

Control de impedancia para rehabilitación de miembros inferiores*

*Proyecto del curso Robótica Avanzada

1st César Delgado

Dept. Ingeniería Mecatrónica
Universidad de Ingeniería y Tecnología
Lima, Perú
cesar.delgado@utec.edu.pe

2nd José Cabeza

Dept. Ingeniería Mecatrónica
Universidad de Ingeniería y Tecnología
Lima, Country
jose.cabeza@utec.edu.pe

3rd Manuel Carita

Dept. Ingeniería Mecatrónica
Universidad de Ingeniería y Tecnología
Lima, Perú
manuel.carita@utec.edu.pe

4th Jairo Custodio

Dept. Ingeniería Mecatrónica
Universidad de Ingeniería y Tecnología
Lima, Perú
jairo.custodio@utec.edu.pe

Abstract—La rehabilitación de miembros inferiores necesita de seguir trayectorias deseadas y de tener cuidado y suavidad en el accionamiento de las mismas dado que se trata de miembros biológicos. Ante ello, el control de impedancia es una solución que permite tener un comportamiento compilante en posiciones deseadas. La implementación se realizó en un Open Manipulator y se evaluó su rendimiento con variaciones en los parámetros de amortiguamiento y rigidez.

Index Terms—control de impedancia, miembros inferiores, open manipulator

I. INTRODUCTION

Para lograr una interacción segura entre humanos y robots, uno de los retos principales es garantizar que la fuerza aplicada por el robot de rehabilitación se mantenga dentro de límites seguros para el paciente. Por ello, es crucial controlar la posición y el movimiento de las extremidades, administrando su ubicación y desplazamiento según trayectorias terapéuticas determinadas. De esta manera, el diseño de robots de rehabilitación para miembros inferiores, se enfrentan desafíos únicos. Esto se debe a las funciones biomecánicas particulares de estos miembros, como la carga de peso y la locomoción, que deben ser consideradas cuidadosamente en el proceso de diseño [2]. Asimismo, el control de impedancia es uno de los controles, que son utilizados para este tipo de interacciones humano-robot debido a que regula la relación dinámica entre la fuerza y el movimiento del robot.

De esta manera, se propone implementar un control de impedancia para el open manipulator para posiciones deseadas. En la figura 1 se muestra el brazo robótico y en la tabla I, se describen algunas de las características del open manipulator

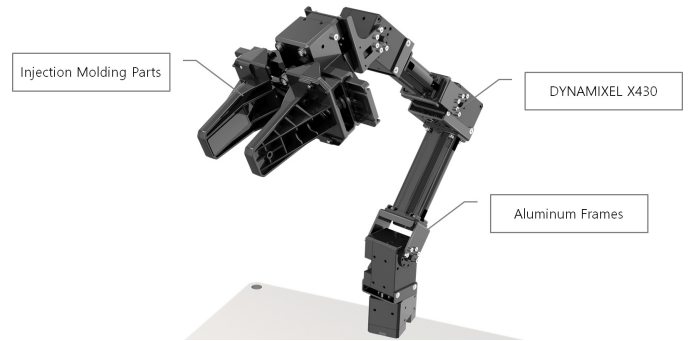


Fig. 1. OpenManipulator

TABLE I
ESPECIFICACIONES DEL OPENMANIPULATOR-X

Elementos	Unidad	Especificaciones
Grados de Libertad (DOF)		5 (4 DOF + 1 DOF Garra)
Carga Útil	g	500
Repetibilidad	mm	0.2
Velocidad (Articulación)	RPM	46
Peso	kg (lb)	0.70 (1.54)
Alcance	mm (in)	380 (14.9)
Carrera de la Garra	mm (in)	20 75 (0.79 2.95)
Actuador		DYNAMIXEL XM430-W350-T(motor DC)

II. METODOLOGÍA

El objetivo de este trabajo es utilizar el control de impedancia para rehabilitación de miembros inferiores. Por ello se

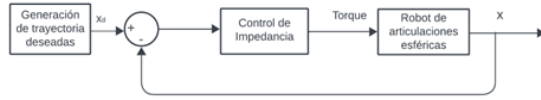


Fig. 2. Diagrama de bloques

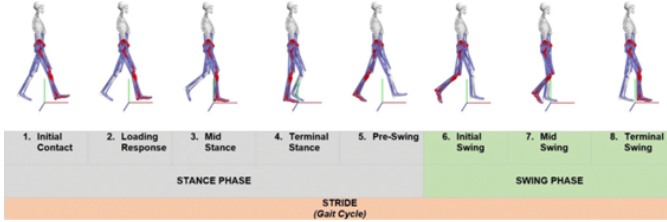


Fig. 3. Patrón de caminata

divide en dos partes principales. La primera parte es la generación de posiciones referencias o movimientos deseados que debería realizar el humano para realizar movimientos que garanticen una rehabilitación progresiva de sus extremidades. La segunda parte es la aplicación del control de impedancia, dada una posición deseada. Por último, para la implementación en el brazo robótico OpenManipulator, se plantea el caso especial del control de Impedancia y se realizan pruebas con este. El diagrama de bloques de la estructura de control se muestra en la figura 2.

