

MODELADO Y SIMULACIÓN DE ACTUADORES SMA CON CARGA VARIABLE

Dorin-Sabin Copaci, Antonio Flores-Caballero
Álvaro Villoslada, Dolores Blanco

Avda. de la Universidad, 30 Leganés (Madrid)
dcopaci@ing.uc3m.es, afcaball@ing.uc3m.es, avillosl@ing.uc3m.es, dblanco@ing.uc3m.es

Resumen

El presente artículo muestra los resultados en el modelado y simulación de actuadores basados en aleaciones con memoria de forma (SMA, del inglés Shape Memory Alloys), cuya elaborada disposición física ha permitido que dichos actuadores puedan ser utilizados con mejores prestaciones de las que se presuponían a este tipo de actuadores, considerados como tecnologías emergentes, no debido a su novedad en el tiempo, sino a la dificultad en emplearlos con eficiencia. Estos actuadores presentan ventajas frente a los considerados convencionales, que les confieren mayor relevancia a la hora de emplearlos en sistemas robóticos de rehabilitación. Los objetivos perseguidos por el presente trabajo son el disponer de un correcto modelado del comportamiento del actuador para cargas variables, que son las cargas que experimentan dichos actuadores en un exoesqueleto. Este modelo de simulación se integra en el mismo entorno basado en modelos donde se simula la componente humana y se desarrollan los algoritmos de control y también se programa el controlador hardware del exoesqueleto.

Palabras clave: Actuadores SMA, modelado, control no lineal, Matlab, Simulink.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos han surgido tendencias diferentes a las inspiradas por la robótica clásica en lo que al diseño de sistemas robóticos para rehabilitación se refiere. Se trata de los denominados "soft-robotics", un concepto de diseño basado en crear sistemas robóticos vestibles [6], en los que el peso y la comodidad son cruciales, estas propiedades se consiguen tratando de evitar los mecanismos intrínsecamente rígidos y pesados exigidos por sistemas de actuación convencionales tales como motores eléctricos, o sistemas de actuación neumáticos basados en cilindros.

Dentro del rango de actuadores acordes con la filosofía de diseño "soft-robotics", se encuentran

las fibras SMA. Éstas cumplen con las exigencias de no imponer estructuras rígidas ni complejos y caros mecanismos de reducción de velocidad con el fin de aumentar el par ejercido. Un actuador SMA es un actuador de activación térmica en el que el calor aportado al mismo se traduce en un desplazamiento lineal, dicho calor puede ser aportado directamente en la fibra SMA por una corriente eléctrica. De forma general puede entenderse que las ventajas que aportan los actuadores basados en SMA son las siguientes:

- Relación Par-Peso del actuador excelente
- Funcionamiento completamente silencioso
- Coste muy bajo
- Capacidad de absorber esfuerzos axiales inesperados
- Electrónica de potencia y control sencillas

Como desventajas se localizan las siguientes:

- Baja frecuencia de actuación
- Energéticamente ineficiente
- Comportamiento no lineal
- Idear una idónea disposición física del actuador

Dada la naturaleza de los sistemas robóticos propuestos, es conveniente el poder disponer de un entorno de simulación y desarrollo completo en forma de una única herramienta, en el que se pueda integrar la simulación del exoesqueleto vestible, junto con la componente humana [4] más un modelo del actuador empleado en el exoesqueleto.

2 DISEÑO DEL ACTUADOR

En principio, un actuador basado en SMA presenta una frecuencia de actuación realmente baja, aún para su uso en un dispositivo robótico orientado a rehabilitación. Esta reducida frecuencia

de actuación está originada por su principio de activación térmico, aplicar calor en la fibra SMA hace que ésta tarde un tiempo en evacuarlo, hasta que no haya evacuado la mayor parte del calor aplicado no habrá recuperado su longitud inicial.

Por tanto, una estrategia para mejorar el ancho de banda del actuador es mejorar su capacidad para evacuar el calor. En estudios y trabajos recientes de este equipo de investigación que hoy os presenta este artículo, se ha planteado y validado experimentalmente una disposición física de sencilla construcción que mejora dos aspectos negativos de este tipo de actuadores. En primer lugar se logra una mejor y más rápida evacuación del calor por procedimientos pasivos, lo que conlleva una mejora en la frecuencia de actuación y al mismo tiempo se ha logrado disponer el actuador de forma que éste no exija una forma física determinada, sino que puede adquirir casi cualquier forma sin perjuicio de la capacidad de generar movimiento [3].

