

CONTROL ACTIVO DE VIBRACIONES EN ESTRUCTURAS CIVILES ESBELTAS

Alfonso V. Poncela Méndez, Eduardo J Moya de la Torre, Fco Javier García Ruiz
 Instituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, Paseo del cauce 59, 47011 Valladolid España. {poncela, edumoy, javgar}@eii.uva.es

Alberto de Domingo de la Rubia
 Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, paseo del cauce 59, 47011 Valladolid, España

Resumen

En el presente trabajo se estudia el control activo de estructuras civiles esbeltas (tipo pasarelas peatonales), utilizando un sistema de sobremesa comercial y un procesador de bajo coste (Arduino), con fines docentes y de investigación. Se muestran, de una forma sencilla, los pasos a seguir para poner en marcha un sistema de control en lazo cerrado cuya finalidad no es otra que la de eliminar o mitigar, en la mayor medida posible, las vibraciones experimentadas por estructuras ante cargas de uso diario como andar, correr, patinar sobre ella, o cargas ambientales como viento. La estructura objeto de interés es modelada de una forma sencilla. Para ello se considera únicamente el modo de vibración principal de la misma. Como esquema de control se proponen controladores simples tipo P, PI o PID. El trabajo está orientado especialmente a estudiantes o investigadores noveles de perfil civil o mecánico. Con él, los estudiantes contarán con una herramienta para entender y profundizar en el control en lazo cerrado de sistemas, trabajando adicionalmente sobre una estructura real de tamaño reducido (algo difícil de llevar a cabo especialmente en la ingeniería civil), y controlador de bajo coste. El sistema queda abierto a la aplicación de técnicas de control alternativas.

Palabras clave: Estructuras esbeltas, Vibraciones, Modelado, Control Activo, Arduino, acelerómetros

1 INTRODUCCIÓN

La arquitectura y el diseño de estructuras civiles, como puentes y pasarelas peatonales, ha evolucionado a lo largo de la historia de varias maneras. En los últimos años, la tendencia es hacia realizaciones más ligeras y esbeltas en aras de las nuevas exigencias estéticas, y gracias a la utilización de nuevos materiales. Este nuevo tipo de estructuras presentan amortiguamiento y frecuencias naturales más bajas que en el pasado, y por lo tanto son más

susceptibles a la excitación por los usuarios humanos (caminando, corriendo, saltando, andando en bici, patines...), y cargas de uso diario (viento...). Estas cargas provocan vibraciones en la estructura mínimo molestas, cuando no peligrosas. Las vibraciones producidas raramente afectan a la resistencia a la fatiga o la seguridad, ya que para ello se realizan los estudios adecuados, pero sí pueden causar un problema de servicio, en términos de molestar a los usuarios.

Debido a que estas vibraciones pueden llegar a ser incómodas, para los usuarios especialmente sensibles a ellas, es necesario realizar el control de las mismas (reducción/eliminación), para así conseguir que no se produzcan o que no se perciban. El control citado puede realizarse mediante distintas soluciones: pasivas, activas[5], semiactivas[6], [8], [11] e híbridas. Así mismo técnicas de control aplicadas en la ingeniería civil lo están siendo en otros ámbitos [7], [10].

En este trabajo nos centraremos en el control activo, empleando como controlador, hardware de bajo coste basado Arduino y estrategias de control sencillas como P, PI o PID.

Otro de los objetivos del presente trabajo es mostrar si un equipo de laboratorio dedicado al estudio y análisis de sensores propios de la ingeniería civil (deformación: galgas extensiométricas eléctricas; desplazamiento: transformador Diferencial Variable Lineal (TDVL); velocidad: generador de cc; aceleración: piezoeléctrico), figura 1, y dotado así mismo de un actuador electromagnético (Shaker) [9], puede ser usado para mostrar al estudiante/investigador novel cómo realizar control activo de estructuras vivas (ligeras y esbeltas) tales como pasarelas peatonales, chimeneas, puentes atirantados... Se usará como sistema a controlar la ménsula del equipo (viga en voladizo empotrada en un extremo, modelada como sistema de un grado de libertad, forma más simple de caracterizar las estructuras anteriormente citadas). Como sensor para cerrar el lazo de control se usará el acelerómetro que

se halla montado sobre la ménsula, los acelerómetros son usados habitualmente para abordar estos problemas. Como actuador (excitador o shaker para nuestro fin) se usará el generador de funciones con su fuente de alimentación.

