punto donde la fuerza de reacción del suelo debería actuar para mantener constante la componente horizontal del momento angular de todo el cuerpo. El CMP es igual al ZMP en el caso en que el momento del CoM es cero. Sin embargo, cuando aparece un momento significativo sobre el CoM, aunque por definición el ZMP no puede abandonar el polígono de soporte en el suelo, el CMP puede hacerlo, como se puede observar en la imagen 2.19.

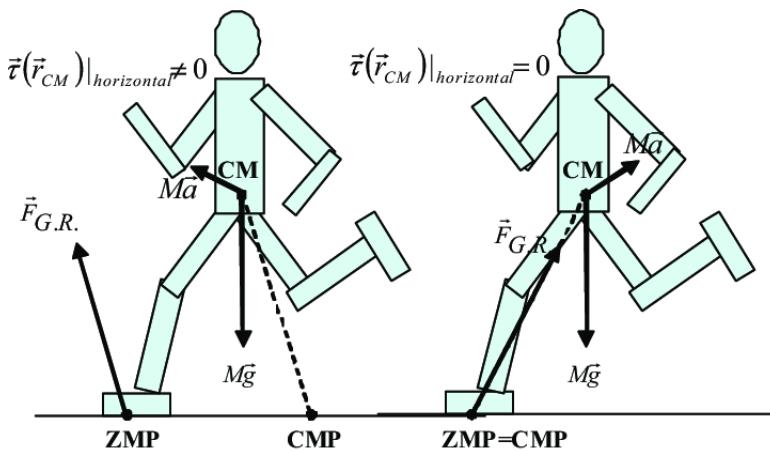


Figura 2.19: Pivote del Momento Centroidal (CMP)

¿QUÉ ES LOCOMOCIÓN BÍPEDA O CAMINATA?

La locomoción bípeda, o caminata, es la acción de desplazarse de un lugar a otro manteniendo en todo momento un pie en contacto con la superficie. En los seres humanos este movimiento complejo y periódico alterna una fase de estabilidad con una fase de inestabilidad. Esta fase de inestabilidad es provocada por la gravedad, pero gracias a ella se produce el movimiento hacia adelante. Debido a la complejidad de este movimiento, se ha utilizado el criterio de Punto de Momento Cero (ZMP) para simplificar su análisis.

Los robots humanoides han sido desarrollados para imitar los movimientos y comportamientos de los humanos. Pero la caminata resulta un comportamiento muy complejo para éstos.

Existen dos tipos de caminata, llamadas caminata estática y caminata dinámica. En la caminata estática el CoM no abandona nunca el polígono de soporte. Sin embargo, en la caminata dinámica, hay períodos en los que la proyección del CoM se sale fuera del polígono de soporte [10], como se puede observar en la Figura 2.20.

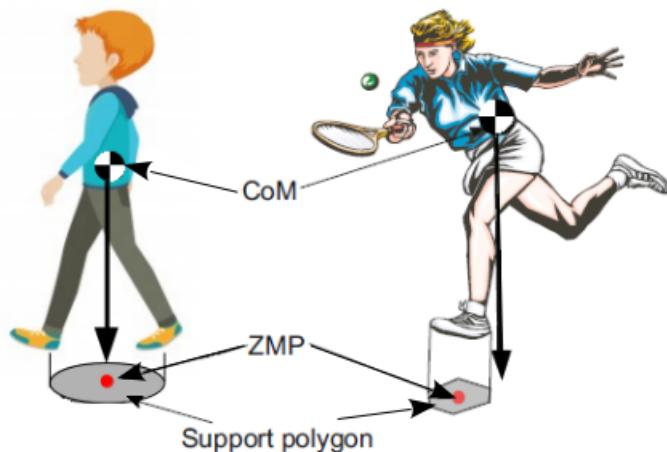


Figura 2.20: CoM, Polígono de soporte y ZMP

Cuando los seres humanos realizan el movimiento de caminar logran mantener el equilibrio gracias a un control corporal total. Sin embargo los robots humanoides no son capaces de controlar por sí solos su cuerpo, por lo que su control de estabilidad es más complejo. En el actual proyecto se van a explicar dos modelos que desarrollan un controlador para mantener el equilibrio en los robots: el modelo de péndulo invertido y el modelo cart-table. Éstos consisten en calcular ciertos parámetros haciendo uso de los sensores de fuerza-par, en el caso del péndulo invertido, y del sensor inercial, en el caso del cart-table, para lograr mantener el equilibrio en la caminata de los robots.

FASES DEL PASO

En el paso o caminata bípeda, como se puede observar en la figura 2.21, las fases se distinguen por:

- **FASE 1.** Fase de apoyo

En esta fase la pierna y el pie que están completamente apoyados en el suelo, soportan todo el peso del bípedo, mientras la pierna de balanceo está realizando el paso.

- **FASE 2.** Fase de balanceo

En esta fase la pierna y el pie que estaban antes apoyados ahora están realizando un paso (avanzando por el aire), hasta volver al apoyo de nuevo.

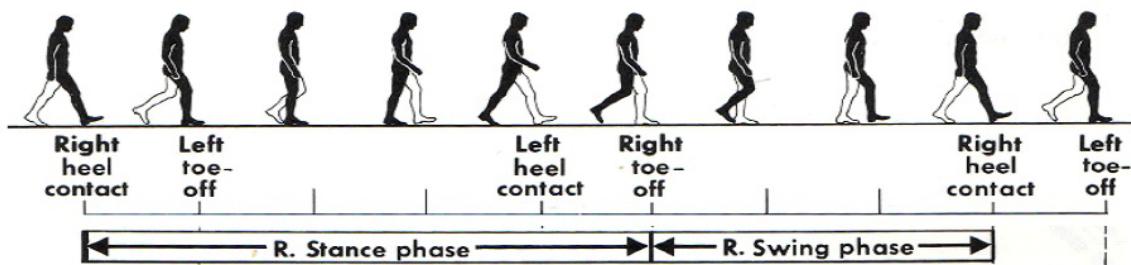


Figura 2.21: Representación gráfica del paso o caminata

2.4. Zero Moment Point (ZMP)

Vukobratović [16] fue uno de los primeros en introducir el concepto más importante y principal a la hora de mantener el equilibrio de los robots humanoides bípedos. Decía que durante el paso, aparte de la realización del movimiento relativo entre juntas del mecanismo, la tarea más importante es preservar el equilibrio dinámico. Para ello toda el área del pie (incluyendo sus bordes) debe estar en contacto con el suelo.

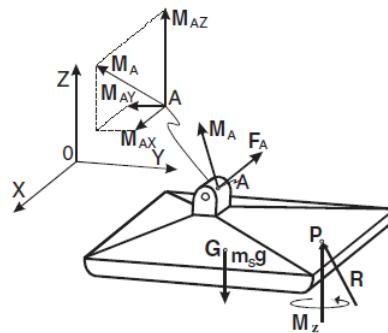


Figura 2.22: Representación de fuerzas y momentos que actúan sobre el pie de apoyo

Si el mecanismo está en equilibrio quiere decir que en el punto P de la suela, donde actúan las fuerzas de reacción del suelo,

$$\begin{aligned} M_x &= 0 \\ M_y &= 0 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Gracias a ello el punto P pasó a denominarse Punto de Momento Cero (ZMP), pudiéndose reducir dichas fuerzas a una sola llamada R y a la componente z del momento M_z sobre dicho punto.

Para calcular dicho punto y asegurarse de que el mecanismo está en equilibrio dinámico, teniendo en cuenta la dinámica del mecanismo, el requisito indispensable es que el pie esté completamente apoyado en el suelo. Para ello hay que partir de las ecuaciones del equilibrio estático para el pie de apoyo:

$$R + F_A + m_s g = 0 \tag{2.2}$$

$$\overrightarrow{OP} \times \overrightarrow{R} + \overrightarrow{OG} \times m_s g + M_A + M_Z + \overrightarrow{OA} \times F_A = 0 \tag{2.3}$$

donde \overrightarrow{OP} , \overrightarrow{OG} y \overrightarrow{OA} son los vectores desde el origen del sistema de coordenadas $O_{(xyz)}$ al punto P donde actúan las fuerzas de reacción del suelo, el centro de masas del pie (G), la articulación del tobillo (A), y la masa del pie m_s .

Dando su proyección en el plano horizontal se obtiene:

$$(\overrightarrow{OP} \times \vec{R})^H + \overrightarrow{OG} \times m_s g + (M_A)^H + (\overrightarrow{OA} \times F_A)^H = 0 \quad (2.4)$$

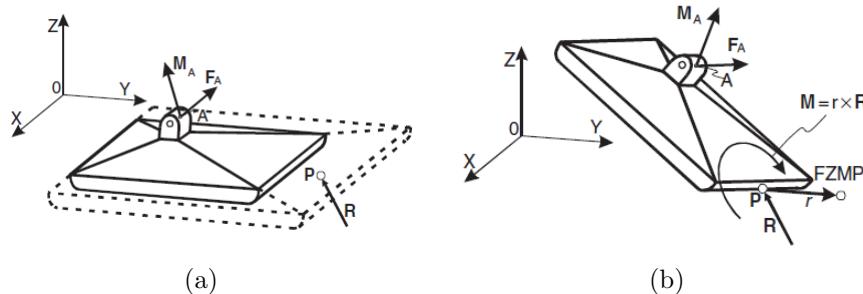
Esta ecuación permite calcular la posición del punto de actuación de la fuerza de reacción del suelo (P) para la dinámica general del mecanismo. Sin embargo esto no sirve para saber si está en equilibrio dinámico cuando el sistema está en movimiento. Para ello hay que tener en cuenta el punto P calculado y el polígono de soporte. Como el punto P calculado con ec (2.4) nunca puede existir fuera del polígono de soporte, ya que si lo hiciera la fuerza total R no actuaría sobre el sistema, sólo si éste está dentro del polígono de soporte el sistema estará en equilibrio dinámico.

Si suponemos que el punto P obtenido de $M_x = M_y = 0$ está fuera del polígono de soporte, consideraríamos dicho punto como ZMP ficticio (**FZMP**).

Ésto se puede explicar en el caso en el que el ZMP se está acercando al borde del polígono de soporte (tanto en simple soporte como en doble soporte). Si no hubiera más momentos adicionales, el sistema estaría en equilibrio (ZMP), pero si hay momentos adicionales el mecanismo comenzaría a girar y se colapsaría, ya que el punto de actuación de la fuerza de reacción del suelo estaría al borde del pie. Dicho punto ya no sería el ZMP.