La disposición física que permite mejorar el ancho de banda del actuador y disponerlo de manera acorde a los principios dictados por el diseño "soft-robotics" es el mostrado en la figura 1. La fibra SMA se localiza dentro de una funda bowden (tubo negro en la figura 1) y se dispone de dos extremidades. La funda bowden es flexible y puede adoptar distintas formas dinámicamente, por lo que el actuador no impone una rigidez estructural.

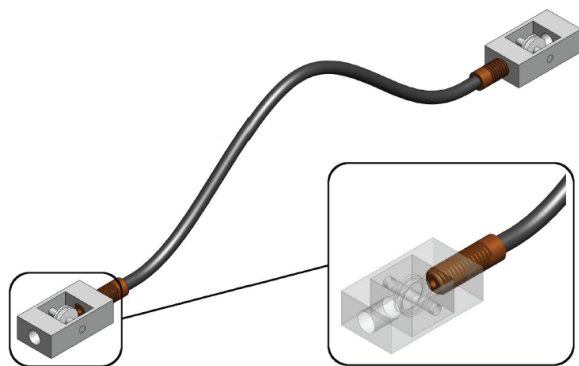


Figura 1: Disposición física del actuador SMA a modelar

Respecto al ancho de banda, la funda bowden proporciona un medio material que ayuda en la disipación del calor generado por el actuador. En el artículo [2] se expone de forma mucho más extensa y detallada los estudios y resultados obtenidos con esta disposición de actuador SMA.

3 MODELADO

Para poder disponer de un entorno de desarrollo completo para exoesqueletos, se requiere un escenario de simulación que contemple los actuadores a utilizar, además de poder diseñar el controlador del mismo y observar el comportamiento del conjunto exoesqueleto-actuador-controlador. El escenario de simulación provee de mayor libertad que la puesta en práctica del sistema real, además de resultar económicamente viable. Una vez depurado el diseño de los actuadores y del exoesqueleto en simulación, se puede proceder a construir uno real con unas garantías aceptables de su viabilidad. De momento, se ha podido verificar la fiabilidad del modelo del actuador SMA contrastándolo con algunos reales de iguales características.

Respecto al modelado del actuador propuesto, se debe tener en cuenta que las fibras SMA presentan un comportamiento no lineal [7, 8, 5], que se encuentra afectado por multitud de factores, como son la temperatura ambiente, la carga a la que están sometidos, la longitud y diámetro de las fibras. Esta alta dependencia de múltiples variables hace que resulte muy complejo plantear un modelo matemático de precisión sin recurrir a herramientas de modelado asistidas por computador.

El procedimiento de modelado aquí presentado se basa en el empleo de las denominadas cajas negras, tanto Hammerstein-Wiener como no lineal exógeno (la entrada es independiente de la salida y de la planta) autorregresivo, este último más conocido por sus siglas NARX. Estos modelos se basan en la combinación entre sistemas no lineales y un sistema lineal parametrizables.

El modelo de identificación Hammerstein-Wiener consta de dos funciones no lineales y una función lineal, su esquema es el mostrado en la figura 2.

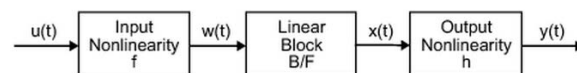


Figura 2: Esquema del modelo Hammerstein-Wiener

Teniendo presente la figura 2, el primer bloque consiste en una transformación sobre los estímulos de entrada a la planta, constituyendo así una no linealidad a la entrada.

El segundo bloque es una función de transfer-

encia lineal, sobre la que se aplican los datos de entradas transformados por el bloque anterior.

El tercer bloque en un modelo Hammerstein-Wiener consiste, al igual que el primero, en una transformación de los datos de salida de la función lineal, constituyendo así una no linealidad como salida de la planta.

