

## Control de impedancia basado en un modelo de toma de decisión

PORTILLO-VÉLEZ, Rogelio\*†, MARÍN-URÍAS, Luis, VÁZQUEZ-SANTACRUZ, J y PORRAGAS-BELTRÁN, Luis.

Recibido Abril 4, 2016; Aceptado Junio 6, 2016

### Resumen

En este trabajo se presenta un novedoso esquema de control de impedancia basado en un modelo de toma de decisión para un brazo robótico. La idea fundamental es generar una variación de la impedancia del manipulador robótico en tiempo real. Se asume que se ejerce una fuerza medible en el efector final la cual, en conjunto con el error cartesiano de seguimiento de trayectorias, permite tomar la decisión de aumentar o disminuir la impedancia del sistema de control. Para modelar el proceso de toma de decisión se consideró el modelo de toma de decisión Win-Stay Lose-Switch (WSLS). El desempeño del esquema de control propuesto se mide utilizando un índice de error de seguimiento de trayectoria. Para validar la efectividad del esquema de control, se presentan simulaciones numéricas para diversas condiciones de trabajo.

**Impedancia, Robótica, Rehabilitación, Toma de decisión**

### Abstract

This paper presents a novel impedance control scheme based on a decision-making model for a robotic arm. The fundamental idea is to generate a variation of the impedance of the robotic manipulator in real time. It is assumed that the patient has a measurable force on the end effector which, together with the Cartesian trajectory tracking error, can make the decision to increase or decrease the impedance of the control system. To model the decision-making process decision-making model Stay Win-Lose-Switch (WSLS) was considered. The performance of the proposed control scheme is measured using an error rate trajectory tracking. To validate the effectiveness of the control scheme, numerical simulations for different working conditions are presented.

**Impedance, Robotics, Rehabilitation, Decision Making**

**Citación:** PORTILLO-VÉLEZ, Rogelio, MARÍN-URÍAS, Luis, VÁZQUEZ-SANTACRUZ, J y PORRAGAS-BELTRÁN, Luis. Control de impedancia basado en un modelo de toma de decisión. Revista de Tecnología e Innovación 2016, 3-7: 22-30

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: rportillo@uv.mx)

†Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El control de fuerza para la interacción física de robots manipuladores se ha abordado usando el control de impedancia (Portillo, 2015). Tradicionalmente la impedancia de un robot manipulador es constante, lo cual impide una adecuada interacción robot-humano. El problema que se aborda en este trabajo es el control de impedancia de un dispositivo robótico. El control del dispositivo robótico pretende integrar modelos de toma de decisión, los cuales permitan que el robot pueda variar la rigidez del mismo dependiendo de la fuerza que se ejerza en el efector final del robot.

Han surgido varias propuestas las cuales implican el controlar la variación de la impedancia de un sistema robótico durante la interacción robot humano. Uno de ellos se centra en el control de la variación de impedancia en un manipulador redundante, KUKA LWR4, el cual es usado para que el mismo sea guiado por un humano al dibujar. El control del mismo fue diseñado para realizar acciones en cooperación con humanos, esto de forma que el operador mueve el efector final del robot en direcciones arbitrarias. La dinámica del efector final es modelada como un sistema masa-amortiguador. La meta de esta estrategia es variar el amortiguamiento y la masa del robot de forma que se adecúe al movimiento del operador durante la interacción física. La idea general fue la de variar el amortiguamiento de acuerdo a la velocidad cartesiana absoluta que presenta el efector final (Ficuciello, 2015). Otra propuesta, pero ahora aplicada totalmente a la rehabilitación y los movimientos terapéuticos surgió en Turquía.

Ésta consiste en replicar y automatizar los movimientos pasivos normalmente aplicados por un fisioterapeuta en la rehabilitación de la rodilla usando un método de impedancia variable, simulando que el terapeuta la aplicara, pero solo con la ayuda del robot. El método empleado consiste en modelar el brazo del terapeuta como un solo resorte y simplifica mucho el modelo. Existe una fase de aprendizaje donde se toman datos de posición y velocidad durante una terapia normal para después calcular los datos necesarios y poder ajustar la impedancia correctamente (Yalcın, 2014). Un acercamiento algo diferente es la de un robot usado para rehabilitación de extremidades inferiores el cual utiliza un control variable de impedancia basado en una estrategia de control de voltaje, de forma que la dinámica no lineal del robot de rehabilitación se puede tomar como una carga externa, debido a esto la ley de control no depende de la dinámica del robot y el controlador de impedancia es computacionalmente más simple (Khoshdel, 2015). Existen de igual manera otras propuestas diferentes a control de impedancia en rehabilitación. Un ejemplo es el propuesto para desarrollar un robot de rehabilitación de extremidades superiores después de un ataque cardíaco. La fuerza requerida es calculada por un algoritmo planificador de trayectorias. El control propuesto es similar al controlador de impedancia, aunque éste permite especificar la fuerza de referencia variable con el tiempo directamente (Erol, 2007).

