

**INFORME DE PRODUCCIÓN INVESTIGATIVA
DECIMA CONVOCATORIA GENERAL PARA EL FOMENTO, DESARROLLO Y
PRODUCCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN DE ALTO NIVEL EN LA UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
CAPÍTULO 1. MODALIDAD DE FINANCIACIÓN EN LOS GRUPOS DE LA
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
“CONSERVACIÓN DEL EQUILIBRIO DE ROBOTS BÍPEDOS EN PRESENCIA DE
PERTURBACIONES MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CONTROL
DE IMPEDANCIA EN LAS ARTICULACIONES INFERIORES”**

1. INFORMACIÓN GENERAL DE PROYECTO

Tabla 1. Información general del proyecto

Código Interno	1605605-012	Supervisor	Ing. Javier Barajas Herrera
Nombre del proyecto de investigación	Conservación del equilibrio de robots bípedos en presencia de perturbaciones mediante la aplicación de técnicas de control de impedancia en las articulaciones inferiores	Fecha de inicio del proyecto.	29/02/2016
Nombre del Investigador principal o docente tutor de semillero	Andrea Katherín Pérez Hernández	Fecha de finalización del proyecto.	01/12/2016
Nombre de los co-investigadores	Juan Manuel Calderón Chávez – Carlos Saith Rodríguez Rojas	Fecha de presentación del informe de avance.	14 de junio de 2016
Nombre de los auxiliares de	Oswaldo Andres Peña Rojas	Centro de costos asignado	17304114

investigación /estudiantes de semillero vinculados			
Grupo de Investigación/Semillero	Grupo de Estudio y Desarrollo en Robótica	Unidad académica	Facultad de Ingeniería Electrónica
Nombre de la línea de investigación	Robótica e Inteligencia Computacional	Porcentaje estimado de avance según cronograma	100%

✓ **Título**

Conservación del equilibrio de robots bípedos en presencia de perturbaciones mediante la aplicación de técnicas de control de impedancia en las articulaciones inferiores

✓ **Resumen**

El proyecto de investigación busca el diseño, implementación y validación de estrategias de control de impedancia en las articulaciones inferiores para asegurar el equilibrio estático de un robot bípedo en presencia de perturbaciones externas en el plano sagital. Dichas perturbaciones son de naturaleza pequeña y suave, presentando un mayor impacto en el torso y disminuyendo proporcionalmente hasta pasar a la rodilla y tobillos.

Para la validación de las estrategias de control se planea la construcción de un prototipo robótico bípedo con 12 grados de libertad (seis en cada pierna) para un total de 24 motores. Dicha plataforma contará con servo motores de PID programable para permitir la implementación de las estrategias de control y la generación de rigidez variable en cada una de las uniones (motores DC). También contará con una unidad central de computo sobre la cual se implementarán los algoritmos y una unidad de censado compuesta por giróscopo y acelerómetro, además de

sensores de posición y fuerza en cada motor. Este proyecto planea generar algoritmos que a futuro puedan ser aplicados a robots humanoides de tamaño similar a los seres humanos con el objetivo de mejorar la interacción entre el hombre y la máquina, además de generar estrategias de equilibrio en procesos de movimientos complejos como caminata. El objetivo final y a largo plazo es el desarrollo de robots que cumplan funciones de búsqueda y rescate de seres humanos en zonas de desastre y atención a personas adultas mediante la asistencia doméstica. El proyecto se enfoca en la utilización de estrategias de control de impedancia con el objetivo de generar puntos de contacto suave con el medio ambiente, dada la naturaleza la naturaleza de interacción que se espera desarrollar con este tipo de robots.

✓ **Palabras clave**

Robots Humanoides, Centro de Masa, Punto de Momento Zero, Filtrado y estimación de señales, Control de impedancia.

✓ **Problema de investigación con ajustes pertinentes.**

Los robots humanoides son hoy en día uno de los campos de la robótica que más atrae la atención por parte de los investigadores en todo el mundo. Aunque actualmente los avances logrados en el campo de robots humanoides en áreas de movilidad, versatilidad, inteligencia y adaptabilidad distan mucho de los seres humanos, es claro que estos son caminos que se deben recorrer en busca de obtener un robot parecido a los seres humanos y con capacidades similares. Se espera que para el 2050 la población mayor de 60 años sea tres veces la actual (Europe, 2015), para lo cual se planea contar con la ayuda de robots humanoides capaces de interactuar con seres humanos de una forma similar a la que se desarrolla entre humanos. Para esto se hace necesario el desarrollo de movimientos especiales en los robots humanoides, basados en el contacto suave entre el robot y el medio que lo rodea. El control de impedancia (impedance

control), control de fuerza (force control) o control de rigidez (stiffness control) son algunas de las técnicas que se vienen utilizando para hacer realidad el contacto suave. Para nuestro caso el problema busca a largo plazo aplicar el contacto suave en algoritmos de caminata, pero antes de pensar en caminar se debe pensar en balancear al robot en posición de erguido (stand-Up) en situaciones con presencia de perturbaciones externas (similares al contacto con objetos externos). El problema que planeamos enfrentar es el balance de un robot bípedo para mantener el equilibrio estático en situaciones de contacto o perturbaciones de objetos extraños en el plano sagital, mediante el uso de técnicas de control de impedancia. El problema que plantea este proyecto de investigación es apenas el punto de partida para un objetivo aún más ambicioso basado en la implementación de algoritmos de control de caminata que aseguren el contacto suave con el medio ambiente.

✓ **Pregunta de investigación**

¿Cómo mantener el balance en robots bípedos en presencia de perturbaciones, mediante el uso de conceptos de control de impedancia aplicados a motores DC en las articulaciones inferiores del cuerpo del robot?

✓ **Objetivos de investigación con ajustes pertinentes.**

Objetivo general

Diseñar un sistema de control capaz de estimar la rigidez necesaria que se debe aplicar en los motores del tobillo y la rodillas de un robot bípedo de acuerdo a la perturbación externa aplicado sobre el cuerpo del robot en el plano sagital con el objetivo de mantener el balance en posición erguida.

Objetivos Específicos

- Implementar un algoritmo de filtrado y estimación que permita adecuar la información

proveniente de los sensores de carga, giróscopo, acelerómetro y sensores de posición de un robot bípedo.

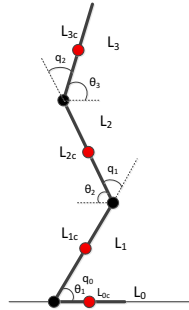
- Implementar una plataforma robótica bípeda de 12 grados de libertad para evaluar las estrategias de control propuestas.
- Plantear e implementar un modelo Dinámico que permita estimar el torque requerido en cada una de las articulaciones básicas del robot (tobillos, rodillas y cadera).
- Diseñar e implementar diferentes estrategias de control que permitan mantener el balance del robot en presencia de perturbaciones.
- Evaluar las diferentes estrategias de control mediante el uso de conceptos de punto de momento cero y centro de masa.
- Evaluar la posibilidad de utilizar estas estrategias de control en movimientos más complejos como caminata o salto.

✓ **Marco teórico y ajustes pertinentes (teorías y conceptos abordados).**

Dentro del campo del desarrollo de algoritmos de control para garantizar el equilibrio en robots humanoides hay tres elementos básicos que se deben tener en cuenta y con los que se trabaja constantemente los cuales son: Un modelo matemático del robot y que se encuentre acorde a las necesidades del movimiento que se desea trabajar, cálculo del centro de masa (CoM) y el del ZMP (Zero Moment Point)

Modelo cinemático y dinámico del robot.

El modelo que se planea trabajar se encuentra en un espacio de dos dimensiones (plano sagital) dado que para nuestro caso las dos piernas realizarán el mismo movimiento y las perturbaciones se encontrarán en el plano sagital. Este modelo consiste de 4 links o eslabones rígidos donde el eslabón 3 representa el tronco, el 2 y 1 el fémur y la pierna y el link 0 los pies. Estos eslabones se encuentran conectados por uniones rotacionales.