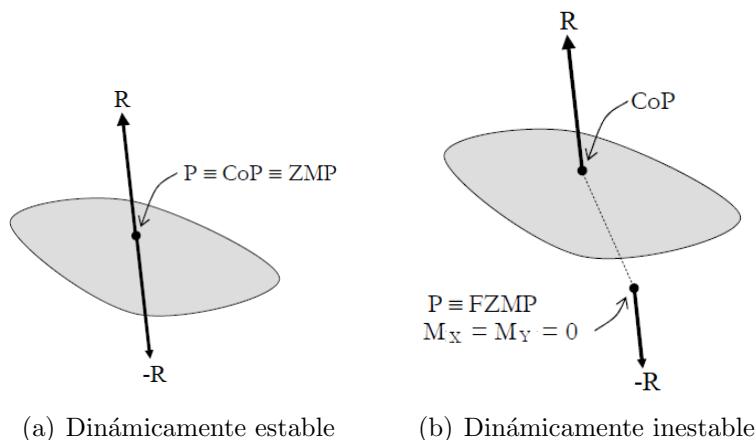
Cuando el mecanismo está en movimiento, una manera de determinar el ZMP es midiendo las fuerzas que actúan cuando el pie entre en contacto con el suelo mediante sensores ubicados en la suela del mecanismo (todos los sensores deben estar en contacto con el suelo, ya que si no se cumple el mecanismo giraría en el borde del pie y volcaría), calculando dicho punto mediante el CoP, que se ha explicado anteriormente. Otra manera sería mediante un modelo dinámico. A partir de las fuerza y el momento en la articulación del tobillo (F_A y M_A) el procedimiento para calcular ZMP consta de dos pasos:

1. Calcular \overrightarrow{OP} de la ec (2.4). La posición obtenida de P sería el ZMP. Aquí no sabemos todavía si el punto P se encuentra dentro o fuera del polígono de soporte porque no se tiene en cuenta el tamaño real de dicho polígono (figura 2.23 a).
2. Una vez calculada la posición del ZMP, se compara con el tamaño real del polígono de soporte. Si está fuera significa que el punto de actuación P de las fuerzas de reacción del suelo se encuentra en el borde del polígono de soporte y se producirá una rotación del mecanismo debido al momento de desequilibrio, cuya intensidad depende de la distancia entre el borde del polígono de soporte y la posición del ZMP calculada, es decir, a la posición del FZMP. Si se encuentra dentro del polígono, el mecanismo estaría en equilibrio (figura 2.23 b).

**Figura 2.23:** Determinación del ZMP

RELACIÓN ENTRE ZMP, FZMP Y COP

Únicamente si la fuerza resultante R está equilibrada con todas las fuerzas activas del sistema bípedo, el CoP y el ZMP coinciden, entonces podríamos decir que se encuentra en equilibrio dinámico, $P \equiv CoP \equiv ZMP$, como se muestra en la figura 2.24a.

**Figura 2.24:** Relación entre ZMP, FZMP y CoP

Sin embargo, si nos fijamos en la figura 2.24b vemos que el punto de ataque de las fuerzas cae fuera del soporte de apoyo, ZMP y CoP no coinciden, por lo que ahora $P \equiv FZMP$.

3. Descripción del sistema

3.1. Robot humanoide TEO

El desarrollo del actual proyecto se produjo sobre el robot humanoide de tamaño completo TEO (Task Environment Operator) del grupo de investigación RoboticsLab, en el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid. Se trata de una versión mejorada de su predecesor Rh-1. Posee 28 grados de libertad y pesa alrededor de 63 kg.

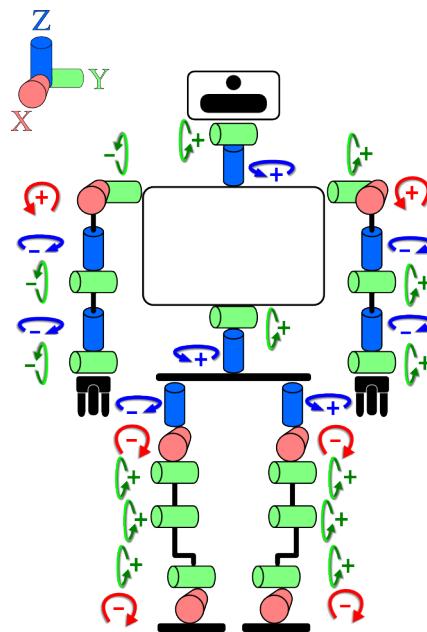


Figura 3.1: Diagrama articulaciones TEO

Está compuesto por varios motores paso a paso que se encargan de mover las articulaciones, 4 sensores de fuerza-par (2 en las muñecas y otros 2 en los tobillos) y un sensor inercial (IMU) que se encargan de recoger toda la información proveniente del entorno, un sistema de visión, realizado a través de una cámara ASUS, y 4 microprocesadores, que se encargan de controlar las principales funciones.

Estos microprocesadores son: visión artificial, que se encarga de computar las imágenes que recibe el robot a través de la cámara; locomoción, encargado de controlar las piernas y la posición del torso, y de obtener la información de los sensores de fuerza-par situados en los tobillos para mantener el robot en equilibrio en todo momento y mantenga una posición erguida, se encuentre en posición estática o caminando.

Para la adquisición de datos, como se ha comentado anteriormente, el robot posee una IMU localizada en el tronco, capaz de medir aceleraciones, campos magnéticos

y ángulos, y 4 sensores de fuerza-par situados en muñecas y tobillos, capaces de medir fuerzas y torques.

En cuanto a la comunicación se usa un protocolo CAN-bus y el software para controlar dichas comunicaciones entre CAN-bus y el ordenador se denomina YARP¹.

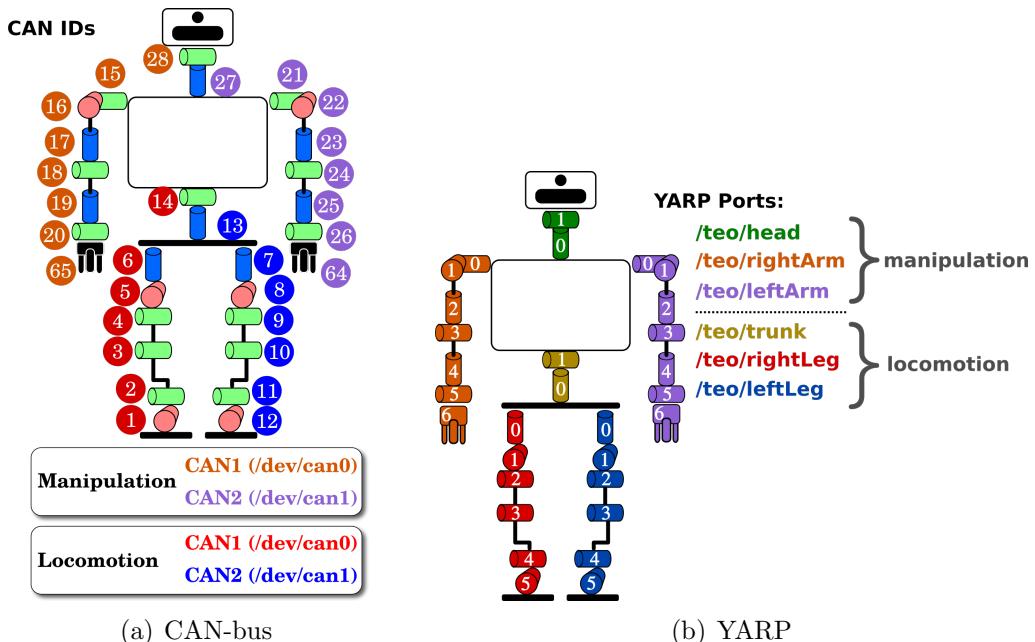


Figura 3.2: Esquema comunicaciones TEO

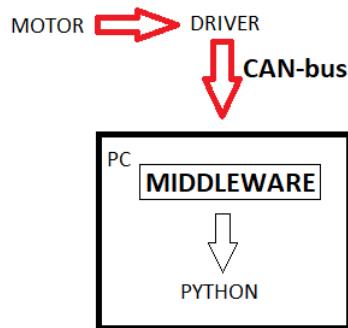


Figura 3.3: Diagrama comunicaciones con PC

¹YARP (Yet Another Robot Platform) es un middleware (software que ayuda a una aplicación a interactuar o comunicarse con otras aplicaciones, paquetes de programas, hardware, redes, y/o sistemas operativos) escrito en C ++ para interconectar sensores, procesadores y actuadores en robots.

3.2. Sensores fuerza-par

Los sensores fuerza-par son dispositivos mecánicos basados en extensómetros dispuestos de tal manera que permiten obtener medidas de fuerzas y momentos en 3 dimensiones.

3.2.1. JR3 50M31A y 85M35A

Los sensores de fuerza-par montados en TEO son sensores proporcionados por la compañía JR3 Inc. y cuyos modelos son 50M31A para las muñecas y 85M35A para los tobillos. Según el fabricante los dos primeros números indican el diámetro de los sensores, seguidos del número de serie, para acabar con dos dígitos que indican su espesor.

Al tratarse de diferentes modelos, éstos poseen diferentes fondos de escala, como se aprecia en la tabla 3.1.

Articulación	Modelo	$F_{x,y}$	F_z	$M_{x,y,z}$
Muñeca	50M31A	100N	200N	5Nm
Tobillo	85M35A	250N	500N	212Nm

Tabla 3.1: Modelos y características de los sensores F-T. [JR3 Inc.]

Estas diferencias se deben a que los tobillos deben soportar más fuerzas y momentos no sólo producidos por cualquier carga que pueda transportar el robot sino por su propio peso también.

Los sensores de la serie M están compuestos por una serie de elementos electrónicos internos que ayudan a filtrar el ruido, proporcionan una salida digital para usar con una tarjeta PCI, para la adquisición de datos, del mismo fabricante y una salida analógica. En cuanto a su precisión los sensores de esta serie poseen una precisión nominal del 1% sobre la escala completa.

Para terminar, estos sensores permiten la adquisición de datos en unidades del Sistema Internacional o en unidades del sistema imperial, señalados en la figura 3.4.

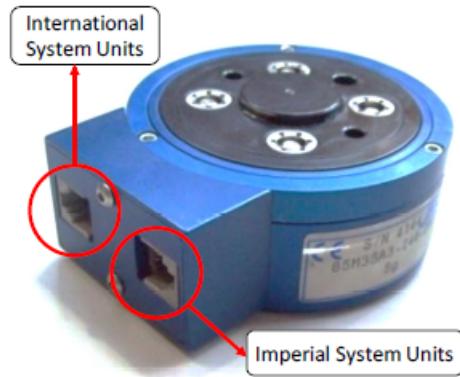


Figura 3.4: Sensor fuerza-par JR3 85M35A

3.2.2. Adquisición de datos

Para la adquisición de datos, como se ha mencionado anteriormente, se utiliza una tarjeta PCI proporcionada por la misma compañía que los sensores JR3 Inc, cuyo modelo es PCI 1592D, compuesta por 4 puertos (nombrados en la figura 3.5). La tarjeta PCI utiliza cables de 6 u 8 pines (RJ-11 y RJ-45 respectivamente) para recibir datos de alta velocidad de los sensores que se conectan a través de estos cables, y proporcionar alimentación a dichos sensores. Esta tarjeta PCI se encuentra instalada detrás del microprocesador de manipulación en el robot.