Otro ejemplo es el robot GENTLE/s, utilizado para neurorehabilitación de pacientes que sufrieron un paro cardiaco. GENTLE/s permite que el paciente practique movimientos en los cuales tiene que llegar de un punto a otro en un ambiente tridimensional dentro de un ambiente háptico virtual. GENTLE/s provee de asistencia a los pacientes para moverse a las posiciones meta a lo largo de un camino predefinido, esto usando un control de admitancia (Loureiro, 2003). Una propuesta más reciente es la de desarrollar el control de un sistema robótico para asistir mediante rehabilitación a los pacientes que de igual manera sufrieron un paro cardiaco.

La meta es que la ley de control provee una fuerza asistida óptima variable en el tiempo en diferentes condiciones variables físicas y ambientales. Se propuso una red neuronal artificial (ANN) la cual ajuste automáticamente las ganancias de un controlador PI. La red neuronal se es entrenada con los parámetros de brazos humanos como entradas y las ganancias del controlador como salidas (Erol, 2005).

### Modelos matemáticos del robot

Sin pérdida de generalidad se considera un robot rígido con 3 grados de libertad rotacionales, su efector final se puede mover en un espacio cartesiano 2-dimensional con una orientación, por lo tanto también se tienen 3 grados de libertad cartesianos. El modelo de cinemática directa para el robot es un mapeo no-lineal  $F_{DK}: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$  dado por la ecuación (1).

$$\mathbf{x} = F_{DK}(\mathbf{q}) \quad (1)$$

El vector  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$  representa a la posición y orientación cartesiana del efector final del robot y el vector  $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^3$  contiene las posiciones de los eslabones del robot.

De manera similar el modelo de cinemática inversa de un robot es definido como el mapeo no-lineal  $F_{IK}: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$  dado por la ecuación (2).

$$\mathbf{q} = F_{IK}(\mathbf{x}) \quad (2)$$

Se considera que el manipulador tiene el modelo dinámico de la ecuación (3), con eslabones rígidos, sin fricción en sus uniones y con actuadores ideales, donde  $M(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^3$  representa a la matriz de inercia,  $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^3$  representa el vector de fuerzas centrífugas y de Coriolis,  $G(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^3$  es el vector de pares gravitacionales y  $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^3$  representa al vector de fuerzas y pares aplicados en las uniones mediante los actuadores.

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + G(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

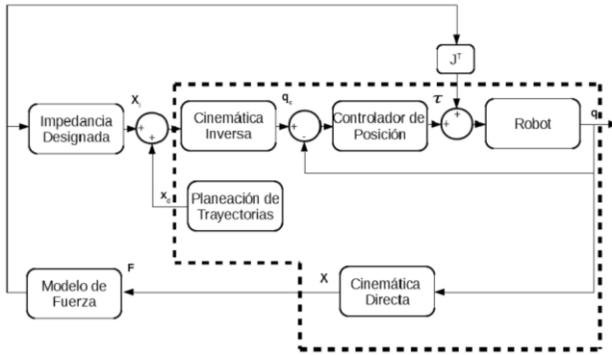
Los vectores  $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^3$  representan la posición, velocidad y aceleración de las articulaciones del robot manipulador.

### Controlador del robot

Se considera un Controlador Proporcional Derivativo (PD) (Kelly, 2005), es una ley de control que consta de un término proporcional al error de posición  $\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}$  y otro término proporcional a la derivada del error de posición  $\dot{\tilde{\mathbf{q}}} = \dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}}$ . La ley de control de un controlador PD está dado por la ecuación (4), donde  $K_p, K_v \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  son matrices diagonales definidas positivas y representan las ganancias del controlador en posición y velocidad, respectivamente.

$$\boldsymbol{\tau} = K_p \tilde{\mathbf{q}} + K_v \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \quad (4)$$

Los bloques interiores a la línea punteada en la figura 1 representan la implementación práctica de las ecuaciones (1) a (4). Se asume que la ley de control se implementa con un periodo de muestreo  $T$ .