Modelo Planar de 4 links o eslabones

Modelo Cinemático

El modelo cinemático está definido por la posición final de los links y del centro de masa de cada uno de ellos denotado por x_{ic} en dirección x y y_{ic} en dirección y.

$x_{1c} = L_{1c} \cos \theta_1$	$y_{1c} = L_{1c} \sin \theta_1$	
$x_{2c} = L_1 \cos \theta_1 - L_{2c} \cos \theta_2$	$y_{2c} = L_1 \sin \theta_1 + L_{2c} \sin \theta_2$	
$x_{3c} = L_1 \cos \theta_1 - L_2 \cos \theta_2 + L_{3c} \cos \theta_3$	$y_{3c} = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_{3c} \sin \theta_3$	

Donde L_i es la longitud de cada uno de los links, θ_i es la rotación absoluta angular de cada unión y L_{ic} es la localización del centro de masa de cada uno de los links donde $i = 1, 2, 3, \dots$

Localización del centro de masa (CoM) del modelo completo

Las coordenadas del modelo completo del robot se expresen mediante las siguientes formulas:

	$C_{om} = \frac{\sum m_i c_i}{\sum m_i} = \frac{\sum m_i c_i}{M}$	$c_i = \begin{bmatrix} x_{cm} \\ y_{cm} \end{bmatrix}$
--	---	--

Donde m_i es la masa de cada uno de los links, c_i es la posición absoluta en cada uno de los links

Modelo Dinámico

Las ecuaciones del modelo dinámico son calculadas mediante la formulación Euler-Lagrange la cual puede ser escrita en su forma general

	$\frac{d}{dx} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_i} = \tau_i$	$\mathcal{L} = K_E - P_E$
--	--	---------------------------

Donde $\mathcal{L}$ representa la ecuación de Lagrange y τ_i representa el torque de cada unión.

En la ecuación de Lagrange K_E representa la energía cinética y P_E la energía potencial de cada link. Substituyendo las ecuaciones anteriores se logra la forma general de la ecuación Euler-Lagrange:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\partial K_E}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial K_E}{\partial \theta_i} + \frac{\partial P_E}{\partial \theta_i} = \tau_i$$

La energía cinética total para un nuestro modelo de 4 links se expresa de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} K_E = & \frac{1}{2} m_1 L_{1c}^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_3 L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 L_{2c}^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 \\ & + \frac{1}{2} m_3 L_2^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 L_{3c}^2 \dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2} I_3 \dot{\theta}_3^2 + m_2 L_1 L_{2c} \cos(\theta_1 + \theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ & + m_3 L_1 L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_3 L_2 L_{3c} \cos(\theta_3 + \theta_2) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \\ & + m_3 L_1 L_{3c} \cos(\theta_1 - \theta_3) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \end{aligned}$$

La energía potencial se encuentra expresada de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} P_E = & m_1 g L_{1c} \sin \theta_1 + m_2 g L_1 \sin \theta_1 + m_3 g L_1 \sin \theta_1 + m_2 g L_{2c} \sin \theta_2 + m_3 g L_2 \sin \theta_2 \\ & + m_3 g L_{3c} \sin \theta_3 \end{aligned}$$

Los torques de cada uno de los links se encuentran reemplazando las ecuaciones de energía potencial y cinética en la formulación de la ecuación Euler-Lagrange así:

Torque para el link 1

$$\begin{aligned}
\tau_1 = & (m_1 L_{1c}^2 + I_1 + m_2 L_1^2 + m_3 L_1^2) \ddot{\theta}_1 \\
& + (m_2 L_1 L_{2c} \cos(\theta_1 + \theta_2) + m_3 L_1 L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)) \ddot{\theta}_2 \\
& + m_3 L_1 L_{3c} \cos(\theta_1 - \theta_3) \ddot{\theta}_3 \\
& + (-m_2 L_1 L_{2c} \sin(\theta_1 + \theta_2) - m_3 L_1 L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + m_2 L_1 L_{2c} \sin(\theta_1 + \theta_2) \\
& + m_3 L_1 L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + (-m_3 L_1 L_{3c} \sin(\theta_1 - \theta_3) \\
& + m_3 L_1 L_{3c} \sin(\theta_1 - \theta_3)) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 - m_2 L_1 L_{2c} \sin(\theta_1 + \theta_2) \dot{\theta}_2^2 \\
& - m_3 L_1 L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \dot{\theta}_2^2 + m_3 L_1 L_{3c} \sin(\theta_1 - \theta_3) \dot{\theta}_3^2 + m_1 g L_{1c} \cos \theta_1 \\
& + m_2 g L_1 \cos \theta_1 + m_3 g L_1 \cos \theta_1
\end{aligned}$$

Torque para link 2

$$\begin{aligned}
\tau_2 = & (m_2 L_{2c}^2 + I_2 + m_3 L_2^2) \ddot{\theta}_2 + m_3 L_2 L_{3c} \cos(\theta_3 + \theta_2) \ddot{\theta}_3 \\
& + (m_2 L_1 L_{2c} \cos(\theta_1 + \theta_2) + m_3 L_1 L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)) \ddot{\theta}_1 \\
& + (-m_2 L_1 L_{2c} \sin(\theta_1 + \theta_2) - m_3 L_1 L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + m_2 L_1 L_{2c} \sin(\theta_1 + \theta_2) \\
& + m_3 L_1 L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + (-m_3 L_2 L_{3c} \sin(\theta_3 + \theta_2) \\
& + m_3 L_2 L_{3c} \sin(\theta_3 + \theta_2)) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 - m_3 L_1 L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \dot{\theta}_1^2 \\
& - m_2 L_1 L_{2c} \sin(\theta_1 + \theta_2) \dot{\theta}_1^2 - m_3 L_2 L_{3c} \sin(\theta_3 + \theta_2) \dot{\theta}_3^2 + m_2 g L_{2c} \cos \theta_2 \\
& + m_3 g L_2 \cos \theta_2
\end{aligned}$$

Torque para el link 3

$$\begin{aligned}
\tau_3 = & m_3 L_1 L_{3c} \cos(\theta_1 - \theta_3) \ddot{\theta}_1 + m_3 L_2 L_{3c} \cos(\theta_3 + \theta_2) \ddot{\theta}_2 + (m_3 L_{3c}^2 + I_3) \ddot{\theta}_3 \\
& + (-m_3 L_2 L_{3c} \sin(\theta_3 + \theta_2) + m_3 L_2 L_{3c} \sin(\theta_3 + \theta_2)) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \\
& + (m_3 L_1 L_{3c} \sin(\theta_1 - \theta_3) + m_3 L_1 L_{3c} \sin(\theta_1 - \theta_3)) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \\
& - m_3 L_2 L_{3c} \sin(\theta_3 + \theta_2) \dot{\theta}_2^2 - m_3 L_1 L_{3c} \sin(\theta_1 - \theta_3) \dot{\theta}_1^2 + m_3 g L_{3c} \cos \theta_3
\end{aligned}$$

Las ecuaciones de torque de cada uno de los links se pueden reagrupar generando la forma general del modelo dinámico del robot así:

	$D(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = T_{\theta}$	
--	---	--

Donde $D(\theta)$ representa la matriz de inercia, $H(\theta, \dot{\theta})$ representa la matriz de fuerza centrífuga y de coriolis, $G(\theta)$ representa la matriz de fuerzas gravitacionales, T_{θ} representa el vector de fuerzas externas y torques aplicados a cada una de las uniones. Los vectores $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ representan cada uno la posición de rotación, velocidad y aceleración respectivamente.

✓ **Metodología** (instrumentos diseñados o empleados, población o muestra).

