

PID control of SMA fibers. Hysteresis consideration, and time extension reduction using electrical resistance measurement

Rafael Francisco López Fernández, Luis Manuel Tomás Balibrea y Ginés Doménech Asensi

*ETSII, Grupo de Visión y Robótica, Universidad de Murcia, Paseo Alfonso XIII, 48
30203 Cartagena (Murcia), Spain.*

*Telf: +34 968325566. Fax: +34 968325433. E-mail: rlf@plc.um.es, lmtb@plc.um.es,
Gines.Domenech@upct.es*

Abstract

SMA fibers can be used as mechanical actuators, since like electrical muscles, they modify their length as temperature changes. Metallographic transformation, which causes shape variation, takes place in a narrow temperature margin, requiring a controller that causes mechanical position feedback, in order to adjust the power supply needed to reach desired position. The alloy used has been NiTi, heated by an electrical current, and cooled by natural convection. Two main problems are the strong transformation hysteresis and the great cooling time, because of natural convection. To control the hysteresis, two PID regulators have been used, which are chosen depending on the transformation direction. As to cooling time optimization and relaxation, they have been reduced in certain cases by modifying the point at which transformation moment occurs, using electrical fiber resistance measurement. Finally, after presenting experimental results, a discussion is developed about SMA actuator restrictions.

Key words: SMA, control, mechanical actuator, PID.

Regulación de fibras de SMA por medio de PID. Consideración de la histéresis, y disminución del tiempo de extensión mediante la medición de la resistencia eléctrica

Resumen

Las fibras de aleaciones con memoria de forma pueden ser usadas como actuadores mecánicos, a modo de músculos eléctricos, modificando su longitud al variar de temperatura. La transformación metalográfica que da lugar a la variación de forma se realiza en un estrecho rango de temperaturas, siendo necesario un regulador, realimentado con la posición del sistema mecánico, para ajustar el aporte de potencia necesario para conseguir la posición deseada. La aleación utilizada ha sido de NiTi, calentada mediante una corriente eléctrica, y enfriada por convección natural. Los dos principales problemas son la marcada histéresis de la transformación y la lentitud del proceso de enfriamiento al realizarse por convección natural. Con respecto a la histéresis, se han utilizado dos reguladores PID, que son escogidos en función de en qué sentido se quiera variar la transformación. En cuanto a la optimización del tiempo de enfriamiento, o relajación, se ha rebajado éste para ciertos casos por medio de la variación del punto en el que se encuentra la transformación utilizando la medida de la resistencia eléctrica de la fibra. Finalmente, en vista de los resultados experimentales, se realiza una discusión de las limitaciones de los actuadores SMA.

Palabras clave: SMA, control, actuador mecánico, PID.

1. Introducción

Las aleaciones con memoria de forma, conocidas por las siglas SMA (Shape Memory Alloys) son aleaciones metálicas que presentan un comportamiento altamente dependiente de la temperatura. Su principal característica es la capacidad que muestran de volver a un tamaño o forma previamente fijados cuando son sometidas a un determinado ciclo térmico. Cuando están a baja temperatura, pueden ser deformadas plásticamente aplicándoles un esfuerzo. Una vez que se elimina el esfuerzo, la deformación permanece mientras que se mantenga la temperatura por debajo de un cierto valor, pero, cuando se sobrepasa este valor, el material se recupera de la deformación y vuelve a su forma inicial. Este comportamiento es el que se ha dado en llamar Memoria de Forma. Si se vuelve a disminuir la temperatura, el material se mantiene sin deformar, conservando su forma hasta que no se aplique nuevamente un esfuerzo. La forma memorizada en el material es fijada mediante tratamiento a temperatura muy superior a la de recuperación de forma. En una aleación con una temperatura de transición de unos 100°C el tratamiento para fijar la forma se suele realizar entre 500°C a 800°C, aunque si el tratamiento se prolonga durante el tiempo suficiente, el rango de temperaturas puede disminuirse a 300°C ó 350°C. La Figura 1 representa el ciclo completo de la transformación metalográfica que experimenta el material. A los efectos de conseguir una deformación a baja temperatura, una carga fija ha sido aplicada al material. Como se puede apreciar, el proceso presenta una acusada histéresis, característica que es común a todos los tipos de aleaciones SMA.

Para aplicaciones en robótica y automatización, la aleación se suele utilizar en forma de delgadas fibras o alambres, o en forma de muelle, utilizándose la recuperación de forma para obtener desplazamientos longitudinales. Este tipo de actuadores tiene una elevada relación fuerza/peso, ocupan un pequeño volumen, son sencillos y no emiten ruidos ni vibraciones. Por sus valores de resistencia eléctrica, y por la disposición en forma de cables, el calentamiento se suele realizar haciendo circular una corriente eléctrica a través de la aleación, aportando calor por efecto Joule. Ejemplos de este tipo de actuadores son

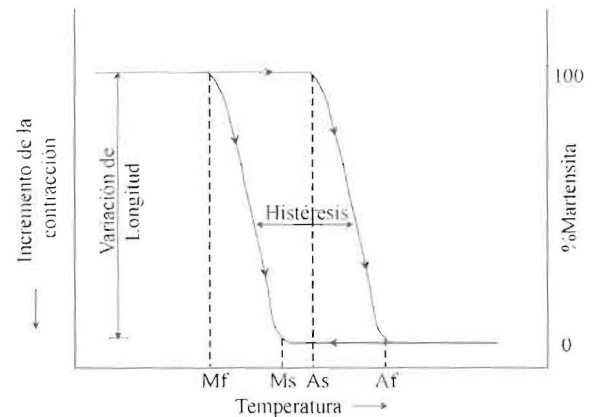


Figura 1. Ciclo completo de la transformación.