Figura 3.5: Tarjeta de adquisición de datos JR3

Para acceder a los datos recibidos de los sensores, es necesario acceder a la dirección de memoria para cada dato disponible de la tarjeta.

Estos datos se pueden obtener en dos tipos de unidades: en unidades del Sistema Internacional o en unidades del Sistema Imperial, por ello hay que estar atentos de qué puerto de los sensores se están obteniendo los datos. En el SI las fuerzas están dadas en Newton [N] y los pares en Decanewton por metro [$dN \cdot m$].

3.2.3. Programa de adquisición de datos

El programa *jr3pci4channelYarp*(disponible en <https://github.com/roboticslab-uc3m/LoliRepo/tree/master/TFM/jr3Yarp/jr3pci4channelYarp>) lee los datos obtenidos de los 4 sensores de fuerza-par del robot TEO.

El tiempo de ciclo del programa es de aproximadamente $20\mu s$ por cada sensor, por lo que los cuatro sensores que leen el tiempo de ciclo es de aproximadamente $80\mu s$.

El conjunto de datos leídos de la tarjeta de adquisición se obtiene en unidades de SI, y se manda a través de puertos YARP mediante un objeto YARP Bottle. Los datos, cuando llegan al cliente, se retrasan entre 10 y $50\mu s$, dependiendo del ciclo de procesamiento del lector, debido a que hasta que el cliente no finaliza el procesamiento anterior no llegan las actualizaciones de los datos, todo ello para que no se pierdan actualizaciones por parte del cliente [14]

La figura 3.6 muestra el procedimiento de adquisición de datos, y la figura 3.7 muestra una captura de pantalla del programa en ejecución.

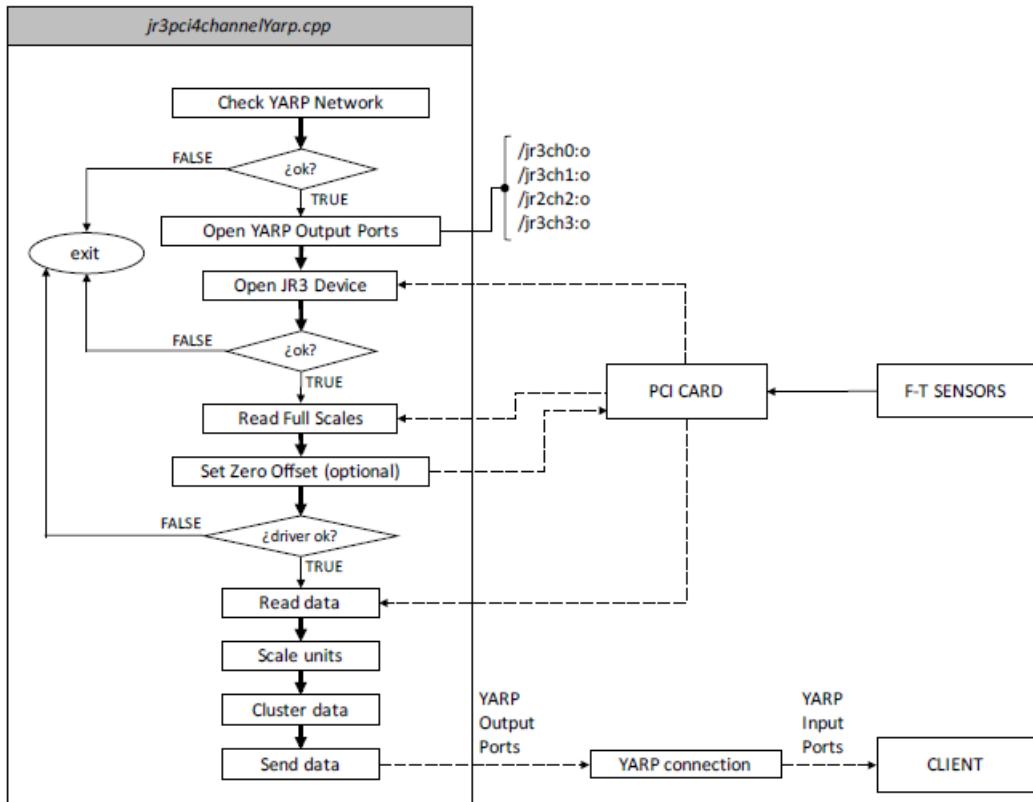


Figura 3.6: Diagrama comunicaciones con PC

3.3. Unidad de medida inercial (IMU)

Para el sistema de percepción como se ha comentado antes se utiliza una IMU, capaz de medir aceleraciones lineales, campos magnéticos y velocidades angulares, gracias a la combinación de acelerómetros, giróscopos y magnetómetros, y en algunos casos incluso barómetros, para obtener información de la temperatura, presión y altitud.

- Acelerómetro: Dispositivo que mide el cambio de aceleración o vibración debido a los movimientos de la estructura a la que está acoplado.
- Giróscopo: Dispositivo mecánico que sirve para medir cambios de orientación en el espacio tridimensional.
- Magnetómetro: Dispositivo que sirve para cuantificar la fuerza o la dirección del campo magnético de un punto en el espacio.

3.3.1. Xsens MTi-28A53G35

La unidad montada en el tronco de TEO pertenece al modelo MTi-28A53G35 proporcionado por la compañía Xsens. Se trata de un AHRS (Attitude and Heading Reference System) y a la vez de una IMU de tamaño y peso reducidos con 3 grados de libertad, compuesto por acelerómetros, giróscopos y magnetómetros 3D.

Su procesador interno de baja potencia proporciona una señal de orientación sin derivación (gracias a que utiliza la gravedad y el campo magnético de la tierra como vectores de referencia), aceleración calibrada, giros y datos de campo magnético terrestre, todo ello en 3D.

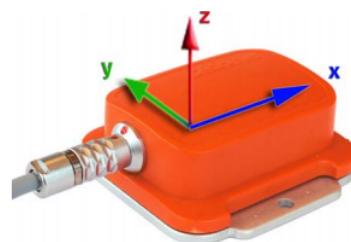


Figura 3.7: IMU

Su tamaño, peso y consumos reducidos, en adición a su robustez de diseño, lo hacen el sensor ideal para poder acoplar en cualquier dispositivo que requiera mediciones de aceleración, giros o campos magnéticos.

Entre sus características más destacadas se encuentran la capacidad de calcular en tiempo real el rumbo y datos dinámicos inerciales, orientación 360° referenciada por la gravedad y el campo magnético de la tierra, alta velocidad de actualización (120 Hz), y calibrado individual para la temperatura, la desalineación 3D y la sensibilidad cruzada del sensor. Además, el MTi incorpora una rutina de mapeado del campo magnético para corregir los efectos del hierro.

MTi-28A##G##	
Interfaz	Digital Serial (RS-232)
Voltaje de funcionamiento	4.5-15V
Consumo de Energía (modo orientación AHRS/3D)	360mW
Rango de Operación de Temperatura	0°C - 55°C
Dimensiones Exteriores	58 x 58 x 22 mm (W x L x H)
Peso	50g

Tabla 3.2: Características sensor IMU MTi-28A [Xsens]

Todo los datos recogidos por el sensor MTi son volcados e interpretados por la computadora gracias al MTi SDK (Software Development Kit), un paquete propietario de Xsens que sirve de interfaz a múltiples niveles: librerías binarias API(Windows, Linux), pero también proporciona código fuente implementando el protocolo de comunicación binario MTi para una fácil integración en cualquier plataforma [12].

El software para acceder al sensor inercial MTi, que está instalado en la CPU de locomoción de TEO, se ha extraído del robot iCub², cuyo software es de código abierto siguiendo las licencias GPL/FDL y desarrollado sobre YARP, gracias a que éste tenía implementado el acceso a uno de sus sensores iniciales MTx.

El envío de datos se realiza a través de un cable RS-232 (CA-USB2) que incluye un convertidor a USB, como el de la figura 3.8.

²iCub se trata de un robot humanoide para la investigación en cognición corporal que fue desarrollado entre el Instituto Italiano de Tecnología y la Universidad de Génova, dentro del consorcio internacional RobotCub, en el que participan varias universidades europeas. Mide 104cm de altura, pesa 22kg y posee 53 grados de libertad. Posee sensores de cámara, micrófonos, sensores iniciales, sensores fuerza/par, sensores de posición o sensores táctiles.



Figura 3.8: Cable RS-232

4. Estudio de la estabilidad

El control de la estabilidad en los robots bípedos resulta muy complejo. Para solucionarlo muchos investigadores han simplificado el cuerpo del robot.

En este capítulo se van a explicar las dos simplificaciones más utilizadas a la hora de estudiar la estabilidad de los robots humanoides bípedos, y más en concreto la estabilidad del robot TEO utilizado en el actual proyecto.

4.1. Modelo Péndulo Invertido Lineal

La primera de ellas es el modelo del péndulo invertido lineal (LIPM). Éste es el modelo más básico utilizado para simplificar la cinemática y la dinámica de los robots bípedos. Se trata de un modelo desarrollado en dos dimensiones con uno (una única unión rotacional) o dos (incluyendo una unión lineal) grados de libertad. S. Kajita () llegó a este modelo haciendo tres suposiciones. La primera de ellas es que la masa total del robot está concentrada en el CoM. En la segunda supone que el robot tiene piernas sin masa, cuyas puntas entran en contacto con el suelo a través de puntos de rotación individuales. Y la última considera que el robot se mueve solamente en el plano sagital (mostrado en la figura 4.1).

