

DISEÑO DE UN MODELO DE PRECISIÓN PARA ACTUADORES PIEZOELÉCTRICOS

Javier Velasco^{1,2}, Oscar Barambones², Isidro Calvo², Idurre Sáez de Ocáriz¹, Ander Chouza²

¹Fundación Centro de Tecnologías Aeronáuticas (CTA), Juan de la Cierva 1, 01510 Miñano.

²Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz, Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), Nieves Cano 12, 01006 Vitoria-Gasteiz.

{javier.velasco, idurre.saezdeocariz}@ctaero.com

{oscar.barambones, isidro.calvo, ander.chouza}@ehu.eus;

Resumen

Los actuadores piezoeléctricos (PEAs) son utilizados en aplicaciones de micro y nano posicionamiento ya que poseen una buena resolución, rápida respuesta y relativamente grandes fuerzas de actuación. Entre los errores de no linealidad en este tipo de actuadores, los más notables son la histéresis, la cedencia y el comportamiento mecánico no lineal. Para diseñar una estrategia de control efectiva y robusta, disponer de un modelo preciso resulta de gran importancia. En este documento se desarrolla un preciso modelo de un actuador piezoeléctrico amplificado ajustado a partir de valores experimentales. Además, se desarrolla una efectiva estrategia de control, que combina modelos inversos de histéresis y comportamiento dinámico con un control proporcional integral.

Palabras clave: Actuadores piezoeléctricos, PEA, control, modelización, simulación.

1 INTRODUCCIÓN

Los actuadores piezoeléctricos poseen una elevada dinámica y un tiempo de respuesta de milisegundos además de una gran resolución. Estas características hacen que este tipo de actuadores sean de gran utilidad en aplicaciones industriales donde se requiera un posicionamiento ultra-preciso [1] [2]. En contra de este tipo de actuadores existen algunas propiedades negativas que dificultan un control preciso: su histéresis, cedencia y comportamiento dinámico. Existen diferentes configuraciones de actuador piezoeléctrico. Este artículo se centra en el estudio de piezoeléctricos de stack o multicapa con amplificación mecánica para su uso en aplicaciones donde se requieren grandes desplazamientos [3].

Debido al comportamiento no lineal de los PEAs y posibles perturbaciones externas, el desarrollo de una estrategia de control que mitigue los errores de posicionamiento resulta clave. En esta línea, el uso

de modelos inversos de histéresis, cedencia y comportamiento dinámico permite corregir errores de posicionamiento directamente en lazo abierto. Por otro lado, el uso de lazos de control cerrados permite reducir notablemente el error en el control. Un control proporcional integral (PI) es un modo simple pero efectivo para corregir incertidumbres y errores en sistemas no lineales. Para el desarrollo de una correcta estrategia de control es necesario trabajar con un modelo matemático que se ajuste en la medida de lo posible a la realidad [4].

2 FUNCIONAMIENTO DE UN ACTUADOR PIEZOELÉCTRICO

Existen diferentes tipos de actuadores piezoeléctricos: lámina, stack y stack con amplificación. La configuración más simple es una lámina. En caso de que se apilen varias láminas consecutivamente se consigue un stack que proporciona mayores desplazamientos y mayores esfuerzos. Los actuadores montados en un sistema de amplificación mecánica proporcionan unos desplazamientos más grandes pero con un decremento en los esfuerzos máximos. En estos actuadores, se monta un stack piezoeléctrico en una carcasa compacta, que incluye un mecanismo con el que se consigue el desplazamiento deseado [5].



Figura 1: Aspecto de un actuador piezoeléctrico amplificado con carcasa protectora

Los materiales que se utilizan en los actuadores piezoeléctricos tienen la propiedad de que al estar sometidos a un campo eléctrico se produce una deformación mecánica. Esta propiedad ocurre también a la inversa: cuando un material piezoeléctrico es sometido a una tensión mecánica se genera un potencial eléctrico entre las superficies del material. Este fenómeno se produce en algunos grupos cristalográficos cuya estructura no tiene un centro de simetría y son polares: una compresión o un cizallamiento provoca la disociación de los centros de gravedad de las cargas eléctricas (positivas y negativas). Como consecuencia, en la masa aparecen dipolos elementales y en las superficies enfrentadas surgen cargas de signo opuesto.