A. Generación de trayectorias

La generación de trayectorias consiste en encontrar puntos deseados que el efector final y las articulaciones deben seguir. En este caso, dado que la aplicación es rehabilitación de extremidades inferiores, estos patrones son la caminata principalmente y suaves de velocidad asociados con la acción humana de correr. Para ello, se utilizaron trabajos ya realizados donde, en el caso del primero [1] distinguen las etapas mas importantes de la caminata. Estos se dividen de las el contacto inicial con el inicial con el suelo y toda la etapa de balanceo con el pie. En primera instancia, estas etapas se distinguen como posiciones inicialmente deseadas por donde como mínimo debe pasar el pie 3.

Asimismo, teniendo como referencia el trabajo realizado por ?? donde analizan el patron de caminata y generan la trayectoria de esta utilizando LSTM y una CNN. Esto se muestra en la figura 4. Este patrón generado, el cual tiene mayor cantidad de puntos por donde pasa el pie se tomó como referencia para posiciones deseadas en el control de impedancia del robot.

B. Control de impedancia

La impedancia es la función de transferencia que relaciona la velocidad $V(s)$ con la fuerza en el efector final del robot

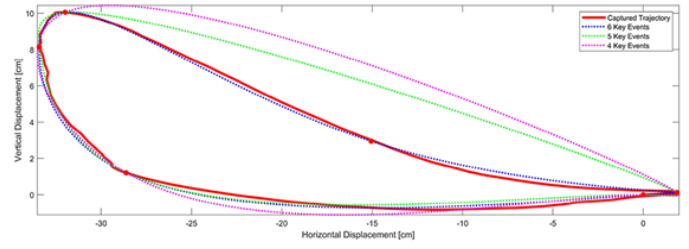


Fig. 4. Trayectoria de una caminata deseada

$F(s)$.

$$Z(s) = \frac{F(s)}{V(s)} = \frac{F(s)}{sX(s)}$$

Esta relación se modela como la acción de un resorte o compilante, el cual tiene tres parámetros asociados. El primero m es la inercia, b es el amortiguamiento y K es la rigidez.

$$ms^2X(s) + bsX(s) + kX(s) = F(s)$$

$$Z(s) = sm + b + \frac{k}{s}$$

Con ello la fuerza puede estar modelado en función del error con respecto a la posición deseada.

$$M_d(\ddot{x} - \ddot{x}_d) + B_d(\dot{x} - \dot{x}_d) + K_d(x - x_d) = F_A$$

Por otro lado, la dinámica del robot manipulador puede ser modelado de la siguiente manera:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + g = \tau$$

Donde M representa la inercia, C es la matriz de Coriolis y fuerzas centrífuga, g que es el vector de gravedad y τ que contiene el vector de torques asociados a cada articulación esférica del robot. Con esto dado, por la dinámica inversa se puede obtener y reemplazar lo siguiente.

$$\tau = M_A J^{-1} A [\ddot{x}_d - J_A \dot{q} + M_d^{-1} (B_d(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_d(x_d - x))] + C\dot{q} + g + J^T A (M_x M_d^{-1} - I) F_A \quad (1)$$

Esta es la ley de control de impedancia que puede ser aplicada a un robot manipulador, sin embargo requiere de ciertas mediciones como de la posiciones actuales q, \dot{q} y la fuerza en el efector final F_A .

C. Implementación en OpenManipulator

La implementación del control de impedancia se realiza en el brazo robótico, Open Manipulator. Este tiene 4 grados de libertad como se explicó anteriormente. Este utiliza motores Dynamixel en cada una de las articulaciones, con encoders para conocer las posiciones y velocidades articulares. Sin embargo, no posee de un sensor de fuerza y torque en el efector final. Esto dificulta la aplicación del control de impedancia, pues como se mostró en la ecuación (1) se requiere conocer la

fuerza aplicada en el efector final. Por ello, se aplica el caso especial, donde se cumple lo siguiente:

$$M_d = M_x = J_A^{-T} M J_A^{-1},$$

Esta consideración permite eliminar a la fuerza aplicada de la expresión y queda de la siguiente manera:

$$\tau = M_A J^{-1} A [\ddot{x}_d - J_A \dot{q} + M_d^{-1} (B_d (\dot{x}_d - \dot{x}) + K_d (x_d - x))] + C \dot{q} + g \quad (2)$$

Con esto, solo es necesario conocer las posiciones articulares actuales y se puede realizar el cálculo de las otras matrices como inercia y estimación del jacobiano analítico a través de la librería KDL (Kinematics and dynamics library).