Enfoque metodológico: el enfoque que se trabajará para el análisis de los datos en el proyecto es de orden cuantitativo, basado en la cuantificación de los datos entregados por los sensores de los motores y del robot, con miras a estimar el punto de equilibrio del robot y el nivel de absorción de perturbaciones externas mediante la medición de la desviación del punto de equilibrio. Dichos datos serán utilizados para estimar las diferentes acciones de control que se deben tomar para mantener el robot en equilibrio.

Fuentes de información: Los artículos de carácter técnico que se encuentran en las revistas IEEE, documentos generados en eventos internacionales como IROS (Intelligent Robots and Systems) e ICRA (International Conference on Robotics and Automation), entre otros, constituyen una fuente de información muy valiosa de la cual se obtendrán conceptos e ideas fundamentales para la ejecución del presente proyecto.

Técnicas de investigación: inicialmente se analizará el estado del arte partiendo del conocimiento y experiencias previas en este campo, haciendo la revisión teórica de documentos referentes para el proyecto como lo son: estimadores óptimos, conceptos generales de modelos dinámicos y cinemáticos de robots humanoides, técnicas de control basados en fuerza, rigidez e impedancia.

Partiendo de la revisión teórica se seleccionarán las herramientas matemáticas que serán empleadas en la implementación del sistema de control y algoritmos de inteligencia computacional encaminados a la implementación de dichos algoritmos en una plataforma

robótica. También se plantearán modelos matemáticos cuyo desempeño será evaluado sobre una plataforma real y en conjunto con los algoritmos de control ayudaran a la generación de nuevas estrategias de control encaminadas a mantener el equilibrio del robot. Las nuevas estrategias serán evaluadas y clasificadas según su desempeño con el fin de seleccionar la que más se ajuste a los objetivos del proyecto tales como mantener el equilibrio y permitir dicha aplicación a movimientos un poco más complejos como caminada y salto.

Instrumentos: para el desarrollo de la propuesta de investigación y el proceso de validación, se empleará el software disponible en la Universidad descrito a continuación:

- MATLAB: a través de esta herramienta se realizarán los prototipos de modelos cinemáticos y dinámicos además las diferentes estrategias de control.
- Lenguaje C: se implementarán los algoritmos de control para la estimación y control del CoM y ZMP de acuerdo al resultado de la revisión del estado del arte y a la selección de las herramientas matemáticas necesarias para resolver el problema planteado.
- Se implementará una plataforma robótica bípeda de 12 grados de libertad para realizar pruebas reales de los modelos y sistemas originalmente prototipados en Matlab e implementados posteriormente en C

Sistematización de la información: Dado que el sistema a controlar presenta varios tipos de señales en cada uno de los actuadores tales como fuerza, posición, velocidad, aceleración, y cada una de estas señales se repite de acuerdo al número de grados de libertad de la plataforma. Además de la información provista por el giróscopo y acelerómetro se hace necesario un sistema que permita adecuar, filtrar e interpretar dicha información, para lo cual se planea tener sistemas de procesamiento de alto rendimiento pero de baja dimensión que permitan hacer cálculos y estimación de estados de alta velocidad pero al mismo tiempo de gran precisión. Para esto se planea la utilización de micro computadores que permitan el proceso de dicha información. Inicialmente se planea la utilización de plataformas tales como Edison o Galileo de Intel, pero esto es algo que se evaluará dentro del desarrollo del proyecto

Perspectiva analítica e interpretativa: en torno a la estimación del desempeño de los algoritmos desarrollados, se realizarán pruebas con diferentes niveles de perturbación en busca de los puntos límites de equilibrio y de evaluación de diferentes características de recuperación o restablecimiento del equilibrio en el sistema, tales como desviación del punto de equilibrio,

velocidad de retorno y desviación final de dicho punto. Además de lo anterior se deben evaluar criterios de migración de los algoritmos a diferentes plataformas a la originalmente diseñada para este proyecto tales como NAO o Darwin robot. Finalmente realizar una evaluación de la posible utilización de estas estrategias de control en otros movimientos tales como caminata o salto, permitiendo así dar inicio a un segundo proyecto con perspectivas un poco más ambiciosas y de resultados aún más prometedores.

- ✓ **Actividades de formación: describir actividades específicas de formación en investigación hasta la fecha para los estudiantes vinculados a los proyectos de semilleros (requerido) y grupos (con auxiliares y asistentes de investigación).**

El proyecto cuenta con un auxiliar de investigación, un investigador principal y dos co-investigadores. Hasta el momento se ha trabajado con el auxiliar de investigación en donde se le ha dado formación en el campo de la robótica y los sistemas embebidos mediante reuniones semanales en las que el ingeniero Juan Calderón con la ayuda de los ingenieros Katherin Pérez y Saith Rodríguez. En dichas reuniones se han tratado temas relacionados tales como:

- Control de motores DC
- Generación de rigidez variable mediante el uso de sistemas de control PID
- Sistemas de control optimo basados en Reguladores Lineales Cuadráticos
- Criterios de estabilidad dinámica y estática
- Generación de puntos y trayectorias de equilibrio basadas en el Punto de Momento Zero (ZMP)
- Evaluación de fuerzas de impacto
- Implementación de modelos matemáticos de sistemas dinámicos no lineales mediante formulaciones de Lagrange-Euler

Las reuniones obedecen al proceso de formación del estudiante con el objetivo de brindarle las herramientas necesarias para la implementación de algoritmos y el planteamiento de algunos sistemas de control necesarios para el desarrollo del proyecto.

✓ **Relación con el currículo: Describir posibles aportes del proyecto al currículo los programas y unidades académicas.**

El proyecto presenta en la actualidad un aporte bastante significativo al currículo el cual se basa en la creación de una nueva asignatura electiva que se iniciara a impartir en el segundo semestre del presente año en la Maestría de Ingeniería Electrónica de la Universidad Santo Tomas. El título de dicha electiva es: “**Control de Robots Móviles**” y se encuentra basada en el avance que sea realizado hasta el momento en el desarrollo del proyecto, en donde se ha logrado el estudio de los diferentes sistemas de control comúnmente aplicados a los robots móviles.

Etapas 1: Continuación del estudio del estado del arte en temáticas relacionadas con el proyecto

Esta etapa se ha desarrollado en un 90% en donde no solo se continuó con el estudio del estado del arte, si no que se profundizó en el estudio de algunas técnicas originalmente no planteadas en este proyecto. Para este momento se tiene el planteamiento de algunas técnicas basadas en el estudio del estado del arte y que se planea poner en marcha su implementación.

A continuación se explica los conceptos básicos del control de rigidez y cuya temática se ha desarrollado dentro de la ejecución de esta primera etapa, dando como resultado una serie de material didáctico que servirá de soporte a la electiva “Control de robots móviles”.

Control de Rigidez (Planteamiento Básico)

Para analizar el concepto de rigidez, se considera el problema de control de fuerza para el sistema que se describe en la Figura 1. El manipulador con masa m se asume para estar en contacto con el medio ambiente, la cual se ubica como una posición estática x_e . El problema de control es especificar una fuerza de entrada (τ) de manera que el manipulador se mueva hasta una posición constante deseada (x_d). En este sistema también se asume que si la posición del manipulador (x) es más grande que x_e , la fuerza (f) ejercida sobre el medio ambiente es dada por:

$$f = K_e(x - x_e) \quad (1)$$

Donde K_e Es una constante positiva usada para denominar la rigidez del entorno. Esto es, asumir que la rigidez del medio ambiente puede ser modeladas como un amortiguador lineal con una constante de amortiguamiento definida por K_e . Para asumir esto se puede visualizar el sistema de un grado de libertad como un esquema de masa-resorte descrito en Figure 2

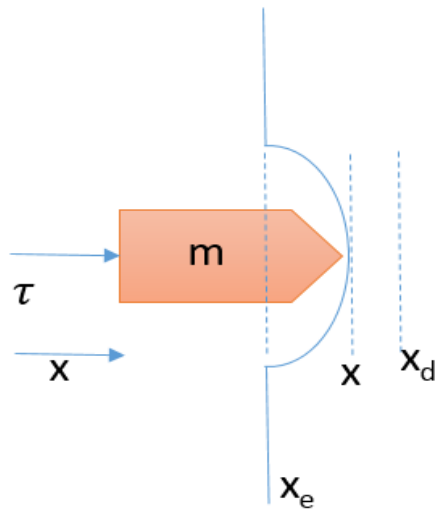


Figure 1: sistema simple de un grado de libertad.