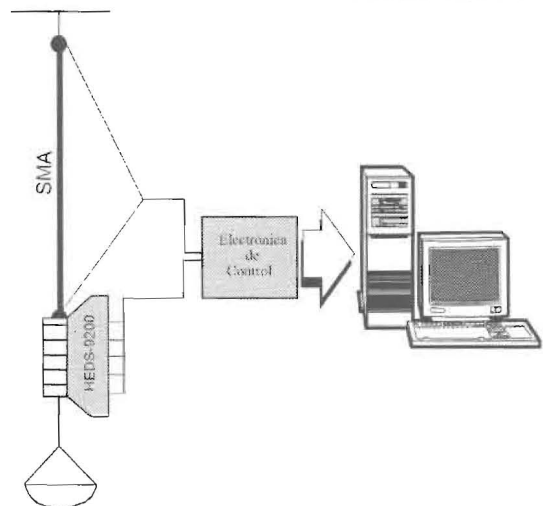


Figura 2. Esquema del sistema de experimentación.

los desarrollados por Grant [1] o Russel [2], un robot bípedo con músculos formados por SMAs desarrollado por Hashimoto [3] y la mano robot desarrollada por Furukawa Electric Co.

2. Plataforma Experimental

Se ha montado verticalmente una fibra de Níquel-Titanio (NiTi), de 150 μm de diámetro y 10,5 cm de longitud, sometida a una carga, incrementable en pasos de 15 g hasta los 330 g, y que se encuentra unida a una regleta graduada que desliza a través de un encoder lineal óptico incremental (HEDS-9200), con una resolución de 50 μm , sistema que puede apreciarse en la Figura 2. Debe hacerse notar que este sistema de medición de la posición supone, para la fibra, una carga adicional de apenas 1 g.

La aleación utilizada pertenece a la serie comercial Flexinol, producida por Dynalloy Inc. La fibra escogida es del tipo HT (alta temperatura), la cual tiene unas temperaturas de transformación unos 20°C superiores a la serie LT (baja temperatura), lo que al suponer una mayor diferencia de temperatura con el ambiente proporciona un enfriamiento más rápido, aumentando la velocidad de extensión. Las temperaturas características de la transformación para esta aleación, en grados centígrados, son:

Tabla 1
Puntos característicos
de la transformación

M_r	M_s	A_s	A_r
62	72	88	98

La carga máxima que puede soportar esta fibra es de 330 g, y la fuerza mínima necesaria para efectuar la deformación es de 35 g. La aleación puede ser alargada hasta un 8,5% de su longitud en estado austenítico, estado de mínima longitud, pero con el objeto de alargar su vida útil la extensión se ha mantenido en el rango del

3-5% de longitud. En las mediciones efectuadas, el paso por cero de la lectura del encoder lineal se ha fijado para una extensión del 3,5% de la longitud mínima.

El calentamiento de la fibra se consigue a través de la utilización de una fuente de intensidad controlada por una tarjeta de adquisición de datos (PCL-818) instalada en un PC. El enfriamiento se realiza a temperatura ambiente, unos 20°C, por convección natural. La fuente de corriente tiene limitado su valor a 0,4 A ya que, a pesar de que cuanto mayor sea el valor de la intensidad más rápida se realizará la recuperación de forma, se ha de imponer un límite para que no se sobrepase un cierto valor de temperatura, a partir del cual la aleación perdería sus propiedades de forma permanente. Para esta aleación de NiTi esta temperatura está sobre 300°C.

La fuente de intensidad se emplea, además, para muestrear el valor de la resistencia eléctrica de la fibra. El circuito de control y medición utilizado se muestra en la Figura 3.

En el modo de calentamiento la intensidad es fijada por la tensión enviada por la salida D/A de la tarjeta de adquisición de datos, mientras que en el modo de medición de la resistencia la

