

# Diseño y control de un sistema de 2 G.D.L. formado por músculos neumáticos en oposición

Sabater, J.M., Azorín, J.M., Castillo, M., Ñeco, R., Jiménez, L.M.  
Departamento Ingeniería Sistemas Industriales  
Universidad Miguel Hernandez  
j.sabater@umh.es

## Resumen

*Un aspecto importante en la evolución y desarrollo de nuevas aplicaciones robóticas reside en el uso y potenciación de las características particulares de los diferentes actuadores. Este artículo presenta los trabajos de diseño, modelado y control de un sistema de 2 grados de libertad formado por cuatro músculos neumáticos trabajando en oposición. Las aplicaciones del dispositivo diseñado son variadas, y en la actualidad está siendo utilizado tanto para la docencia en aspectos de control en posición de sistemas neumáticos como en la investigación de nuevas aplicaciones robóticas destinadas a aplicaciones de interacción no-rígida entre hombre y máquina.*

**Palabras clave:** Músculos neumáticos, control, robótica, interacción hombre-máquina.

## 1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la robótica se encuentra indisolublemente ligado a la evolución y uso de diferentes actuadores que proporcionen movimiento a los dispositivos mecánicos. Muchas de las aplicaciones presentes y futuras precisan de una evolución de los actuadores utilizados más coherente con sus características particulares.

Uno de los actuadores a los que todavía no se le ha explorado suficientemente es el músculo neumático. El catedrático alemán Franz Reuleaux (1829-1905) ya describió en el año 1872 el funcionamiento de un actuador neumático. El actuador por músculo neumático (PMA) es un dispositivo mecánico de actuación cuyo modo de funcionamiento fue inspirado por el de los músculos biológicos (figura 1). Consiste en un tubo interno de caucho, que aloja aire a presión, recubierto por una malla de fibras trenzadas. Uno de los extremos se encuentra cerrado por una placa y es por donde el músculo aplicará la fuerza al exterior. Al introducir aire a presión en el tubo de caucho, éste se hincha expandiéndose en sentido transversal, lo cual provoca en la malla de fibras una tensión en sentido tangencial al tubo de caucho y ortogonal

al eje de rotación del mismo. La malla de fibras inextensible está trenzada en forma de rombo.

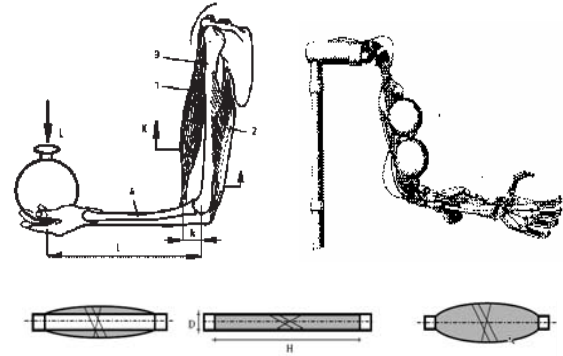


Figura 1: Inspiración y concepto de músculo neumático

El músculo neumático presenta una serie de características particulares que pueden considerarse como ventajas o desventajas en según que aplicación [1]. Estas características les permiten abarcar un amplio rango de aplicaciones [2], como por ejemplo aplicaciones de elevada carga en ambientes hostiles, como puede ser un manipulador para el vaciado de la vasija de un reactor nuclear [3], brazos manipuladores destinados a la interacción suave hombre-máquina [4] [5] [6], o pinzas especiales para aplicaciones de grasping específicas [7]. Sin embargo, una limitación común en todas estas aplicaciones es la referente al control en posición del actuador neumático [8], debido a la dificultad inherente debida a la compresibilidad del aire y a las no linealidades (alta fricción, banda muerta, etc.) del propio actuador. Numerosos investigadores han propuesto soluciones tratando de obtener modelos matemáticos teóricos del actuador neumático [9].

El presente artículo presenta brevemente los trabajos realizados en la el laboratorio de robótica de la Universidad Miguel Hernández sobre el modelado y control de un sistema de 2 grados de libertad actuado por músculos neumáticos en oposición [10]. Los modelos utilizados son dos, uno basado en un modelado teórico, (adaptado de [11]) y otro basado en un modelo empírico identificado. Los resultados obtenidos permiten utilizar la pla-

taforma diseñada tanto para la docencia de conceptos de control de sistemas neumáticos como para el desarrollo de sistemas hombre-máquina no rígidos.

## 2 SISTEMA DESARROLLADO

Se trata de un dispositivo robótico de 2 grados de libertad inspirado en los movimientos del hombro humano. Cuenta con cuatro actuadores por músculo neumático, dispuestos formando un mecanismo paralelo y enfrentados dos a dos, con los cuales se consigue el movimiento del eje central (figuras 2, 3). Este eje central hace las veces de un brazo. Este brazo se encuentra articulado en uno de sus extremos por una articulación universal, de forma que funciona análogamente a un joystick esférico de 2 grados de libertad.