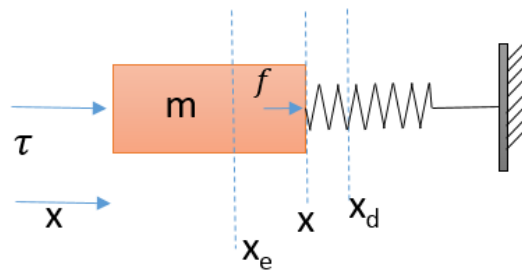


Figure 2: diagrama masa-resorte.

Asumiendo que la gravedad y la fricción son despreciables, la ecuación de movimiento para el sistema expuesto en Figure 2 es como se muestra a continuación

$$\tau = k_e m \ddot{x} + k_e (x - \dot{x}) \quad (2)$$

El diagrama de bloques del sistema para (2) se muestra en la Figura 3. En ella Se puede apreciar que se usa s para denotar la variable de la transformada de Laplace.

La expresión dinámica dada en (2) resulta en un controlador simple PD

$$\tau = -k_v \dot{x} + k_p (x_d - x), \quad (3)$$

Donde k_v y k_p son las ganancias positivas del controlador. Sustituyendo (3) en (2), se obtiene el sistema en lazo cerrado la cual se puede representar en el diagrama de bloques de la Figura 4.

$$m \ddot{x} + k_v \dot{x} + (k_p + k_e) x = k_p x_d + k_e x_e, \quad (4)$$

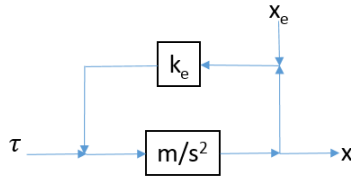


Figura 3: Diagrama de bloques del sistema.

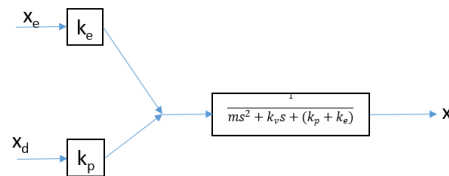


Figura 4: Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado.

De la Figura 4 se sabe que el sistema en lazo cerrado es estable desde que se definan las constantes m, k_v, k_p y k_e positivas. De este modo se puede determinar los polos de la función de transferencia se encuentren en el plano de la izquierda de estabilidad.

$$H(s) = \frac{1}{ms^2 + k_v s + (k_p + k_e)}$$

Para determinar la fuerza que ejerce el controlador PD descrito en (3) sobre el medio ambiente, se examina el sistema con las condiciones de estado estacionario. Debido a que x_d y x_e son constantes, la transformada de Laplace de x descrita en (4), se puede expresar de forma que

$$x(s) = \frac{k_p x_d + k_e x_e}{s(ms^2 + k_v s + (k_p + k_e))} \quad (5)$$

Por lo tanto, el estado estacionario de la posición del manipulador se puede definir como

$$\bar{x} = \lim_{s \rightarrow 0} s x(s) = \frac{k_p x_d + k_e x_e}{k_p + k_e} \quad (6)$$

La posición del manipulador en estado estacionario puede ser usada para calcular la fuerza en estado estacionario (f) ejercida en el medio ambiente. Al reemplazar (6) en (1), la fuerza en estado estacionario es como se muestra a continuación

$$\bar{f} = \frac{k_p k_e (x_d - x_e)}{k_p + k_e} \quad (7)$$

Como era de esperar, la constante de amortiguamiento del ambiente es a menudo considerada grande debido a que el robot es presionado contra una superficie rígida cercana en la mayoría de las aplicaciones que demandan un control de fuerza. Así, si se asume que $k_e \gg k_p$ se determina que la fuerza en estado estacionario descrita en (7) queda como sigue a continuación

$$\bar{f} \cong k_p (x_d - x_e) \quad (8)$$

De todo lo anterior, se puede concluir en que la estrategia de control de posición dada en (3), también ejerce una fuerza en el entorno. Específicamente, dicha fuerza es creada por una trayectoria deseada que predomina y que está ligeramente entre la superficie de contacto. Al intentar eliminar el error de posición, el controlador de posición ejerce una fuerza en estado estacionario sobre la superficie. De este modo, la ganancia en la posición (k_p) de la expresión de la fuerza en estado estacionario descrita en (8), estaría representando la rigidez deseada del manipulador. Esto significa que el manipulador puede visualizarse como un amortiguador, de constante de amortiguamiento k_p ejerciendo una fuerza en el entorno. Por lo tanto, el término de “control de rigidez” es normalmente asociado a un controlador PD como el descrito en (3), siempre y cuando la rigidez pueda ser establecida ajustando la variable k_p .

Etapas 2: Adquisición, ensamble y montaje del prototipo robótico de validación

Se realizó la compra de algunos materiales necesarios para iniciar los experimentos con sensores, pero aún no se ha determinado con exactitud los motores que se deben comprar para construir la plataforma del robot humanoide. Esta etapa lleva hasta ahora un desarrollo del 30%.

Etapas 3: Diseño e implementación de estrategias de control basadas en control de rigidez, impedancia y fuerza.

Esta etapa se ha desarrollado en un 60% en donde se han implementado tanto en simulación como en una fase experimental con el robot DarWin modelos de rigidez variable.

El primer modelo de control que se estudió y se implementó tanto en simulación como en un robot real es el de “Control de torque pre calculado”

A continuación se presenta un resumen del desarrollo teórico realizado en torno al control de torque pre calculado.

Control de Torque Pre Calculado

El control de torque pre computado es una estrategia de control que utiliza la linearización por realimentación de estado de sistemas no lineales. Además de usar el cálculo del torque requerido por el robot dentro del lazo de control de realimentación no lineal. Este tipo de control se caracteriza por mantener una señal deseada procurando que el sistema intente seguirla. La idea es reducir el error debido a la linearización por realimentación que genera el sistema. Éste error se define como la diferencia entre la trayectoria deseada y la posición actual del motor tal y como se muestra en la ecuación (1), $\dot{e}(t)$ y $\ddot{e}(t)$ se pueden definir mediante una ecuación similar.

$$e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (1)$$

Donde $q(t)$ es la posición actual del actuador (2), el cual se define desde el modelo dinámico del robot descrito en el marco teórico de este proyecto.

$$\ddot{q} = D^{-1}(q)(H(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_d - \tau) \quad (2)$$

Ahora sustituyendo (2) en (1) se obtiene la segunda derivada del error como se muestra en (3)

$$\ddot{e}(t) = \ddot{q}_d(t) + D^{-1}(q)(H(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_d - \tau) \quad (3)$$

Se define $u(t)$ como la función de entrada del control, y $w(t)$ la función de perturbación. Entonces $u(t)$ y $w(t)$ se define como sigue a continuación.

$$u(t) = \ddot{q}_d(t) + D^{-1}(q)(H(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - \tau) \quad (4)$$

$$w(t) = D^{-1}(q)\tau_d \quad (5)$$

En la linearización por realimentación descrita en (4) se puede invertir dejando como resultado τ quedando así lo siguiente:

$$\tau = D(\ddot{q}_d(t) - u(t)) + H(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (6)$$