El trabajo se enmarca dentro de las actuaciones llevadas a cabo los autores en la Pasarela del Museo de la Ciencia de la ciudad de Valladolid, en la cual ya se han probado soluciones pasivas (TMD, tuned mass damper amortiguador de masa sintonizado) y activas basada en controlador Texas Instruments [3],[4]. El interés ahora se debe a que en la pasarela ha cambiado el piso de madera original por otro de chapa perforada, y se busca actualizar el hardware de control (sensores y controlador especialmente).

El artículo está organizado de la siguiente forma: después de una breve introducción, sección 1, la sección 2 describe los medios usados; la sección 3 muestra el modelado, identificación y simulación del sistema; la sección 4 está dedicada determinar el controlador y sus parámetros; la sección 5 incluye el modelo del actuador en el diseño; en la sección 6 se presenta cómo se ha llevado a cabo la programación del controlador en el sistema Arduino; la sección 7 muestra los resultados de las pruebas reales en el laboratorio, y finalmente, en la sección 8 se ofrecen algunas de las principales conclusiones. texto tendrá un interlineado sencillo y deberá estar justificado. Dejar una línea entre párrafos.

2 SISTEMA Y CONTROLADOR

El equipo que se pretende evaluar ha sido diseñado para la realización de prácticas de sensores de magnitudes físicas tales como desplazamiento, velocidad, aceleración lineal, y esfuerzos flexores. Se trata de la maqueta Alecop MF-540 [1], de la figura 1. Está formada por una ménsula vibrante (viga en voladizo empotada en un extremo) compuesta por dos láminas sujetas por sus extremos a un soporte fijo al bastidor, y que en su extremo libre presenta una varilla vertical donde están el actuador, el sensor de desplazamiento (TDVL) y el sensor de velocidad. Sobre la propia ménsula está el acelerómetro (sin electrónica alguna) figura 1.

Como actuador (excitador) se tiene una bobina que, alimentada con una señal oscilante, (procedente de un generador de funciones), hace vibrar la ménsula voluntad. Este actuador está compuesto por un devanado fijo y un imán unido a una varilla vertical, la cual a su vez está fijada a la ménsula vibrante (figura 2). Al alimentar el devanado con una corriente, ésta genera un flujo magnético, el cual produce sobre el imán una fuerza en dirección

vertical. Al estar sujeto el imán a la varilla vertical, la fuerza generada se traducirá en un movimiento de la ménsula. A mayor corriente se generará un mayor flujo y por consiguiente mayor fuerza de desplazamiento.

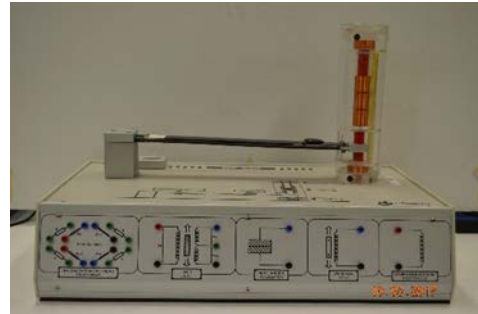


Figura 1: Equipo comercial usado. Parte inferior bornas para acceso a señales de los sensores y actuador.

En el panel frontal de la maqueta, figura 1, están situadas las bornas de conexión que dan acceso a las señales de los sensores y los de la bobina actuadora (todos ellos sin electrónica alguna).

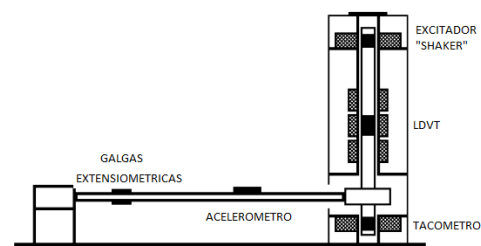


Figura 2: vista general del sistema, sus sensores y actuador

El equipo cuenta así mismo con los módulos necesarios, figura 3, para el acondicionamiento de las señales procedentes de los sensores desnudos de la figura 2, y fuente de alimentación del actuador.