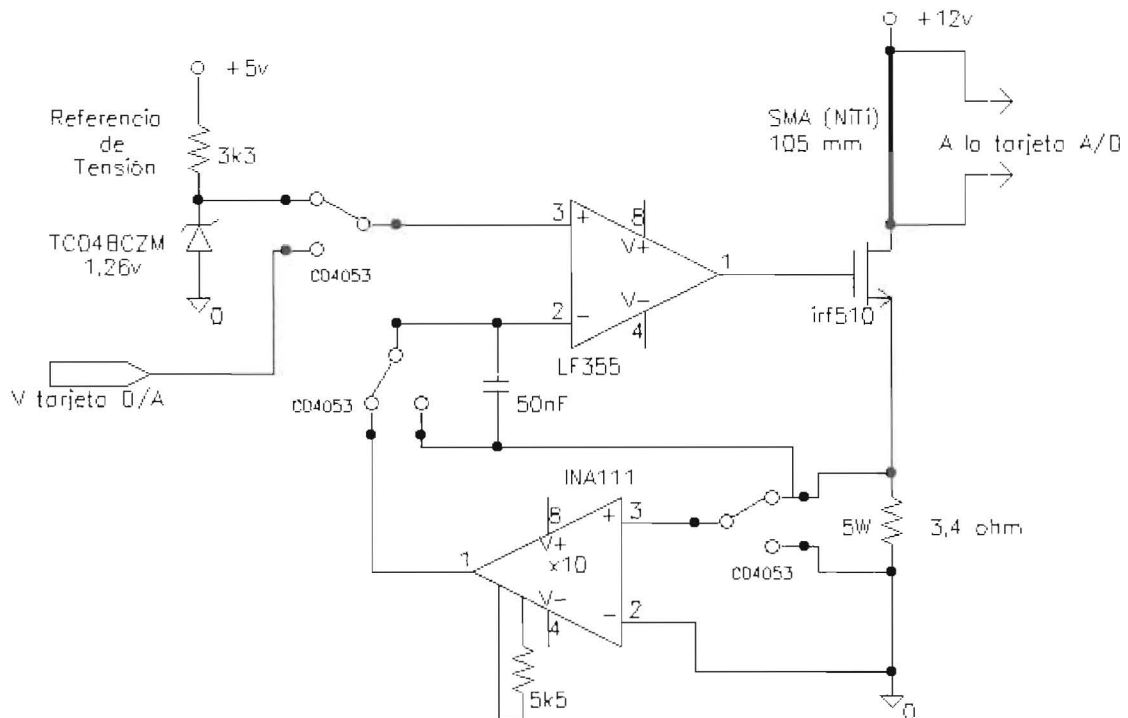


Figura 3. Esquema del circuito de control de calentamiento y medición de resistencia.

intensidad es un valor fijo establecido por una referencia de tensión, concretamente 34 mA, un 10% de la intensidad nominal que da como resultado un aporte de potencia de un 1% de la nominal, siendo despreciable el calentamiento provocado. El PC está conmutando continuamente entre estos dos modos de funcionamiento, tomando una muestra del valor de la resistencia cada 55 ms.

La tarjeta, además de controlar la entrada y salida analógica y la entrada digital del multiplexor de la fuente de intensidad, se encarga de la lectura de la salida digital del encoder lineal, a una frecuencia de 1kHz.

3. Regulación de la Posición

Si lo que se pretende es un actuador que se posicione únicamente en dos posiciones extremas, correspondientes a la máxima contracción y a una determinada extensión, es suficiente con utilizar un tipo de control todo o nada, en lazo abierto, con la única precaución de que la tensión aplicada no llegue a sobrecalentar la aleación. En cambio, en muchos casos interesa controlar el grado de recuperación de forma, la contracción realizada, para obtener un actuador cuya posición pueda ser fijada en un determinado punto. Se puede observar en la Figura 1 que la transformación se realiza sobre un rango de temperaturas, por lo que es posible fijar el estado de la aleación en un punto intermedio de la transformación y de esta manera conseguir la recuperación de longitud que se desee. Por otra parte, la Figura 1 representa la transformación para una carga dada, y lo que sucede en la práctica es que el rango de temperaturas de la transformación varía al variar la carga, necesitándose mayor temperatura para un mayor esfuerzo aplicado. Además, para posiciones que no sean las extremas (contracción o relajación total), se va produciendo una lenta deriva en la transformación metalográfica, y por lo tanto en la posición. A título de ejemplo, la muestra experimentada puede derivar, con un intensidad fija, en un periodo de 10 minutos, de 1,2 mm a 1,8 mm de contracción.

Por esta razón, y porque no es fácil obtener un modelo teórico para la transformación que tenga en cuenta la dependencia de ésta con la carga y la deriva de sus características con el en-

vejecimiento, es necesario el uso de un regulador en lazo cerrado de forma que no sea necesario conocer con detalle el modelo de la aleación SMA.

El controlador empleado habitualmente es un PID, siendo el punto de consigna una determinada posición. Las condiciones de estabilidad de un regulador PID aplicado al control de posición de aleaciones SMA han sido expuestas por Madill [4], tratándose de sistemas de primer orden, y teniendo en cuenta el comportamiento de estas aleaciones, especialmente marcado por la histéresis. Los criterios de estabilidad del sistema PID-SMA son fáciles de alcanzar, no apareciendo problemas generalmente en este sentido. Es en el apartado de optimización del tiempo de establecimiento donde hay que prestar alguna atención, ya que si la respuesta es demasiado rápida se provocaría una sobreoscilación, lo que obligaría a enfriar para volver al punto de consigna, proceso que es bastante más lento, por ser por medio de convección natural y por culpa de la histéresis, que aumentar la contracción calentando, con lo que se emplearían sólo unas décimas de segundo para alcanzar el punto de consigna, y un tiempo varias veces mayor en recuperar la desviación producida por la sobreoscilación.

Por otra parte, cuando la contracción sea mayor que la deseada, el regulador actuará disminuyendo la intensidad de acuerdo con la ecuación de transferencia del PID y los parámetros (K, T_i, T_d) que se hayan establecido (Función de transferencia del PID).

$$\frac{I(s)}{P(s)} = K + \frac{T_i}{s} + T_d s \quad (1)$$

En realidad, la manera más rápida de disminuir la contracción es reducir a cero la intensidad. Así, cuando el error es negativo se ha recurrido a quitarle al PID el control sobre la fuente de intensidad y establecer el valor de ésta a 0 A. Internamente, el PID sigue calculando un descenso de la intensidad para alcanzar el punto de consigna, pero éste sólo vuelve a controlar la fuente de intensidad cuando el error alcanza otra vez valores que sean positivos o nulos. El esquema de control correspondiente se puede observar en la Figura 4.