**Figura 1** Esquema de control implementado sin toma de decisión (impedancia constante).

El bloque de planeación de trayectorias se encarga de brindar las trayectorias cartesianas deseadas  $x_d \in \mathbb{R}^3$ . El bloque de modelo de fuerza representa, ya sea un modelo matemático para la fuerza ejercida en el efector final o la medición directa de la fuerza por medio de un sensor. El bloque de impedancia designada representa típicamente una ecuación diferencial de segundo orden (5), donde  $D, B, K \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  son matrices diagonales de masa, amortiguamiento y rigidez, (Portillo, 2015).

$$D\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = F \tag{5}$$

**Modelos de toma de decisión**

La toma de decisiones ha sido objeto de estudio en la ciencia cognitiva desde hace algunos años. El modelo que se abordará es el de Win-Stay Lose Switch (Gana quédate, pierde cambia), éste es una regla para tomar decisiones binarias basadas en recompensas anteriores, se ha utilizado anteriormente en diversas áreas como psicología, teoría de juego, estadística, y estudio de máquina (Corredor, 2016). De igual forma ya existen propuestas para integrar los modelos de toma decisión en tareas de robótica, por ejemplo, en una excavación robótica supervisada por el ser humano (Cao, 2008).

Las investigaciones actuales de la interacción humano-robot deja claro que la integración de la dinámica de toma de decisión humana-robot debe tomar las ventajas de la fuerte toma de decisión de los humanos y de los agentes robóticos. En una investigación anterior se propuso una tarea de toma de decisión humano-robot, la cual está asociada a una tarea compleja en la cual el rol del humano puede estar mapeado en una tarea de dos alternativas (two-alternative forced choice task). El ambiente propuesto es un problema de búsqueda que emplea robots supervisado por un humano, donde tanto el humano como el robot trabajan en forma conjunta para maximizar el número de recursos encontrados. Cabe mencionar que ser un sistema completamente automatizado, este podría fallar. Se empleó un el modelo de toma de decisión humana Win-Stay, Lose Switch (WSLS) junto con el modelo de two-alternative forced choice Task (Cao, 2008).

Se define  $x(kT) \in \{A, B\}$  como la decisión binaria de A o B en un tiempo específico  $kT$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ), se considera una ventana de  $N$  decisiones anteriores. La variable  $T$  representa el tiempo de muestreo en el que se toman las decisiones.

En la ecuación (6) se define  $y(kT)$  como el número de veces que se eligió la opción A en las últimas  $N$  pruebas.

$$y(kT) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_{iA}(t) \tag{6}$$

Donde:

$$\delta_{iA}(kT) = \begin{cases} 1 & \text{si } x(kT) = A \\ 0 & \text{si } x(kT) = B \end{cases}$$

Cabe mencionar que  $y(kT)$  solo puede tomar valores de un set de valores finitos de  $N + 1$  valores discretos:

$$\gamma = \{jc, j = 0, 1, \dots, 20\}$$

Donde:

$$c = \frac{1}{N}$$

La recompensa en un tiempo  $kT$  es definida como:

$$r(kT) = \begin{cases} f_A & \text{si } x_1(kT) = A \\ f_B & \text{si } x_2(kT) = B \end{cases} \quad (7)$$

Las funciones que se proponen para establecer la recompensa son de tipo lineal:

$$\begin{aligned} f_A &= k_A y(kT) + c_A \\ f_B &= k_B y(kT) + c_B \end{aligned}$$

Donde  $k_A$  y  $k_B$  son pendientes y  $c_A$  y  $c_B$  son terminos constantes de las dos curvas de recompensa.

El modelo WSLS asume que solo se tiene conocimiento de las recompensas de las dos decisiones anteriores y establece que un cambio en eleccion se hace cuando la recompensa decrece. Por lo tanto la dinámica de cambio de opción en el proceso de toma de decisión sigue la dinámica de la ecuación (8), donde  $\bar{x}$  se refiere al operador NOT.

$$x((k+1)T) = \begin{cases} x(kT) & \text{si } r(kT) \geq r((k-1)T); \\ \bar{x}(kT) & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (8)$$

### Variación de la impedancia en línea

El modelo de toma de decision WSLS se puede aplicar en conjunto con el control de impedancia.