Como hardware control se ha elegido el Arduino Mega ADK. Se caracteriza por tener: (1) gran capacidad de cálculo, alta CPU speed; (2) Entradas Analógicas capaces de leer nuestros acelerómetros; (3) Salidas PWM (modulación anchura de impulso) capaces de controlar nuestro actuador (en este caso mediante un Shield adicional); (4) Capacidad de memoria elevada. Se programa con el software Arduino.

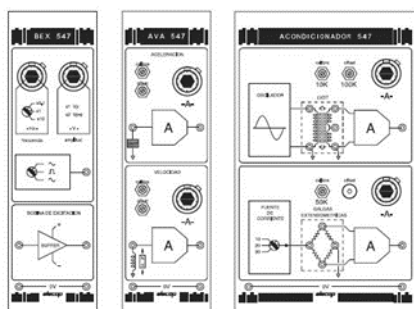


Figura 3: Fuente alimentación excitador (iz). Módulos acondicionadores de señal (centro y derecha)

Para poder alimentar al actuador (shaker) se requiere una señal analógica +/-10V y corriente suficiente. Dado que el controlador no incorpora salida analógico-digital alguna, se emplearán las salidas digitales disponibles en el arduino con capacidad para generar modulación de anchura de impulso. Esto obliga a usar un hardware adicional, un shield el cual gracias su entrada PWM y otra digital (para el control de sentido), nos permite generar la tensión analógica deseada (con la polaridad requerida y amperios suficientes) para aplicar al actuador disponible (shaker).

3 MODELADO/IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

Se va a controlar la ménsula de modo que perturbaciones externas (vibraciones) sean *reducidas* a niveles aceptables. Estos sistemas (estructuras esbeltas y ligeras) se caracterizan por tener un coeficiente de amortiguamiento extraordinariamente bajo (*son fuertemente subamortiguadas*), lo cual hace que presenten picos de resonancia grandes (*respuesta en frecuencia*), que amplifican enormemente armónicos presentes en las excitaciones próximas a la frecuencia natural, dando también lugar a *sobreelongaciones* grandes (*respuesta temporal*). Adicionalmente como las frecuencias a las que se presentan tales fenómenos son bajas (unos pocos Hz), los *tiempos de establecimiento* resultan grandes. Por tanto, habremos de buscar cómo *aumentar* el coeficiente de amortiguamiento para reducir los picos de resonancia y las sobreelongaciones.

Lo primero que hacemos es modelar e identificar el sistema, para seguidamente simular el comportamiento empleando Matlab/Simulink.

Como modelo matemático tomamos inicialmente el correspondiente a un sistema de segundo orden subamortiguado sin normalizar.

Para la identificación realizamos experimentos y ensayos en el laboratorio con los cuales hallamos los parámetros característicos del modelo matemático asociado. Empleamos el acelerómetro, el sensor de desplazamiento y las galgas extensiométricas para medir la vibración, posición y fuerza a la que está sometida la ménsula respectivamente. Mediante el excitador llevamos al sistema a resonancia y hallamos así su frecuencia natural. Seguidamente mediante pesos conocidos, hallamos la rigidez midiendo la respuesta estacionaria del sistema ante las distintas cargas aplicadas. Finalmente, cargamos el sistema, lo dejamos estabilizar, retiramos la carga y lo dejamos oscilar libremente. De este modo podemos hallar el coeficiente de amortiguamiento usando el decaimiento de la respuesta temporal del sistema.

El modelo matemático resultante es:

$$\frac{h}{F} = \frac{5.665}{s^2 + 0.6460s + 2191.64} \quad (1)$$

En donde:

h = posición vertical de extremo libre
 F = fuerza aplicada

El coeficiente de amortiguamiento resulta ser 0.0069, y la frecuencia natural 7.45Hz.

4 DISEÑO DEL CONTROLADOR

Usamos aquí configuraciones sencillas como lo son P, PI y PID, y comparamos resultados entre ellas.

La Función de Transferencia obtenida para nuestra estructura viene dada por (1). Ahora bien, usamos como variable controlada la aceleración dado que, la medición de la posición en estos casos no es viable y se emplean acelerómetros. Nuestra Función de Transferencia queda como:

$$\frac{a}{F} = \frac{5.665s^2}{s^2 + 0.6460s + 2191.64} \quad (2)$$

Ahora tenemos un cero doble en el origen en (2) debido a la consideración del acelerómetro en lugar del sensor de posición.