Los materiales piezoeléctricos son frágiles y tienen una baja resistencia mecánica, por esta razón se deben minimizar los esfuerzos laterales, transversales o esfuerzos de pandeo. Los esfuerzos deben aplicarse centrados uniformemente sobre la cara del actuador piezoeléctrico. En cuanto a las limitaciones físicas del material, en funcionamiento a partir de una determinada frecuencia y desplazamiento se puede llegar a provocar un calentamiento excesivo, y como consecuencia se despolarizan las capas piezoeléctricas, inutilizando el actuador. Aun así, las limitaciones de la electrónica de alimentación/control suelen ser más restrictivas: en cuanto que a mayor frecuencia de trabajo, mayor es la potencia necesaria de ser suministrada al actuador. Normalmente la potencia del controlador no suele alcanzar las condiciones para que se produzca la degradación del material piezoeléctrico.

En contra de estos materiales existen algunas características negativas que dificultan el control preciso de este tipo de actuadores: histéresis, cedencia y su comportamiento dinámico [1].

2.1 HISTÉRESIS

De los tres inconvenientes vistos anteriormente, esta no linealidad es la que más afecta al comportamiento de los actuadores piezoeléctricos: puede llegar a producir un error del 10-15% del rango de desplazamiento. La histéresis representa la dependencia del estado del sistema no sólo con respecto al estímulo presente sino también con estímulos pasados. En el caso de los actuadores piezoeléctricos la histéresis se presenta bajo la relación del campo eléctrico/polarización y del campo eléctrico/deformación, siendo la histéresis entre el campo eléctrico y la deformación la que tiene una mayor transcendencia en el control de actuadores piezoeléctricos. La histéresis de un actuador piezoeléctrico se observa en la figura 2.

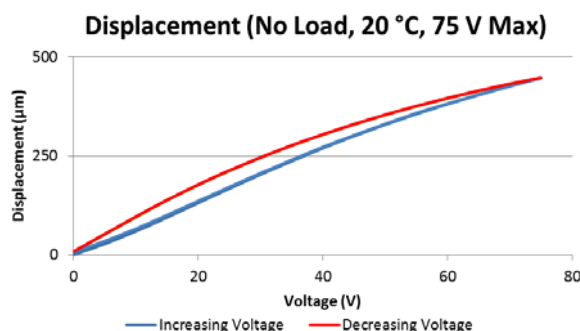


Figura 2: Histéresis típica de un actuador piezoeléctrico [5]

2.2 CEDENCIA

La cedencia es una deformación a lo largo del tiempo que ocurre sin aplicar cambios en la carga eléctrica o mecánica a la que está sometido el material. En los materiales piezoeléctricos este fenómeno se produce por las mismas causas que la histéresis, pero tiene una menor influencia en el desplazamiento y es mucho más lento en el tiempo (1% de la deformación por cada 10 segundos). Por medio de un control en lazo cerrado, en operaciones de alta frecuencia, no se suele considerar en la estrategia de control. En cambio, en operaciones en lazo abierto y de baja frecuencia la cedencia debe ser tomada en cuenta para evitar errores en el posicionamiento.

2.3 COMPORTAMIENTO DINÁMICO

Como resultado de las deformaciones del material piezoeléctrico aparecen fuerzas, desplazamientos, velocidades y aceleraciones. Dependiendo de la distribución de las masas en el mecanismo, el comportamiento dinámico de los actuadores varía. El comportamiento dinámico variable afecta al modo de control y tiene una mayor influencia contra más grandes sean las cargas aplicadas, tal y como se puede comprobar en la figura 3.

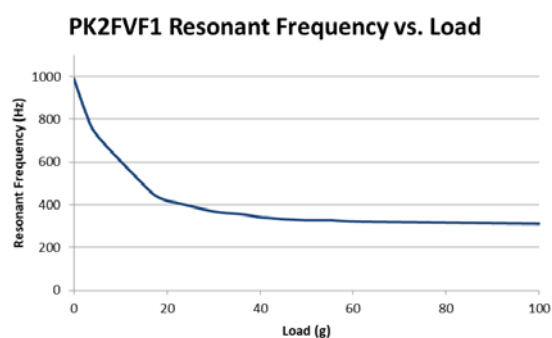


Figura 3: Comportamiento dinámico de un actuador piezoeléctrico [5]

