

EVALUACION MULTI-ZMP PARA TAREAS DE TRANSPORTE DE OBJETOS EN ROBOTS HUMANOIDES

Juan Miguel Garcia-Haro, Santiago Martinez, Juan Hernandez-Vicen, Carlos Balaguer

Universidad Carlos III de Madrid (España)

{jgarciah, scasa, balaguer}@ing.uc3m.es, juanhernandezvicen@gmail.com

Resumen

Este artículo presenta un enfoque de control postural de un robot humanoide camarero. En investigaciones anteriores, se propusieron dos métodos para tratar esta complejidad. La primera fue una mejora para el control del equilibrio del cuerpo (locomoción) y la segunda fue un método para aplicar los conceptos clásicos del equilibrio del cuerpo para transportar objetos en una bandeja (manipulación). Este enfoque se basa en el concepto de un sistema de evaluación multi-ZMP para controlar la estabilidad del objeto y el cuerpo. Ambos métodos se desarrollaron de forma independiente, evitando perturbaciones entre ellos. La integración en una arquitectura de control postural de todo el cuerpo es un reto para el rendimiento de ambos métodos, debido a la gran influencia entre ellos. En este artículo, se presentan ambos métodos para tratar la complejidad de la tarea humanoide. Es decir, cómo estos métodos se han integrado en un controlador postural humanoide y los resultados de la interacción.

Palabras clave: Robot Humanoide, Camarero, Control de Transporte de Objetos, Equilibrio

1 INTRODUCCIÓN

La tecnología robótica está pasando por una gran revolución. Los investigadores están ahora más cerca que nunca de conseguir que los robots de servicio puedan ayudar a las personas en sus actividades cotidianas.

Cada vez más empresas y grupos de investigación están desarrollando robots humanoides para diferentes propósitos. A medida que crezca la expectativa de que los robots humanoides deben operar como ayudantes humanos y compañeros sociales, la necesidad de mejorar será mayor.

Sus habilidades motoras se vuelven cada vez más importantes. Equipados con sistemas antropomorfos altamente versátiles, sensores robustos y potentes computadoras, los robots humanoides deberían ser capaces de manejar muchas tareas básicas que realizan los humanos.

De hecho, ya hay algunos ejemplos de robots trabajando en la industria de restauración (Figura 1, parte superior). En países como China, los restaurantes están utilizando robots para tomar pedidos y servir comida [14]. Pizza Hut ha agregado robots llamados Pepper, fabricados por la compañía japonesa SoftBank, en Asia [3].



Figura 1: Resumen ilustrado de la posibilidades de un robot camarero. En la fila de arriba, hay algunos ejemplos de robots camarero. En la fila de abajo, se observan posibles situaciones en que debe lidiar un robot camarero

Un robot de catering debe realizar sus tareas de una manera razonable, por ejemplo, dentro de un marco de tiempo aceptable o sin limitar el entorno. Para ello, el robot camarero debe estar equipado con diferentes habilidades, como la interacción social, la detección y el seguimiento de personas, la planificación, la detección de objetos, la clasificación y la manipulación. Sin embargo, todas estas habilidades son campos de investigación activos e interdisciplinarios (Figura 1, parte inferior). Por lo tanto, la naturaleza integradora de los robot camarero abre nuevos desafíos de investigación centrados en el funcionamiento concurrente de estas habilidades de manera precisas y robusta. Para cumplir con dichos requisitos frente a cambios dinámicos o de interacción con humanos, estas habilidades deben mejorarse [16][13].

En la Universidad Carlos III de Madrid, el grupo de investigación “RoboticsLab” está desarrollando el robot humanoide móvil autónomo TEO (Task Environment Operator). TEO puede utilizarse como robot de asistencia o como robot personal en una oficina o en un entorno más profesional como robot de camarero.

El componente principal de dicho robot para manipular objetos es su mano, la cual incorpora una bandeja. El diseño de nuestra bandeja de mano se basa en la observación del típico movimiento de un camarero humano (Figura 2).

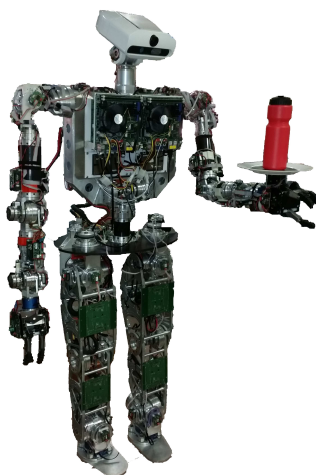


Figura 2: La plataforma humanoide TEO desarrollada por el grupo “RoboticsLab”

Para este artículo, se ha planteado que el robot debe realice tres tareas principales. El primer objetivo es mantener el equilibrio del objeto a transportar sobre la bandeja mientras el robot está en reposo. El segundo es controlar dinámicamente el equilibrio del cuerpo del robot. Finalmente, el objetivo es mantener el equilibrio del robot y el objeto sobre la bandeja al mismo tiempo mientras se completa la tarea de transporte.