En el caso puntual, la señal $u(t)$ es seleccionada como el lazo realimentado de un controlador PID:

$$u(t) = -k_v \dot{e} - k_p e - k_i \varepsilon, \quad \text{where } \dot{\varepsilon} = e \quad (7)$$

Finalmente se reemplaza (7) en (6), dejando la expresión final de τ como se muestra en (8) y en la Fig. 1.

$$\tau = D(\ddot{q}_d(t) + k_v \dot{e} + k_p e + k_i \varepsilon) + H(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (8)$$

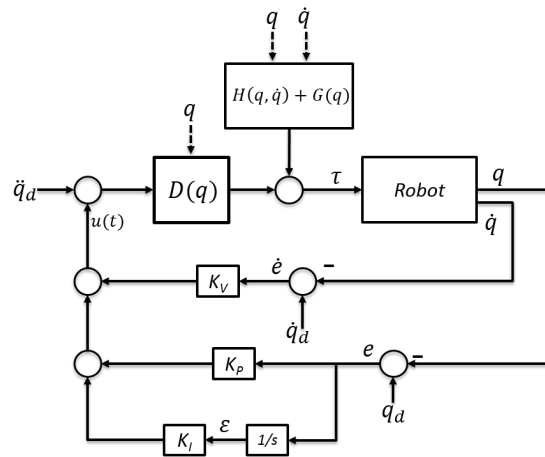


Figura 1: Esquema del control de torque computarizado con lazo PID externo.

Etapa 4: Evaluación de las estrategias de control implementadas sobre la plataforma robótica

Esta etapa se ha desarrollado en un 60%. Esta etapa presenta resultados colaterales que han dado origen a dos ponencias y dos publicaciones. Llamamos resultados colaterales a los resultados obtenidos en esta etapa, porque son el resultado de nuevas aplicaciones de los modelos de control que estamos utilizando y que han arrojado resultados satisfactorios, pero dichas aplicaciones no se encuentran planteadas en la versión original de este proyecto.

Dicha aplicación es la reducción del impacto contra el suelo cuando un robot humanoide pierde el equilibrio. Esta aplicación surgió de la necesidad de tratar de proteger al robot cuando los algoritmos de control de balance fallan. Dichos algoritmos de balance fallaron constantemente en la etapa inicial de estas pruebas y fue necesario desarrollar estrategias de control alternas para tratar de proteger el robot.

Inicialmente estos algoritmos alternos se probaron en el software de simulación de robots llamado “WeBots” en donde se usó el modelo virtual del robot “DarWin O.P.”. Posteriormente se realizaron pruebas en el robot real, obteniendo resultados satisfactorios.

Etapa 5: Diseño e implementación de estrategias de control de rigidez basadas en técnicas de control óptimo.

Modelo eléctrico del motor

Dado que la mayoría de los actuadores de robots son motores eléctricos, el presente trabajo utiliza el modelo matemático de un motor eléctrico típico para el diseño del controlador. La ecuación característica del motor eléctrico se presenta en la siguiente ecuación.

$$\frac{\theta(s)}{Vin(s)} = \frac{K_t G_r}{s((J_s + b)(L_s + R) + K_t K_b)} \quad (9)$$

Donde V es la tensión de entrada, θ es la posición angular, L es la inductancia de la armadura, R es la resistencia de la armadura, b es la constante de fricción viscosa del motor, J es el momento de la inercia del rotor, K_t es la constante del par del motor, G_r es la relación de transmisión, y K_b es la constante de fuerza electromotriz.

- **Regulador cuadrático lineal (LQR)**

El control óptimo lineal del regulador cuadrático (LQR) ha sido ampliamente estudiado durante décadas con una amplia gama de aplicaciones. Minimiza el error en las trayectorias de variable de estado de un sistema mientras que requiere la energía de control mínima. El objetivo de utilizar LQR es generar un efecto de rigidez variable en el actuador (motor eléctrico) como se explicará más adelante.

LQR se basa en la minimización del índice de rendimiento como se muestra por la ecuación (10).

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T r u(t)] dt \quad (10)$$

Donde Q y R son las matrices de penalización para el error de variables de estado y la señal de control, respectivamente. La relación entre Q y R determina lo que es más importante entre la minimización del error de estado o la energía de control. Por lo tanto, el presente trabajo propone determinar la rigidez de los motores utilizando la matriz Q. Cuando Q tiene valores grandes, el error de posición del motor es penalizado. Entonces, el motor intenta mantener la posición contra cualquier perturbación (Alta rigidez). De lo contrario, si Q tiene valores pequeños, se permite cierto error de posición, generando baja rigidez en el motor. La ley de control de realimentación se define por (11).

$$u(t) = -R^{-1}B^T Px(t) = -Kx(t) \quad (11)$$

Donde, K es la ganancia de Kalman y se define como $K = R^{-1} B^T P$ donde P es una matriz simétrica definida positivamente la cual es una solución de la ecuación de Riccati algebraica continua definida por (12).

$$A^T P + PA - PBR^{-1}P + Q = 0 \quad (12)$$

Aquí, A y B son las matrices de la descripción del estado de la planta (motor), Q es semi-definida simétricamente positiva además de ser una matriz ponderada y R es un número positivo.

Usando la ecuación de Riccati, las ganancias de la realimentación se pueden calcular y el diseño del sistema de control se puede realizar. Sin embargo, el rendimiento del sistema depende de la selección adecuada de la matriz Q. La siguiente sección explica cómo calcular Q basado en un modelo deseado y cómo ajustar un PID usando el enfoque LQR.

- **PID optimo**

PID es un sistema de control ampliamente utilizado en todo el mundo. Para el caso actual, este trabajo intenta proporcionar un método para variar la rigidez en un motor usando PID, con un enfoque óptimo. La rigidez variable se utiliza para reducir la fuerza de impacto en la caída de robots, como se mencionó anteriormente.

El diseño del PID óptimo se basa en los trabajos presentados por [1] y [2]. Donde propusieron por primera vez un diseño PID utilizando el enfoque LQR, pero la selección de la matriz Q no se definió. El segundo diseña el PID usando LQR y proporciona un método para determinar los valores de Q, basados en el polinomio característico del comportamiento deseado.

El trabajo actual asume los diseños de PID como un diseño de control óptimo LQR, donde el error es las variables de estado y las ganancias óptimas de retroalimentación de estado son los parámetros PID (K_p , K_i y K_d). La figura 2 muestra la configuración típica de PID, donde $r(t)$ es la posición deseada del actuador.

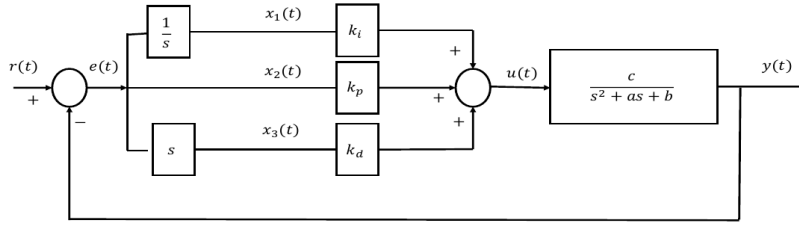


Fig. 2. Controlador PID para un Sistema d Segundo orden

El PID y la planta de segundo orden (motor) son definidos por (13) y (14) respectivamente.

$$G(s) = \frac{c}{s^2 + as + b} = \frac{y(s)}{u(s)} \quad (13)$$

$$u(s) = e(s) \left(\frac{K_i}{s} + K_p + K_d s \right) \quad (14)$$

Ahora, las variables de estado se definen como (15).

$$x_1 = \int e(t)dt, x_2 = e(t), x_3 = \frac{de(t)}{dt} \quad (15)$$

Para el diseño de realimentación, el punto de ajuste externo deseado no afecta al diseño del controlador y es posible asumir $r(t) = 0$, por lo que $e(t) = -y(t)$. Este es un supuesto común en el diseño del regulador estándar.