El modelo Simulink es el de la figura 4.

Cerrando el lazo y dado que la señal de referencia debe ser $0m/s^2$, (no queremos aceleración alguna en el sistema controlado), el modelo queda como se ve en la figura 5.

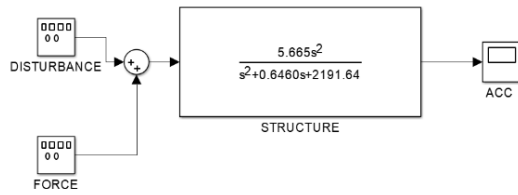


Figura 4. Modelo Simulink del Sistema en lazo abierto.

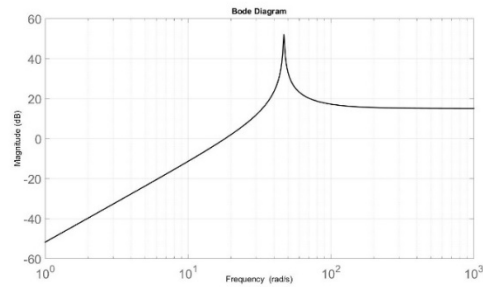


Figura 7. Respuesta en Frecuencia del modelo en lazo abierto

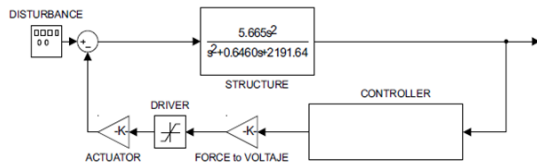


Figura 5. Modelo Simulink del Sistema en lazo cerrado.

La figura 6 muestra la simulación de la respuesta temporal de (2) ante una perturbación de entrada tipo escalón (considerando 0.024Kg, 0.2352N como carga razonable para el sistema, lo cual supone un 15.78% de la masa equivalente de la estructura). El sistema parece necesitar al menos 12s para que la perturbación desaparezca.

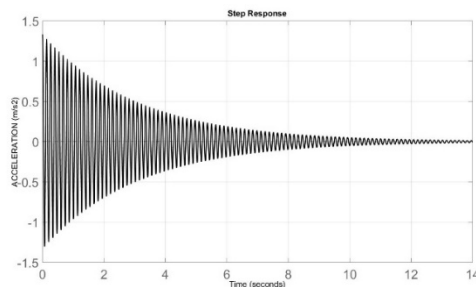


Figura 6. Respuesta escalón del modelo en lazo abierto.

La figura 7 muestra la Respuesta en Frecuencia de (2). De ella se desprende que las bajas frecuencias son muy atenuadas, las medias presentan resonancia y las altas son tratadas por igual. Nuestro objetivo es por tanto reducir/eliminar el fenómeno de resonancia, para evitar que el sistema amplifique armónicos presentes a las frecuencias correspondientes, produciendo un efecto no deseado en el sistema. La zona de altas frecuencias preocupa pero menos, dado que en las estructuras de nuestro interés armónicos por encima de 10Hz no suelen aparecer.

La tabla 1 muestra los resultados de la simulación, en términos de aceleración máxima y tiempo de establecimiento, de los casos lazo abierto y los tres en lazo cerrado (controladores P, PI y PID), ante perturbaciones escalón.

Tabla1.- Sistema Lazo Abierto vs Sistema Lazo Cerrado

Entrada/Sistema	$a_{cc\ max}$ m/s^2	t_{ss} s
Escalón/ LA	1.33	12.1
Escalón/ (LC-P)	0.67	24.2
Escalón/ (LC-PI)	0.000219	8.99
Escalón/ (LC-PID)	0.176	0.283

El caso lazo cerrado con controlador PID parece una buena solución, en tanto que caso lazo cerrado con controlador P se descarta por sus bajas prestaciones.

5 MODELADO DEL ACTUADOR

Dado que no conocemos el modelo matemático del actuador del equipo, en realidad es un generador de funciones según el fabricante [1], y diseñado para tareas de análisis no de control, en primera aproximación lo modelamos de la forma más sencilla posible, es decir, como una ganancia.