2 ESTADO DEL ARTE

Uno de los próximos campos de aplicación de los robots de servicio es el área del catering, donde los robots podrán ayudar como asistentes. Estos nuevos robots son muy similares a los robots personales, los cuales tienen que moverse por la casa (entornos dinámicos para humanos), interactuando con humanos [5][12][2].

Por lo tanto, los robots camarero tendrán características similares a los robots de servicio doméstico. De este modo, los robots de catering podrían ayudar y apoyar en tareas como servir los platos, cocinar alimentos, preparar cócteles, recoger pedidos..., como chef, bar-robot o camarero [15].

En este caso, el restaurante será considerado el lugar de trabajo. Cualquier restaurante está compuesto por una gran cantidad de objetos estáticos como mesas, sillas, puertas, paredes, atriles,... y objetos dinámicos como humanos, camareros u otros robots de camareros.

Además, en este entorno cambiante, el robot camarero debe realizar diversas tareas como acompañar a los clientes a sus asientos, recibir los pedidos de bebida y comida, servir los platos, y otros.

Si un robot tiene que comportarse como un camarero, estas consideraciones o requisitos deben tenerse en cuenta. Basándose en estos, es necesario considerar cuáles serán las habilidades fundamentales del robot. Principalmente estas cuatro características son la arquitectura del robot, la interacción humano-robot (Human-Robot Interaction - HRI en inglés), la planificación de trayectorias, y el plan de ejecución [9].

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Antes de abordar la solución del robot camarero, hay otros problemas con los que el sistema de control de equilibrio debe lidiar. En este sentido, la mecánica del robot y la complejidad de la tarea de equilibrar la bebida hacen que se tengan en cuenta dos problemas. Por un lado, los defectos mecánicos del robot que dificultarán la lectura correcta de los datos de los sensores de Fuerza/Par (F-T del inglés). Por otro lado, la tarea de equilibrar la bebida causará problemas en el cálculo de la ZMP del objeto si la bandeja deja de estar en el plano horizontal o coplanar.

3.1 EQUILIBRIO DEL CUERPO

Para abordar el problema del equilibrio, los robots suelen ser representados por modelos simplificados a los cuales se les aplica un criterio de estabilidad para poder computar la cinemática y dinámica del robot y calcular la respuesta para mantenerse estable. El modelo que se ha utilizado en esta investigación es el péndulo invertido lineal tridimensional (3DLIPM), que fue propuesto por Kajita [8]. Para el criterio de estabilidad, se utilizará el Zero Moment Point (ZMP) introducido por Vukobratovic [17]. Una limitación que tiene este criterio es que solo se puede aplicar cuando los contactos son coplanarios. Las dos razones de esta selección son la simplicidad de las ecuaciones utilizadas para el cálculo de ZMP y la posibilidad de usar sensores F-T para medir todas las fuerzas y pares necesarios para el cálculo de ZMP.

Existen numerosos problemas mecatrónicos y también relativos a la tarea de equilibrio que pueden llegar a ser notables durante el control de estabilidad. Estos errores o problemas surgen de la propia linealización de este modelo del robot, la aproximación del Centro de Masa (CoM), desviaciones de medición en los sensores F-T, la flexibilidad de la estructura, irregularidades en el suelo.

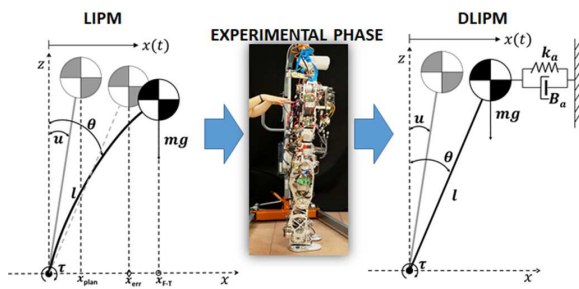


Figura 3: Visualización del proceso de ajuste del modelo nuevo modelo dinámico del robot DLIPM.