3 MODELO DE UN ACTUADOR PIEZOELÉCTRICO

Un modelo trata de representar matemáticamente el comportamiento de un sistema. Los actuadores piezoeléctricos se pueden modelar de dos formas diferentes: modelado microscópico y modelado macroscópico. En el modelado microscópico se utilizan elementos finitos para modelar el sistema. Este enfoque conlleva un alto coste computacional que hace que este tipo de modelos no sean aptos para aplicaciones de control para micro y nano posicionamiento. En el modelado macroscópico, el actuador se modela en su conjunto. Estos modelos son los que se analizarán para el diseño de controladores avanzados de actuadores piezoeléctricos. Los primeros modelos macroscópicos no tenían en cuenta el comportamiento no lineal de la histéresis y cedencia, ni el comportamiento lineal de la dinámica vibracional del sistema.

Como veremos a continuación existen diferentes sub-modelos independientes para modelar los actuadores teniendo en cuenta la histéresis, cedencia y dinámica de los sistemas. Para construir un modelo completo del sistema se utiliza la combinación de varios sub-modelos de acuerdo a las propiedades del actuador y su modo de control.

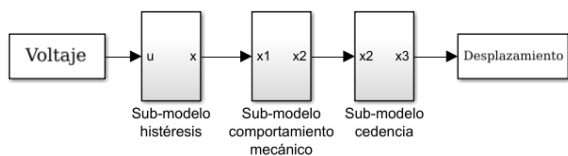


Figura 4: Modelo estructural que incorpora histéresis, comportamiento mecánico y cedencia

3.1 SUB-MODELOS EXISTENTES

En este apartado se describen los sub-modelos macroscópicos más importantes para simular la histéresis, comportamiento mecánico y cedencia.

3.1.1 Sub-modelos de histéresis

Se han desarrollado multitud de modelos de histéresis. A continuación se describen algunos de los más importantes.

3.1.1.1 Modelos independientes de la frecuencia

Se modelizan ciclos grandes y pequeños a partir de la entrada de voltaje mediante diversas fórmulas que son independientes de la frecuencia de control. Estos modelos tienen precisión únicamente para un reducido espectro de frecuencias. El modelo Preisach

(CPM) [6] [7] modeliza la histéresis utilizando el operador básico “Relay”, que se basa en tres parámetros (subida α , bajada β y un factor de ajuste μ). El modelo Prandtl-Ishlinskii (PI) [7] [8] es bastante similar al modelo Preisach, utiliza los operadores “Play” y “Stop” que tienen inversa analítica. El actuador se modeliza por medio del efecto combinado de varios operadores.

3.1.1.2 Modelos dependientes de la frecuencia

Para modelar la histéresis en función de la frecuencia los modelos Preisach CPM y Prandtl-Ishlinskii P-I se pueden modificar de forma que incluyan la dinámica del sistema que representan.

En el modelo CPM se introduce un nuevo factor multiplicativo para ajustarse a la dinámica en función del voltaje medio y la variación de voltaje entre los extremos. El problema es que es necesario conocer la función de entrada. En casos en los que el voltaje futuro es desconocido se utiliza un factor dependiente de la primera derivada que de buenos resultados en frecuencias inferiores a 10Hz. Utilizando redes neuronales se consigue modelizar la histéresis con buenos resultados hasta los 30Hz (muy inferior al 1KHz que pueden llegar a alcanzar los PEAs).

El modelo Prandtl-Ishlinskii dependiente de la frecuencia es simple pero efectivo, aunque tiene la desventaja de que modeliza la histéresis simétricamente. En [9] se propone un modelo P-I modificado que tiene en cuenta la asimetría (añadiendo el término $a_1 u^3$). La ventaja de este modelo frente a otros es su relativa sencillez matemática y que su inversa puede aplicarse en el control para corregir la no linealidad de la histéresis. El operador matemático del modelo Prandtl-Ishlinskii modificado (MPI) se formula de la siguiente manera:

$$x(t) = a_1 u^3 + a_2 u + \sum_{i=1}^n b(r_i) F_{or_i}[u] \quad (1)$$

Siendo $a_2 u + \sum_{i=1}^n b(r_i) F_{or_i}[u]$ el operador que modela la histéresis simétricamente.