En las gráficas de la Figura 5, realizadas con una carga constante de 150 g, se puede com-

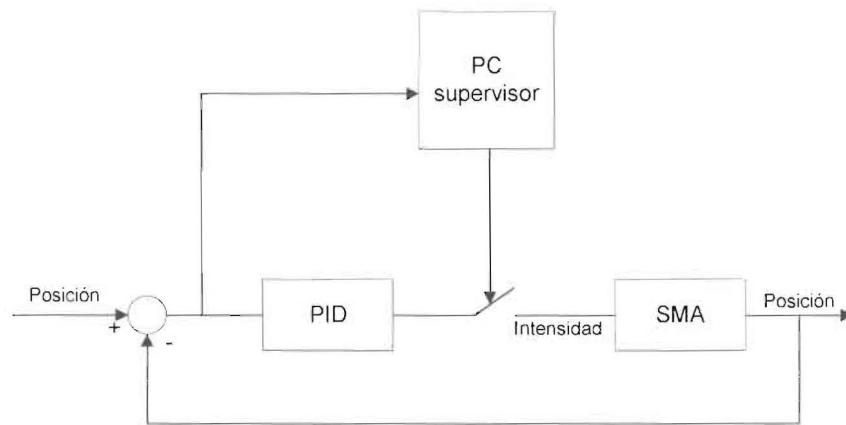


Figura 4. Esquema de control de PID con corte de intensidad supervisada.

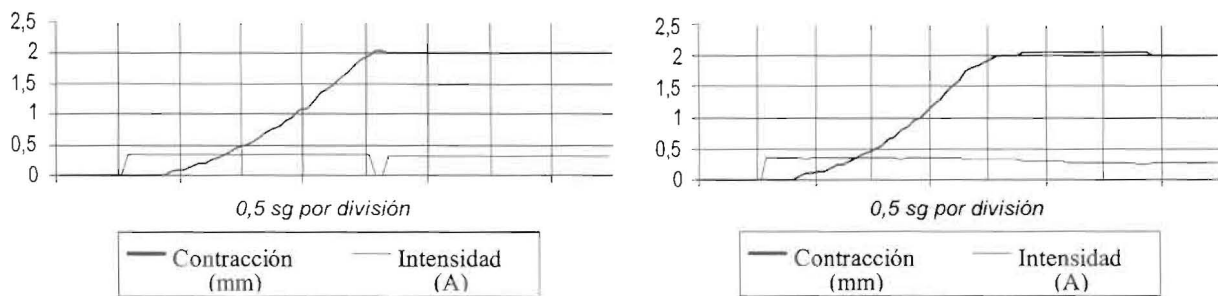


Figura 5. A la izquierda PID con corte de I, a la derecha PID continuo.

probar como el tiempo de establecimiento después de alcanzar el punto de consigna (2 mm), debido a una sobreoscilación de 50 μm , es de sólo 100 ms en el caso de PID con corte de I, mientras que, para el PID de salida continua, este tiempo se extiende hasta casi 1,5 sg, tiempo necesario para disminuir la salida del regulador hasta el valor requerido por esa posición. Se podría pensar que es posible mejorar la respuesta en el segundo caso haciendo la respuesta del PID más rápida, pero el hecho es que el regulador empleado es el más rápido posible, sintonizado por el método de Ziegler-Nichols, sin que se llegue a comprometer la estabilidad del sistema.

3.1. Tiempo de contracción

En cuanto al tiempo de contracción, éste puede ser disminuido aumentando la intensidad suministrada, con la condición de no sobrecalentar la aleación, manteniendo ésta por debajo del ya comentado límite de 300°C a partir del cual se pierden las propiedades de memoria de forma de manera permanente. Como inicialmente se necesi-

tará un mayor aporte de energía para elevar la temperatura y realizar la transformación, se puede dar un primer pulso de corriente inicial para realizar la contracción, y a continuación bajar ésta a un valor de mantenimiento, evitando así que la aleación se sobrecaliente. En principio, hasta que no se ha efectuado completamente la recuperación de forma, toda la transformación, la energía suministrada no comienza a emplearse para aumentar la temperatura más allá de la temperatura correspondiente al final de la transformación pero, en la práctica, cuando la transformación se realiza demasiado rápido debido a la aplicación de una potencia excesiva, aunque sea durante un corto periodo de tiempo, la aleación resulta dañada por sobrecalentamiento, elevándose la temperatura por encima de A_f sin que la transformación se haya completado.

La Figura 6 es la gráfica de una fibra acoplada a un regulador ajustado para suministrarle una corriente de 1 A a la fibra hasta alcanzar una contracción de 1mm, momento en el que conmuta a un corriente de mantenimiento de

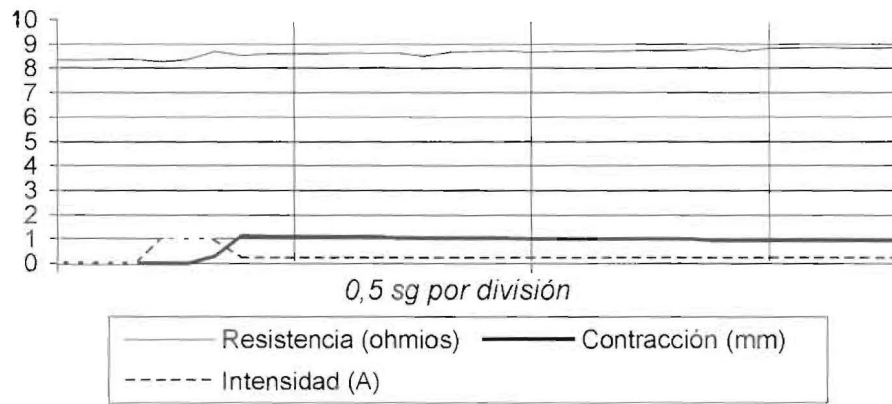


Figura 6. Sobrecalentamiento por intensidad excesiva.

