

DISEÑO Y CONTROL DE ACTUADORES BASADOS EN MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA

Estibalitz Asua, Victor Etxebarria y Alfredo García-Arribas

Departamento de Electricidad y Electrónica, Facultad de Ciencia y Tecnología, UPV/EHU
bcbasure@ehu.es, victor@we.lc.ehu.es, alf@we.lc.ehu.es

Resumen

Los actuadores basados en aleaciones con memoria de forma (SMA) son atractivos candidatos para ser utilizados como mecanismos de actuación en micromáquinas y robots ligeros. No obstante, la dificultad de controlar con precisión la proporción austenita-martensita en su transformación de fase estructural, conlleva que estos materiales se utilicen principalmente como actuadores “todo o nada”. En este trabajo se presenta una estrategia de control en lazo cerrado capaz de controlar con precisiones en torno a la micra la contracción y relajación de este tipo de materiales, y se propone un actuador basado en un hilo de nitinol que funcionará como garra en un robot ligero.

Palabras clave: SMA, actuadores micrométricos, redes neuronales.

1 INTRODUCCIÓN

Las aleaciones con memoria de forma (SMA-s) son materiales que experimentan una transición de fase estructural debido a agentes externos (esfuerzos y/o temperatura). Este cambio de fase, induce cambios en su forma, particularmente en su longitud si la aleación tiene forma de hilo. Debido a esta propiedad, un actuador basado en estas aleaciones puede reducirse a un único elemento SMA, por ejemplo, un hilo activado eléctricamente, lo que supone una importante ventaja, sobre todo si tenemos en cuenta la progresiva miniaturación de la tecnología y la necesidad de desarrollar dispositivos ligeros y de pequeño tamaño, capaces de proporcionar grandes fuerzas y/o realizar desplazamientos precisos, con alta rapidez de respuesta y energéticamente eficientes [13].

Desde el descubrimiento del Nitinol (aleación con memoria de forma Níquel-Titanio), se ha incrementado el número de mecanismos de actuación basados en SMA-s con aplicaciones en diversos campos, como son, medicina, ámbito aeroespacial, automóvil... No obstante, tradicionalmente estos materiales se emplean como actuadores electro-

mecánicos de “todo o nada”, fundamentalmente por la dificultad de controlar de manera fina la proporción austenita-martensita en su transformación de fase estructural. Esta transformación es no lineal y presenta naturaleza histerética, por ello, un control preciso de posición o fuerza requiere el uso de controladores no triviales.

La solución ideal para controlar de forma precisa estos materiales consiste en desarrollar un modelo de su comportamiento termo-mecánico, basado en modelos matemáticos que ya han sido analizados [14], como se ha realizado para otros materiales [15]. A partir de este modelo se podría experimentar un modelo inverso, de tal forma que la histéresis quedara compensada y el sistema completo no presentara no linealidades. No obstante, no es sencillo obtener buenos modelos de las transiciones de fase que puedan ser utilizados en lazos de control.

En el pasado se han propuesto diferentes modelos del comportamiento histerético de estos materiales, desde modelos lineales [3, 7, 12], hasta modelos no lineales más precisos, siendo uno de los modelos más conocidos el modelo Preisach [8, 9]. Actualmente se proponen dos nuevos modelos histeréticos, el primero se basa en considerar la histéresis como un retraso de fase [4, 5], y el segundo propone el modelo Bouc-Wen como solución para caracterizar histéresis suaves [10, 11].

A pesar de sus propiedades altamente no lineales, estos materiales han sido controlados mediante técnicas de control diversas [13], pero tanto los modelos, como las estrategias de control, han sido analizados teóricamente y/o mediante simulaciones. Son pocos los que consideran actuadores reales e implementan un método de control para los mismos [6, 13, 16].

En este trabajo se propone el uso de un hilo de Nitinol como actuador más versátil y se exploran las posibilidades reales de utilizar SMA-s como actuadores de precisión. Tras haber implementado diferentes métodos de control capaces de controlar micrométricamente la posición y velocidad de estos materiales [1], se muestran los resulta-

dos obtenidos con la estrategia más adecuada y se demuestran experimentalmente las mejoras que supone el introducir dentro del lazo de control un método de compensación de la histéresis basado en una red neuronal.