Para hallar la relación que existe de forma estática entre la tensión aplicada al actuador y la fuerza generada, realizamos un ensayo en el cual excitamos a la ménsula con una onda cuadrada de 1Vcc (y de muy baja frecuencia), dejamos que el sistema se estabilice, medimos el desplazamiento estacionario h_{ss} y con él deducimos la fuerza que el actuador ejerce, figura 8.

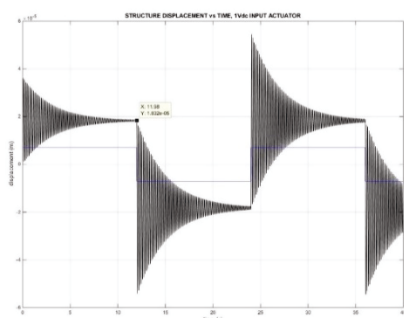


Figura 8 Posición ménsula bajo entrada 1Vcc al actuador

Del ensayo se obtiene que $h_{ss} = 0.01832\text{mm}$. Por tanto con los datos del anexo I, el actuador genera 0.00708mN/V . Tomamos esta expresión como función de transferencia del actuador, y volvemos a simular el comportamiento del sistema, (actuador incluido), para los casos con controladores PI y PID, que son los esquemas de control elegidos.

En la tabla 2 se resumen las prestaciones obtenidas con los nuevos controladores (PI y PIDn) al considerar el actuador en el diseño.

Tabla 2.- Sistema Lazo abierto vs Sistema lazo cerrado +Actuador

Entrada/Sistema	$acc\ max$ m/s^2	t_{ss} s
Escalón/ LA	1.33	12.1
Escalón/ (LC-PI)	0.946	9.64
Escalón/ (LC-PIDn)	1.18	6.94

La consideración del actuador, dadas sus limitaciones físicas (poca potencia), empeora la calidad del control. Las aceleraciones máximas mejoran al igual que los tiempos de establecimiento, pero menos de lo esperado.

6 PROGRAMACION DEL CONTROLADOR

El programa se ha dividido en varias partes (figura 9). Está basado en 3 librerías distintas que controlan las interrupciones, el Shield y el PID.

6.1 GESTIÓN DEL PERIODO DE MUESTREO

Para que el periodo de muestreo sea constante se usan las interrupciones temporales de Arduino. Es necesario emplear las librerías “avr/io.h” y “avr/interrupt.h”. Para trabajar con las interrupciones

en Arduino, primero se deben ajustar todos los parámetros del TIMER en la parte setup (antes de ajustarlos se deben deshabilitar las interrupciones globales para que no se activen mientras se modifican los parámetros del timer): se activa el modo comparación; se introduce el valor de comparación para que la interrupción de produzca cada 25 ms; se activa el prescaler del timer al valor adecuado; se activan las interrupciones para el TIMER. Para finalizar, se activan las introducciones globales. Una vez se han ajustado los parámetros, se crea el manejador del timer cuando se produce una interrupción: ISR (TIMER1_COMPA_vec).

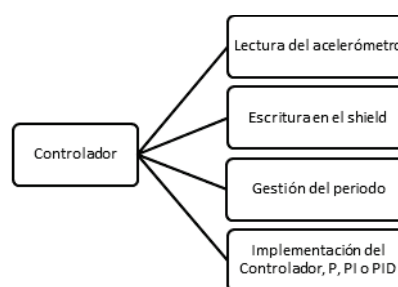


Figura 9 Estructura del programa para el Arduino

El valor de 25 ms no se ha elegido de forma arbitraria si no que se ha tomado un periodo de muestreo adecuado al sistema que estamos considerando, ya que según el teorema de Shannon debemos muestrear al menos al doble de la máxima frecuencia presente en el sistema. Se toma ésta como la frecuencia natural. En nuestro caso este valor es 7.45Hz. Por tanto debería fijarse la frecuencia de muestreo en al menos 14.9Hz equivalente $0.06711s = 67.11ms$ de periodo de muestreo. Como vemos, el valor de 25ms es menor que el periodo máximo de muestreo por lo tanto el muestreo es correcto. Adicionalmente este valor permite compatibilizar el control con el envío de datos para la monitorización, dado que el envío de datos por puerto serie está restringido a un tiempo mínimo de 20ms usamos 25ms para poder realizar todos los cálculos y poder enviar un dato mediante el puerto serie en cada periodo de muestreo.