Todos estos errores conducen a un aumento de esfuerzo para el controlador y hacen que la ajuste de la tarea de control sea más difícil (Figura 3, parte izquierda).

Para resolver este problema, el error se modela utilizando la información de los sensores F-T instalados en los tobillos del robot. Todos los efectos causados por cualquier perturbación se reflejan en las fuerzas y pares medidos. El método utilizado para desarrollar el nuevo modelo mejorado sigue los siguientes pasos.

Basado en el conjunto de experimentos Push-Recovery de bucle abierto, las mediciones de los sensores F-T se capturan y procesan. Luego, con esta información, se calcula el ZMP_{F-T} real y se compara con el ZMP_{exp} esperado. Se modela la diferencia entre ellos y se obtiene una ecuación que describe este error. El error modelado se incluye en el modelo original como una fuerza ficticia que corrige la diferencia encontrada. Una vez que se ha obtenido el nuevo modelo, el nuevo comportamiento de ZMP planificado es similar al de la ZMP medida.

Por tanto, la idea es modificar el modelo LIPM, agregando un sistema que represente los errores del robot real obtenido de la experimentación (Figura 3, parte derecha). Este nuevo modelo llamado DLIPM (Dynamical Linear Inverted Pendulum Model) agrega el error modelado, compensando tanto la respuesta en régimen permanente (k_a) como la respuesta en régimen transitorio para limitar las oscilaciones (B_a). Así, la ecuación 1 que define el movimiento del nuevo modelo viene dada por:

$$\tau = -ml\ddot{x}(t) - B_a l \dot{x}(t) - k_a l x(t) + mgx(t) \quad (1)$$

Donde $x(t)$ es el movimiento del CoM, m es la masa del péndulo, l es su longitud, k_a es la constante del muelle, y B_a es la constante del amortiguador. El par τ se puede obtener de las ecuaciones del ZMP.

Los valores de k_a y B_a dependen del valor de ZMP actual, desarrollando una solución no lineal basada en *gain scheduled matching*. De esta manera, los parámetros se ajustan dinámicamente a los múltiples puntos de trabajo del controlador. Al final, el sistema se ha probado experimentalmente para capturar la respuesta del sistema de control contra variaciones del ZMP, obteniendo una reducción del casi 10% del error [11].

3.2 EQUILIBRIO DEL OBJETO

Una tarea de manipulación sin agarre es una opción común para transportar objetos. Esta opción de no agarrar objetos tiene ciertas ventajas. Dado que el objeto no está rígidamente unido a la mano/herramienta del robot, el objeto puede exhibir una clase más amplia de movimientos que si estuviera agarrada. También, se pueden usar brazos más simples para transportar más de un objeto e incluso independientemente de su peso [4][1][10]. Sin embargo una tarea de manipulación sin agarre (como puede ser **pivotar**), en el que la bandeja del robot mantiene el equilibrio de un objeto, requieren otra vez de los conceptos LIPM y ZMP, para controlar la estabilidad del objeto en cuestión. La razón vuelve a ser la misma, en la que el comportamiento pivotante de la botella sobre la bandeja se ajusta al modelo 3DLIPM debido a un coeficiente de fricción muy alto. Y además, el robot dispone de un sensor F-T en la muñeca para computar el ZMP del objeto.

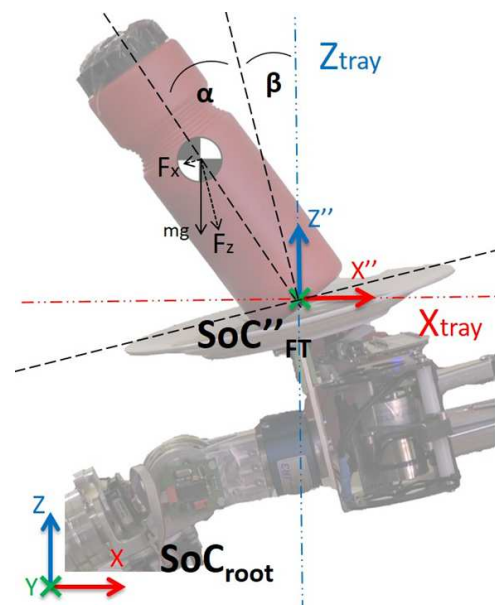


Figura 4: Representación del comportamiento de la botella ante inestabilidades. Descomposición de las fuerzas causadas por el peso de la botella y su transformación mediante la aplicación del concepto 3D Dynamical Slopes.