El modelo NARX es una red neuronal dinámica (las redes estáticas no presentan retroalimentación ni retardos) recurrente con conexiones de retroalimentación que encierran varias capas de la red. La ecuación 1 define un modelo NARX:

$$y(t) = f(y(t-1), \dots, y(t-n), u(t-1), \dots, u(t-n)) + \epsilon_t \quad (1)$$

Donde la salida $y(t)$ es regresivo a valores previos de la señal de salida y valores previos de la señal de entrada. Es frecuente añadir al modelo NARX una señal de error, denotada en la ecuación 1 por ϵ_t , término que puede representar un error o desviación necesaria para que las series temporales ($y(t)$ y $u(t)$) puedan predecir con mayor exactitud la salida deseada para la planta objeto del modelado. La figura 3 muestra el esquema de una red neuronal NARX, en la que se puede apreciar cómo la salida está realimentada a la primera capa.

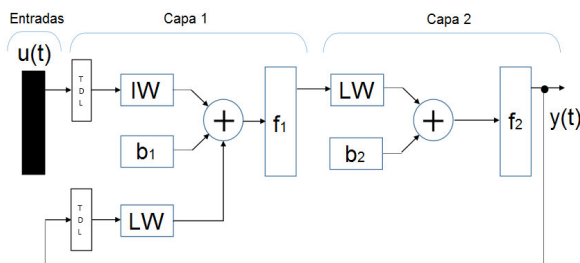


Figura 3: Esquema de una red neuronal NARX

Estos modelos de identificación requieren introducir estímulos en la planta física y capturar los datos de salida, ya sea posición o rotación angular, u otros según sea la configuración física y de sensorización de la planta. La herramienta de modelado asistido por computador, en este artículo 'System Identification' de Matlab®, utiliza los datos de entrada al sistema y los datos de salida capturados para obtener los parámetros que definen tanto las funciones no lineales como la función lineal, parámetros que permiten aproximar la respuesta de salida deseada para la señal de entrada utilizada.

4 IDENTIFICACIÓN DEL MODELO

Dada la peculiaridad de estos actuadores basados en SMA, un procedimiento de modelado que proporciona unos resultados coherentes es el de modelar el actuador en dos partes o etapas, la etapa de contracción y la etapa de relajación. Esto se encuentra motivado por el funcionamiento del actuador, la etapa de contracción es la que requiere la práctica totalidad del aporte de energía, mientras que la etapa de relajación no suele exigir señal de entrada alguna; el actuador recupera su longitud inicial mediante un esfuerzo de tensión debido a una carga, y ésta puede ser variable, lo que hará que varíe la curva del movimiento descrito en su recuperación.

La planta física empleada para la identificación de los modelos de los actuadores SMA es la mostrada en la figura 4, que contiene un sistema avanzado de prototipado rápido para control (ARCP) integrado en el mismo entorno de programación en base a gráficos, Matlab/Simulink®, resultado de una tesis doctoral del grupo de investigación[1].

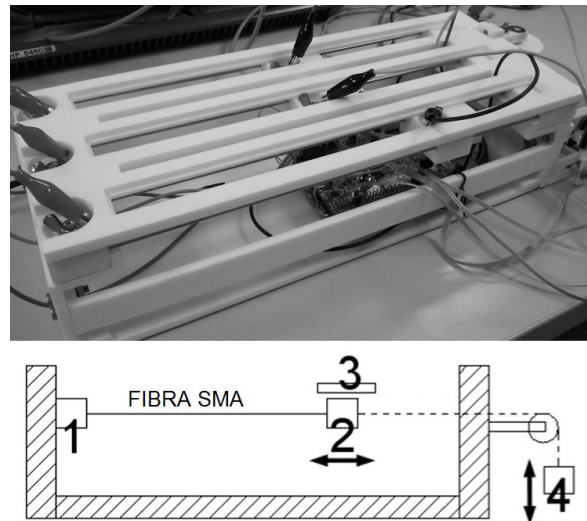


Figura 4: Banco de pruebas SMA. Elementos del esquema: 1-Fibra SMA 2-Extremo móvil 3-Sensor de posición 4-Carga

Respecto a la señal de entrada, se han empleado estímulos basados en escalones, cuya amplitud y longevidad en el tiempo hacen que el actuador alcance cerca del 4% de su contracción, valor que representa el máximo comúnmente recomendado al trabajar con fibras SMA, pero que tampoco saturen el actuador en su contracción máxima por un tiempo excesivo. La figura 5 muestra los estímulos de entrada y los empleados para verificar la planta física, a la derecha se muestra la

comparación de resultados tanto de la simulación como del actuador real.