Un modelo dependiente de la frecuencia bastante simple es el modelo de Bouc-Wen, que combina histéresis y de vibraciones dinámicas [10] [11]. La histéresis se modeliza por medio de tres parámetros (α , β y γ) de la siguiente manera:

$$\dot{h} = \alpha \dot{u} - \beta |\dot{u}| h |h|^{n-1} - \gamma \dot{u} |h|^n \quad (2)$$

Donde u es el voltaje aplicado, h es la variable que describe la histéresis, d que es el coeficiente efectivo del piezoeléctrico y α , β y γ los parámetros que ajustan la forma del bucle de histéresis.

3.1.2 Sub-modelos de comportamiento mecánico

Para modelar las vibraciones del actuador piezoeléctrico se deben tener en cuenta la masa unida al piezoeléctrico, las rigideces y amortiguación del sistema. Normalmente se suele modelar como un sistema de segundo orden con un único elemento. Los modelos inversos de la dinámica se utilizan en lazo abierto para corregir el error cuando se usa control en lazo abierto [12].

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F_A \quad (3)$$

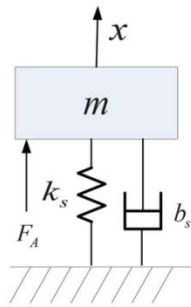


Figura 5: Esquema del modelo dinámico de un piezoeléctrico

3.1.3 Sub-modelos de cedencia

La cedencia de un actuador piezoeléctrico se suele modelar con una expresión logarítmica a lo largo del tiempo. Comúnmente se utiliza la fórmula [1]:

$$x(t) = x_0 \left(1 + \gamma \log_{10} \left(\frac{t}{t_0} \right) \right) \quad (4)$$

Siendo $x(t)$ la respuesta del modelo, x_0 la respuesta para el tiempo t_0 y γ un coeficiente que depende del voltaje. Este coeficiente puede dar problemas de no linealidad en $t \rightarrow 0$ y $t \rightarrow \infty$.

4 DESARROLLO DE UN MODELO DE ACTUADOR PRECISO

Para modelar el sistema se puede utilizar una combinación de varios sub-modelos. En el nuevo modelo incluiremos las no linealidades de histéresis y comportamiento mecánico, ya que la cedencia no tiene mucha influencia en operaciones no estáticas y en lazo cerrado. El esquema del modelo del sistema se observa en la figura 6.

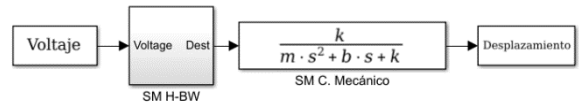


Figura 6: Esquema del modelo propuesto de actuador piezoeléctrico

4.1 Modelo Bouc-Wen + Comportamiento Mecánico (BW+CM)

Para el modelado del comportamiento mecánico utilizaremos un sistema de segundo orden compuesto por una masa m , un muelle de rigidez k y un amortiguador b . Como modelo de histéresis partimos del modelo propuesto por Bouc-Wen. Siendo k la constante de rigidez que relaciona la deformación con la fuerza aplicada, d es la constante que relaciona linealmente el desplazamiento con la tensión aplicada u , la corrección por histéresis h . La ecuación del sistema del piezoeléctrico (sin fuerzas externas) resulta de la siguiente manera:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = k(du - h) \quad (5)$$

Siendo la histéresis

$$\dot{h} = ad\dot{u} - \beta|\dot{u}|h - \gamma\dot{u}|h| \quad (6)$$

A partir de datos experimentales obtenidos del fabricante Thorlabs [5], se estiman los valores de las constantes d , m , b , a , β y γ mediante una función de estimación de parámetros de Matlab basada en el método de mínimos cuadrados no lineales. La constante de rigidez k es conocida a partir de los datos del fabricante. Si se realiza una comparativa entre los valores reales y los resultados experimentales obtenemos una aproximación con un error máximo de $41,42\mu\text{m}$ (un 9,26% del rango de desplazamiento total).

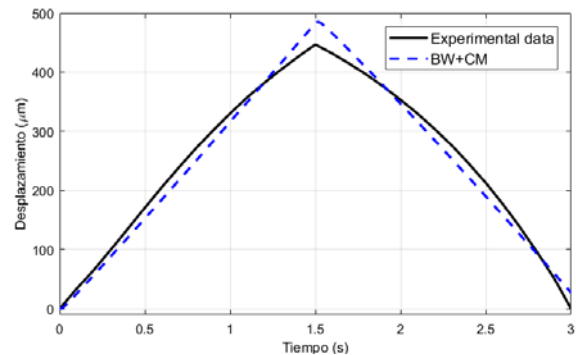


Figura 7: Comparativa entre los valores experimentales y el modelo combinado BW+CM.