El principal problema para este control de estabilidad es la orientación de la bandeja, y por tanto, de las medidas del sensor F-T (Figura 4). Para poder aplicar las ecuaciones de ZMP, la bandeja siempre debe ser coplanar con el plano horizontal. Sólo de esta forma, todas las fuerzas y pares ejercidos por la botella se reflejarán correctamente en el sensor y, por lo tanto, se podría aplicar las ecuaciones del ZMP. En la caso del robot TEO, obviamente la bandeja tendrá diferentes orientaciones durante el control de equilibrio. Estas *poses*, relacionadas con el estado de la botella, generan datos en el sensor que no se pueden aplicar directamente para el cómputo del ZMP. Para usarlo, es necesario aplicar unas transformaciones basadas en el concepto de *3D Dynamic Slopes*. Este concepto se basa en la estimación dinámica de la *pose* del sensor F-T en la muñeca, permitiendo interpretar correctamente los datos del sensor en función de la orientación de la bandeja.

Si la bandeja se colocara siempre en el plano axial, el problema de calcular la ZMP se resolvería. Sin embargo, habrá instantes donde la bandeja estará inclinada respecto a la vertical. La razón está asociada con la estrategia de control. Como no hay control motor sobre la botella, es obligatorio que la bandeja se reoriente para contrarrestar el grado de inestabilidad de la botella. Es por estas reorientaciones por las que se debe aplicar el concepto *3D Dynamic Slopes*.

La solución de *3D Dynamic Slope* consiste en obtener el ángulo de inclinación de la bandeja θ y el eje de rotación \vec{n} , siendo \vec{n} un vector perpendicular al eje de inclinación de la botella. Además, asumimos que este vector siempre deberá estar contenido en el plano horizontal. De esta manera, al aplicar una transformación de rotación sobre el SoC (Sistema de Coordenadas) de la bandeja, y por tanto del SoC del sensor, se consigue que ambos SoC estén sobre un plano coplanario virtual en el que las nuevas lecturas modificadas del sensor se pueden aplicar a las ecuaciones del ZMP.

Con el nuevo SoC del sensor F-T, el ZMP de la botella se representa con las ecuaciones 2 y 3. Éstas toman en cuenta tanto los valores d_X , d_Y y d_Z relacionados con la distancia entre los SoC del sensor F-T y de la bandeja, como el ángulo de inclinación con respecto al plano virtual para el cálculo ZMP. β y β' son estos ángulos para los planos frontal y sagital respectivamente. La suma geométrica de β y β' está relacionada con el ángulo de inclinación θ de la bandeja. α es el ángulo relativo entre la botella y la bandeja. Garcia-Haro et al. [6], muestra los resultados obtenido de manera satisfactoria del comportamiendo del ZMP de la botellas aplicado *3D Dynamic Slope*.

$$X''_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)(x_i - d_X) - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i (z_i - d_Z)}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g) * \cos(\beta)} \tag{2}$$

$$Y''_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)(y_i - d_Y) - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i (z_i - d_Z)}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g) * \cos(\beta')} \tag{3}$$

4 APLICACIÓN DEL ROBOT CAMARERO

En nuestra idea de robot camarero, el robot intentará transportar objetos en una bandeja. Por lo tanto, el robot debe tener las siguientes habilidades principales. Por un lado, el robot debe mantener su propio equilibrio (tareas de caminata). Y, por otro lado, el robot debe transportar objetos en una bandeja (tareas de manipulación sin agarre).

En la sección anterior, los sistemas de locomoción y manipulación fueron verificados y validados por separado. En ambos sistemas, se trataban diferentes problemas relacionados con los problemas mecánicos y la complejidad de la tarea. En cualquier caso, las soluciones propuestas han sido verificadas individualmente, obteniendo resultados aceptables. En el caso de la locomoción, el controlador del cuerpo se ajusta dinámicamente en función de su estado de estabilidad. En este caso, el controlador de la parte inferior del cuerpo está considerando la física del robot como si fuera un sólido rígido (modelo LIPM). De tal manera que el efecto del movimiento del brazo no se contempla en ningún momento. Pero tambien sucede lo mismo en el caso de la manipulación, con el controlador del objeto. Éste se adapta dinámica y únicamente al estado de la botella y la bandeja, sin tener en consideración el efecto de las perturbaciones que surgen del control del cuerpo.