0,2 A. El desplazamiento se consigue realizar en 230 ms, lo que supone una velocidad de contracción de 4,3 mm/sg, velocidad mayor del doble de la que se obtendría con su intensidad nominal, pero la aleación queda permanentemente dañada y pierde todas sus propiedades de memoria de forma. La medición de la resistencia da valores normales, con las variaciones habituales debidas a la transformación, sin que en ningún momento haya forma de saber que se está produciendo un proceso en la aleación que la está dañando irremediablemente. Russell [2] utiliza un sensor pirométrico para detectar el sobrecalentamiento, pero este método es costoso y difícilmente aplicable a una fibra de sólo 150 μm de diámetro, por lo que la única forma de asegurar la integridad de la fibra es moderar el valor máximo de la intensidad, al objeto de que la temperatura de la aleación se mantenga dentro del margen permisible para el rango de temperaturas ambiente esperado.

3.2. Compensación de la histéresis

Además de establecer un límite máximo de intensidad y de reducir a cero ésta para disminuir la contracción, el regulador diseñado ha tenido que ser adaptado a trabajar con un material que tiene un comportamiento fuertemente marcado por la histéresis. El proceso de histéresis da como resultado diferentes propiedades del material en función de que éste se encuentre en estado martensítico o austenítico, lo que desde el punto de vista del regulador equivale a tener que regular dos sistemas con propiedades diferentes. En la Tabla 2 se muestran los parámetros de la aleación para ambos estados metalográficos:

Tabla 2
Parámetros físicos de las dos fases metalográficas

	Martensita	Austenita
Resistividad ($\mu\Omega\text{cm}$)	76	82
Módulo de Young	28	75
Susceptibilidad Magnética ($\mu\text{emu/g}$)	2,5	3,8
Conductividad Térmica ($\text{W/cm}^\circ\text{C}$)	0,08	0,18

Aunque para posiciones intermedias la composición metalográfica sea también intermedia, tomando los parámetros físicos así mismo un valor intermedio, a nivel práctico esta diferencia de propiedades se refleja en un diferente comportamiento en función de que la aleación esté aumentando o disminuyendo su contracción, es decir, en función de que se esté aumentando la cantidad de una u otra fase metalográfica.

El mecanismo implementado para compensar este comportamiento ha sido la utilización por parte del regulador PID de dos conjuntos de constantes (K, T_i, T_d), que adaptan el regulador al diferente comportamiento de la aleación según se aumente o disminuya la contracción. En la Figura 7 se muestra el comportamiento de un regulador único frente a uno con conmutación entre dos conjuntos de valores. Los dos reguladores

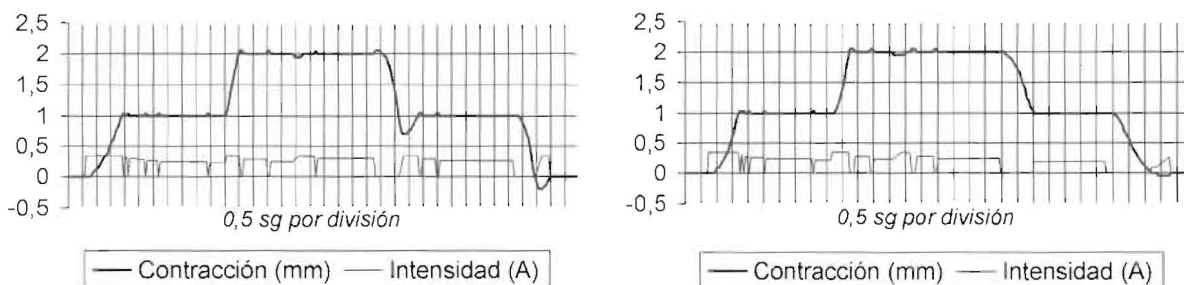


Figura 7. A la izquierda PID simple, a la derecha PID adaptable con dos grupos de parámetros.

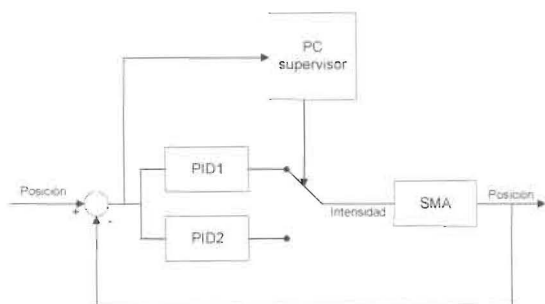


Figura 8. Esquema de control con dos PIDs.

Tabla 3
Parámetros del PID

	T	K	T _i	T _d
Incremento de contracción	0,001	0,01	10	10 ⁻⁵
Disminución de contracción	0,001	0,01	7000	10 ⁻¹⁵

son sometidos a un ciclo de contracción a 1 mm, 2 mm a continuación, extensión hasta 1 mm y finalmente extensión hasta el punto inicial, 0 mm, con una carga constante de 150 g.