4.2 Modelo Bouc-Wen + Comportamiento Mecánico Modificado (BW+CM mod)

Como se indica en [9] el modelo MPI incluye un término en la ecuación para ajustarse a la asimetría. En el modelo que se propone en este artículo sustituiremos la constante del piezoeléctrico d por una ecuación de tercer orden D_{eq} . Con este término se trata de conseguir una relación más precisa entre desplazamiento y voltaje aplicado. En el término h , que corrige la posición por histéresis, se mantiene la constante lineal d para mantener la simplicidad de la corrección por histéresis. El sistema queda modelizado por las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = k(D_{eq}u - h) \quad (7)$$

$$D_{eq} = d_1u + d_2u^2 + d_3u^3 \quad (8)$$

$$\dot{h} = \alpha\dot{u} - \beta|\dot{u}|h - \gamma\dot{u}|h| \quad (9)$$

A continuación se representa el modelo en Simulink por medio de un diagrama de bloques:

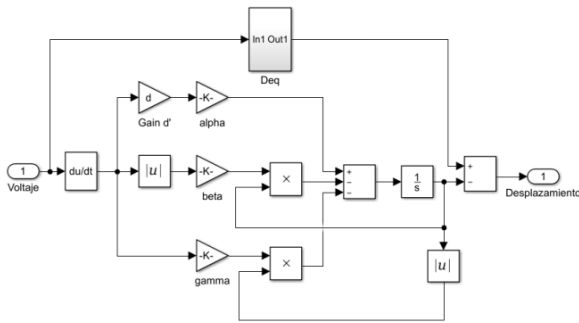


Figura 8: Esquema del modelo Bouc-Wen modificado

Para realizar la estimación de los parámetros mantenemos fijo el valor de d , m , b y k . Nuevamente a partir de los valores experimentales suministrados por el fabricante, mediante la función de estimación de parámetros de Matlab se obtienen los parámetros para el modelo combinado Bouc-Wen + Comportamiento Mecánico Modificado.

Tabla 1: Parámetros estimados para el modelo original y el modificado.

	BW+CM	BW+CM Mod	Unidad
m	$9,15 \times 10^{-5}$	$9,15 \times 10^{-5}$	Kg
b	3960,6	3960,6	N s/m
α	0,1026	0,1549	-
β	0,0191	0,1112	-
γ	0,0003	0,0256	-

k	224000	224000	N/m
d	6,8967	6,8967	m/V
d_1	-	$8,45 \times 10^{-6}$	m/V
d_2	-	$-2,98 \times 10^{-8}$	m/V ²
d_3	-	-5×10^{-11}	m/V ³

Si se realiza una comparativa entre los valores reales y los resultados experimentales obtenemos una aproximación con un error máximo de $7,58 \mu\text{m}$ (un 1,69% del rango de desplazamiento total).

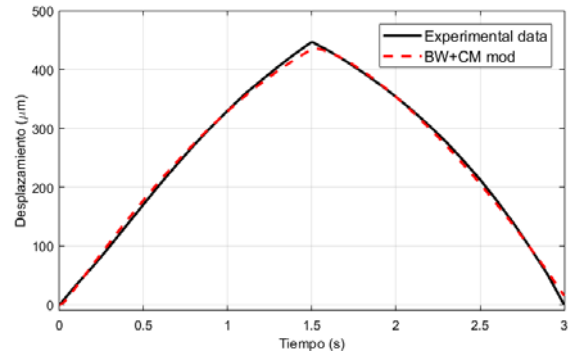


Figura 8: Comparativa entre los valores experimentales y el modelo combinado BW+CM Mod.

El error máximo obtenido con el nuevo modelo combinado Bouc Wen + Comportamiento Mecánico Modificado es inferior en prácticamente todo el rango, mostrando una precisión mayor.