Una vez analizadas las posibilidades reales de utilizar estos materiales como actuadores micrométricos, se ha diseñado un prototipo de actuador basado en SMA-s, concretamente, una garra para un robot ligero. Se pretende implementar sobre este actuador la estrategia de control citada, pero, debido al propio dispositivo, se debe sustituir el sensor de posición utilizado anteriormente (LVDT) por uno más ligero. Con ese fin, este trabajo finaliza analizando la posibilidad de utilizar galgas extensiométricas o la propia resistencia del hilo como sensor.

2 DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES

A lo largo de este trabajo se emplean fundamentalmente dos dispositivos experimentales. El primero se utiliza para desarrollar diferentes estrategias de control y seleccionar la más adecuada y el segundo, es una primera aproximación de un actuador basado en SMA-s.

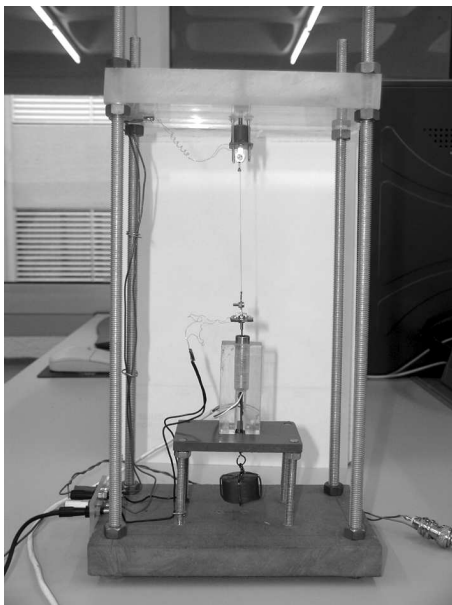


Figura 1: Plataforma experimental basada en SMA-s.

2.1 Plataforma experimental basada en SMA-s

El dispositivo experimental se muestra en la figura 1. El hilo de Nitinol de 75 mm de longitud y 0.15 mm de diámetro está suspendido ver-

tualmente de un soporte fijo y el extremo inferior del mismo está unido al núcleo de un LVDT, que proporciona una tensión proporcional al desplazamiento del hilo al contraerse y relajarse. Además, del hilo cuelga una pesa de aproximadamente 60 gramos que realiza la fuerza de deformación necesaria para que recupere su longitud original. El hilo se calienta por el efecto Joule cuando por él atraviesa una corriente proporcionada por una fuente de corriente controlada mediante el ordenador. Todas las señales son medidas utilizando la tarjeta de adquisición de datos 6025E de National Instruments de 12 bits, lo que supone que la resolución instrumental del dispositivo experimental sea de $1\text{ }\mu\text{m}$ aproximadamente.

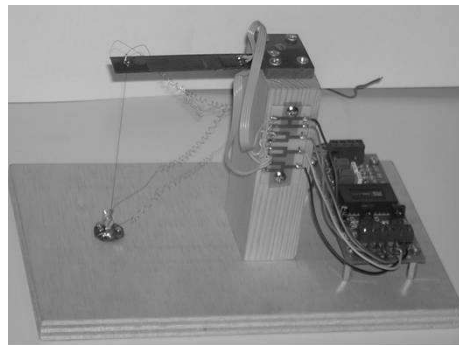


Figura 2: Prototipo de actuador basado en SMA-s.

2.2 Prototipo de actuador basado en SMA-s

El dispositivo experimental se muestra en la figura 2. El extremo inferior del hilo está fijo en la base del dispositivo, mientras que el extremo superior está suspendido de una lámina metálica, de tal forma que la contracción del hilo produce una flexión de la lámina. El hilo se contrae al calentarse por el efecto Joule cuando por él atraviesa una corriente proporcionada por una fuente medidora "SourceMeter" de Keithley modelo 2802, comunicada mediante una tarjeta PCI-GPIB con el ordenador y controlada por el mismo. La flexión de la lámina se mide empleando las galgas extensiométricas, cuya señal se recoge en un puente de galgas y junto con las medidas tomadas con la fuente medidora, se analizan en el programa realizado con el software de aplicación LabVIEW [2].

3 RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 Control micrométrico de posición y velocidad de SMA-s

La principal dificultad de control de las aleaciones con memoria de forma es la histéresis que aparece

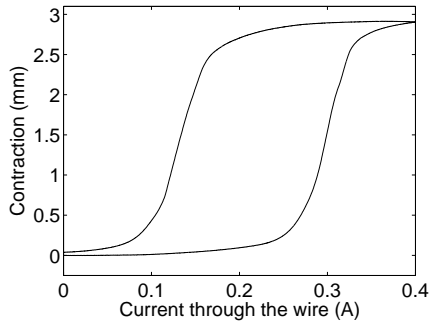


Figura 3: Histéresis experimental que presenta un hilo de Nitinol.