El regulador único ha sido ajustado, por el método de Ziegler-Nichols, para optimizar el proceso de aumento de la contracción, mientras que el adaptable tiene un conjunto de constantes ajustadas para el aumento y otro para la disminución de la contracción. Se puede observar que en el tramo de subida el comportamiento de ambos es similar, con tiempos de subida y de establecimiento semejantes, mientras que en el tramo de bajada el comportamiento del PID único deja bastante que desear, con una acusada iner-

cia que resulta en un sobrepasamiento bastante notable del punto de consigna, tanto al extenderse de 2 a 1 mm, como al extenderse de 1 a 0 mm. El control con el doble conjunto de parámetros es algo bastante simple de realizar cuando el PID se implementa digitalmente en un computador, y proporciona una considerable mejora de la respuesta. La Figura 8 muestra el esquema de control equivalente.

3.3. Resultados del regulador

Por tanto, el regulador finalmente implementado ha sido un PID, imponiendo la discontinuidad en la función de salida de reducir a 0 A la intensidad para contracciones mayores que la deseada y fijando $I = 0,4$ A como intensidad máxima, con 1 ms de periodo de muestreo y con dos conjuntos de parámetros en función de la dirección del movimiento. Los valores empleados pueden verse en la Tabla 3.

Como se observa, la aportación de la parte derivativa del PID es bastante baja, sobre todo en el caso de la disminución de la contracción, lográndose la regulación fundamentalmente con la acción proporcional e integral.

Tal como se puede observarse en la Figura 9, el tiempo de contracción hasta 3 mm, aproximadamente una contracción del 3%, es de 1,5 sg, lo que supone una velocidad de 2 mm/sg, y el tiempo de disminución de la contracción de 3 a 1 mm es de 1,3 sg, efectuándose la extensión a razón de 1,5 mm/sg. Finalmente, el tiempo de extensión de 1 a 0 mm de contracción es de 1 sg, siendo en este caso la velocidad de descenso de 1 mm/sg. La velocidad para llegar a contracción cero resulta menor ya que el proceso se ralentiza conforme se va acercando a la deformación inicial.

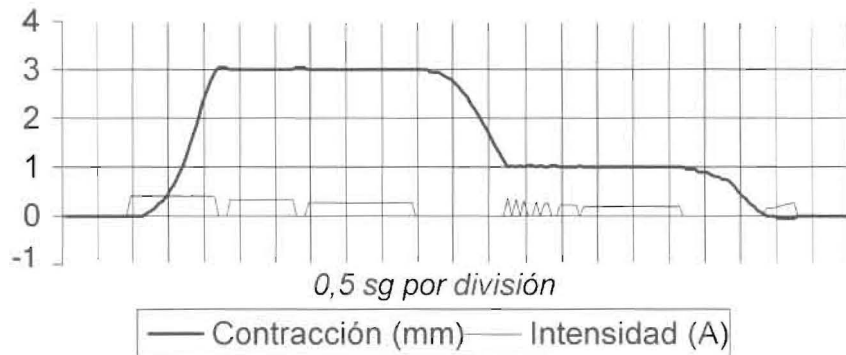


Figura 9. Comportamiento del Regulador PID definitivo.

En cuanto a las oscilaciones de $50\ \mu\text{m}$ con respecto a la consigna, visibles en la gráfica, hay que decir que éstas son difícilmente evitables ya que hasta que el regulador no detecta que se ha producido una desviación respecto al punto de consigna, no puede actuar para compensarla. Las aleaciones SMA no funcionan como otros actuadores mecánicos, los cuales una vez alcanzada una determinada posición pueden ser fijados en ésta, de forma que sólo un par o una fuerza suficientemente grandes puedan sacarlos de la posición, como por ejemplo un motor de pasos, sino que es necesario compensar constantemente las desviaciones que puedan inducirse debido a variaciones de la carga, de la temperatura ambiente, o derivas en la transformación. En cualquier caso, si el sistema de control funciona adecuadamente, estas variaciones no deben pasar de una unidad de la resolución del sensor de posición, en este caso $50\ \mu\text{m}$.

4. Mejora de la velocidad de extensión

El tiempo de relajación es una de las mayores limitaciones de los dispositivos SMA. Con la fibra utilizada la velocidad de extensión es sólo un 50% menor que la de contracción, pero si se aumenta el diámetro para aumentar la fuerza disponible, aunque se puede mantener la velocidad de contracción empleando más potencia, por el contrario el tiempo de extensión aumenta considerablemente, disminuyendo la velocidad de extensión exponencialmente con el diámetro, por lo que se deben buscar procedimientos que rebajen en lo posible el tiempo de extensión. El pro-

blema no consiste solamente en que la relajación, o extensión, se obtiene a través del enfriamiento, que es un proceso lento para convección natural y temperatura ambiente, sino que además, debido a la histéresis de la transformación, en el proceso de enfriamiento hay un intervalo de temperaturas, desde el final de la fase austenítica hasta el principio de la fase martensítica, en el cual no se tiene ninguna variación de la longitud.

Para conseguir una relajación lo más rápida posible se puede utilizar algún medio que incremente el flujo de calor entre el dispositivo SMA y el ambiente, como por ejemplo empleando convección forzada de aire o inmersión en algún fluido que permita un mayor flujo de calor que el aire y que sea aislante eléctrico, como el aceite. Pero este tipo de soluciones complican la construcción del dispositivo y le hacen perder sus propiedades de simplicidad, pequeñas dimensiones y bajo peso.