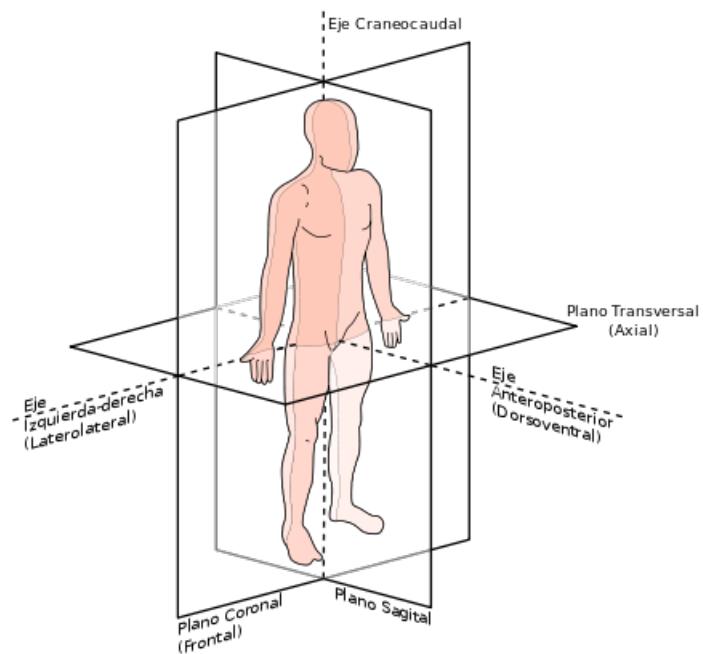


Figura 4.1: Plano Anatómico Sagital

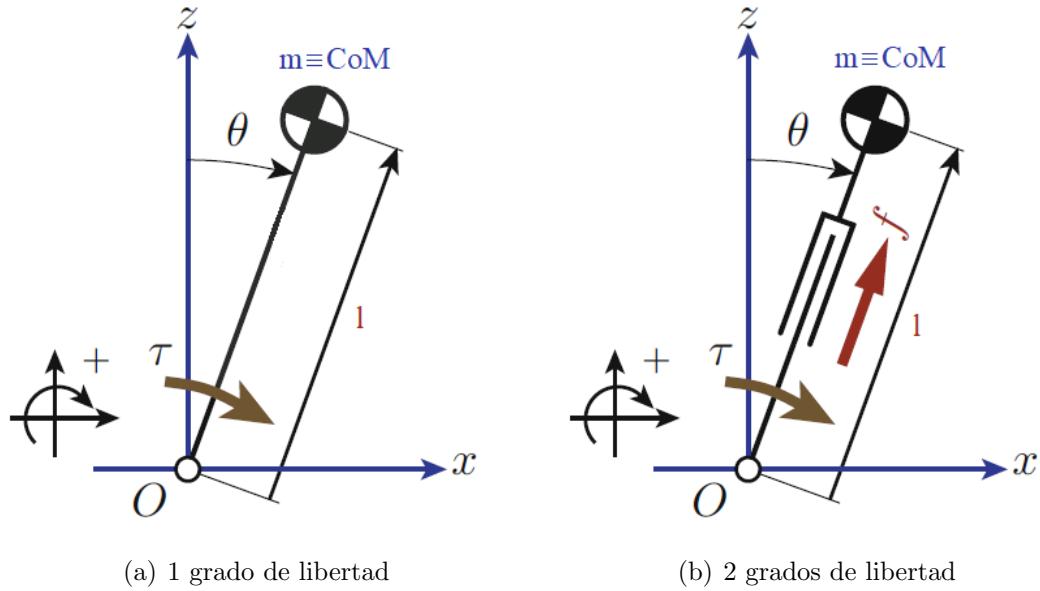


Figura 4.2: Modelo Péndulo Invertido Lineal

La ecuación que define el movimiento del CoM es la siguiente:

$$\tau = -ml^2\ddot{\theta} + mgl \sin \theta \quad (4.1)$$

donde m es la masa del sistema localizada en el CoM, l es la longitud del péndulo, τ es el par en el punto de rotación y θ es el ángulo del péndulo. Sin embargo, esta es una ecuación no lineal, por lo que resulta en un controlador muy complejo para el robot. Para resolver este problema asumimos que θ es lo suficientemente pequeño ($\theta < 10^\circ$) como para considerar que $\sin \theta = \theta$. Esta simplificación le permitió a Kajita () desarrollar el modelo más utilizado a lo largo de los años para el estudio de la estabilidad de los robots bípedos, una evolución del modelo lineal en 2D, que le permitió trabajar en 3D, el modelo Péndulo Invertido Lineal en tres dimensiones (3DLIPM) [15].

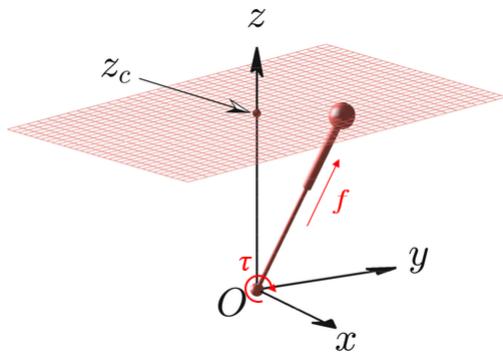


Figura 4.3: Modelo Péndulo Invertido Lineal 3D (3DLIPM)

Tras la simplificación la ecuación 4.1 queda:

$$\tau = -ml^2\ddot{\theta} + mgl\theta \quad (4.2)$$

La posición del CoM $\mathbf{p} = (x, y, z)$ está determinada por unas variables de estado $\mathbf{q} = (\theta_r, \theta_p, r)$, luego las ecuaciones en los 3 ejes quedan:

$$x = rS_p \quad (4.3)$$

$$y = -rS_r \quad (4.4)$$

$$z = rD \quad (4.5)$$

donde $S_r \equiv \sin \theta_r$; $S_p \equiv \sin \theta_p$; $D \equiv \sqrt{1 - S_r^2 - S_p^2}$.

Teniendo en cuenta que (τ_r, τ_p, f) son los pares y fuerzas asociados a las variables de estado (θ_r, θ_p, r) , la ecuación del movimiento del péndulo invertido 3D queda descrita matemáticamente como:

$$m \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} = (J^T)^{-1} \begin{pmatrix} \tau_r \\ \tau_p \\ f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

donde la estructura de la jacobiana es:

$$J = \frac{\partial p}{\partial q} = \begin{pmatrix} 0 & rC_p & S_p \\ -rC_r & 0 & -S_r \\ -rC_rS_r/D & -rC_pS_p/D & D \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

$$C_r \equiv \cos \theta_r, C_p \equiv \cos \theta_p \quad (4.8)$$

$$S_r \equiv \sin \theta_r, S_p \equiv \sin \theta_p \quad (4.9)$$

$$D \equiv \sqrt{1 - S_r^2 - S_p^2} \quad (4.10)$$

Sustituyendo 4.3, 4.4 y 4.5, se obtienen las ecuaciones de la dinámica en los ejes x, y y z

$$m(-z\ddot{y} - y\ddot{z}) = \frac{D}{C_r}\tau_r - mg_y \quad (4.11)$$

$$m(-z\ddot{x} - x\ddot{z}) = \frac{D}{C_p}\tau_p - mg_x \quad (4.12)$$

$$m(-x\ddot{x} + y\ddot{y} + z\ddot{z}) = rf - mg_z \quad (4.13)$$

Pero estas ecuaciones del péndulo invertido son no lineales y demasiado complejas para usarlas en la generación de tareas de caminata. Por esta razón se restringe el movimiento del CoM en la coordenada z al plano Z_c , cuyo vector normal es $(k_x, k_y, -1)$.

$$z = k_x x + k_y y + z_c \quad (4.14)$$

Si el plano de restricción es horizontal ($k_x = k_y = 0$), la dinámica bajo el control de la restricción están dada por

$$\ddot{x} = \frac{g}{z_c}x - \frac{1}{mz_c}\tau_y \quad (4.15)$$

$$\ddot{y} = \frac{g}{z_c}y - \frac{1}{mz_c}\tau_x \quad (4.16)$$

$$\ddot{z} = 0 \quad (4.17)$$

En el caso de que el plano de restricción esté inclinado ($k_x = k_y \neq 0$), se puede obtener la misma dinámica aplicando una restricción adicional para los pares de entrada,

$$\tau_x x + \tau_y y = 0 \quad (4.18)$$

A partir del modelo 3DLIPM junto a la restricción horizontal ($k_x = k_y = 0$) podemos obtener la posición de la proyección del Punto de Momento Cero (ZMP) en el suelo,

$$x_{zmp} = -\frac{\tau_y}{mg} \quad (4.19)$$

$$y_{zmp} = -\frac{\tau_x}{mg} \quad (4.20)$$

4.1.1. LIPM aplicado al robot humanoide TEO

Los sensores que se han utilizado son los F/T de los tobillos, ya que son los que están en contacto con el suelo. Gracias a su información se puede calcular la posición del ZMP para que TEO pueda conservar el equilibrio, a partir de las ecuaciones del modelo de péndulo invertido 3DLIPM.

Las ecs. 4.19 y 4.20 del ZMP para este modelo responden a la ecuación general:

$$x_{ZMP} = -\frac{\sum x \cdot F_z}{\sum F_z} \quad (4.21)$$

Pero este modelo se ha tenido que modificar para el robot TEO utilizado en el actual proyecto, ya que se considera que cuando un robot bípedo está soportando su peso en un pie, el tobillo del robot se convierte en el punto pivotante del modelo conectado al CoM del robot a través de su pierna sin masa. Pero este punto pivotante no se encuentra totalmente en el suelo ya que la estructura de TEO está construida de tal manera que el tobillo está elevado respecto al suelo debido a la anchura de la suela del robot, como se muestra en la figura 5.1. Por lo tanto, la ec. del ZMP adaptada sería:

$$x_{ZMP} = -\frac{\tau_y + hF_x}{F_z} \quad (4.22)$$

donde τ_y es el par en el punto pivotante alrededor del eje y , F_x y F_z son las fuerzas

medidas en las direcciones x y z respectivamente, y h es la altura de la suela del robot hasta la localización del sensor F/T.

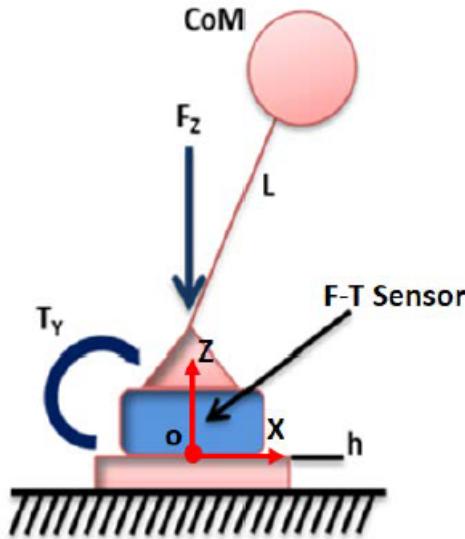


Figura 4.4: Modelo LIPM con un sensor F/T entre el tobillo y la suela

Pero esta ecuación sólo valdría cuando el robot está apoyado sobre una pierna (simple apoyo). Sin embargo, el proyecto se ha desarrollado estando apoyadas las dos piernas (doble apoyo), por lo que la ecuación para el ZMP global es:

$$x_{ZMP_{DS}} = \frac{x_{ZMP}^R F_z^R + x_{ZMP}^L F_z^L}{F_z^R + F_z^L} \quad (4.23)$$

donde R indica la pierna derecha y L la pierna izquierda. A pesar de que en doble apoyo el robot tiene dos puntos pivotantes en los tobillos, se puede aplicar el modelo de péndulo invertido simple ya que ambos tobillos tienen el mismo movimiento a lo largo del eje x (plano sagital).