Este control se aplicó en posiciones deseadas y se cambió los parámetros de Inercia, amortiguamiento y rigidez para evaluar su comportamiento. Por último, cabe mencionar que para la implementación se utilizó el OpenManipulator con Robot Operating System (ROS) por medio de nodo en C++.

III. RESULTADOS

Como se menciona anteriormente, para la implementación del control planteado, se usó el robot Open Manipulator 5.

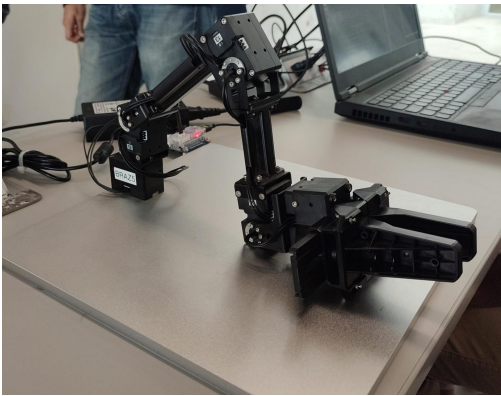


Fig. 5. Robot Open Manipulator a implementar

A continuación, se muestran los resultados del control de impedancia para el retorno a una posición inicial. Cabe resaltar que los videos de los casos presentes se muestran en el repositorio del proyecto.

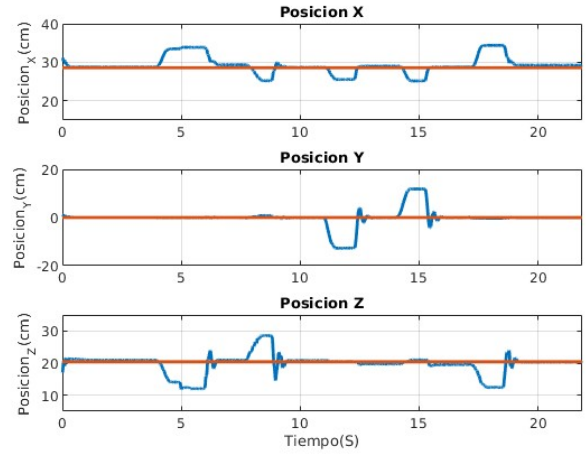


Fig. 6. Desplazamiento del efector final en X, Y, y Z con un $K = 49$ y $B = 1.5$

En la figura 6, se observa que usando una constante de rigidez $K = 49$, y una constante de amortiguación $B = 1.5$. Dado esto, vemos en las respuestas que al momento de aplicar fuerzas en el efector final del robot, este se desplaza en el espacio operacional resultando en los disturbios presentes en la gráfica 6; sin embargo, vemos que el controlador logra realizar el retorno del efector final con un sobre-amortiguamiento. Este comportamiento se debe a la presencia de la constante de amortiguamiento en la ley de control.

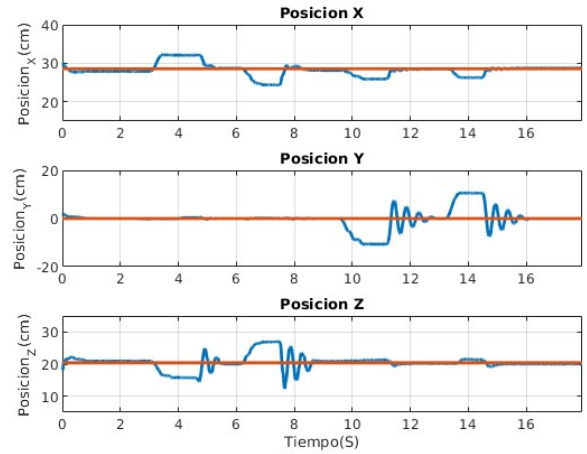


Fig. 7. Desplazamiento del efector final en X, Y, y Z con un $K = 49$ y $B = 0$

Por otro lado, en la figura 7, se mantiene el valor de la constante de rigidez; sin embargo, ahora le damos un valor nulo a la constante de amortiguamiento. Por tanto, esto explica las oscilaciones presentes en la respuesta del control al momento de desplazar el efector final del brazo robótico.