En cambio, se puede optimizar el proceso de enfriamiento, sin ningún mecanismo adicional, manteniendo la aleación en la temperatura más baja posible en cada momento, en el punto donde comenzará la transformación de austenita a martensita. De esta forma, al retirarle el suministro de potencia en un instante dado, la aleación comenzará la transformación inmediatamente, sin tener que pasar por el intervalo de temperatura sin variación de forma debido a la histéresis.

De esta manera no se incrementa la velocidad de accionamiento cuando el dispositivo deba ser accionado a su máxima frecuencia de contracción-extensión, pues siempre será necesario pasar la zona de histéresis, pero sí que se incre-

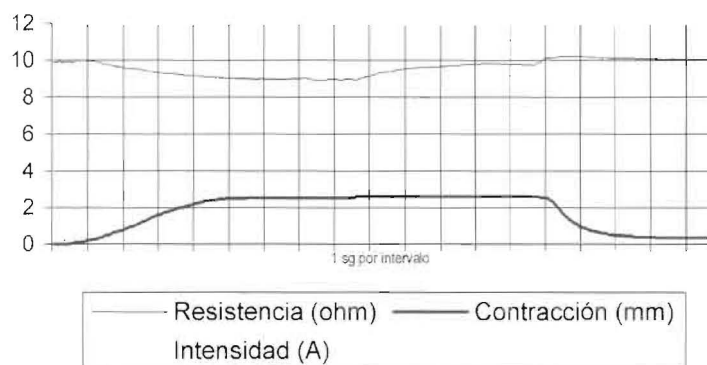


Figura 10. Variación de la resistencia durante la transformación metalográfica.

mentará cuando se requiera que la extensión sea realizada después de un determinado tiempo en el estado de contracción, ya que una parte del tiempo que haya estado en contracción en una posición fija se aprovecha para atravesar el intervalo de histéresis.

La tarea de llevar la aleación al punto de inicio de transformación sería sencilla si fuera posible medir su temperatura. El problema radica en que lo habitual es el uso de fibras SMA que no suelen llegar a los 500 μm de diámetro, con lo que su tamaño y capacidad calorífica son muy pequeñas, y no es posible utilizar un termopar o cualquier otro tipo de sensor de contacto directo para determinar su temperatura. Tampoco se puede obtener la temperatura midiendo su resistividad eléctrica, ya que ésta depende del punto de la transformación y de la carga, no pudiéndose establecer una relación biyectiva entre la resistividad y la temperatura. Sería necesario utilizar otro tipo de sensores, como los pirométricos, medidores de la radiación infrarroja, pero las temperaturas de funcionamiento relativamente bajas (sobre 100°C) y el pequeño tamaño de los dispositivos hace que sólo se hayan utilizado este tipo de sensores en casos muy concretos para detectar el sobrecalentamiento, como se comentó anteriormente al hablar de los daños permanentes en la aleación por exceso de temperatura, y no para controlar en qué punto de la transformación se encuentra la aleación.

Ya que no es fácil conocer la temperatura de la aleación, será necesario controlar algún otro parámetro medible que de una indicación de cuándo va a comenzar la transformación a martensita. Se da la circunstancia de que la resisten-

cia eléctrica varía con la transformación, pero además, en la transformación de austenita a martensita, lo hace precediendo a la transformación de forma. Antes de que a causa de la transformación comience a variar la longitud se produce una variación medible de la resistencia.

En la Figura 10 se puede ver el proceso completo de calentamiento y enfriamiento. La aleación se encuentra inicialmente a temperatura ambiente y con una deformación de aproximadamente 2,5 mm. A continuación se le aplica una corriente de 0,3 A y comienza la transformación. Se puede observar que junto con la variación de la longitud (recuperación de forma) se va produciendo una disminución de la resistencia eléctrica. Ésta es debida, por una parte, a la dependencia de la resistencia con la longitud de la muestra y, por otra, a los cambios que la transformación metalográfica produce en la resistividad. La resistencia varía según $R = \rho \cdot [l^2 / V]$ donde l es la longitud total, V el volumen, que es constante, y ρ la resistividad, la cual depende de la temperatura y, de una forma no lineal, de la fracción de transformación metalográfica realizada. El resultado final es la disminución de la resistencia al pasar de la fase martensítica a la austenítica.

Una vez que se ha efectuado la recuperación de forma ésta se mantiene mientras que se siga suministrando a la aleación la potencia suficiente para equilibrar su pérdida de calor con respecto al ambiente. Debido a la histéresis del proceso es posible disminuir la potencia aplicada y, por tanto, la temperatura efectiva sin que comience a realizarse la transformación. Esta es la situación que interesa para poder pasar a la fase martensítica, y por tanto relajar la fibra, lo más rápidamente posible.