Suponiendo que $r(t) = 0$, la función de transferencia puede expresarse como (16).

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{c}{s^2 + as + b} = \frac{-E(s)}{U(s)} \quad (16)$$

Ahora la relación entre $U(s)$ y $E(s)$ se escribe en el dominio del tiempo y se muestra en (17).

$$\ddot{e}(t) + a\dot{e}(t) + be(t) = -cu(t) \quad (17)$$

Sustituyendo (16) en (17) la relación entre $u(t)$ y $y(t)$ se expresa en términos de las variables de estado como (18).

$$\dot{x}_3 + ax_3 + bx_2 = -cu(t) \quad (18)$$

Finalmente, usando (18) y (15) la formulación del espacio de estado se representa en (19).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -b & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -c \end{bmatrix} u(t); \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -b & -a \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -c \end{bmatrix} \quad (19)$$

Ahora se ve como una representación estándar de espacio de estado $\dot{x}=Ax(t) + Bu(t)$ donde A y B son mostradas por (19).

Entonces, usando la ecuación de Riccati la solución de la ecuación se puede aplicar usando A y B de (19) y P se define como una matriz simétrica 3x3 como se representa en (20).

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Usando los resultados de la matriz P, las ganancias K se obtienen usando la ecuación (20a)

donde

$$K_1=K_i, K_2=K_p \text{ y } K_3=K_d. \quad (20a)$$

- **Diseño de la rigidez variable usando PID optimo**

Con el fin de desarrollar una rigidez variable en un motor usando un diseño óptimo de PID, es necesario establecer una función de transferencia de acuerdo con el rendimiento deseado. Por lo general, la función deseada se determina de acuerdo con los requisitos de tiempo de establecimiento, sobrepico y tiempo de subida entre otros. Pero, para el caso presente, estos parámetros se pueden definir de acuerdo con el rendimiento normal del motor en actividades comunes de robot como caminar.

La idea de este punto es establecer un punto estándar donde la rigidez del motor se definirá como una rigidez normal. A partir de este punto se definirá una rigidez baja y alta. Por tanto, la función deseada se define como un sistema de tercer orden, cuyo polinomio característico tiene tres raíces definidas por $(s + \alpha_1)(s + \alpha_2)(s + \alpha_3)$.

El objetivo de esta sección es el diseño de un controlador PID, a partir del rendimiento deseado utilizando un enfoque óptimo. La función de transferencia PID se define como se muestra por(21)

$$G_{PID}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (21)$$

Siguiendo el método descrito por [1], las matrices Q y P se definen como se muestra por (22), (23), (24) y (25) , respectivamente.

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

De acuerdo con las condiciones óptimas, donde P tiene que ser una solución de la ecuación de Riccati. Los valores de Q se pueden establecer en función de los coeficientes de la

función de transferencia del motor y de las raíces de la ecuación característica polinómica deseada. Los valores Q se representan mediante (23), (24) y (25).

$$q_1 = \frac{R\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2}{c^2} \quad (23)$$

$$q_2 = \frac{R(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_1^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_2^2 - b^2)}{c^2} \quad (24)$$

$$q_3 = \frac{R(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 - a^2 + b^2)}{c^2} \quad (25)$$

Una vez que Q se ha definido, la ecuación de Riccati se aplica usando (12) y se obtiene la matriz P. La solución de la ecuación de Riccati se puede encontrar usando métodos numéricos o software matemático como Matlab.

Ahora, las constantes PID óptimas se calculan usando (26).

$$K_i = R^{-1}cP_{13}; \quad K_p = R^{-1}cP_{23}; \quad K_d = R^{-1}cP_{33} \quad (26)$$

Debido a que las ganancias óptimas de PID se calcularon usando un polinomio característico de la función de transferencia deseada con los parámetros de rendimiento habitual, se supone que la rigidez en el motor es una rigidez usual. Pero, basándose en este diseño, es posible calcular un nuevo conjunto de ganancias óptimas de PID. Estas nuevas ganancias pueden producir una rigidez alta o baja desde la perspectiva de rigidez habitual. La rigidez baja y alta puede diseñarse escalando la matriz Q_{usual} por un factor ρ como se muestra por (27).

$$Q_{new} = \rho Q_{usual} \quad (27)$$

Donde ρ es un parámetro escalar, para $\rho > 1$ se obtiene una alta rigidez y $0 < \rho < 1$ la baja rigidez será alcanzada por el motor.

Finalmente, con Q_{nuevo} definido, es necesario resolver la ecuación de Riccati para Q_{nuevo} y obtener los valores de P para calcular las nuevas ganancias de control PID.

Experimentos y resultados

Con el fin de realizar experimentos de protección de la caída de un robot fue elegido el humanoide Darwin Op. Este robot fue utilizado porque es uno de los robots humanoides más populares en RoboCup y sus actuadores se utilizan a lo largo de las diferentes ligas, como Humanoid soccer, rescue, junior y @home. El robot tiene 45,5 cm de alto, 3 kg de peso, y tiene 20 grados de libertad (DoF). Los actuadores motorizados son Dynamixel MX-28, con una resolución de encoder absoluta de 4.096, par de torsión de 31.6 Kg-cm y control programable PID. La última característica es la más importante, ya que el presente trabajo propone un PID óptimo para generar rigidez variable.

El método propuesto depende de la función de transferencia del motor para diseñar el PID. Como no hay suficiente información sobre el modelo de motor, se propone un modelo reducido, como se muestra en la Fig. 3. Donde G_o es el modelo interno del motor eléctrico. En aras de la simplicidad, algunas variables se pusieron a cero, tales como la velocidad objetivo $\dot{\theta}_d$, K_i y K_d . De acuerdo con las especificaciones del fabricante si $\dot{\theta}$ es cero, el bucle de retroalimentación del control de velocidad está desactivado. De modo que el modelo interno sólo depende de la ganancia proporcional (K_p).

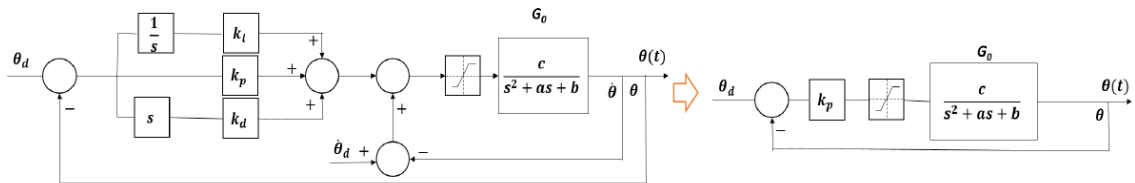


Fig.3. Modelo Reducido del Motor

El modelo propuesto es un sistema de segundo orden como se representa por Fig. 3 y se muestra en la Fig. 3. Se estimó utilizando el "Ident Tool Box" de Matlab. Las constantes obtenidas son $a=106.1$, $b=3$ y $c=1319$ con $K_p=16$. Este modelo se ve afectado por la no linealidad de la función de saturación. Esta función es el límite de tensión de funcionamiento del motor. Este modelo reducido funciona con valores K_p inferiores a 64 y error de posición inferior a 1000, lo cual no es un problema para el método propuesto, ya que se utiliza en situaciones en las que el error de posición es cercano a cero y el sistema intenta mantener el punto de referencia.

Los otros parámetros importantes del método propuesto son las raíces de la ecuación característica del comportamiento deseado. En este caso $a_1=-238$, $a_2=-79$, y $a_3=-8.5$. El método se puede aplicar ahora usando la función de transferencia y las raíces deseadas establecidas.

El experimento consiste en ejecutar varios ensayos del robot que cae con diferentes valores de p . El robot está de pie y es empujado de atrás hacia adelante, luego mueve sus brazos a la posición segura. Los nuevos valores de PID de acuerdo con p se programan en los motores de codo y hombro. La Figura 4 muestra una secuencia de movimiento del experimento.