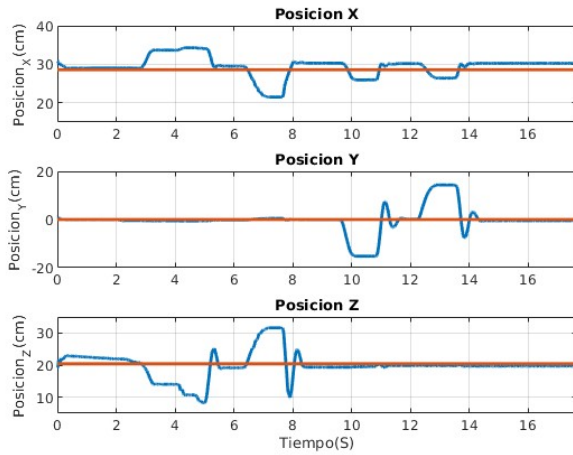


Fig. 8. Desplazamiento del efector final en X, Y, y Z con un $K = 25$ y $B = 0.5$

Asimismo, en la figura 8, se disminuye la constante de rigidez K a un valor de 25, por lo que se ve en la respuesta del control que el brazo robótico permite un desplazamiento mayor en el espacio operacional a diferencia de los casos anteriores. Además, es posible notar que en el desplazamiento en X no se llega a la posición deseada, debido a una rigidez menor.

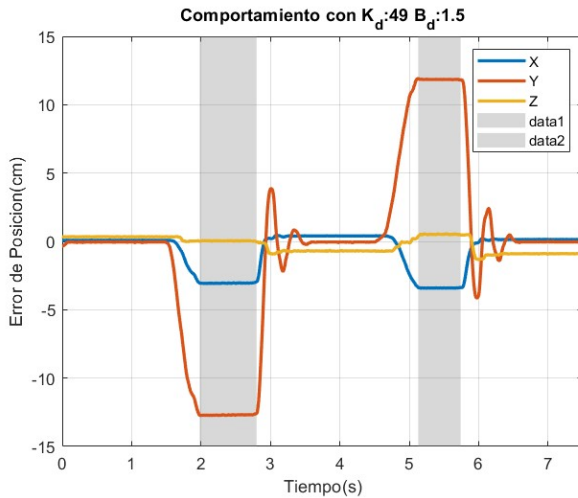


Fig. 9. Desplazamiento en el espacio operacional con regiones de acción sobre el efector final

Por último, se presenta en la figura 9 el comportamiento del robot con los parámetros del primer caso frente a dos acciones o desplazamientos aplicados en el efector final. Estas acciones ocurren en las regiones grises mostradas en la figura.

IV. CONCLUSIONES

- Se implementó efectivamente el control de impedancia para un brazo manipulador. Su comportamiento varió dependiendo de los parámetros de inercia, amortiguamiento

y rigidez. Cuando el amortiguamiento fue nulo, el comportamiento fue mas oscilatorio, y se noto la oposición al movimiento cuando la velocidad aumentaba más bruscamente, mientras que un parámetro mas alto permitía que el efector final retorne más rápido a su posición deseada. Por otro lado, el parámetro de de rigidez alto ofrecía resistencia al desplazamiento, mientras que una rigidez nula, permitía un desplazamiento sin casi oposiciones.

- Dado que la implementación utiliza un robot de tan solo 4 articulaciones, cuando la fuerza aplicada fue sobre el eje y, solo se notó el accionamiento de uno de lo motores y ocasionó que el eje x también exista pequeñas oscilaciones.
- Por otro lado, cuando la fuerza en otras de las articulaciones (no efector final), no tenía efecto sobre este, pues el control es el espacio operacional y no en el articular y el robot podía mover otras articulaciones en el espacio nulo.
- Para un trabajo futuro, se recomienda aplicar el control de impedancia en un prototipo de rehabilitación con las trayectorias deseadas.
- Como recomendación, se puede aplicar reinforcement learning para realizar estimación de los parámetros de inercia, damping y stiffness dependiendo de la posición del prototipo de rehabilitación..

REFERENCES

- [1] R. Mendoza, D. Torriceli, J. Huegel, J. Gordillo, J. Pons, and R. N. Soto, "An Adaptable Human-Like Gait Pattern Generator Derived From a Lower Limb Exoskeleton," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 6, 2019, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2019.00036>.
- [2] J. C. Perez Ibarra and A. A. G. Siqueira, "Impedance control of rehabilitation robots for lower limbs, review," in *Proc. 2014 Joint Conference on Robotics: SBR-LARS Robotics Symposium and Robocontrol*, 2014.
- [3] ROBOTIS e-manual," in ROBOTIS e-Manual, Accessed: 2023-11-30. [Online]. Available: <https://emmanual.robotis.com/docs/en/platform/openmanipulator>.
- [4] Semwal, V.B., Jain, R., Maheshwari, P. et al. Gait reference trajectory generation at different walking speeds using LSTM and CNN. *Multimed Tools Appl* 82, 33401–33419 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11042-023-14733-2>
- [5] Roveda, L., Maskani, J., Franceschi, P. et al. Model-Based Reinforcement Learning Variable Impedance Control for Human-Robot Collaboration. *J Intell Robot Syst* 100, 417–433 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10846-020-01183-3>