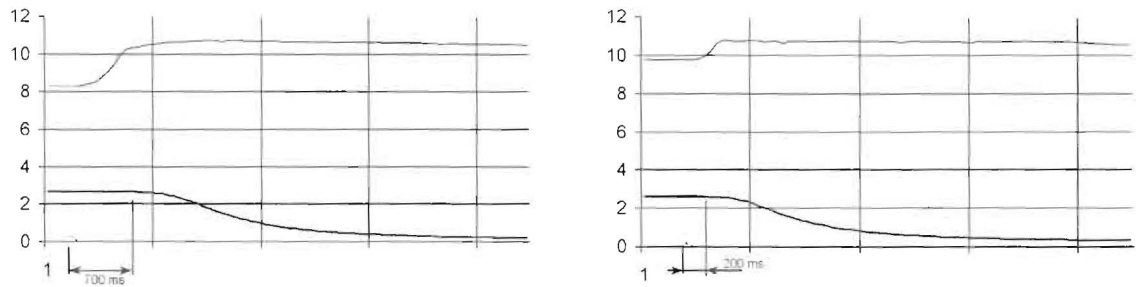


Figura 11. A la izquierda relajación directa, a la derecha con enfriamiento previo.

En la Figura 10, después de efectuar la recuperación de forma aplicando una corriente de 0,3 A (0,79 W), se rebajó ésta hasta el valor mínimo posible sin que comenzase la relajación; en este caso 0,22 A (0,47 W), situándose en el punto de comienzo de la transformación a martensita. Lo que se puede apreciar es que sin que haya ninguna variación en la longitud de la muestra se produce una subida ostensible de la resistencia, que pasa de $8,8 \Omega$ a $9,8 \Omega$, una variación del 11%. De esta manera, se puede utilizar el valor de la resistencia eléctrica para determinar cuándo se ha alcanzado el punto de comienzo de la transformación, siempre que previamente se haya comprobado empíricamente a qué valor de resistencia se corresponde este punto.

En la Figura 11 se puede observar como disminuyendo la intensidad para salvar el intervalo de histéresis se consigue que la relajación empiece a producirse apenas 200 ms después de cortar la intensidad, mientras que si se mantiene la intensidad en el valor que fue necesario para realizar la recuperación de forma se tiene que este tiempo se eleva hasta 700 ms. Esto supone un enfriamiento previo de unos 30°C , el intervalo de histéresis de las aleaciones de NiTi.

El problema de este procedimiento es que es aplicable sólo cuando no se realiza una contracción proporcional, sino que se realiza un accionamiento todo o nada, sin un regulador que fije una posición intermedia, pues en las posiciones intermedias el aumento de resistencia al acercarse al comienzo de la transformación es mucho menor, del orden de unas pocas centésimas de ohmio para esta muestra, y resulta difícilmente medible. Además, la carga debe ser fija, pues la resistencia depende de la

carga aplicada y el valor de la resistencia al comienzo de la transformación variaría al variar la carga.

Será el tipo de aplicación y la velocidad requerida los que determinen si se debe aumentar la complejidad del diseño para realizar la medición de la resistencia, y si el aumento de velocidad en algunos casos (no con accionamiento a la máxima frecuencia posible) compensa el mayor costo.

5. Conclusiones

Aunque es posible realizar el control de actuadores SMA con un regulador PID clásico, se pueden mejorar notablemente las características de su respuesta mediante dos PIDs conmutados a través de un elemento supervisor, un PC en este caso, de forma que se utilicen diferentes parámetros en función del movimiento a realizar, considerando así los efectos de la histéresis, y teniendo en cuenta que el enfriamiento más rápido se consigue con intensidad nula, introduciendo esta discontinuidad en la función del regulador. Además, también se ha mostrado que en el caso de utilizar un tipo de accionamiento todo o nada, es posible utilizar la medida de la resistencia eléctrica para disminuir la temperatura de la aleación hasta el punto de comienzo de la transformación y de esta manera disminuir el tiempo de respuesta para la extensión.

En definitiva, los actuadores basados en SMAs pueden ser utilizados en tareas de posicionamiento donde la precisión necesaria esté dentro de ± 1 unidad de la resolución del sensor de posición, ya que la deriva en la posición no puede ser compensada hasta que no es detecta-

da, y donde la velocidad de accionamiento requerida no sea muy elevada, teniendo como ventajas su alta relación peso/fuerza, simplicidad, ausencia de ruidos y vibraciones, y su pequeño tamaño.

Agradecimientos

El presente trabajo ha sido desarrollado gracias a la financiación aportada a través del Proyecto TAP96-1412-C02-02 "Sistema Visuo-Motor Neuronal para Manipulación Autoadaptable de Objetos" financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología Española y a la Beca para Formación de Personal Investigador "Sistema Visuo-Motor Neuronal para el Control de un Robot Manipulador Adaptable en Fuerza y Posición" concedida por la Fundación Séneca, Centro de Coordinación de la Investigación, Región de Murcia, España, a D. Rafael Francisco López Fernández.

Referencias Bibliográficas

1. Grant, Danny; Hayward, Vincent, "Design of Shape Memory Alloy Actuator with High Strain and Variable Structure Control", *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA, 1/4, P 254-259.*
2. Russell, R. Andrew; Gorbert, Robert B., "Improving the Response of SMA Actuators", *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation x3 1995. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 95CH3461-1. P 2299-2304.*
3. Minoru Hashimoto, Masanori Takeda, Hirofumi Sagawa, Ichiro Chiba, Kimiko Sato, "Shape Memory Alloy and Robotic Actuators", *Journal of Robotics Systems 2(1):3-25 (1985).*
4. Daniel R. Madill, David Wang, "The Modelling and L_2 -Stability of a Shape Memory Alloy Position Control System", *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, P 293-299.*

Recibido el 23 de Noviembre de 1998
En forma revisada el 5 de Mayo de 2000