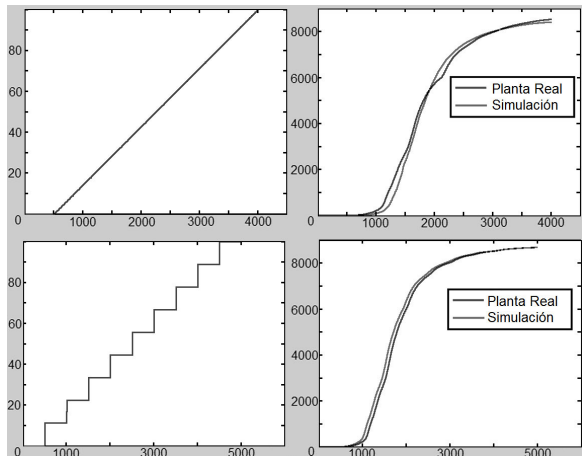


Figura 5: Estímulos de entrada al actuador SMA real. Abajo: estímulo de identificación. Arriba: estímulo de validación

Este proceso de identificación para la etapa de contracción se ha repetido para varios diámetros, longitudes y cargas para actuadores SMA como los descritos en el segundo apartado. Para cada uno de ellos se ha obtenido un modelo Hammerstein-Wiener o NARX, dependiendo de si uno u otro obtenían una mejor aproximación para el actuador SMA analizado. En total se dispone de modelos identificados para la siguientes combinaciones de actuadores SMA:

- Cargas: 100 , 250 , 500 y 1000 gramos
- Diámetro: 0.15 , 0.25 y 0.5 milímetros
- Longitudes: 15 y 23 centímetros

El objetivo a alcanzar para el escenario de simulación propuesto en el artículo, es que el modelo de simulación admita cargas variables para distintos actuadores SMA. El modelo de simulación llevado a cabo permite cambiar dinámicamente, en tiempo de ejecución, la carga a la que está sometido el actuador, y el diámetro y la longitud del mismo al inicio de dicha simulación. Esto se ha conseguido empleando interpolaciones, entre unos y otros modelos, a partir de las pendientes de las curvas de salida proporcionadas por los modelos. No resulta de especial interés el valor numérico, que representa la posición del actuador, arrojado por los modelos no lineales, sino la combinación porcentual de los distintos valores de las pendientes (las curvas presentan una evolución) es lo que proporciona el comportamiento de un supuesto actuador SMA intermedio, cuyo modelo matemático no es conocido. De esta forma se dispone de un amplio repertorio de actuadores

SMA para el escenario de simulación.

Respecto de la etapa de bajada o relajación del actuador, se dispone de tantas curvas de bajada como modelos no lineales se han obtenido, para las mismas combinaciones de actuadores SMA que las recientemente ilustradas. Esto se ha hecho así porque en la relajación prácticamente no hay estímulos de entrada a la planta y en esta situación los modelos de identificación no lineal Hammerstein-Wiener y NARX no son capaces de obtener un modelo satisfactorio, por lo que se ha recurrido a capturar los datos de salida arrojados por cada etapa de relajación. Cada curva de bajada es diferente de las demás, y para no guardar tanta cantidad de datos en el modelo, se ha recurrido a la herramienta software 'Curve fitting' de Matlab® para obtener una función que defina cada una de las curvas de bajada. La misma técnica de combinación porcentual utilizada para la etapa de subida, ha arrojado resultados muy satisfactorios. Esta sencilla técnica de disponer de curvas descriptivas no aporta resultados aceptables para la etapa de subida, ya que ésta depende de la carga y de la referencia en posición deseada, ésta referencia puede tener cualquier forma, ya sea senoidal o en base a escalones. Por eso en la etapa de contracción se han empleado los modelos no lineales, identificados por las técnicas anteriormente explicadas.

5 RESULTADOS

El modelo para los actuadores SMA obtenido de la manera explicada en este artículo ha sido sometido a pruebas en las que la carga depende de la posición, en el caso que nos interesa, la posición angular de las articulaciones del exoesqueleto, hasta ahora se han considerado exoesqueletos con un solo eje articulado; en las pruebas ilustradas mediante las figuras 6 y 7, la carga variaba desde los 200 hasta los 1000 gramos. A efectos prácticos la carga repercute en un par en la articulación que los actuadores SMA necesitan vencer. Se muestran experimentos cuyo resultado ha podido contrastarse con actuadores SMA y la estructura física de una articulación disponibles de forma real en el laboratorio.