El objetivo del esquema de control propuesto en este trabajo es variar el valor de la rigidez  $K$  del modelo de impedancia de la ecuacion (5) por medio de un proceso dinamico de toma de decisiones modelado por las ecuaciones (6)-(8).

En un tiempo determinado  $kT$ , dependiendo del valor binario de la decision  $y(kT)$  se puede modificar el valor  $K$  de rigidez del sistema masa-resorte amortiguador modelado para el brazo robotico en la ecuación (5), de forma que el modelo de toma de decision WSLS debe de cambiar la rigidez inteligentemente, dependiendo de los resultados de un numero determinado de decisiones tomadas anteriormente.

Para lograr la variación de la impedancia se plantea establecer la rigidez  $K$  de la ecuación (5) donde  $K_0$  representa una matriz inicial de rigidez y  $\Delta K$  representa un valor de incremento (o decremento) predeterminado.

$$K = K_0 \pm \Delta K \quad (9)$$

La medición de fuerza indica que el robot se encuentra en contacto con el operador o algún agente externo. Esta fuerza causará un error de seguimiento de trayectorias cartesianas  $\mathbf{e}_c = \|\mathbf{x}_d - \mathbf{x}\|$  que se utiliza para determinar el signo positivo o negativo de  $\Delta K$  en la ecuación (9). La relación entre el proceso de toma de decisión y la variación de impedancia se establece como sigue. Si el error de seguimiento  $\mathbf{e}_c$  es mayor que una tolerancia de error  $s$  se considera una decisión A, si el error de seguimiento  $\mathbf{e}_c$  es menor o igual a la tolerancia de error  $s$  se considera una decisión B. Con lo anterior la dinámica del proceso de toma de decisión establecida por las ecuaciones (6)-(8). Lo anterior se resume en la ecuación (10), la cual complementa el esquema de toma de decisión. Su efecto será rigidizar el comportamiento del robot cuando el error de seguimiento sea mayor que  $s$ .

$$x(kT) = \begin{cases} A & \text{si } \mathbf{e}_c > s \\ B & \text{si } \mathbf{e}_c \leq s \end{cases} \quad (10)$$

La figura 2 muestra la implementación práctica del esquema de control propuesto. Se agregan los bloques de error cartesiano y del proceso de toma de decisión para modificar la rigidez  $K$  de la ecuación (5).

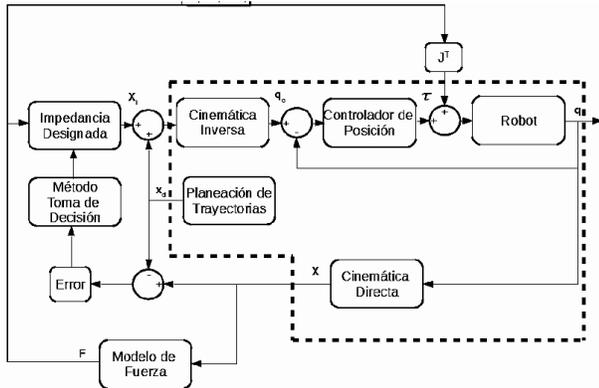


Figura 2 Esquema de control con toma de decisión implementado (impedancia variable).

Con el esquema de variación de impedancia propuesto se pretende lograr transmitir hacia el robot la decisión que toma el humano sobre si seguir una trayectoria modificarla ejerciendo una fuerza en el efector final. En el nuevo esquema de control, podemos observar que se calcula un error cartesiano a partir de la cinemática directa del manipulador. A partir de este error y del modelo de recompensa de la (7), se toma la decisión de variar la impedancia del sistema, de forma que la variable  $K$  de la ecuación (5) aumentara o disminuya su valor según la dinámica establecida por las ecuaciones (6)-(10). La trayectoria resultante de dicha variación de impedancia se suma con la trayectoria deseada, de forma que se obtiene la trayectoria comandada al manipulador.

**Resultados**

Se modeló en Solidworks un prototipo de brazo robotico que tiene 3 grados de libertad, figura 3. Se diseñó el brazo lo mas simple posible, esto significa, omitiendo detalles como tornillos, tuercas, etc.