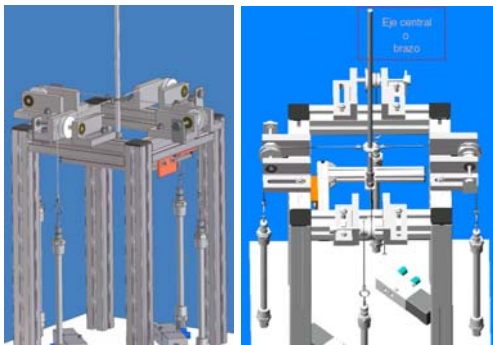


Figura 2: Esquema del dispositivo desarrollado

### 2.1 DISEÑO MECÁNICO

La disposición mecánica de los diferentes componentes permite estudiar el comportamiento de los actuadores trabajando en oposición. Se ha optado por una configuración paralela en la que los actuadores trabajan sobre una misma plataforma final, constituida por una arandela que se mueve en el plano  $XY$ .

El sistema ha sido construido con perfiles de aluminio y piezas mecanizadas en el Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales de la Universidad Miguel Hernández. Cada uno de los cuatro actuadores dispone de un potenciómetro acoplado al eje de rotación de forma que se conoce la posición de cada actuador.

### 2.2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

#### 2.2.1 Arquitectura hardware

La arquitectura hardware está compuesta por los siguientes equipos:

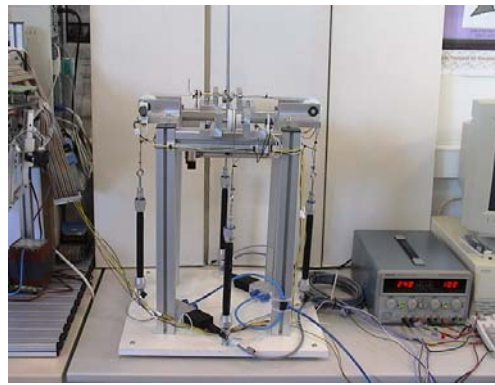


Figura 3: Foto del dispositivo

- Ordenador personal: CPU a 500 MHz, 256 MB SDRAM; S.O: Microsoft Windows 2000.
- Tarjeta de control dSpace DS1103, conectada al bus pci del PC.
- Válvulas MPYE-5-1/8-HF-010-B de Festo.
- Músculos neumáticos MAS-... de Festo.
- Potenciómetros monovuelta de Piher.

Se han realizado dos implementaciones, una con dos válvulas, de forma que cada una de las válvulas está conectada a dos músculos neumáticos, y otra implementación en la que cada uno de los actuadores está comandado por una válvula. Los músculos están enfrentados y cuando uno de ellos se contrae el otro se estira, y viceversa, obteniéndose el movimiento del brazo o eje central. El movimiento se obtiene al introducir más o menos caudal de aire en los actuadores por músculo neumático, gracias al desplazamiento de la corredera de las válvulas. La posición del brazo se lee a través de los potenciómetros.

#### 2.2.2 Arquitectura software

La sencilla arquitectura software utilizada hace uso de los siguientes componentes:

**RTLlib** Librería en C proporcionadas por dSpace que permite programar S-functions en Simulink o implementar un controlador manualmente usando programas escritos en C.

**Mlib/Mtrace** Librerías de interfaz Matlab-dSpace. Permiten el acceso directo al hardware dSpace desde el entorno de trabajo de Matlab. Gracias a estas librerías es posible unir la capacidad de cálculo de Matlab con la captura de datos y la variación de parámetros de control en tiempo real.

**ControlDesk** Software de dSpace que ofrece una gran variedad de instrumentos virtuales para crear interfaces gráficas y permite acceder a las variables de los programas que están siendo ejecutados en la tarjeta de control.

**Matlab/Simulink** La secuencia de trabajo con el sistema desarrollado es la siguiente; usar el entorno Matlab/Simulink y las librerías RTI/RTlib para construir los modelos de control, siendo el código en C automáticamente generado, compilado y descargado a la tarjeta de control DS1103. Una vez se esté ejecutando en la tarjeta el modelo, se puede hacer uso de ControlDesk para visualizar los datos leídos o realizar cambios en los parámetros de control.

### 3 MODELADO E IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

#### 3.1 Cinemática del sistema

La figura 4 muestra que si el actuador por músculo neumático se comprime una distancia  $d$ , el brazo se desplazará una distancia  $x$ , y la punta de éste una distancia  $x'$  (esta distancia es la proyección sobre el plano XY de la posición de la punta del brazo).