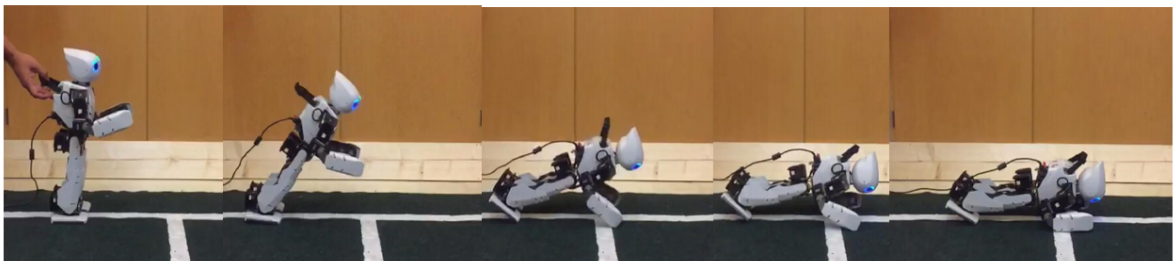


Fig. 4. Secuencia de movimiento del experimento

Al final de la secuencia de movimiento en la Fig. 4, El lector puede observar cómo se desplazan los brazos de la posición segura y se reduce el impacto entre el cuerpo del robot y el suelo.

La figura 5 muestra la posición del centro de masa (CoM) del robot en cinco ensayos diferentes. Cada ensayo tiene valores diferentes de ρ , para estos casos $\rho = 0.05, 0.1, 0.3, 1$ y 3 .

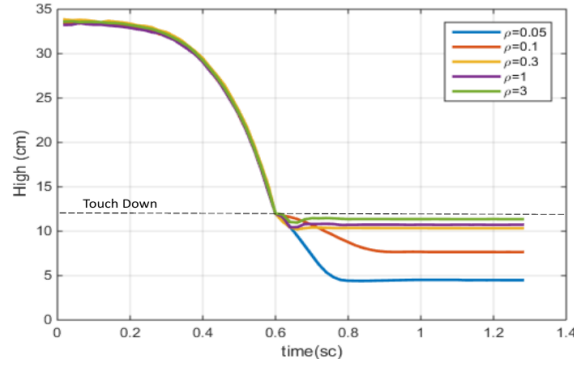


Fig. 5. Posición del centro de masa con diferentes valores de ρ

Otro parámetro importante utilizado para medir la fuerza de impacto en el suelo es el desplazamiento d del CoM en el momento de impacto. La figura 4 muestra cómo d aumenta a medida que ρ se reduce.

La fuerza de impacto promedio se puede estimar usando [], donde d es inversamente proporcional a la fuerza de impacto. V_i es la velocidad de impacto y m es la masa del robot.

$$F_{i-avg} = \frac{\frac{1}{2}mV_i^2}{d} \quad (28)$$

Los resultados de la fuerza de Impacto, la velocidad de impacto y el desplazamiento de CoM se muestran en la Tabla I.

Table 1: Experiment Results

ρ	Impact Velocity (m/s)	Distance (d) (cm)	Impact Force (N)	Impact Reduction (%)
0.05	1.78	7.61	60.44	86.8
0.1	1.72	4.34	98.84	78.52
0.3	1.75	1.79	248.07	41.60
1	1.72	1.54	278.55	39.46
3	1.69	0.9	460.14	0

La Tabla I representa los resultados de los cinco ensayos mostrados en la fig. 5. Los resultados muestran cómo el desplazamiento (d) aumenta de acuerdo con los decrementos de ρ .

La fuerza de impacto se reduce con valores menores de ρ y aumenta con valores grandes de ρ . Esto destaca la importancia de la variación de rigidez para reducir la fuerza de impacto. La baja rigidez genera grandes valores de desplazamiento y una reducción significativa de la fuerza de impacto.

✓ Logros generales de la investigación.

El proyecto ha seguido su marcha de una forma normal y típica a este tipo de iniciativas.

Se presentan algunos logros bastante importantes como lo son:

Dos ponencias de carácter internacional y Tres artículos de publicación en IEEE y en el "Lecture notes of computer science" de Springer. El segundo se encuentra clasificado en categoría Q2 de Scopus. Un paper en el Journal of Networks and Innovative.

- Calderon, J., Cardona, G., Llofriu, M., Shamsi, M., Williams, F., Moreno, W., and Weitzenfeld, A., 2016, "*Impact Force Reduction Using Variable Stiffness With Optimal Approach For Falling Robots*", RoboCup Symposium 2016, July 4, Leipzig, Germany (Accepted).
- Cardona, G., Moreno, W., Weitzenfeld, A., Calderon, J. "*Reduction of Impact Force in Falling Robots Using Variable Stiffness*". in *Conference SoutheastCon (2016)*.
- Juan M. Calderon, Wilfrido Moreno, and Alfredo Weitzenfeld. "*Impact Force Reduction Using Fuzzy Variable Stiffness in a Jumping Robot*." Journal of Network and Innovative Computing 4, no. 2016: 152-163.

RESULTADOS

Tipo de productos derivados del avance del proyecto a la fecha (movilidades, publicaciones, alianzas/redes establecidas, otro tipo de productos).

Tipo de producto	Nombre de producto	Fecha de revisión, publicación o presentación	Nombre de la revista/libro o evento en que se presenta el producto.	Modo de verificación	Número de anexo
Ponencia	Reduction of Impact Force in Falling Robots Using Variable Stiffness	Marzo de 2016	Conference SoutheastCon (2016)	http://sites.ieee.org/southeastcon2016/	Anexo 1: Portada del evento
Ponencia	Impact Force Reduction Using Variable Stiffness With Optimal Approach For Falling Robots	Julio de 2016	RoboCup Symposium 2016, July 4, Leipzig, Germany	http://www.robocup2016.org/en/symposium/ http://www.ais.uni-bonn.de/robocup.de/2016/papers/RoboCup_Symposium_2016_Calderon.pdf	Anexo 2: Copia de Artículo
Artículo	Reduction of Impact Force in Falling Robots Using Variable Stiffness	Julio de 2016	IEEE Xplore	ISBN: 1558-058X DOI: 10.1109/SECON.2016.7506716	Anexo 3: Artículo
Artículo	Force Reduction Using Variable	Julio de 2016	“Lecture Notes of Computer	En proceso de publicación	Anexo 4: Copia de Artículo

	Stiffness With Optimal Approach For Falling Robots		Science” Springer		
Artículo	Impact Force Reduction Using Fuzzy Variable Stiffness in a Jumping Robot	Marzo de 2016	Journal of Network and Innovative Computing	ISBN: 2160-2174 http://www.mirlabs.net/jnic/secured/Volume4-Issue1/Paper17.pdf	Anexo 5: Artículo
Artículo	Fuzzy Variable Stiffness in Landing Phase for Jumping Robot	Diciembre de 2015	Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications	ISBN: 978-3-319-28030-1 DOI: 10.1007/978-3-319-28031-8_45	Anexo 6: Artículo

CONCLUSIONES

La reducción de la fuerza de impacto en un robot cayendo se logró utilizando un enfoque de rigidez variable. Este trabajo ilustra cómo la reducción de la rigidez en el motor puede ayudar a reducir la fuerza de impacto. La variación de rigidez se realiza a través del diseño de un controlador PID. Adicionalmente, los coeficientes del PID se calculan usando un diseño LQR. El diseño propuesto del controlador PID fue probado usando un robot humanoide llamado Darwin OP, y se realizaron varios ensayos con diferentes parámetros. Los resultados fueron satisfactorios, mostrando una reducción de la fuerza de impacto en el suelo de hasta el 86%. La

variación de la rigidez se propuso en términos de la variación de la matriz Q usando un coeficiente de modulación, ρ . La baja rigidez se alcanza con $0 < \rho < 1$ y se genera alta rigidez usando $\rho > 1$. Según experimentos, la baja rigidez permite la reducción de la fuerza de impacto a través del centro de desplazamiento masivo. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que cuando ρ se acerca a 0, la rigidez es demasiado baja. Entonces, los brazos no detienen el cuerpo del robot y se estrella contra el suelo. La estimación de los parámetros del motor se realizó utilizando un modelo reducido del Dynamixel MX-28.