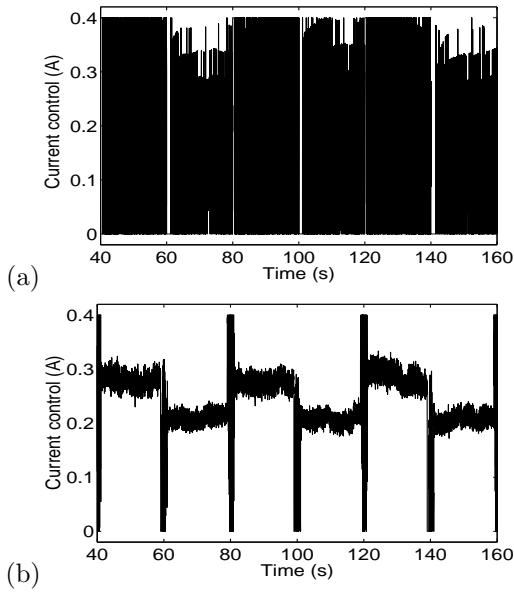


Figura 4: Señal de control necesaria ante una señal de referencia cuadrada utilizando el método de control a) PI con antiwindup; y b) PI con antiwindup combinado con una red neuronal entrenada.

al producirse la transición de fase estructural. La figura 3 muestra un ejemplo de histéresis que presenta un hilo de Nitinol de aproximadamente 75 mm de longitud y 0.15 mm de diámetro.

Tras implementar sobre el dispositivo experimental mostrado en la figura 1 diferentes estrategias de control capaces de controlar micrométricamente la posición (referencia cuadrada) y velocidad de contracción y relajación (referencia rampa) de estos materiales, se analizan los resultados experimentales obtenidos, y se deduce que un controlador PI con antiwindup es el que presenta los mejores resultados. Con este método de control de estructura variable es posible obtener errores de posición cercanos a $4 \mu\text{m}$, aunque la histéresis del sistema implica grandes esfuerzos de la señal de control para corregir pequeños errores.

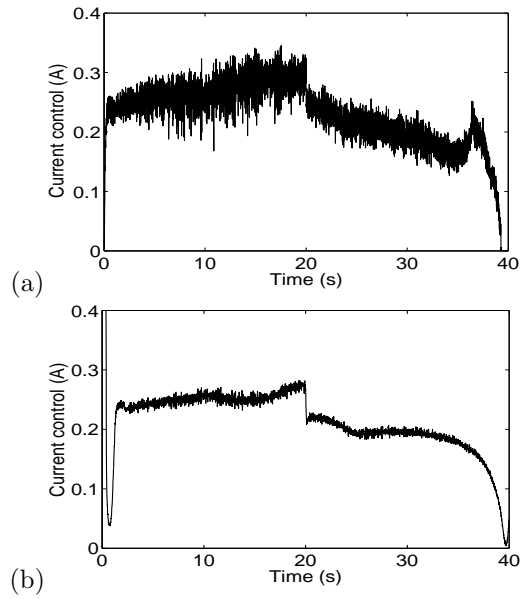


Figura 5: Señal de control necesaria ante una señal de referencia rampa utilizando el método de control a) PI con antiwindup; y b) PI con antiwindup combinado con una red neuronal entrenada.

Estos esfuerzos pueden ser mejorados incluyendo los efectos de la histéresis en el esquema del control no lineal (comparar las imágenes a) y b) de las figuras 4 y 5). Se ha demostrado experimentalmente que si se inserta en el lazo cerrado de control una red neuronal entrenada off-line para caracterizar la histéresis inversa, el error de posición está en torno a $2-3 \mu\text{m}$, cerca del error instrumental (ver figuras 6 y 7), con la ventaja de que no se necesita gran esfuerzo de la señal de control para obtenerlo, lo que implica mayor fiabilidad y menor deterioro del dispositivo de posicionamiento.

3.2 Garra para un robot ligero basada en SMA-s

Una vez analizadas las posibilidades reales de utilizar estos materiales como actuadores micrométricos, se ha diseñado un prototipo de actuador basado en SMA-s, concretamente, una garra para un robot ligero (ver figura 8) y se tratará de implementar la estrategia de control anterior para posicionarlo micrométricamente. No obstante, como paso intermedio, y en primera aproximación, se ha diseñado el prototipo de actuador mostrado en la figura 2, cuyo fundamento es similar al de la garra, pero con la ventaja de trabajar con una única lámina metálica, de modo que pueda estudiarse el control de deflexión de dicha lámina de una forma más sistemática. Los resultados que se obtengan con este dispositivo darán idea del posible uso de la garra.