4.1.2. DLIPM: mejora del modelo del péndulo invertido simple

En la respuesta dinámica del modelo de péndulo invertido simple se observaba que había cierto error conforme se aumentaba el ZMP. Ésto se corrigió con una mejora de dicho modelo que mejoraba esta respuesta dinámica y eliminaba ese error, es decir, que ajustaba el ZMP calculado a partir de los datos obtenidos de los sensores F/T de los tobillos, a un ZMP teórico al que debería llegar el robot. Este modelo se denomina DLIPM

4.2. Modelo cart-table

La siguiente simplificación más utilizada para el control del equilibrio de los robots humanoides bípedos es el modelo cart-table.

Este modelo proporciona información de las aceleraciones e inercias del cuerpo del robot, muy útiles a la hora de realizar tareas de caminata dinámica. Consiste en un carro de masa M corriendo sobre una mesa sin masa (figura 4.5). Tiene la misma dinámica de movimiento que el modelo de péndulo invertido pero añade una relación directa entre el ZMP y el movimiento.

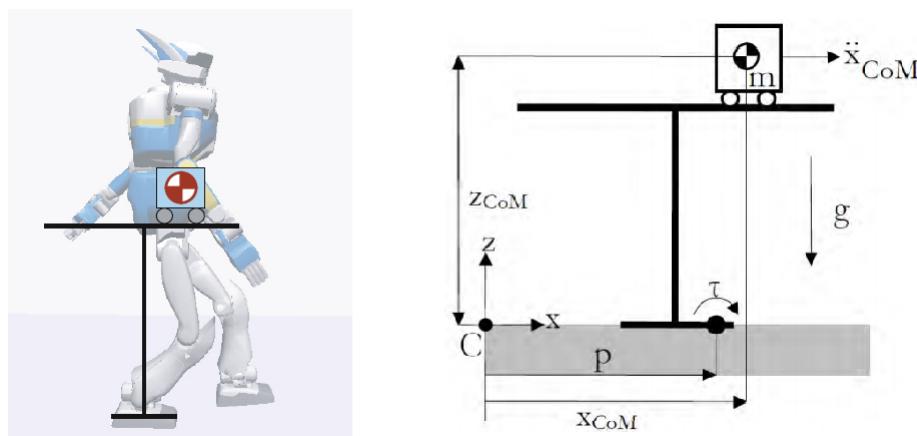


Figura 4.5: Modelo Cart-Table

Las ecs del modelo cart-table para controlar el ZMP se obtienen sustituyendo 4.19 y 4.20 en 4.15 y 4.16 del modelo 3DLIPM,

$$\ddot{x}_{CoM} = \frac{g}{z_{CoM}} (x_{CoM} - x_{ZMP}) \Rightarrow x_{ZMP} = x - \frac{z_{CoM}}{g} \ddot{x}_{CoM} \quad (4.24)$$

$$\ddot{y}_{CoM} = \frac{g}{z_{CoM}} (y_{CoM} - y_{ZMP}) \Rightarrow y_{ZMP} = y - \frac{z_{CoM}}{g} \ddot{y}_{CoM} \quad (4.25)$$

Estas ecuaciones se denominan **Ecuaciones del ZMP**.

Como se puede observar el pie de la mesa es demasiado pequeño para que el carro permanezca en el borde, por lo que el carro debe llevar una determinada aceleración para que la mesa se mantenga en posición vertical durante un tiempo, en el que el ZMP exista dentro del pie de dicha mesa.

Por otro lado Shuji Kajita y Bernard Espiau [20] añadieron que si esta aceleración es demasiado grande, el ZMP calculado se sale del polígono de soporte (4.6a). Esto es porque 4.24 y 4.25 no tienen en cuenta el polígono de soporte ni la restricción

unilateral (por lo que se asume que el pie está pegado al suelo, y esto no puede ser viable ya que el robot necesita levantar el pie para caminar). Por ello, hay que tener en cuenta dicha restricción, y como se puede observar en la 4.6b, la mesa ya no está en vertical, por lo que hay que tener en cuenta la aceleración en z a parte de la gravedad, quedando la ecuación del ZMP como:

$$\ddot{x}_{CoM} = \frac{g}{z_{CoM}} (x_{CoM} - x_{ZMP}) \Rightarrow x_{ZMP} = x - \frac{z_{CoM}}{g + \ddot{z}_{CoM}} \ddot{x}_{CoM} \quad (4.26)$$

que da el cálculo del ZMP en el borde del polígono de soporte (pie de la mesa).

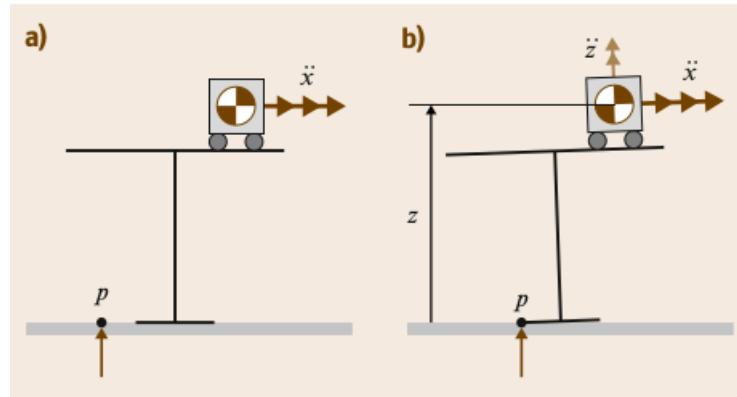


Figura 4.6: Cálculo del ZMP. a) Modelo ficticio, b) Modelo real

Esto es importante ya que un ZMP fuera del polígono de soporte implica que el robot podría no mantener el total contacto pie-suelo y la caminata no se produjese según lo planeado. Cuando el ZMP está dentro del polígono de soporte se puede garantizar el contacto total pie-suelo.

4.3. Equivalencia de modelos

Ambos modelos son diferentes maneras de calcular una misma salida, en este caso el ZMP. Como se puede deducir éstos deben de dar

Para ambos modelos la variable más importante y que tienen en común es la altura del CoM, desde el punto de medida de las fuerzas y los pares para el caso del modelo LIPM (longitud del péndulo), y la longitud desde el suelo hasta el CoM para el modelo cart-table (Z_{CoM}). Otra variable que hay que tener en cuenta cuando el robot realiza un paso es la inclinación, ya que ésta varía.

Esto se puede observar en la imagen

donde:

$$X_{ZMP_{FT_t}} \neq X_{ZMP_{IMU_t}} \Rightarrow X_{ZMP_{FT_{(t+1)}}} = X_{ZMP_{IMU_{(t+1)}}} \quad (4.27)$$

4.4. Estrategias de control

Los seres humanos son capaces de mantener el equilibrio en entornos complejos y novedosos ante diferentes perturbaciones mediante el movimiento de las diferentes partes de su cuerpo. Esta capacidad de respuesta ante perturbaciones externas ha hecho que diferentes investigadores acerquen el estudio de la estabilidad de los seres humanos a los robots humanoides.

Pueden aparecer diferentes perturbaciones que alteren el equilibrio del robot cuando éste se encuentra en una postura estable. Estas perturbaciones pueden aparecer en el plano sagital (perturbaciones anterior-posteriores) o en el plano frontal (perturbaciones mediolaterales). Se han hecho numerosos estudio del equilibrio cuando el robot se encuentra en posición estática, apareciendo diferentes estrategias de control para mantener dicho equilibrio ante la aparición de diferentes perturbaciones. Dichas estrategias se han separado en función de la magnitud de dicha perturbación y de la posición de la postura del robot en: estrategias de tobillo, cadera y paso [17] [18].

Estas estrategias están basadas en la cuantificación del cambio de dirección del CoP en las direcciones anteriormente mencionadas.

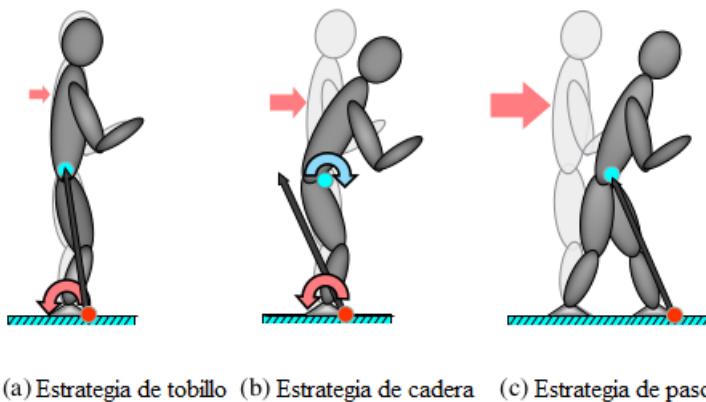


Figura 4.7: Estrategias de balance

La primera de ellas es la estrategia de tobillo. Ésta se aplica para pequeñas perturbaciones anterior-posteriores que tienen lugar en el plano sagital. Se usa para controlar y mantener el CoP en el polígono de soporte. Cuando ocurre una alteración del equilibrio de baja magnitud el cuerpo del robot se puede considerar como un péndulo invertido ajustándose dicho equilibrio mediante el par de la articulación del tobillo.

En la estrategia de la cadera, al igual que en la estrategia de tobillo, se actúa en el plano sagital y se basa en el balance del CMP. Ésta interviene cuando la perturbación del equilibrio es lo suficientemente intensa como para que la estrategia del tobillo no sea suficiente. Se utiliza la articulación de la cadera y se puede usar

independientemente o en combinación con la estrategia del tobillo.

La última estrategia es la del paso. Ésta se lleva a cabo cuando aparece una perturbación en la que una aplicación de par contraria en las articulaciones no es suficiente para recuperar el equilibrio. Cuando se realiza el paso el área del polígono de soporte se reajusta, creando unos nuevos límites de equilibrio.

Todas ellas dependen de diferentes factores como puede ser las condiciones del entorno (entornos rocosos o lisos, por ejemplo), la forma de la suela del robot, la altura del cuerpo, o la posición en la que se encuentre en el momento en el que se produce dicha perturbación.

5. Estudio de la respuesta de los sensores del robot humanoide TEO y la aplicación de su información al control del equilibrio

En este capítulo se van a exponer las respuestas de los sistemas sensoriales del robot humanoide TEO a diferentes inclinaciones para simular perturbaciones pequeñas que cambian la posición del ZMP y mantener el equilibrio del robot haciendo uso de la estrategia de control de los tobillos. Para ello se decidió ajustar un modelo (el modelo de péndulo invertido lineal) de los dos actuales existentes y a partir de él ajustar el otro (el modelo cart-table).