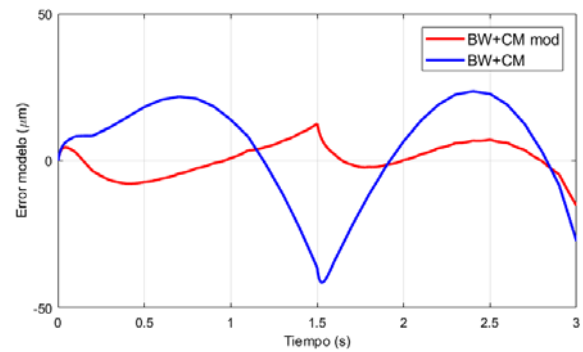


Figura 8: Comparativa entre el error de los dos modelos: BW+CM Mod y BW+CM.

5 DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL PRECISA

Para desarrollar una estrategia de control precisa utilizaremos el modelo combinado Bouc-Wen + Comportamiento Mecánico Modificado desarrollado previamente para simular el comportamiento del actuador piezoeléctrico. Siendo un modelo con un

gran ajuste al actuador real se puede conseguir desarrollar una estrategia de control efectiva minimizando ajustes en los parámetros de control en el sistema real.

El control PI es una técnica de control en lazo cerrado sencilla que proporciona unos resultados aceptables. En el caso de un control en lazo abierto utilizar un modelado inverso suele ser una solución que ofrece buenos resultados, pero en este caso si existen perturbaciones externas el sistema no realiza ninguna corrección. En este documento como solución de control se propone una estrategia combinada de un modelo inverso del piezoeléctrico con un control en lazo cerrado PI. El modelo inverso permitirá ajustar la salida y el lazo cerrado PI corregir posibles errores o perturbaciones externas. El esquema del modelo de control propuesto se muestra a continuación.

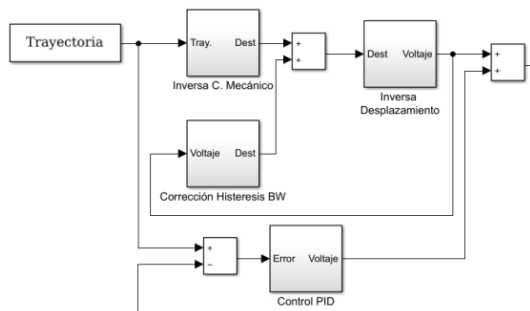


Figura 9: Sistema de control combinado Modelos Inversos con PI.

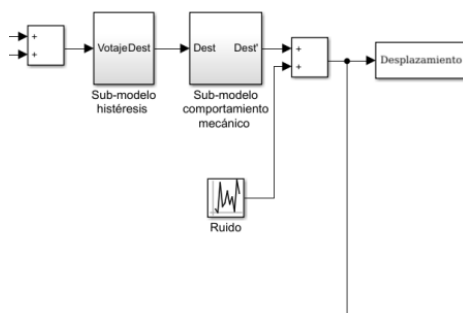


Figura 10: Modelo del actuador piezoeléctrico con ruido externo para validar las estrategias de control.

Para evaluar la respuesta de las diferentes estrategias de control se ha simulado la respuesta del sistema para una entrada en escalón y para una entrada sinusoidal. Las estrategias de control utilizadas han sido (1) un modelo inverso en lazo abierto, (2) un control en lazo cerrado PI y (3) un control combinado del modelo inverso con un lazo cerrado PI. En la figura 11 y 12 se puede comprobar la respuesta del sistema para las entradas en escalón y sinusoidal, y en las figuras 13 y 14 se puede ver en detalle el error de cada estrategia de control respecto a la consigna.

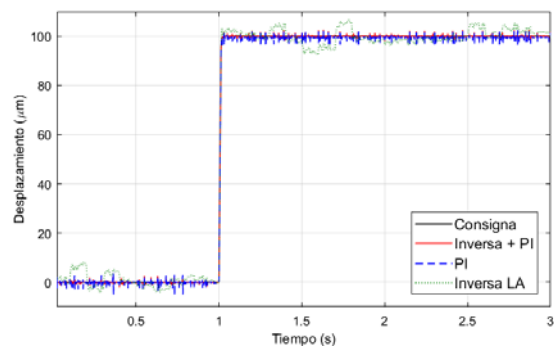


Figura 11: Respuesta de los diferentes sistemas de control para una entrada en escalón.