6.2 ESCRITURA EN EL SHIELD

Aquí debe usarse librería que proporciona el fabricante del driver "DualMC33926MotorShield.h".

6.3 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR P, PI O PID

En esta parte se programa algoritmo de nuestro PID. Para ello Arduino proporciona la librería “PID_v1.h” la cual se debe configurar correctamente.

El modelo de PID que sigue e implementa esta librería puede verse en la figura 10.

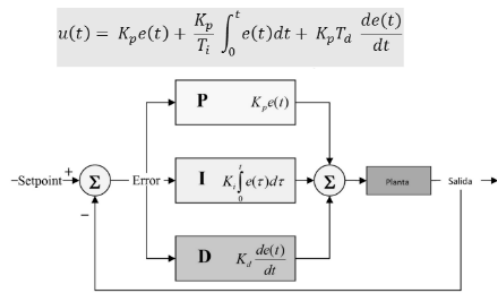


Figura 10. Algoritmo de control a implementar

La materialización de un PID trae consigo una serie de problemas no contemplados en el diseño. Estos son: amplificación del término derivativo y saturación del término integral. Arduino los soluciona y ofrece: ejecución con periodo de trabajo constante; eliminación del “Derivative Kick” (filtrado de acción derivativa), fenómeno que se produce por variaciones rápidas en la señal de referencia que se magnifican por la acción derivativa; y el anti Wind Up.

7 PRUEBAS SISTEMA: LAZO ABIERTO VS SISTEMA EN LAZO CERRADO

Con los parámetros teóricos PI_n y PID_n hallados, pasamos seguidamente a comprobar su validez en la situación real, es decir trabajando sobre el equipo del laboratorio. Para ello se monta el experimento, figura 11.

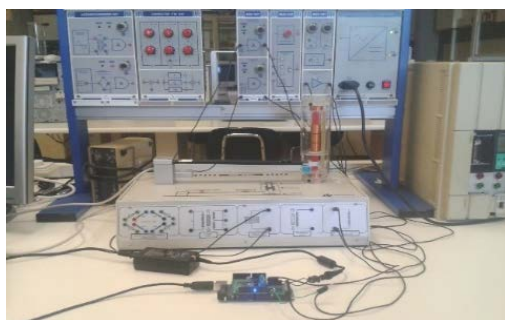


Figura 11. Montaje realizado para experimentar con la ménsula y el microcontrolador.

Ello supone:

- Programar el PI y PID en nuestro Arduino Mega ADK (como ya se ha explicado).
- Conectar la señal del acelerómetro a su acondicionador.

- Conectar la salida del acondicionador del acelerómetro a la entrada analógica del Arduino.
- Conectar la salida del Shield a la entrada de la fuente de alimentación del actuador para proporcionar la potencia necesaria a la bobina excitadora.
- Cargar los programas en el controlador y ponerlo en marcha.
- Perturbar la ménsula y dejarla oscilar libremente. Es decir, se aplica el peso elegido (0.024Kg) al extremo de la ménsula y una vez alcanzado el régimen estacionario, se retira y deja oscilar.
- Realizar pruebas para los casos: sistema en lazo abierto; sistema en lazo cerrado controlado con el PI_n; sistema en lazo cerrado controlado el PID_n.
- Registrar y analizar los datos generados.

7.1 EXPERIMENTO SISTEMA EN LAZOABIERTO

La respuesta del sistema al ser “liberado” de la carga inicial aplicada trabajando en modo manual sin acción de control alguna, puede verse en la figura 12 (curva superior). La aceleración máxima experimentada fue de 1.61m/s². El tiempo de establecimiento resultó ser de 13.2s.

7.2 EXPERIMENTO CON CONTROLADOR PI_n

En este caso, sistema operando en modo automático en lazo cerrado con controlador proporcional integral y sistema anti windup [2], recibió una fuerza que le produjo una aceleración máxima de 1.47m/s². En la figura 12 (curva inferior) vemos la evolución en el tiempo de la señal. El tiempo de establecimiento resultó ser 8.60s.

7.3 EXPERIMENTO CON CONTROLADOR PID_n

Finalmente mostramos el resultado al utilizar el controlador PID incluyendo filtrado de la parte derivativa y sistema anti windup [2], figura 12 (curva central). En esta ocasión la aceleración inicial fue de 1.45m/s². El tiempo de establecimiento resultante 7.30s.