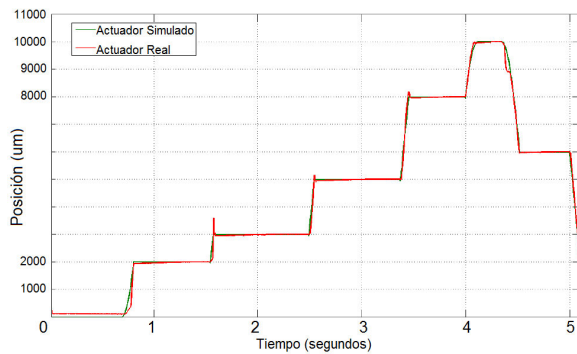


Figura 6: Comparación entre la respuesta del actuador SMA real y el actuador SMA simulado. Diámetro de 0.5 mm. y longitud de 23 cm.

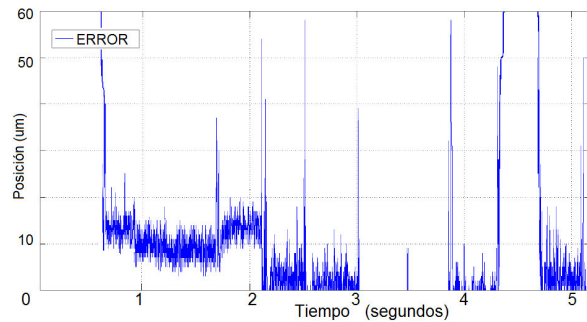


Figura 7: Comparación del error en posición entre la respuesta del actuador SMA real y el actuador SMA simulado. Diámetro de 0.5 mm. y longitud de 23 cm.

Tal y como se ha corroborado de forma experimental, los planteamientos seguidos para obtener un modelo del actuador SMA propuesto se han mostrado correctos, dado que el comportamiento del actuador SMA simulado con carga variable es prácticamente idéntico al mismo actuador SMA, sometido a las mismas cargas variables, existente en la realidad.

Cierto es, que estos resultados preliminares no han permitido corroborar la totalidad del espectro de características, en longitud y diámetro, de los actuadores SMA disponibles desde la interfaz de simulación. Pero si arrojan resultados más que esperanzadores respecto a la viabilidad y fiabilidad del modelo de simulación. En posteriores estudios, deberán llevarse a la práctica actuadores SMA de diferentes longitudes y diámetros a los probados hasta ahora.

6 UTILIZANDO EL MODELO

El modelo del actuador SMA está diseñado para poder ser integrado y utilizado junto con el resto de toolboxes para simulación de exoesqueletos, interacciones con la componente humana y diseño de controladores embebidos desarrolladas en el grupo de investigación. El entorno de trabajo está basado en el concepto del diseño basado en modelos, que utiliza procedimientos de programación en base a gráficos, de forma que se maximice la eficiencia. Este entorno es el provisto por Matlab/Simulink®.

Por los motivos explicados en el párrafo anterior, el modelo de actuador SMA es un fichero en formato Simulink®, diseñado para su versión 2011, y compilado tanto para computadores con sistemas operativos de 32 bits como de 64 bits. Se ha compilado en forma de ejecutable para Matlab® (denominados ficheros .MEX), con el fin de minimizar el tiempo necesario para llevar a cabo una simulación, una vez compilado se ejecuta a Tiempo-Real sin mayor inconveniente.

Dicho modelo de Simulink presenta una interfaz como la mostrada en la figura 8 :

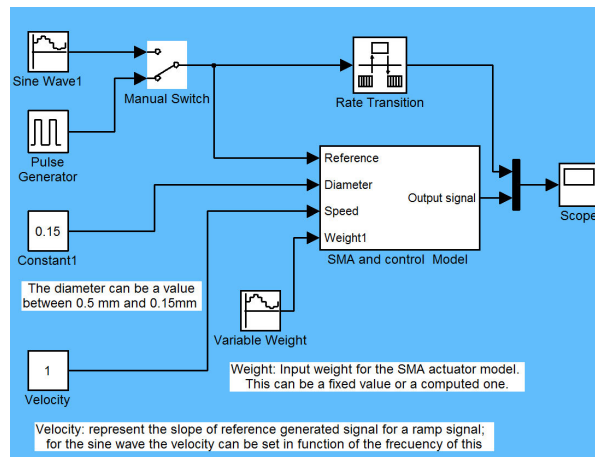


Figura 8: Interfaz del modelo de simulación del actuador SMA para Simulink®

Como valores de entrada, el modelo de actuador SMA para Simulink® presenta:

- Referencia deseada en posición, expresada en micrómetros.
- Diámetro de la fibra SMA, valores posibles desde 0.15 mm. hasta 0.5 mm.
- Carga (en gramos) a la que se somete la fibra SMA, admite un valor fijo o un valor originado mediante cómputo.

- Velocidad, un valor que hace referencia a la agresividad con la que el algoritmo de control actúa sobre la etapa de potencia; orientado a la experimentación con el control en posición.

7 CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una metodología que se ha mostrado apropiada para modelar un actuador basado en fibras SMA. El procedimiento aquí ilustrado descompone el comportamiento del actuador en dos etapas, una etapa de contracción en la que se produce el aporte de energía a dicho actuador y una etapa de relajación, en la que el actuador recupera su longitud original debido al esfuerzo provocado por una carga, pudiendo ser ésta una carga variable.

El hecho de que la carga a la que se somete al actuador SMA pueda ser variable, está relacionado con la intención de aplicación del actuador. Se desea utilizar el actuador propuesto en sistemas de rehabilitación robóticos basados en el concepto denominado 'soft-robotics'. Al ser un sistema robótico, el actuador servirá para controlar en posición y velocidad distintas articulaciones, debido a la disposición física que irá adoptando el exoesqueleto, el par a vencer desde la articulación es variable. Por tanto, se torna interesante y útil el disponer de un modelo de simulación que describa el comportamiento de un actuador SMA sometido a cargas variables. Por otra parte, la posibilidad de poder flexionar y/o disponer físicamente de casi cualquier forma al actuador, nos ha permitido aproximarnos mejor al concepto 'soft-robotics', de manera que el actuador del exoesqueleto ya no impone rígidas estructuras mecánicas en las articulaciones.

Los resultados arrojados tanto por las simulaciones como por las comprobaciones de las mismas frente a actuadores SMA reales, permiten aseverar que el modelo propuesto para el actuador SMA puede ser utilizado con un alto grado de fiabilidad.

Agradecimientos

Los autores expresan su deseo de agradecimiento por el soporte económico a los proyectos HYPER-Consolider Ingenio 2010 y al proyecto RoboCity2030-II-CM (S2009/DPI-1559).

Referencias

[1] A. Flores-Caballero, (2014) Sistema Avanzado de Prototipado Rápido para Control en Exoesqueletos y dispositivos Mecatrónicos,

Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid

- [2] A. Villoslada, A. Flores-Caballero, D. Copaci, D. Blanco, L. Moreno, (2014) High-displacement fast-cooling flexible Shape Memory Alloy actuator: application to an anthropomorphic robotic hand, 14th IEEE-RAS International Conference on Humanoids Robots
- [3] A. Villoslada, A. Flores-Caballero, D. Copaci, D. Blanco, L. Moreno, (2014) High-displacement flexible Shape Memory Alloy actuator for soft wearable robots, Robots and Autonomous Systems: Special Issue on Wearable Robotics for Motion Assistance and Rehabilitation
- [4] D. Copaci, A. Flores-Caballero, D. Blanco, L. Moreno, (2014) Herramienta de Simulación para el Desarrollo de Exoesqueletos basada en Matlab/Simulink, XXXV Jornadas de Automática
- [5] Dutta, S.M. and Ghorbel, F.H., (2005) Differential hysteresis modeling of a shape memory alloy wire actuator, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics
- [6] José L. Pons, (2008) Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons, Wiley Editorial, John Wiley & Sons, Inc.
- [7] Krejci, P. and Kuhnen, K., (2001) Inverse control of systems with hysteresis and creep, IEEE Proceedings on Control Theory and Applications
- [8] Krulevitch, P. and Lee, A.P. and Ramsey, P.B. and Trevino, J.C. and Hamilton, J. and Northrup, M.A., (1996) Thin film shape memory alloy microactuators, Journal of Microelectromechanical Systems