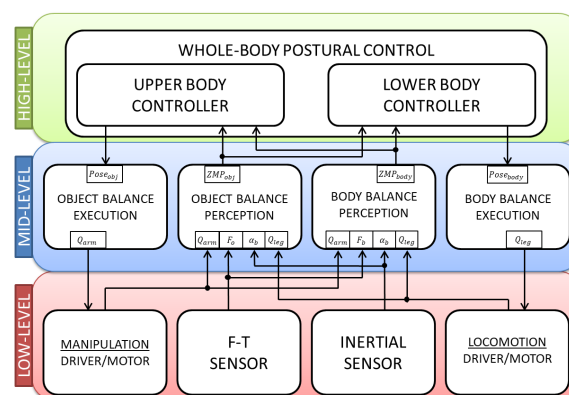


Figura 5: Aplicación del robot camarero. Representación de los diferentes subprocesos involucrados en la aplicación y la conexión entre ellos.

Pero es obvio que, en un ser humano o un robot humanoide, los movimientos de los miembros superiores e inferiores se afectan entre sí. Por un lado, si un humano agarra un peso con sus brazos extendidos, su cuerpo cederá y se moverá hacia adelante. Por otro lado, si comienza o deja de caminar, la aceleración o desaceleración afectará a la botella en la bandeja.

Por estas razones, se propone la aplicación de camarero (mostrado en la Figura 5). En esta aplicación, los controladores del cuerpo superior e inferior continúan controlando el equilibrio de la estabilidad del cuerpo y el objeto, respectivamente. Pero ahora, ambos controladores toman en consideración el valor de estabilidad del otro.

Para ello, la aplicación de camarero se divide en tres niveles. En el nivel bajo, se ubican todos los dispositivos de robot que interactúan directamente con el exterior. Desde el aprovechamiento de la información de los sensores F-T y de inercia (entradas), hasta la actuación del robot sobre los drivers de cada una de las articulaciones del robot (salidas).

En el nivel medio, hay dos tipos de procesos. Hay procesos que aprovechan la propia información del robot, y hay procesos que modifican la postura del robot. Para esta aplicación, se han desarrollado cuatro procesos en total.

- El proceso OBP (Object Balance Perception - Percepción del Equilibrio del Objeto en inglés) tiene que chequear el estado de equilibrio del objeto transportado. Y el proceso BBP (Body Balance Perception - Percepción del Equilibrio del Cuerpo) tiene el objetivo de calcular el estado de equilibrio del cuerpo.
- El proceso OBE (Object Balance Execution - Actuación del Equilibrio del Objeto en inglés) genera la acción sobre cada una de las articulaciones del brazo. Y el proceso BBE (Body Balance Execution - Actuación del Equilibrio del Cuerpo) controla las articulaciones de ambas piernas.

En el nivel alto, está el Control Postural de Cuerpo Completo (Whole-Body Postural Control - WBPC). Éste se compone de dos procesos.

- El proceso UBC (Upper Body Controller - Controlador de la parte Superior del Cuerpo en inglés) decide la acción sobre los brazos de acuerdo con la OBP y la BBP.
- El proceso de LBC (Lower Body Controller - Controlador de la parte Inferior del Cuerpo en inglés) elige el movimiento sobre las piernas dependiendo también de la OBP y la BBP.

4.1 ARQUITECTURA WBPC

Para una mejor comprensión del desarrollo de esta aplicación de camarero, la arquitectura WBPC se explica con más detalle en la Figura 6, en la que se realiza la evaluación de múltiples ZMP (objeto y cuerpo). A partir del esquema anterior, la arquitectura WBPC se basa en la ejecución de los controladores tanto de la parte superior como inferior en paralelo. Estos dos controladores son la locomoción (LBC) y la manipulación (UBC), y se basan en sistemas de tipo FIS (Fuzzy Inference System).

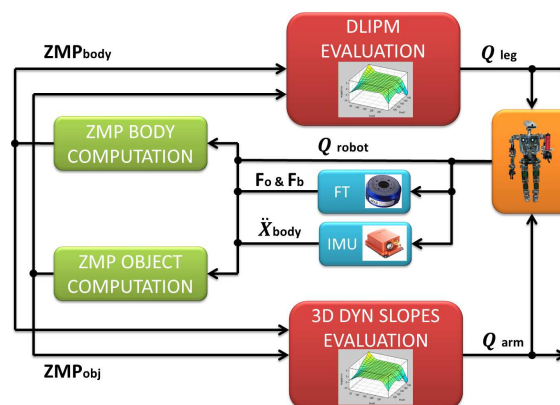


Figura 6: Representación gráfica de la arquitectura de control WBPC.