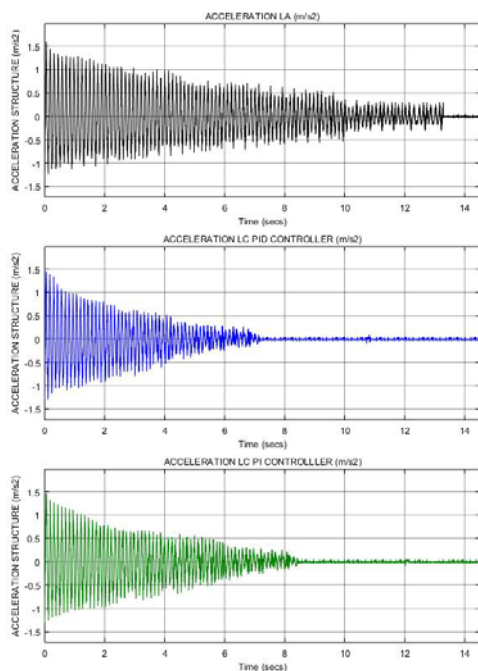


Figura 12 Aceleraciones de la ménsula en los tres casos: arriba lazo abierto, centro lazo cerrado PID, abajo lazo cerrado PI.

7.4 COMPARATIVA ENTRE FUNCIONAMIENTO EN LAZO ABIERTO Y FUNCIONAMIENTO LAZO CERRADO

7.4.1 Sistema en lazo abierto y sistema controlado con controlador PI

La comparación entre el caso lazo abierto y lazo cerrado con controlador PI indica que el tiempo de establecimiento se reduce un 34.84%, y que la señal en los cuatro primeros segundos mejora notablemente en favor del sistema con el controlador PI.

7.4.2 Sistema en lazo abierto y sistema controlado con controlador PID

En este caso, la comparación entre el caso lazo abierto y caso lazo cerrado con el controlador PIDn empleado, indica de nuevo que el tiempo de establecimiento mejora al reducirse un 44.69% , y la señal en los cuatro primeros mejora igualmente en favor del sistema con el controlador PIDn.

7.4.3 Sistema controlado con PI vs sistema controlado con PID

La comparación ahora entre ambos esquemas de control, muestra claramente ligera ventaja del PIDn tanto en cuestión de tiempo de estabilización, como

de evolución dinámica (véanse los 2 primeros segundos figura 12).

La tabla 3 resume las mejoras conseguibles dadas las limitaciones del excitador disponible.

Tabla 3.- Ménsula vs Ménsula+Controladores+actuador

Entrada/sistema	a _{cc} max m/s ²	t _{ss} s	%mejora a _{cc} max	%mejora t _{ss}
Escalón/ LA	1.61	13.2		
Escalón/ LC,PID	1.45	7.30	9.93	44.69
Escalón/LC,PI	1.47	8.60	8.69	34.84

8 CONCLUSIONES

Como hemos podido ver en los experimentos reales a nivel laboratorio, el control en lazo cerrado mejora la respuesta del sistema, pero menos de lo esperado. Se ha conseguido una reducción en el tiempo de establecimiento del 34.84%. en el caso del PI, y del 44.69% en el caso del PID, mejorando los transitorios y los máximos iniciales, lo cual supone una mejora notable, y todo ello con estrategias de control sencillas.

Los resultados obtenidos confirman que es posible emplear el microcontrolador seleccionado (Arduino), y que el equipo, propuesto (maqueta Alecop), puede ser empleado no sólo para estudiar sensores (cometido principal del mismo), sino también para mostrar, a nivel de laboratorio, a estudiantes e investigadores noveles, cómo puede aplicarse la teoría de control a estructuras civiles para mejorar su estado vibratorio.

Finalmente, se han desarrollado tres tipos de programas de apoyo para el estudio y control en lazo cerrado del sistema mediante el microcontrolador. Dos programas con el software y entorno de Arduino y Netbeans (el del lectura acelerómetro, control y escritura en driver); y un tercero para tomar datos y exportar a fichero para su posterior tratamiento con Matlab, Excel...