Hasta ahora, se había utilizado un LVDT

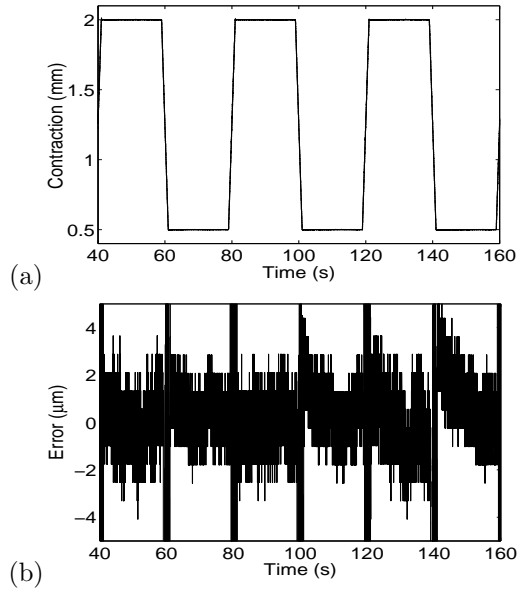


Figura 6: Control PI con antiwindup combinado con el método de compensación basado en redes neuronales ante una señal de referencia cuadrada: a) Contracción, b) error.

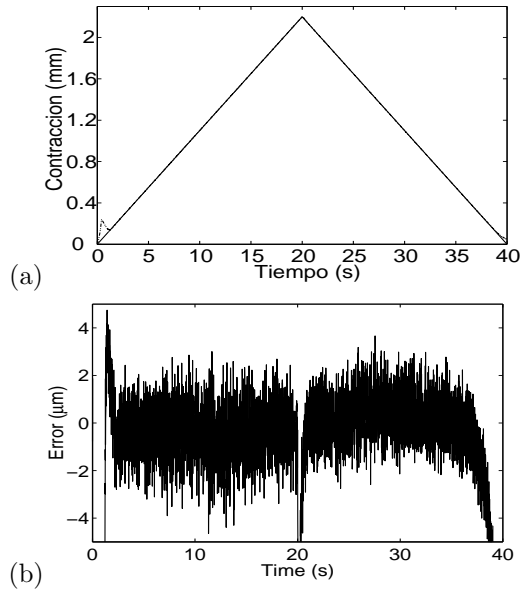


Figura 7: Control PI con antiwindup combinado con el método de compensación basado en redes neuronales ante una señal de referencia rampa: a) Contracción, b) error.

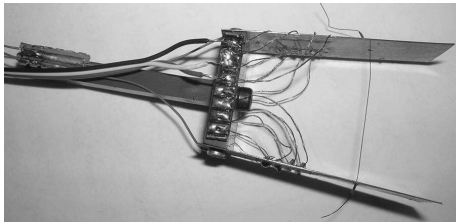


Figura 8: Prototipo de una garra para un robot ligero basada en SMA-s.

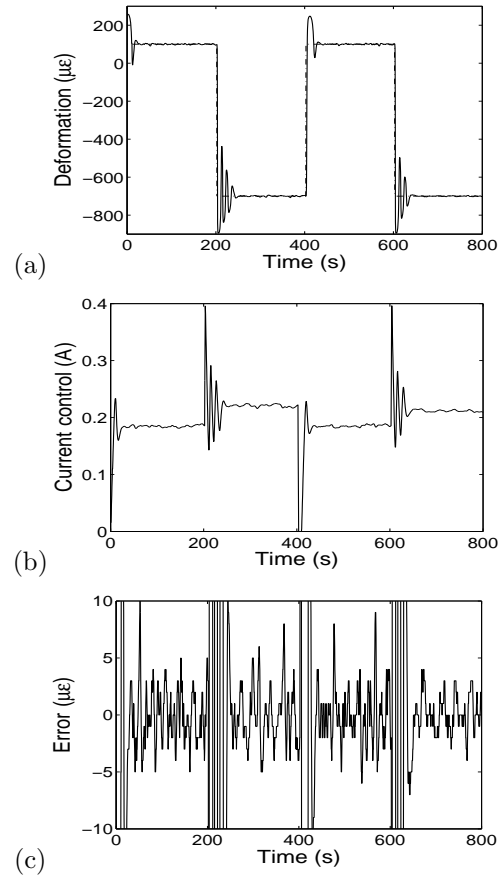


Figura 9: Control PI ante una señal de referencia cuadrada: a) Contracción, b) señal de control, c) error.