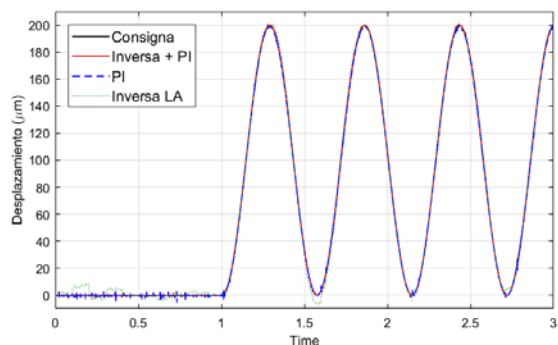


Figura 12: Respuesta de los diferentes sistemas de control para una entrada sinusoidal.

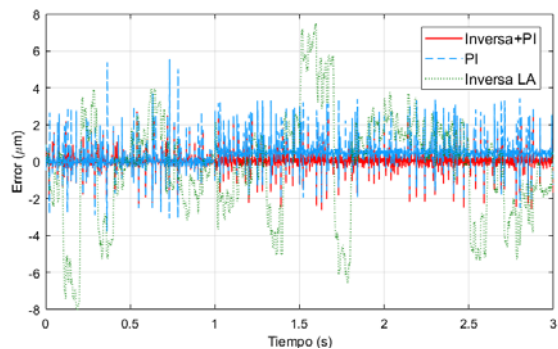


Figura 13: Error de los diferentes sistemas de control para una entrada en escalón.

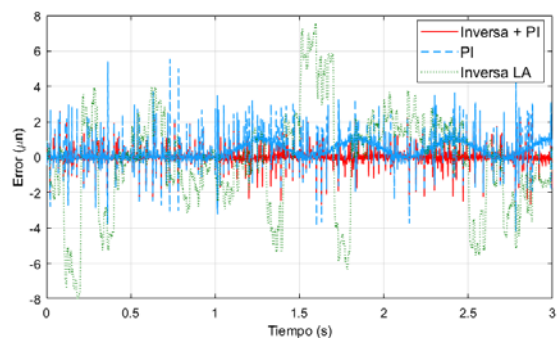


Figura 14: Error de los diferentes sistemas de control para una entrada sinusoidal.

Como se puede comprobar en las gráficas que muestran el desplazamiento del actuador piezoeléctrico, los tres métodos de control siguen la consigna del sistema. Ahora bien, el error en cada uno de los tres sistemas es diferente. En el caso del control en lazo abierto, el sistema es incapaz de corregir la desviación en la posición producida por el ruido externo: el error del sistema de control es de $\pm 8\mu\text{m}$. Tras ajustar las ganancias PI del lazo cerrado, la respuesta del sistema en comparación con el control en lazo abierto el error del sistema es mucho menor (inferior a $\pm 6\mu\text{m}$). Se puede comprobar que la respuesta del sistema por medio de un control combinado, incorporando la inversa del sistema y un control en lazo cerrado PI, la respuesta es aún mejor: el error se mantiene por debajo de $\pm 3\mu\text{m}$. Mediante el sistema en lazo abierto el sistema anticipa las correcciones de histéresis y dinámica del sistema a partir de la consigna de entrada, y el control PI permite compensar errores en la modelización del sistema y errores producidos por ruido externo.

6 CONCLUSIONES

Los actuadores piezoeléctricos ofrecen unas propiedades muy atractivas para el desarrollo de sistemas de micro posicionamiento. En su contra presentan algunas no linealidades que dificultan un control preciso: histéresis, comportamiento mecánico y cedencia. Desarrollar un modelo de simulación que represente el sistema de la forma más cercana al comportamiento real resulta de gran importancia para desarrollar las estrategias de control y ajustar los parámetros de control del sistema eficazmente.

A partir de diferentes submodelos ya existentes se puede crear un modelo con el que se puede llegar a simular el comportamiento real del actuador con gran precisión. Es de vital importancia crear el modelo atendiendo a las necesidades reales de nuestra aplicación: control en lazo abierto o cerrado, frecuencia de trabajo, inestabilidades del sistema... con el fin de optimizar el diseño y conseguir unos resultados certeros.