La razón para usar este tipo de sistema es la bio-inspiración. Al usar un robot humanoide y también imitar una aplicación de seres humanos, es interesante usar un sistema similar a la forma en la que piensan los seres humanos. De hecho, los sistemas FIS pueden modelar los aspectos cualitativos del conocimiento humano y los procesos de razonamiento.

El uso de los sistemas Fuzzy presenta múltiples ventajas. Algunas de estas ventajas son el uso de información real del sistema a controlar, su buena resistencia al ruido o el bajo esfuerzo de cálculo. Además, la capacidad de los filtros Fuzzy para enfrentar sistemas no lineales es útil. Por lo tanto, puede encajar muy bien con el comportamiento de un robot humanoide [7].

Para entrenar los sistemas FIS de cada uno de los controladores, se utiliza la herramienta ANFIS (Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System) de Matlab. La arquitectura y los procedimientos de aprendizaje que asocian a la herramienta ANFIS se presentan como un sistema FIS implementado en el marco de redes adaptativas. Al utilizar un procedimiento de aprendizaje híbrido, el sistema puede construir un mapeo de entradas-salida basado en el conocimiento humano (en forma de reglas Fuzzy if-then).

El controlador del cuerpo tiene cuatro entradas (Figura 6, parte superior). Estas cuatro entradas son los sensores propioceptivos de las piernas (Q_{leg}), los dos sensores F-T en los tobillos (F_b), el sensor de inercia (α_{body}) ubicado muy cerca del CoM y las coordenadas articulares de los brazos (Q_{arm}). La fusión de las cuatro entradas sirve para calcular la ZMP del cuerpo (ZMP_{body}) y predecir su rango de estabilidad. En este caso, la posición del brazo (Q_{arm}) produce un efecto casi despreciable en la ZMP del cuerpo. La razón se debe al hecho de que la diferencia entre la masa del brazo y el cuerpo es significativa. Aun así, se ha decidido incluir este valor para un control más preciso.

El controlador del objeto también a su vez tiene cuatro entradas (Figura 6, parte inferior). Estas cuartas entradas son los sensores propioceptivos del brazo (Q_{arm}), el sensor F-T en la muñeca (F_o), el sensor inercial ubicado en el CoM (α_{body}) y las coordenadas de articulares de las piernas (Q_{leg}). El cálculo de ZMP del objeto (ZMP_{obj}) depende de las fuerzas y los pares y la postura de la bandeja. Pero además, el valor de ZMP del objeto también depende de la postura del cuerpo (Q_{leg}) y su aceleración (α_{body}). La postura del robot es la inclinación del robot cuando se balancea, el cual complementa la postura de la bandeja. Y la aceleración del robot se traduce en una fuerza externa sobre la botella.

4.2 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Para verificar la viabilidad del sistema propuesto, se compara el controlador WBPC utilizando dos modelos propuestos para el cuerpo. Primero con el modelo LIPM y luego con el modelo mejorado DLIPM. En las pruebas, la respuesta de ZMP_{obj} y ZMP_{body} se captura contra fuerzas externas aplicadas al robot.

Las pruebas aplicadas a ambos casos consisten en aplicar una perturbación externa al robot humanoide y calcular los parámetros de estabilidad. En el caso de utilizar el LIPM, el modelo es fijo y la respuesta del sistema depende de este modelo. La actuación del control y su eficacia se basan en la precisión del modelo.

Pero en el caso de usar el DLIPM, el modelo se adapta a las condiciones de estabilidad (ZMP_{body}). Esto significa que el modelo se reconfigura en cada ciclo de control. Por lo tanto, el esfuerzo de control se basa en un modelo más preciso y su respuesta mejora el rendimiento de la balanza. En ambos casos, la salida del modelo es un comando articular de acuerdo con la planificación del ZMP.

El WBPC controla la parte superior del cuerpo y el ZMP_{obj} usando el método ‘3D dynamical slopes’. Este control se ha mejorado gracias a la aplicación del DLIPM porque modifica la dinámica de la tarea y reduce el impacto de cualquier tipo de perturbación sobre el objeto.

La Figura 7 muestra el rendimiento del control de estabilidad para el controlador UBC (ZMP_{obj}) y el controlador LBC (ZMP_{body}). En estas pruebas, el robot es empujado para verificar su respuesta. En el primer caso del WBPC que usa el modelo LIPM, ambos controladores cumplen el objetivo de mantener la estabilidad. Sin embargo, ambos controladores sobreoscilan en exceso y además tienen un tiempo de estabilización grande (Figura 7(a), parte superior). La dinámica del equilibrio está totalmente determinada por el modelo, y no es posible modificarla. Por lo tanto, el controlador UBC debe lidiar también con las perturbaciones no eliminadas por el controlador LBC.