como sensor de posición para poder medir el encogimiento del hilo. Lógicamente, debido principalmente a su tamaño y peso, si se desean utilizar estos actuadores en aplicaciones reales de robótica ligera, este sensor debe ser sustituido. En este trabajo se analiza la posibilidad de utilizar galgas, o la propia resistencia del hilo como sensor, es decir, un control “sensorless”.

3.3 Control de deformación de un actuador basado en SMA-s

Las galgas ubicadas en la lámina flexionada por la fuerza de recuperación que ejerce el hilo de Nitinol al encogerse, permiten hacer un control de deformación de la misma. La figura 9 muestra la respuesta del sistema ante una entrada cuadrada, señal que representa una flexión y deflexión periódica de la lámina entre dos niveles intermedios. Utilizando un controlador sencillo PI, se obtiene un error en el permanente entorno a 5 microdeformaciones ($\mu\epsilon$). Teniendo en cuenta que la flexión máxima de la lámina es de 1170 $\mu\epsilon$, el error en el permanente está en torno al 0.4 %.

Lo que actualmente se pretende analizar es la pérdida de precisión que supone sustituir el LVDT por las galgas extensométricas. Se desea conocer la relación entre la deformación proporcionada por las galgas y la posición del extremo de la lámina metálica. Para ello, actualmente estamos ensayando dos métodos: por una parte se añade al dispositivo un sensor inductivo cuya salida es proporcional al movimiento del extremo de la varilla; y por otra, se utilizan las ecuaciones de Euler-Bernoulli para calcular matemáticamente esa relación. A pesar de que todavía no se han obtenido unos resultados definitivos, puede apreciarse que ese error de deformación podría suponer un error de posición de en torno a 10 micras.

3.4 Análisis de la resistencia de un hilo de Nitinol debido a la transformación de fase

La resistencia del hilo de Nitinol varía al producirse la transición de fase estructural. La figura 10 muestra esta variación en función de la corriente que atraviesa el hilo, y como se puede deducir de la figura 11, la relación resistencia-contracción es no lineal, lo que dificulta el uso de la resistencia como sensor. Además, para deducir la contracción del hilo, no basta con conocer la resistencia en ese mismo instante, sino que se deben conocer valores previos de la resistencia (esto es: el sistema posee memoria).

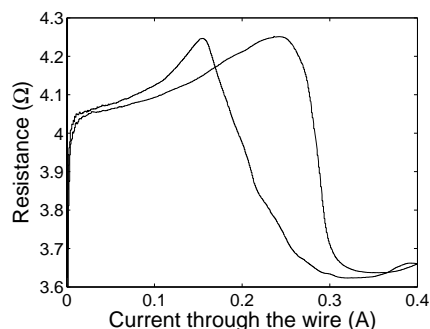


Figura 10: Variación de la resistencia al producirse la transición de fase estructural.

No obstante, al igual que se ha realizado anteriormente para relacionar la contracción con la corriente que atraviesa el hilo, se podría entrenar una red neuronal para caracterizar la curva contracción vs resistencia, de tal forma que un lazo de control como el representado en la figura 12 permitiría un control “sensorless” del sistema, es decir, que el propio hilo funcionase como sensor y actuador a la vez. Esta línea de trabajo se encuentra actualmente en curso.

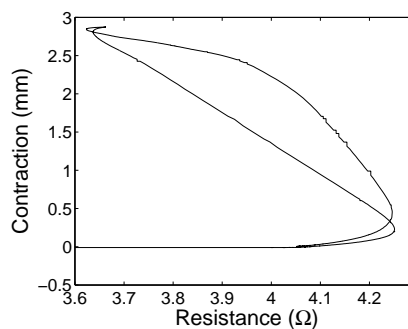


Figura 11: Relación entre la resistencia y la contracción del hilo.

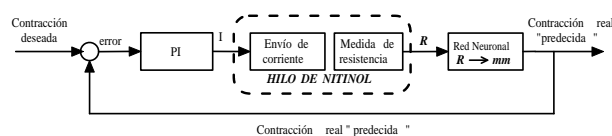


Figura 12: Esquema simplificado de un control “sensorless”.