El algoritmo propuesto puede aplicarse a robots de tamaño completo, pero es necesario tener en cuenta el peso del robot, el modelo matemático de los motores de los brazos y el tipo de sistema de control utilizado en el motor. Si el controlador no es un PID, debe diseñarse un modelo de control diferente, basado en valores LQR calculados.

En contraste con los algoritmos tradicionales de protección del robot que cae, el presente trabajo no propone trayectorias especiales inspiradas en artes marciales o tecnologías de animación. Alternativamente, la rigidez variable se propone en términos de un diseño LQR. Trabajos futuros incluyen el uso de la teoría de la optimización para generar rigidez variable. Además, el algoritmo propuesto podría unirse a los algoritmos de generación de trayectorias para complementarse entre sí.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] Das, Saptarshi, et al. "LQR based improved discrete PID controller design via optimum selection of weighting matrices using fractional order integral performance index." *Applied Mathematical Modelling* 37.6 (2013): 4253-4268.

[2] Yu, Gwo-Ruey, and Rey-Chue Hwang. "Optimal PID speed control of brush less DC motors using LQR approach." *Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference on*. Vol. 1. IEEE, 2004.

[3] Baez, Heyson, Katherin Perez, Eyberth Rojas, Saith Rodríguez, Jorge Lopez, Carlos Quintero, and Juan M. Calderon. "Application of an educational strategy based on a soccer

robotic platform.” In Advanced Robotics (ICAR), 2013 16th International Conference on, pp. 1- 6. IEEE, 2013.

[4] Kitano, Hiroaki, Satoshi Tadokoro, Itsuki Noda, Hitoshi Matsubara, Tomoichi Takahashi, Atsushi Shinjou, and Susumu Shimada. ”Robocup rescue: Search and rescue in large-scale disasters as a domain for autonomous agents research.” In Systems, Man, and Cybernetics, 1999. IEEE SMC’99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on, vol. 6, pp. 739-743. IEEE, 1999.

[5] Weitzenfeld, Alfredo, Joydeep Biswas, Mehmet Akar, and Kanjanapan Sukvichai. ”RoboCup Small-Size League: Past, Present and Future.” In RoboCup 2014: Robot World Cup XVIII, pp. 611-623. Springer International Publishing, 2014.

[6] Eguchi, Amy. ”RoboCup Junior for promoting STEM education, 21st century skills, and technological advancement through robotics competition.” Robotics and Autonomous Systems 75 (2016): 692-699.

[7] Calderon, Juan M., Eyberth R. Rojas, Saith Rodriguez, Heyson R. Baez, and Jorge A. Lopez. ”A Robot soccer team as a strategy to develop educational initiatives.” In Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, Panama City, Panama. 2012.

[8] Rodriguez, Saith, Eyberth Rojas, Katherin Perez, Jorge Lopez, Heyson Baez, and Juan Manuel Calderon. ”STOxs 2013 Team Description Paper.” (2013).

[9] Biswas, J., Mendoza, J.P., Zhu, D., Klee, S. and Veloso, M., CMDragons 2014 Extended Team Description.

[10] Rodriguez, Saith, Eyberth Rojas, Katherin Perez, Jorge Lopez, Carlos Quintero, Juan Manuel Calderon, and Oswaldo Pena. ”STOxs 2015 Extended Team Description Paper.”

[11] Missura, Marcell, Hak Yi, Min Sung Ahn, Sanghyun Cho, Kevin Liu, Dennis Hong, and Daniel D. Lee. ”RoboCup 2015 Humanoid AdultSize League Winner.” RoboCup 2015: Robot World Cup XIX 9513 (2016): 132.

[12] Rodriguez, Saith, Katherin Perez, Carlos Quintero, Jorge Lopez, Eyberth Rojas, and Juan Calderon. ”Identification of Multimodal Human-Robot Interaction Using Combined Kernels.” In Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications, pp. 263-273. Springer International Publishing, 2016.

- [13] Ruiz-del-Solar, Javier. "A Dynamic and Efficient Active Vision System for Humanoid Soccer Robots." *RoboCup 2015: Robot World Cup XIX* 9513 (2016): 316.
- [14] Martn, Francisco. "Visual Localization Based on Quadtrees." In *Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference*, pp. 599-610. Springer International Publishing, 2016.
- [15] Perez-Hernandez, Andrea K., André's Gomez-García, Eyberth R. Rojas-Martínez, Carlos S. Rodríguez-Rojas, Jorge López-Jiménez, and Juan M. Calderón-Chavez. "Edge Detection Algorithm Based on Fuzzy Logic Theory for a Local Vision System of Robocup Humanoid League." *Tecnologías* 30 (2013): 33-50.
- [16] Kitano, Hiroaki, Minoru Asada, Yasuo Kuniyoshi, Itsuki Noda, Eiichi Osawa, and Hitoshi Matsubara. "RoboCup: A challenge problem for AI." *AI magazine* 18, no. 1 (1997): 73.
- [17] Visser, Ubbo. "AI and Robotics: RoboCup Evolution." *KI-Kunstliche Intelligenz* (2016): 1-5.
- [18] Quintero, Carlos, Saith Rodríguez, Katherín Pérez, Jorge López, Eyberth Rojas, and Juan Calderón. "Learning Soccer Drills for the Small Size League of RoboCup." In *RoboCup 2014: Robot World Cup XVIII*, pp. 395-406. Springer International Publishing, 2014.
- [19] Biswas, Joydeep, Juan Pablo Mendoza, Danny Zhu, Benjamin Choi, Steven Klee, and Manuela Veloso. "Opponent-driven planning and execution for pass, attack, and defense in a multi-robot soccer team." In *Proceedings of the 2014 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems*, pp. 493-500. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2014.
- [20] Rodríguez, Saith, Eyberth Rojas, Katherín Pérez, Jorge López, Carlos Quintero, and Juan Calderón. "Fast Path Planning Algorithm for the RoboCup Small Size League." In *RoboCup 2014: Robot World Cup XVIII*, pp. 407-418. Springer International Publishing, 2014.
- [21] Mendoza, Juan Pablo, Joydeep Biswas, Philip Cooksey, Richard Wang, Steven Klee, Danny Zhu, and Manuela Veloso. "Selectively Reactive Coordination for a Team of Robot Soccer Champions." (2015).
- [22] Homem, Thiago PD, Ricardo C. Destro, Flavio Tonidandel, and Reinaldo AC Bianchi. "Newton: A High Level Control Humanoid Robot for the RoboCup Soccer KidSize League." In *Robotics: Joint Conference on Robotics, LARS 2014, SBR 2014, Robocontrol 2014, So Carlos, Brazil, October 18-23, 2014. Revised Selected Papers*, vol. 507, p. 53. Springer, 2015.

- [23] Lopez,J.,Perez,K.,Rojas,E.,Rodriguez,S.,Calderon, J.M. and Weitzenfeld, A., 2013, November. Comparison between a fuzzy controller and classic controller applied to stabilize a humanoid robotic platform. InAdvanced Robotics (ICAR), 2013 16th International Conference on (pp. 1-6). IEEE.
- [24] Elibol, Ercan, Juan Calderon, Martin Llofriu, Car- los Quintero, and Alfredo Weitzenfeld. "Power Us- age Reduction of Humanoid Standing Process using Q- Learning." In RoboCup 2015: Robot World Cup IXX, Springer Berlin Heidelberg, 2015.