5.1. Estudio de la respuesta de los sensores F/T

5.1.1. Descripción de la metodología experimental

Para realizar los experimentos ha sido necesario seguir una serie de pasos, ya que si no se seguían los experimentos podrían no dar lecturas correctas y por tanto el experimento sería fallido. Los pasos a seguir son:

NOTA: Los primeros 2 pasos deben realizarse con el robot en suspensión, es decir, sin que toque el suelo con la suela de los pies. A continuación se explicará el motivo.

1. Puesta del robot en posición inicial (Homeposs)

Una vez se ha encendido el robot y las CPU's se va a proceder a la puesta a cero de la posición del mismo, ya que puede haber modificaciones en su posición de anteriores experimentos o simplemente para asegurarse que los experimentos salen correctamente y siempre empiezan desde la misma posición de inicio. Esto debe realizarse con el robot en suspensión para evitar posibles colisiones de los pies con el suelo.

2. Corrección offset sensores F/T

Ya realizada la posición de inicio del robot, desde una terminal se deben iniciar los sensores F/T de los tobillos que se van a encargar de dar la información de las fuerzas y los pares al programa para así poder realizar los experimentos, siempre con el robot en suspensión para eliminar los posibles offset que puedan tener los mismos. Es importante que no esté apoyado en el suelo para que cuando se ejecute esta corrección, no se elimine el valor de la fuerza ejercida por la masa del robot. Una vez que se han iniciado los sensores F/T de los tobillos ya se podría bajar el robot para que éstos puedan tener en cuenta el propio peso del robot y las demás fuerzas y pares.

3. Puesta en funcionamiento del programa

Cuando se inicia el programa, existe una primera fase en la que el robot no

realiza ningún movimiento. Esto se debe a que se está configurando de tal manera que se elimine el offset que pueda haber al inicio debido a la posición de homepos del robot, ya que ésta no es perfecta y, debido a la flexibilidad de la estructura y otros errores acumulados, puede no estar totalmente erguido y que las fuerzas en el plano axial no sean cero.

Una vez que ha pasado esta fase, y estamos seguros de que ese offset se ha eliminado en la medida de lo posible, se envía al robot un ZMP_{ref} y TEO comanda un ángulo, que ha calculado a partir de la conversión del ZMP_{ref} , activando los motores de sus tobillos e inclinando el robot dicho ángulo, y calculando el $ZMP_{F/T}$ del modelo de péndulo invertido lineal hasta que este $ZMP_{F/T}$ se estabiliza, para hacer coincidir tanto la parte transitoria como la parte de régimen permanente del $ZMP_{F/T}$ con el del ZMP_{ref} .

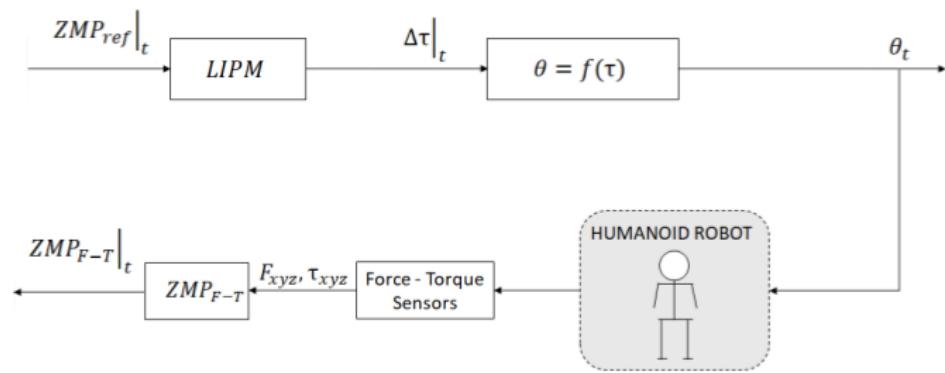


Figura 5.1: Control de posición básico del ZMP usando el modelo LIPM

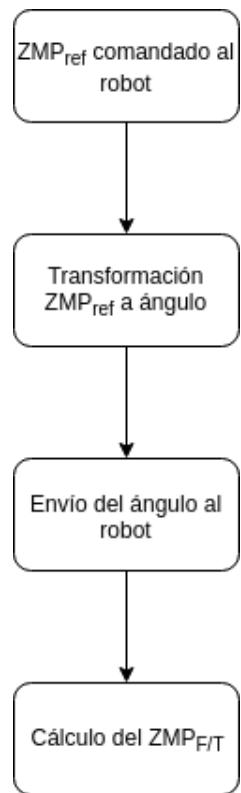


Figura 5.2: Diagrama de flujo del programa

5.1.2. Resultados experimentales

En el presente proyecto se ha llevado a cabo una batería de 30 experimentos.

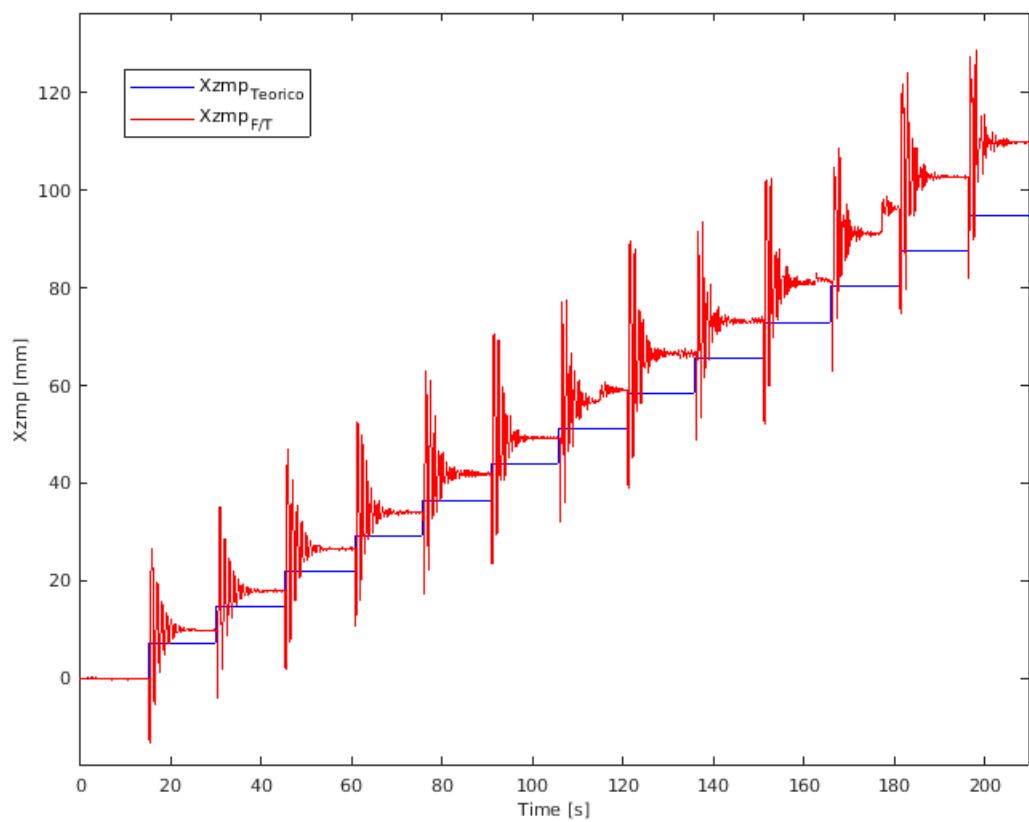


Figura 5.3: Evolucion ZMP modelo LIPM

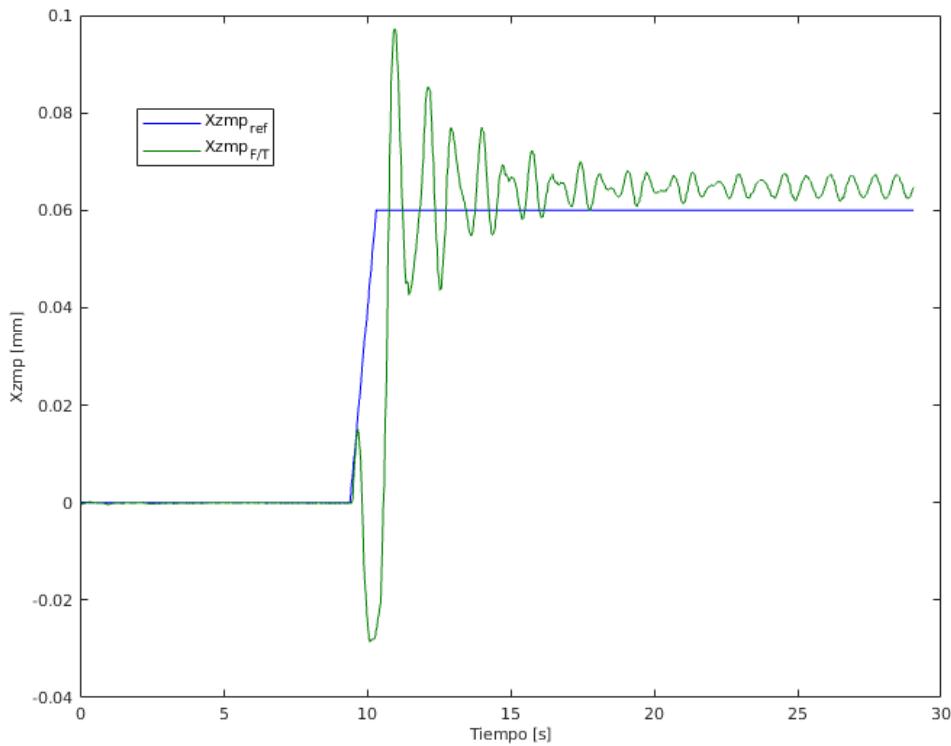


Figura 5.4: Evolución ZMP modelo LIPM para ZMPref = 5mm

En el gráfico de la figura 5.4 se puede observar que a pesar de realizar un control/corrección sobre el ángulo que se comanda al robot a partir de la conversión del ZMP_{ref} , el $ZMP_{F/T}$ nunca llega a estabilizarse y esto es debido a que continuamente se está corrigiendo el ángulo de inclinación.

En los siguientes experimentos se cambiaron varias variables para comprobar si el $ZMP_{F/T}$ se podía estabilizar sin necesidad de un control en el ángulo.