4 CONCLUSIONES

Con este trabajo se demuestra que, a pesar de la característica histerética y no lineal de la transición de fase que presentan las aleaciones con memoria de forma, los hilos SMA apropiadamente controlados, son serias alternativas para ser utilizados como mecanismos de actuación. Se ha demostrado experimentalmente que con una red neuronal entrenada para implementar la histeresis inversa, combinada con la sencilla estrategia de control proporcional-integral con antiwindup se obtienen precisiones cercanas a la micra, y además, no se requieren grandes esfuerzos de la señal de control para conseguirlos, lo que implica mayor fiabilidad y menor degradación del actuador.

Se ha diseñado un actuador basado en SMA-s, y se ha analizado la posibilidad real de utilizarlo como garra en un robot ligero. La precisión en el control de estos actuadores está fuertemente ligada al sensor que se utilice, por ello, se estudia la posibilidad de utilizar galgas o la propia resistencia del hilo como sensor, y se muestran los problemas que surgen al utilizar cada una de ellas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la CICYT por la financiación parcial de este trabajo a través del proyecto DPI2005-03121. También agradecen al Gobierno Vasco por la beca predoctoral BFI05.283 y por la financiación recibida a través del proyecto ACTI-MAT. La garra se ha diseñado en colaboración con Robotiker-teknalia.

Referencias

- [1] Asua, E., Exebarria, V. and García-Arribas, A., (2006) "Micropositioning control using shape memory alloys", Proceedings of IEEE Conference on Control Applications CCA 2006, pp 3229-3234, Munich, Germany.
- [2] Asua, E., Exebarria, V. and García-Arribas, A., (2007) "Control micrométrico de posición basado en SMA-s", Foro tecnológico sobre instrumentación virtual NIDays 2007, Bilbao, Spain.
- [3] Baz, A., Imam, K. and McCoy J., (1990) "Active vibration control of flexible beams using SMA", Journal of Sound and Vibration, n.4, pp 437-456.
- [4] Cruz-Hernández, J.M. and Hayward, V., (2001) "Phase Control Approach to Hysteresis Reduction", IEEE Trans. on Control Systems Technology, vol.9, n.1, pp 17-26.
- [5] Cruz-Hernández, J.M. and Hayward, V., (1998) "An Approach to Reduction of Hysteresis in Smart Material", Proceedings of the 1998 IEEE, International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgium.
- [6] Grant, D. and Hayward, V., (1997) "Variable Structure Control of Shape Memory Alloy Actuators", IEEE Systems and Control Magazine, vol.17, n.3, pp 80-88.
- [7] Hashimoto, M., Takeda, M., Sagawa, H., Chiba, J. and Sato, K., (1985) "Shape Memory Alloy and Robotic Actuators", Journal of Robotic System", vol.2, n.1, pp 3-25.
- [8] Hughes, D. and Wen, T.J., (1995) "Preisach modeling and compensation for smart material hysteresis", SPIE, Active Materials and Smart Structures, vol. 2427, pp 50-64.
- [9] Hughes, D. and Wen, T.J., (1995) "Preisach modeling of a piezoceramic and shape memory alloy hysteresis", IEEE Conference on Control Applications, pp 1086-1091.
- [10] Ikhoulane, F., Mañosa, V. and Rodellar, J., (2006) "Adaptive control of a hysteretic structural system, Automatica, vol.41, pp 25-231.
- [11] Ikhoulane, F., and Rodellar, J., (2006) "A Linear Controller for Hysteretic Systems", IEEE Transactions on automatic control, vol.51, n.2, pp 340-344.
- [12] Kuribayashi, K., (1986) "A new actuator of a joint mechanism using NiTi alloy wire", International Journal of Robot Research, vol.4, n.4, pp 47-58.
- [13] Lee, C. and Mavroidis, C., (2002) "Analytical Dynamic Model and Experimental Robust and Optimal Control of Shape-Memory-Alloy Bundle Actuators", Proceedings of the 2002 Symposium on Advances in Robot Dynamics and Control, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New Orleans, LA, USA.
- [14] Mayergoyz, I., (2003) "Mathematical models of hysteresis and their applications", Elsevier.
- [15] Smith, R.C., (2005) "Smart Material Systems. Model Development", SIAM press.
- [16] Zhong, Z.W. and Yeong, C.K., (2006) "Development of a gripper using SMA wire", Sensors and Actuators, vol.126, pp 375-381.