De igual forma se mantuvo la menor cantidad de relaciones de posición posibles, de forma que se eliminaran las que fueran redundantes y se buscó la manera de que una relación pudiera sustituir a otras dos relaciones.

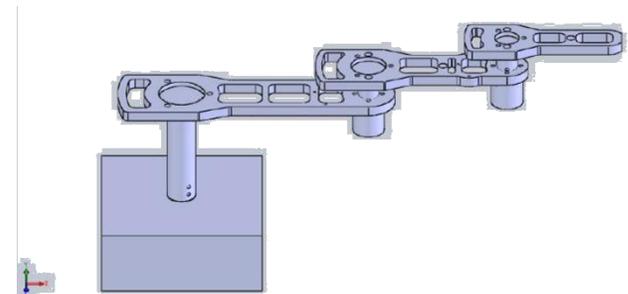


Figura 3 Robot manipulador empleado en las simulaciones.

Para realizar una simulación en SimMechanics de Matlab, sin el esquema de variación de impedancia, se programó una fuerza en las dos direcciones cartesianas  $\{x,y\}$  con valor  $F_x = 10\sin(t)$ ,  $F_y = 10\sin(t)$  aplicadas a la ecuación (5). La figura 4 muestra la trayectoria generada cuando la fuerza se aplica y se considera impedancia constante. La figura 5 muestra el error cartesiano  $e_c$  en el mismo caso, es decir, sin considerar el modelo de toma de decisión para variar la impedancia. La trayectoria deseada es un círculo en el espacio cartesiano.

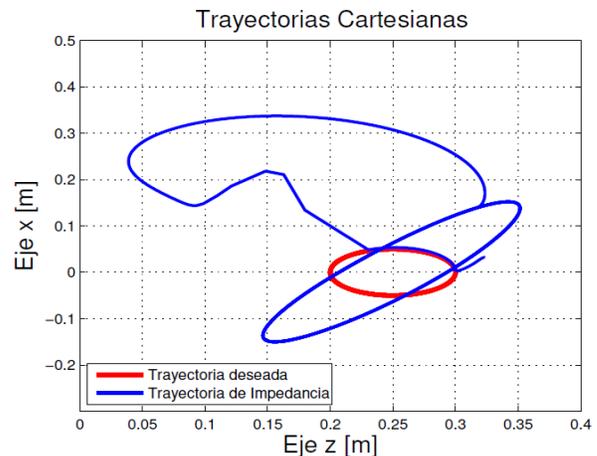


Figura 4 Trayectoria cartesiana generada con impedancia constante (Sin toma de decisión)

Para el modelo de toma de decision considerado la variable relevante es el número de toma de decisiones  $N$ . Por otra parte, el esquema de simulacion se implemento utilizando un metodo numerico que se ejecuta cada determinado tiempo de muestreo  $T$ , el cual representa otro parametro de relevancia para evaluar el desempeño del esquema de control propuesto. En el modelo de impedancia el parametro que se decidio variar fue la rigidez  $K$ , a traves de la variable de  $\Delta K$ . El efecto del cambio en estas 3 variables se estudio considerando una tolerancia de error  $s=0.005$  [m]. Se realizaron simulaciones numéricas para determinar los valores adecuados de las variables  $N=40$ ,  $T=0.055$  y  $\Delta K = 100$ .

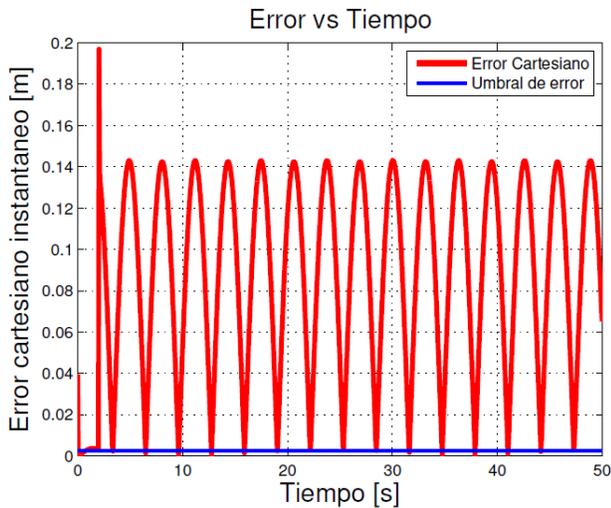


Figura 5 Error cartesiano (Sin toma de desicion)

La figura 6 muestra los resultados de seguimiento cartesiano (para la misma trayectoria circular deseada) de una simulación con la misma fuerza  $F_x = 10\sin(t)$ ,  $F_y = 10\sin(t)$  en el efector final del robot, y considerando la variación de impedancia con los parámetros mencionados arriba. Se observa un seguimiento mucho mejor que en el caso de impedancia constante (Sin toma de desición).