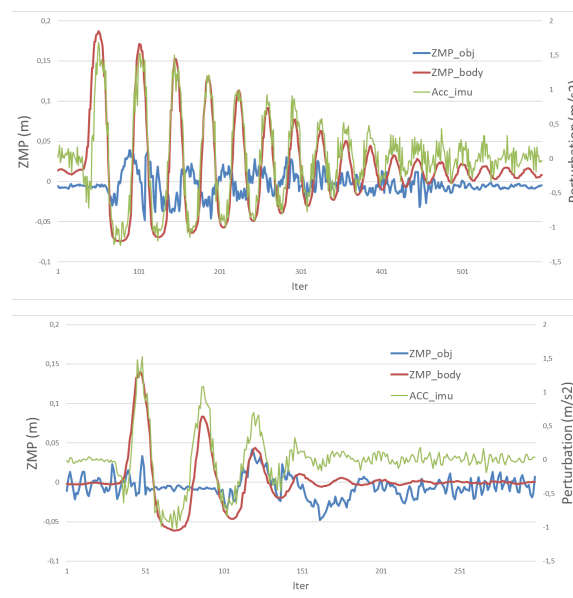


Figura 7: Evolución temporal de ZMP_{body} y ZMP_{obj} en función de una perturbación externa (empuje). Arriba, el sistema WBPC no incorpora el modelo DLIPM. Abajo, el sistema de camareros WBPC propuesto si incluye el modelo DLIPM.

Para el caso del WBPC que usa el modelo DLIPM, la respuesta es mejor en diferentes aspectos. Las sobreoscilaciones del ZMP_{body} son más pequeñas y menos intensas. La respuesta del tiempo es cuatro veces menor. Y además, el ZMP_{obj} se estabiliza más rápido. La razón es que el DLIPM es capaz de absorber perturbaciones tanto externas como internas (debido a su ajuste dinámico). De esta manera, las perturbaciones causadas por el brazo se minimizan, y el controlador del objeto funciona mejor (Figura 7(b), parte inferior).

En la Figura 7, también se representa la aceleración de un sensor de inercia. Tiene dos propósitos. El primero es captar el momento en el que se empuja al robot (primera oscilación). El segundo es comprobar cómo responde globalmente el sistema para corroborar los resultados de los valores de ZMP.

5 CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un enfoque de Controlador Postural (WBPC) de un robot camarero para ser aplicado en entornos reales. Para ello, se han propuesto dos métodos. Por un lado, la aplicación del modelo de péndulo invertido lineal (DLIPM) mejora significativamente la estabilidad del cuerpo del robot. Este modelo se ha obtenido de manera experimental, por lo que su proceso de desarrollo se puede aplicar fácilmente a otros robots. Por otro lado, el método 3D Dynamic Slope para la manipulación es capaz de calcular la estabilidad del objeto transportado de manera efectiva. El cálculo de ZMP del objeto se obtiene sin importar la *pose* del robot y la inclinación de la bandeja.

Para la integración de ambos métodos, se ha desarrollado una arquitectura WBPC. Ésta se basa en el concepto de evaluación múltiple de ZMPs y la interrelación de las estabilidades del objeto y del robot. Así, los métodos expuestos para la estabilidad computacional consideran las influencias entre ellos. Se logra mediante el desarrollo de un sistema difuso que simplifica la complejidad de la tarea.

Como conclusión final, los métodos y la arquitectura propuestos se han testado y desarrollado adecuadamente para cumplir con la tarea del camarero sobre el control del equilibrio. Se necesita una investigación más profunda para evaluar el equilibrio durante la marcha, pero la primera etapa de la investigación en este campo se ha logrado con éxito, como se puede ver en el enlace: <https://youtu.be/XJzGwDIjFCY>. La dinámica de la respuesta de equilibrio se ha establecido y se puede aplicar directamente en trabajos futuros.

Agradecimientos

The research leading to these results has received funding from the HUMASOFT project, with reference DPI2016-75330-P, funded by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness, and from the RoboCity2030-DIH-CM Madrid Robotics Digital Innovation Hub (“Robótica aplicada a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos, Fase IV”; S2018/NMT-4331), funded by “Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid” and cofunded by Structural Funds of the EU.