Exp.	k_p	k_d	k_u
1	-0.0025	0.00005	1
2	-0.0025	0.00005	1.2
3	-0.0025	0.00005	1.4
4	-0.0025	0.00005	2
5	-0.005	0.0005	1
6	-0.005	0.0005	1.65
7	-0.01	0.0005	1
8	-0.01	0.0005	1.65
9	-0.05	0.005	1.65
10	-0.015	-0.00025	1.4
11	-0.035	-0.0001	1.4

Tabla 5.1: Batería de experimentos

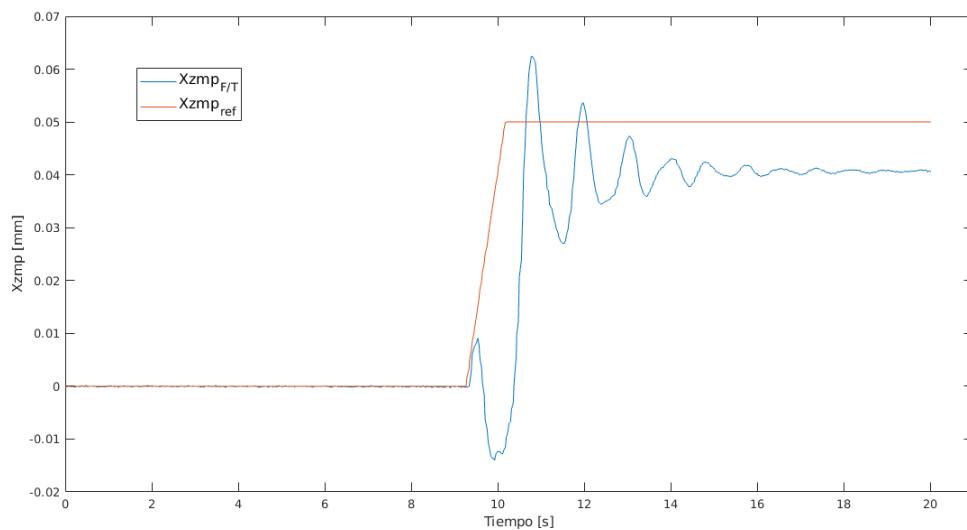


Figura 5.5: Evolución ZMP modelo LIPM para ZMPref = 5mm

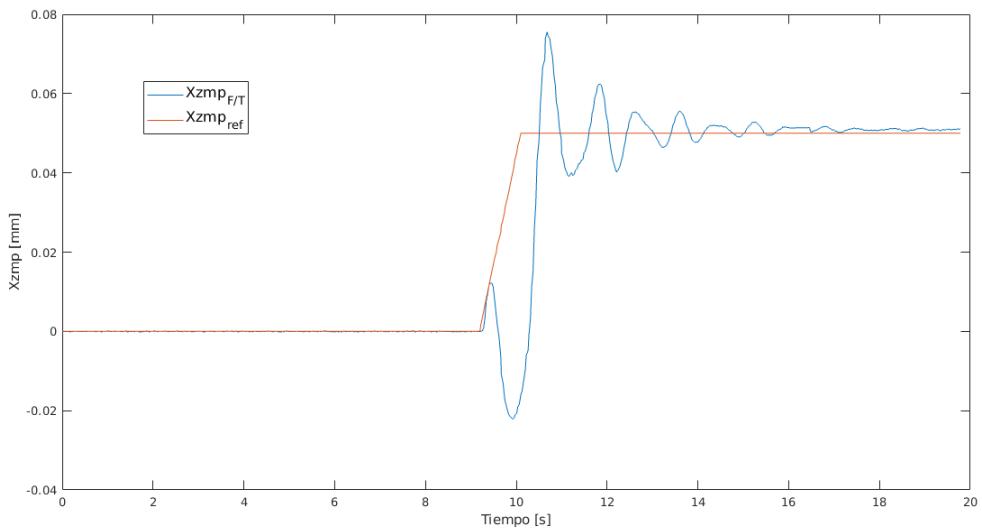


Figura 5.6: Evolución ZMP modelo LIPM para ZMPref = 5mm

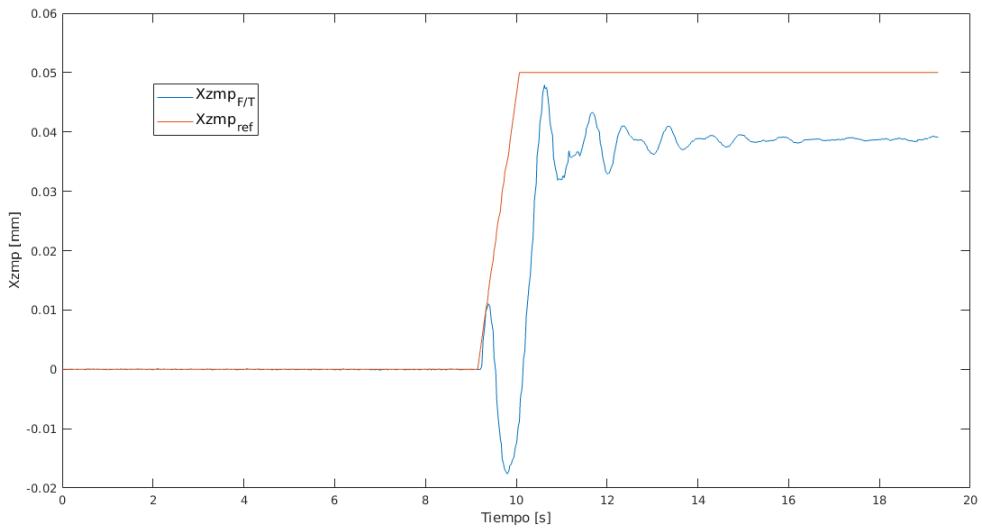


Figura 5.7: Evolución ZMP modelo LIPM para ZMPref = 5mm

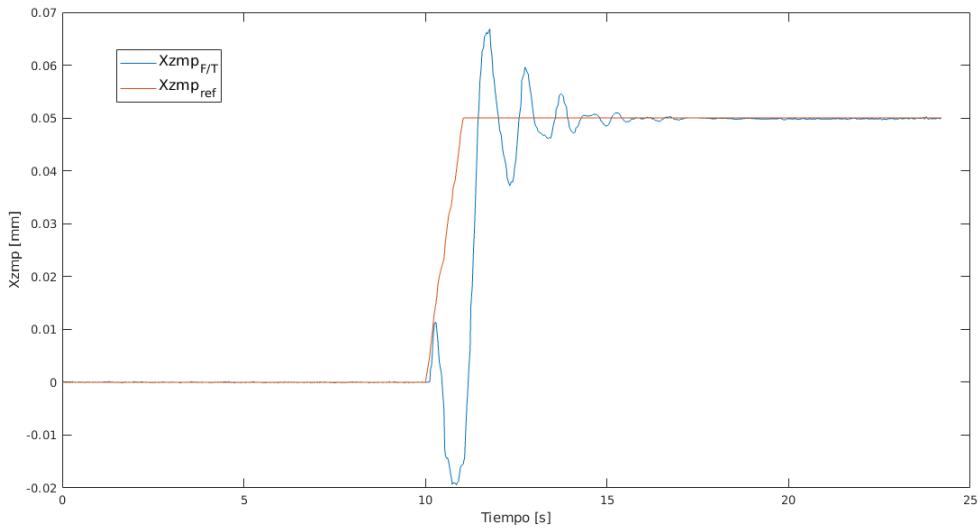


Figura 5.8: Evolución ZMP modelo LIPM para ZMPref = 5mm

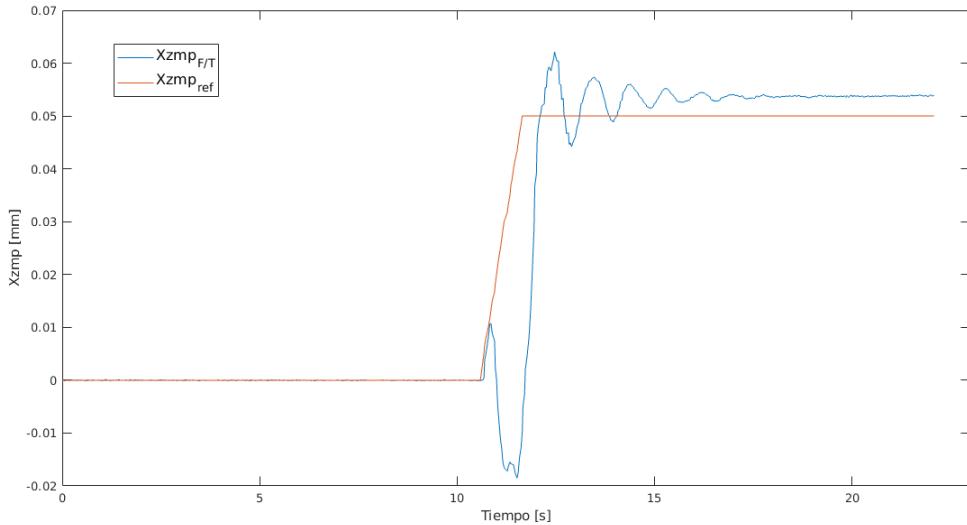


Figura 5.9: Evolución ZMP modelo LIPM para ZMPref = 5mm

Las primeras pruebas se desarrollaron en bucle abierto para ver cómo evolucionaba el ZMP_{FT} respecto al ZMP_{ref} ³, es decir, se comandaba un ZMP de referencia al que tenía que ir el robot y a partir del esa referencia el robot debía calcular el ángulo de inclinación de los tobillos y una vez que se tenía ese ángulo el robot calculaba el ZMP del modelo LIPM a través de la información que le llegaba de las fuerzas y los pares de los sensores de los tobillos.

³ZMP de referencia al que el robot debería llegar atendiendo a la física y cálculos teóricos del modelo LIPM

Como se puede observar el ZMP_{FT} no se corresponde con el ZMP_{ref} conforme se va aumentando el ángulo de inclinación, debido al error que tenía en régimen estacionario.

Más tarde se decidió realizar las pruebas en bucle cerrado y se puede observar cómo fue mejorando la respuesta del ZMP_{FT} hasta que en la última gráfica se desarrolló el modelo del actual proyecto, el modelo DLIPM, que se explicará más adelante.

5.1.3. Modelo Péndulo Invertido Lineal Dinámico (DLIPM)

Como se ha comentado en el capítulo 4, existen errores provenientes de la información de los sensores F-T de los tobillos del robot debido a los efectos que aparecen en los pares y fuerzas medidos por los sensores cuando éste es sometido a una perturbación de su equilibrio, por lo que se hace necesario separar las inexactitudes de las mediciones y la información relacionada con el comportamiento esperado ante dichas perturbaciones.

Para es necesario establecer las variables que intervienen en el proceso (CoM y masa) y definir una estrategia para su control. Para el actual modelo de péndulo invertido lineal aplicado a TEO, la ubicación del CoM y de la masa no son completamente precisas debido a las diferencias entre los diseños CAD y el modelo real del robot, y como ésto no se puede corregir en el robot real, se han utilizado los valores teóricos de dichos parámetros. Para la estrategia de control, teniendo en cuenta el modelo establecido, se puede establecer previamente la ubicación del ZMP para que éste permanezca siempre dentro del polígono de soporte. De esta manera se reducen esfuerzos en el sistema de control, por lo que las ganancias de ajuste serán menores.