Con dicho software el siguiente paso será la aplicación, a la pasarela del Museo de la Ciencia de la ciudad de Valladolid.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo recibido por el ITAP y el departamento ISA de la EII UVA, prestando equipos e instalaciones.

ACTIVE CONTROL OF VIBRATIONS IN SLENDER STRUCTURES

Abstract

The aim of this work is to study the active control of slender civil structures (pedestrian footbridges), using a laboratory equipment and a low cost microcontroller (Arduino), for teaching and research purposes. It shows, in a simple way, the steps to put in operation a feedback control system. This controller is intended to remove or mitigate, as much as possible, the vibrations of the structure caused by the daily use of users (walking, running, skating) or environmental loads like wind. A simple model of the experimental structure is obtained attending to main mode of vibration. This work targets students and young researchers, for this reason only P, PI and PID controllers are used, but it is open to work with other types of controllers like optimal control, fuzzy control.

Keywords: Control of Vibrations in Slender Structures using simple and low cost solution.

Referencias

- [1] Alecop, 2017. <http://www.alecop.com/equipamiento-didactico/areas/captadores-regulacion-de-procesos-y-automatas-programables/estudio-de-los-captadores-de-magnitudes-fisicas-serie-540-3/> (último acceso Junio 2019).
- [2] Aström K,J., Wittenmark B. 2013. Computer-Controlled Systems: Theory and Design. Dover Publications, ISBN 9780486486130
- [3] Casado Sánchez, C., Sebastián Sánz, J. de, Muñoz Díaz, I., Poncela Méndez, A., Lorenzana Ibán A. 2011 Control de Vibraciones en Pasarelas Peatonales Dyna (ISSN: 0012-7361) Vol 86, nº3. Págs 318 a 327, junio-julio 2011. Ed. Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España.
- [4] Casado, Carlos M., Díaz, Iván. Sebastián, Jesús de. Poncela, Alfonso V. Lorenzana, Antolín. 2013. Implementation of passive and active vibration control on an in-service footbridge. Structural Control and Health Monitoring Vol: 20, issue:1, Págs: 70 a 87. Enero 2013. <http://onlinelibrary.wiley.com/DOI/10.1002/stc.v20.1/issuetoc>
- [5] Chen, Wai-Fah. Duan, L. 1999. Bridge Engineering Hand Book, Capítulo 59: Active Control in Bridge Engineering. ISBN 0-8493-7434-0. Publicado por CRC Press LLC.
- [6] Hernández A, Marichal, G.N, Poncela, A.V, Padrón, I. 2015. Design of intelligent control strategies using a magnetorheological damper for span structure. Smart Structures and Systems, An International Journal ISSN: 1738-1584(Print),ISSN: 1738-1991(Online) Volumen 15,ssue: 4,Páginas: 931-947,Abril 2015 Editorial (si libro): Copyright © 2015 Techno-Press, Ltd. Korera Korea.
- [7] Hurel Ezeta J., Mandow, A., García Cerezo, A. 2013. Los Sistemas de Suspensión Activa y Semiactiva: Una Revisión. Revista RIAI vol10 (2013) págs. 121–132 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2013.03.002>.
- [8] Matía, F, Marichal, G. N, Jiménez, E. (2014).Fuzzy Modeling and Control: Theory and Applications, ISBN 978-94-6239-081-2, DOI: 10.2991/978-94-6239-082-9 DOI: 10.2991/978-94-6239-082-9_9 (Cap9) Editorial Atlantis Computational Intelligence Systems, Vol. 9 Páginas,177-189. Atlantis Press & SPRINGER
- [9] Poncela, A., Moya, E., García, F.J., Peinador, C. 2017. Automatización de la realización de prácticas en la maqueta Alecop MF-540. Libro de Actas del XXIV SAEII17. pp 73. Julio 2017, Valencia, España. ISBN 978-84-606-8573-9
- [10] Tudón-Martínez J.C., Verrier S., Morales-Menendez R., Sename O., (2016) Control Tolerante a Fallas en una Suspensión Automotriz Semi-Activa Revista RIAI vol 13 (2016) 56–6. 2015 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L.U. <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2015.02.009>
- [11] Xu Z-D, Guo Y-Q, Zhu J-T, Xu F-H. 2017. Intelligent Vibration Control in Civil Engineering Structures ISBN 978-0-12-405874-3. Academic Press Elsevier



© 2019 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).