English summary

MULTI-ZMP EVALUATION FOR OBJECTS TRANSPORT TASKS IN HUMANOID ROBOTS

Abstract

This article presents a whole-body postural control approach of a waiter humanoid robot. In previous research, two methods for dealing with this complexity were proposed. The first one was an improvement for balance control of the body (locomotion) and, the second one was a method to apply classic body balance concepts for transporting objects on a tray (manipulation). This approach is based on the concept of a multi-ZMP evaluation system to control object and body stability. Both methods were developed independently, avoiding cross-linked perturbations. The integration into a whole-body postural control architecture is challenging for the performance of both methods, due to the big influence between them. In this article, both methods for dealing with humanoid task complexity are presented. That is, how these methods have been integrated into a humanoid postural controller and the results of the interaction.

Keywords: Humanoid Robot, Waiter, Object Transport Control, Balance.

Referencias

- [1] Aiyama, Y., Inaba, M., & Inoue, H. (1993). Pivoting - A New Method of Graspless Manipulation of Object by Robot Fingers. *Analysis*, 1, 136–143.
- [2] Chen, C., Gao, Q., Song, Z., Liping, O., & Wu, X. (2010). Catering service robot. *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, 599–604.
- [3] Curtis, S. (2016). Pizza Hut hires ROBOT waiters to take orders and process payments at its fast-food restaurants. Retrieved January 9, 2018, from <http://www.mirror.co.uk/tech/pizza-hut-hires-robot-waiters-8045172>

- [4] Dogar, M. R., & Srinivasa, S. S. (2010). Push-grasping with dexterous hands: Mechanics and a method. In *IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2010 - Conference Proceedings*, 2123–2130.
- [5] Elinas, P., Hoey, J., Lahey, D., Montgomery, J. D., Murray, D., Se, S., & Little, J. J. (2003). Waiting with Jose, a vision-based mobile robot. *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Cat. No.02CH37292), 4, 3698–3705.
- [6] Garcia-Haro, J. M., Martinez, S., & Balaguer, C. (2018). Balance Computation of Objects Transported on a Tray by a Humanoid Robot Based on 3D Dynamic Slopes. In *2018 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 704–709. IEEE.
- [7] Hernandez-Vicen, J., Martinez, S., Garcia-Haro, J. M., & Balaguer, C. (2018). Correction of Visual Perception Based on Neuro-Fuzzy Learning for the Humanoid Robot TEO. *Sensors*, 18(4), 972.
- [8] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Yokoi, K., & Hirukawa, H. (2001). The 3D linear inverted pendulum mode: a simple modeling for a biped walking pattern generation. In *Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1, 239–246. IEEE.
- [9] Kemp, C. C., Edsinger, A., & Torres-Jara, E. (2007). Challenges for robot manipulation in human environments [Grand challenges of robotics]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14(1), 20–29.
- [10] Lynch, K. M., & Mason, M. T. (1996). Dynamic underactuated nonprehensile manipulation. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS'96*, 2, 889–896. IEEE.
- [11] Martinez, S., Garcia-Haro, J. M., Victores, J., Jardon, A., & Balaguer, C. (2018). Experimental Robot Model Adjustments Based on Force-Torque Sensor Information. *Sensors*, 18(3), 836.
- [12] Maxwell, B. A., Meeden, L. A., Addo, N., Brown, L., Dickson, P., Ng, J., ... Wales, J. (1999). Alfred: The Robot Waiter Who Remembers You. *Proceedings of AAAI Workshop on Robotics*, 1–12.
- [13] Meeussen, W., Wise, M., Glaser, S., Chitta, S., McGann, C., Mihelich, P., ... Berger, E. (2010). Autonomous door opening and plugging in with a personal robot. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 729–736. IEEE.
- [14] Nguyen, C. (2016). Chinese restaurants are replacing waiters with robots. *Tech Insider*. Retrieved from <http://www.businessinsider.com/chinese-restaurant-robot-waiters-2016-7/#these-ten-robot-waiters-serve-customers-in-chengdu-china-carrying-dishes-around-and-giving-simple-greetings-to-customers-1>
- [15] Ray, C., Mondada, F., & Siegwart, R. (2008). What do people expect from robots? 2008 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, 3816–3821. IEEE.
- [16] Srinivasa, S. S., Ferguson, D., Helfrich, C. J., Berenson, D., Collet, A., Diankov, R., ... Weghe, M. Vande. (2010). HERB: A home exploring robotic butler. *Autonomous Robots*, 28(1), 5–20.
- [17] Vukobratovic, M., & Borovac, B. (2004). Zero-moment point — thirty five years of its life. *International Journal of Humanoid Robotics*, 1(1), 157–173.



© 2019 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).