A partir de los experimentos desarrollados se ha podido establecer un método para desarrollar el nuevo modelo. Se recogen y procesan los datos obtenidos de los sensores F-T de los experimentos de push-recovery del sistema en bucle abierto. Con esta información, se calcula el $X_{ZMP_{F-T}}$ real y se compara con el $X_{ZMP_{exp}}$ esperado. De aquí se puede observar que hay una diferencia, el error anteriormente comentado, por lo que para corregirlo éste se modela, obteniendo una ecuación para describir dicho error. Una vez obtenido el error modelado, éste se incluye en el modelo original como una fuerza ficticia que corrige la diferencia, obteniéndose el nuevo modelo utilizado a lo largo del actual proyecto. A partir del mismo se puede observar como el comportamiento del ZMP medido y el planificado son similares.

A continuación se van a describir las diferentes fases seguidas para llegar a desarrollar tanto el nuevo modelo como la nueva arquitectura de control y su posterior validación.

5.1.4. Estudio de la respuesta del sistema

Para estudiar la respuesta de los sensores F-T ante perturbaciones y aplicar dicha información obtenida al modelo simplificado de TEO, y poder así desarrollar un nuevo modelo personalizado, se ha seguido una serie de pasos divididos en tres fases (fase experimental, fase de análisis de datos y fase de validación de resultados) que se ilustran en la figura 5.10.

Para poder establecer el nuevo modelo lo primero que hay que hacer es fijar las variables que intervienen en el modelo. La masa del robot TEO es de 62,6 kg y la altura desde el suelo al CoM es 0,893 m (la longitud del péndulo). El siguiente paso que se realizó fue someter al robot a una serie de variaciones en el ángulo de los tobillos para simular perturbaciones pequeñas, con la excepción de que no volvía al ZMP inicial, para así poder modelar mejor la diferencia entre el ZMP esperado y el medido, estudiándose su variación dinámica también a lo largo del proceso. Por último, se validaron los datos para el nuevo modelo con la nueva arquitectura de control.

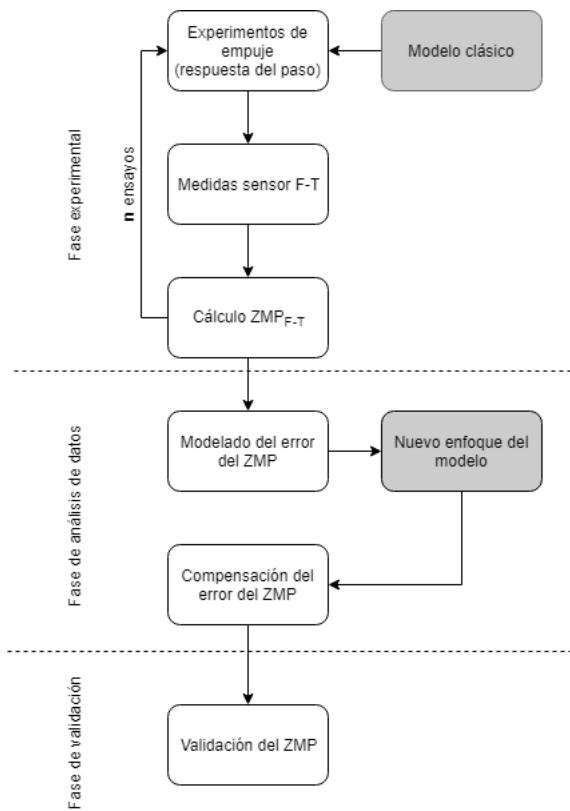


Figura 5.10: Diagrama del desarrollo experimental del nuevo modelo

En la figura 5.11 se presenta al robot apoyado sobre las dos piernas (doble soporte) en un entorno plano orientado hacia el plano en el que se ha desarrollado dicho modelo, el plano sagital (x-z). Esta metodología también se podría aplicar para

cualquier otro plano espacial ya que se obtuvieron resultados similares en el plano frontal (y-z).

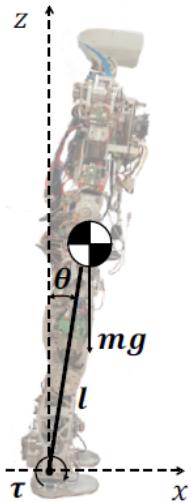


Figura 5.11: Plano de desarrollo de los experimentos del robot TEO

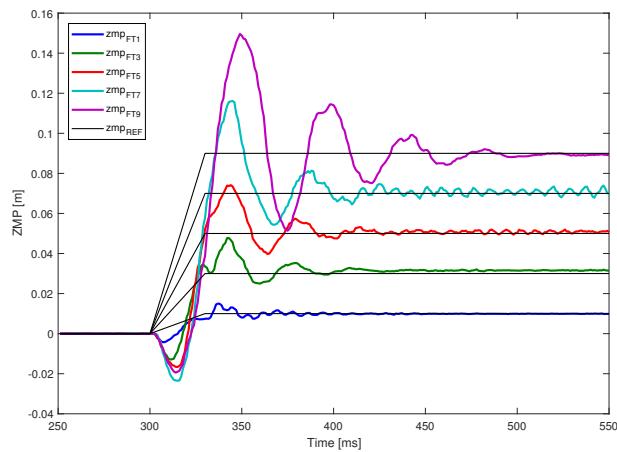


Figura 5.12: Evolucion ZMP modelo DLIPM

6. Conclusiones y trabajos futuros

Referencias

- [1] Milicua Ainhoa, "Las 6 leyes de la robótica de la Unión Europea", Blogthinking, 21-06-2017. [En línea]. Disponible en: <https://blogthinkbig.com/las-6-leyes-de-la-robotica-de-la-union-europea>.
- [2] Wikipedia, Robótica", Wikipedia, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Rob%C3%BCunhbox\voidb@x\bgroup\let\unhbox\voidb@x\setbox\@tempboxa\hbox{o\global\mathchardef\accent@spacefactor\spacefactor}\accent19o\egroup\spacefactor\accent@spacefactor\futurelet\@let@token\penalty\@M\hskip\z@skiptica>
- [3] Wikipedia, Robot", Wikipedia, 2007. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Robot>.
- [4] International Organization for Standardization, Robots and robotic devices – Vocabulary", ISO, 03-2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/55890.html?browse=tc>.
- [5] Asociación Española de Robótica y Automatización, AER-Automation. [En línea]. Disponible en: <https://www.aer-automation.com/aer-atp/robotica-industrial-y-de-servicio/>. Acceso: junio 2018.
- [6] K. Sanchez Madriz, Clasificación de los robots según su arquitectura", El avance de la Robótica, 31-10-2011. [En línea]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/elavancedelarobotica/clasificacion-de-los-robots/clasificacion-de-los-robots-su>.
- [7] Robots and Androids, "The History of Robots", Robots and Androids. [En línea]. Disponible en: <http://www.robots-and-androids.com/history-of-robots.html>. Acceso: junio 2018.
- [8] Md Akhtaruzzaman y A.A. Shafie, Evolution of Humanoid Robot and contribution of various countries in advancing the research and development of the platform", presentada en Control Automation and Systems (ICCAS), Korea, 27-30 oct. 2010. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/224205809_Evolution_of_Humanoid_Robot_and_contribution_of_various_countries_in_advancing_the_research_and_development_of_the_platform?enrichId=rqreq-ab514ae1b200677f50fc57e833fdf1d3-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWd1OzIyNDIwNTgwOTtBUzoxMDI4NTkwODEyNTY5NjhAMTQwMTUzNDkyNDI5Mw%3D%3D&el=1_x_2&esc=publicationCoverPdf. Acceso: julio 2018.
- [9] T. Martín y A. Serrano, "Dinámica de sistemas. Centro de masas", Universidad Politécnica de Madrid. [En línea]. Disponible en: <http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/dinamsist/cdm.html>.

- [10] S. Kajita, H. Hirukawa, K. Harada y K. Yokoi, "Introduction to Humanoid Robotics", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-54536-8>
- [11] S. Fernández, "Locomoción bípeda del robot humanoide NAO", Proyecto final de carrera, Universidad Politécnica de Catalunya, Cataluña, España, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/9115>. Acceso: julio 2018.
- [12] Xsens Technologies B.V., "MTi Miniature Attitude and Heading Reference System", Xsens Technologies B.V., Holanda, 2009.
- [13] Xsens Technologies B.V., "MTi and MTx User Manual and Technical Documentation", Xsens Technologies B.V., Holanda, Informe técnico MT0100P , 2006.
- [14] G. Metta, P. Fitzpatrick y L. Natale, "YARP: Yet another robot platform", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 3, n.º 1, pp. 43-48, marzo 2006. [En línea]. Disponible en: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.5772/5761>. Acceso: julio 2018.
- [15] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Yokoi y H. Hirukawa, "The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation", presentada en International Conference on Intelligent Robots and Systems, Maui, Hawaii, USA, Oct. 29 - Nov. 03, 2001. [En línea]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/6a31/6e0d44e35a55c41a442b3f0d0eb1f9d4d0ca.pdf>. Acceso: julio 2018.
- [16] M. Vukobratović y B. Borovac, "Zero Moment Point - Thirty five years of its life", *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 1, n.º 1, pp. 157–173, 2004. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/220065796_Zero-Moment_Point_-_Thirty_Five_Years_of_its_Life. Acceso: julio 2018.
- [17] D.A. Winter , F. Prince, J. S. Frank, C. Powell and K. F. Zabjek, Unified theory regarding A/P and M/L balance in quiet stance", *Journal of neurophysiology*, vol. 75, n.º 6, pp. 2334-2343, julio 1996. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/14409014_Unified_theory REGARDING_AP_and_ML_balance_in_quiet_stance. Acceso: agosto 2018.
- [18] D.N. Nenchev y A. Nishio, .Experimental Validation of Ankle and Hip Strategies for Balance Recovery with a Biped Subjected to an Impact", presentada en International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, USA, Oct. 29 - Nov. 2, 2007. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/4296918_Experimental_validation_of_ankle_and_hip_strategies_for_balance_recovery_

with_a_biped_subjected_to_an_impact

- [19] M. Vukobratović, "Humanoid Robotics - Past, Present State, Future", presentada en 4th Serbian-Hungarian Joint Symposium on Intelligent Systems, Belgrado, 2006. [En línea]. Disponible en: http://conf.uni-obuda.hu/sisy2006/1_Vuk.pdf
- [20] S. Kajita y B. Espiau, "16. Legged Robot", en B. Siciliano y O. Khatib (Eds.) *Springer Handbook of Robotics*. Berlin, Alemania: Springer-Verlag, 2008, pp. 361-389.