La figura 7 presenta el error cartesiano. Se aprecia una considerable disminución, consistente con el objetivo del esquema de control planteado en este trabajo.

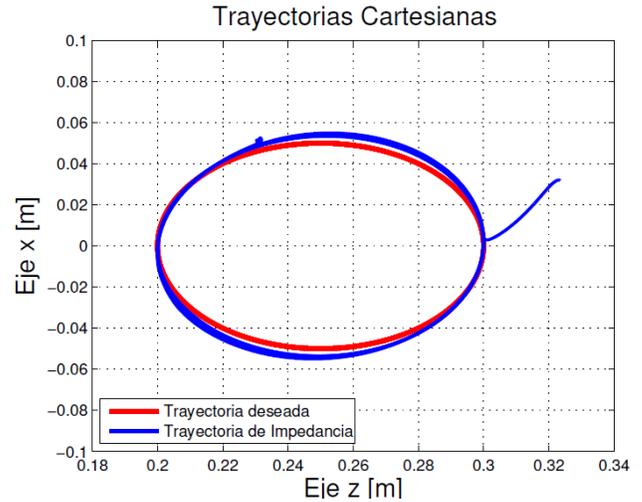


Figura 6 Trayectoria cartesiana generada con impedancia constante (Con toma de desicion)

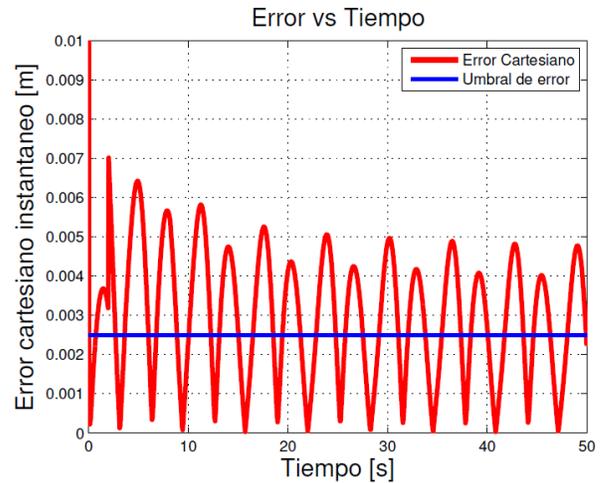
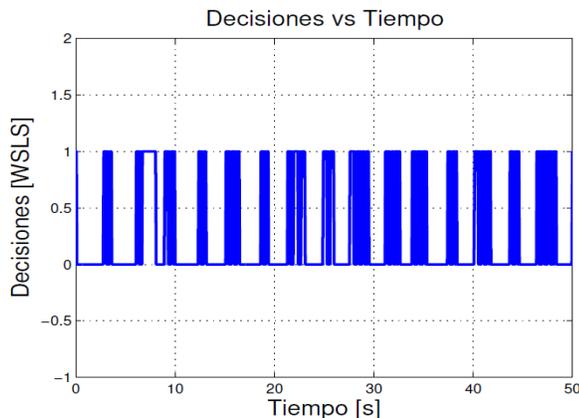


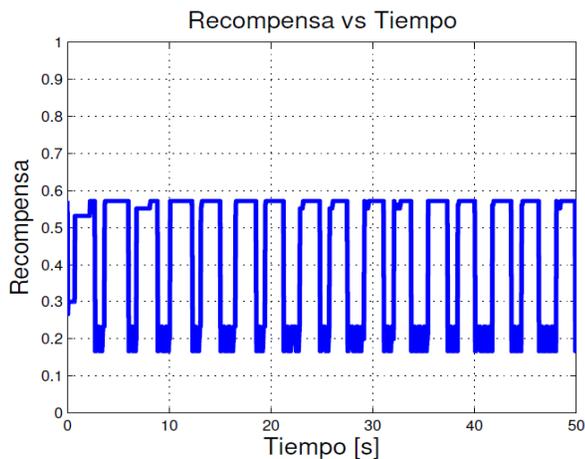
Figura 7 Error cartesiano (Con toma de desicion)

Las figuras 8 muestra la variación en la toma de desiciones y la recompensa, es decir, la forma en que la ecuaciones (6)-(10) establecen la dinámica de toma de desiciones. Se observa un comportamiento de tipo ciclo límite, como el que se describe en (Cao, 2008).