Matlab Simulink es una potente herramienta de trabajo que permite diseñar una estrategia de control y ajustar los parámetros del sistema de una manera rápida y sencilla. Pero al tratarse del desarrollo de una estrategia de control a partir de un modelo por simulación es necesario realizar un análisis de los resultados experimentalmente. Por medio de ensayos experimentales se podrán validar tanto los modelos representativos del actuador piezoeléctrico como de las estrategias de control desarrolladas. Está será una de las tareas que se plantean para continuar con la investigación y desarrollo de nuevas estrategias de control para actuadores piezoeléctricos.

Agradecimientos

Los autores están muy agradecidos al Gobierno Vasco por su apoyo a través Convocatoria ELKARTEK Expediente: KK-2017/00033 y a la Diputación Foral de Álava por el Convenio CONVAUTIN de colaboración entre la Fundación Centro de Tecnologías Aeronáuticas, la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea y Aernnova Aerospace.

English summary

PRECISION MODEL DESIGN FOR PIEZOELECTRIC ACTUATORS

Abstract

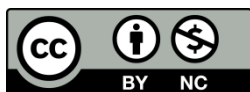
Piezoelectric actuators (PEAs) are used in a wide variety of nano and micro positioning systems due to their remarkable features of high resolution, fast response and high load capacity. Among the non linearities existing in these actuators, the most important are hysteresis, creeping and nonlinear mechanical behaviour. In order to design an effective and robust control strategy, it is highly important to use an accurate model. In this paper it is presented an accurate amplified PEA model adjusted with experimental data. Additionally, it is designed an effective control strategy which combines inverse models for hysteresis and mechanical behaviour with a proportional-integral closed loop control.

Keywords: Piezoelectric actuator, PEA, control, modelization, simulation.

Referencias

- [1] Gu et al, (2016) "Modeling and Control of Piezo-Actuated Nanopositioning Stages: A Survey", IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 13, no. 1, pp. 313-332.
- [2] R. J. E. Merry, N. C. T. de Kleijn, M. J. G. van de Molengraft, and M. Steinbuch, (2009) "Using a walking piezo actuator to drive and control a high-precision stage," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 14, no. 1, pp. 21–31.
- [3] C. Ru, L. Chen, B. Shao, W. Rong, and L. Sun, (2009) "A hysteresis compensation method of piezoelectric actuator: Model, identification and

- control,” *Control Eng. Pract.*, vol. 17, no. 9, pp. 1107–1114.
- [4] H. G. Xu, T. Ono, and M. Esashi, (2006) “Precise motion control of a nanopositioning PZT microstage using integrated capacitive displacement sensors,” *J. Micromech. Microeng.*, vol. 16, no. 12, pp. 2747–2754.
- [5] <https://www.thorlabs.com/>
- [6] X. Song, L. Duggen, B. Lassen, and C. Mangeot, (2017) “Modeling and identification of hysteresis with modified preisach model in piezoelectric actuator,” *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics, AIM*, pp. 1538–1543.
- [7] M. Al Janaideh, D. Davino, P. Krejčí, and C. Visone, (2015) “Comparison of Prandtl-Ishlinskiĭ and Preisach modeling for smart devices applications,” *Phys. B Condens. Matter*, vol. 486, pp. 155–159.
- [8] P.Krejci and K.Kuhnen, (2001) “Inverse control of systems with hysteresis and creep,” *IEE Proc. online no. 20010375*, vol. 141, no. 1, pp. 185–192.
- [9] G. Y. Gu, L. M. Zhu, and C. Y. Su, (2014) “Modeling and compensation of asymmetric Hysteresis nonlinearity for Piezoceramic actuators with a modified Prandtl-Ishlinskii model,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 3, pp. 1583–1595.
- [10] Y.-T. Liu, K.-M. Chang, and W.-Z. Li, (2010) “Model reference adaptive control for a piezo-positioning system,” *Precis. Eng.*, vol. 34, no. 1, pp. 62–69.
- [11] Y. Li and Q. Xu, (2010) “Adaptive Sliding Mode Control With Perturbation Estimation and PID Sliding Surface for Motion Tracking of a Piezo-Driven Micromanipulator”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 18, no. 4, pp. 798-810.
- [12] L. Parali and A. Sari, (2017) “Vibration Modelling of Piezoelectric Actuator (PEA) Using Simulink Software,” pp. 153–157.



© 2018 by the authors.
Submitted for possible
open access publication
under the terms and conditions of the Creative
Commons Attribution CC-BY-NC 3.0 license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>).