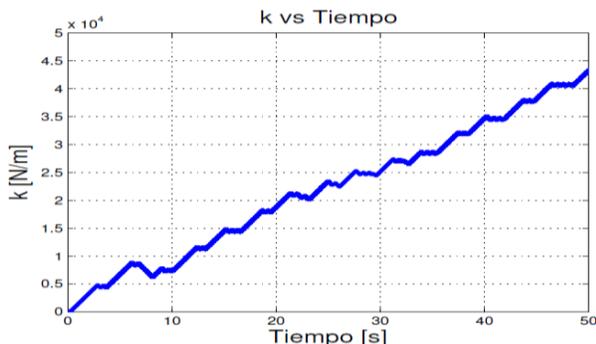
La figura 10 muestra la variación de la rigidez  $K$  del manipulador. Se observa un crecimiento sostenido, que es consistente con la necesidad de mantener el error por debajo del límite  $s=0.005$  [m].



**Figura 8** Decisiones tomadas en el experimento.



**Figura 9** Variación de la función de recompensa.



**Figura 10** Variación de la rigidez  $K$  (impedancia) para el experimento con toma de decisiones.

## Agradecimientos

El primer autor agradece el apoyo brindado por la SEP a través del proyecto PRODEP UV-PTC-798, con oficio DSA/103.5/15/7127.

## Conclusiones

El modelo de variación de impedancia propuesto para el brazo robotico para rehabilitación es válido bajo las circunstancias de simulación y experimentación en las que se llevo a cabo. Por lo tanto, es posible variar la impedancia del sistema robotico utilizando como base un Modelo de Toma de Decisión. El sistema robotico aumenta o disminuye la ganancia de forma que disminuye el error de seguimiento del mismo al existir una fuerza externa sobre su efector final. Existe todavía incertidumbre en el método empleado para la toma de decisión. Existen otros modelos de toma de decisión más complejos, incluso basados en métodos probabilísticos. Como trabajo futuro, es necesario investigar si dichos métodos o algún otro es más conveniente. Además es necesario averiguar las condiciones para las cuales la variación de la impedancia mantiene la estabilidad del sistema completo en lazo cerrado.

## Referencias

Portillo-Velez R., Rodriguez-Angel A., and Cruz-Villar C. An optimization-based impedance approach for robot force regulation with prescribed force limits. *Mathematical Problems in Engineering* [online] Available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/918301>, pages 1–13, 2015 [Accessed 1 Apr. 2016].

Ficuciello F., Villani L. and Siciliano B. Variable Impedance Control of Redundant Manipulators for Intuitive Human–Robot Physical Interaction. *IEEE Transactions on Robotics*. Vol. 31 (4), pp. 1-14, 2015.

Yalcin B., Akdoğan E., and Tufekci C. International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers, Vol. 3 (1), pp. 27-31, 2014.

Khoshdel A. Akbarzadeh and H. Moeenfard. Variable impedance control for rehabilitation robot using interval type-2 fuzzy logic. International Journal of Robotics, Vol. 4 (3), pp. 46-54, 2015.

Erol D. Design of an Intelligente Control Architecture for Rehabilitation Robotics. PhD thesis, Vanderbilt University, 2007.

Loureiro R., Amirabollahian F., Topping M., Driessen B., and Harwin W. Upper limb robot mediated stroke therapygentle/s approach. Autonomous Robots, Vol. 15, 2003.

Erol D., Mallapragada V., Sarkar N., Uswatte G. and Taub E. A new control approach to robot assisted rehabilitation. Proceedings of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005.

Cao M., Stewart A., and Leonard N. Integrating human and robot decision-making dynamics with feedback: Models and convergence analysis. Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control., 2008.

Corredor J. Decision making model in a haptic assistance. Technical University of Munich, Internal Report, 2012.

Rafael Kelly and Victor Santibañez. Control de Movimiento de Robots Manipuladores. Pearson Educación, 2003.