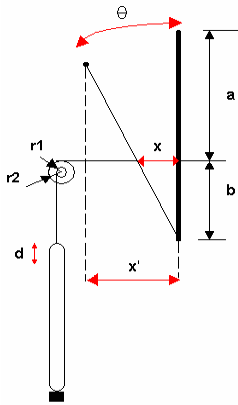


Figura 4: Esquema de la cinemática del dispositivo

Las poleas se introdujeron en el diseño mecánico para tener un factor de aumento en distancia desplazada por el brazo respecto a la distancia que el músculo neumático es capaz de contraerse mediante su dilatación, por tanto, la ecuación que relaciona estos desplazamientos es:

$$x = d \cdot \frac{r_2}{r_1} \quad (1)$$

El ángulo girado por el brazo se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\tan \theta = \frac{x}{b} = \frac{x'}{a+b} \quad (2)$$

y sustituyendo se obtiene que:

$$x' = \frac{d \cdot r_2 \cdot (a+b)}{b \cdot r_1} \quad (3)$$

#### 3.2 Identificación del sistema

En esta sección se describen los pasos dados para realizar una identificación de los ejes X e Y del sistema. Como resultado de esta identificación se obtuvieron los modelos que sirvieron como punto de partida para realizar un control en posición. Los modelos obtenidos fueron dos funciones de transferencia discreta, una para cada uno de los ejes.

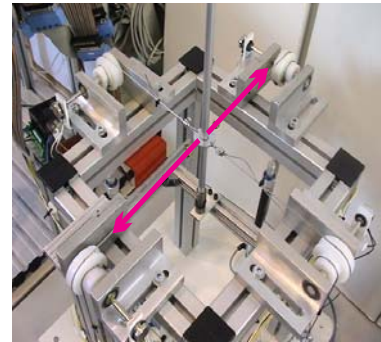


Figura 5: Movimiento del eje X

Tabla 1: Parámetros de simulación

Tiempo de muestreo	0.01s
Paso fijo de integración	0.01s
Solver	paso fijo-ode1(Euler)
multitarea	single-task mode

Introduciendo un escalón de 0.25V en un eje y con las siguientes opciones de simulación (tabla 1), se utilizó la herramienta ControlDesk para obtener los datos reales y la toolbox de identificación de Matlab para, con un modelo de tercer orden  $arx331$ , obtener la función de transferencia (4).

$$Gp_x = \frac{-0.2932 \cdot z^{-1}}{1 - 0.4832 \cdot z^{-1} - 0.2098 \cdot z^{-2} - 0.2861 \cdot z^{-3}} \quad (4)$$

En la figura 6 se muestra una comparación entre la salida real del sistema y la del modelo.

Análogamente se obtuvo la función de transferencia para el eje Y.

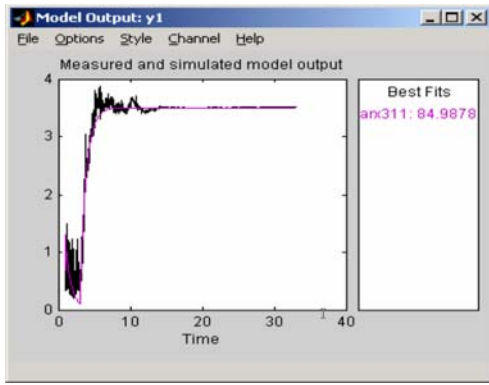


Figura 6: Comparación de la salida real y la del modelo identificado

$$Gp_y = \frac{-0.8206 \cdot z^{-1}}{1 - 0.4554 \cdot z^{-1} - 0.2177 \cdot z^{-2} - 0.2819 \cdot z^{-3}} \quad (5)$$

#### 4 CONTROL DEL SISTEMA

Uno de los objetivos del trabajo era realizar una comparativa entre diferentes reguladores para un control en posición del sistema. Se obtuvieron tanto reguladores empíricos como reguladores calculados a partir de la función de transferencia identificada. Se muestra a continuación las ecuaciones de los reguladores obtenidos que mejor comportamiento obtuvieron.

##### Ziegler-Nichols

Las funciones de transferencia obtenidas para los ejes X e Y son las mostradas en (6) y (7)

$$G_{PIDx}(z) = \frac{0.96 \cdot z - 0.9538}{z - 1} \quad (6)$$

$$G_{PIDy}(z) = \frac{0.91 \cdot z - 0.9047}{z - 1} \quad (7)$$

La figura 7 muestra la salida ante una entrada escalón de 10mm del sistema identificado (rojo) y del sistema real (azul).

##### Por asignación de polos

Utilizando el modelo discreto del sistema se obtuvieron los siguientes reguladores por asignación de polos:

$$G_{Rx}(z) = \frac{-3.4110 \cdot z^3 + 1.6479 \cdot z^2 + 0.71569 \cdot z + 0.97578}{z^2 \cdot (z - 1)} \quad (8)$$

$$G_{Ry}(z) = \frac{-1.2185 \cdot z^3 + 0.55485 \cdot z^2 + 0.26524 \cdot z + 0.34353}{z^2 \cdot (z - 1)} \quad (9)$$

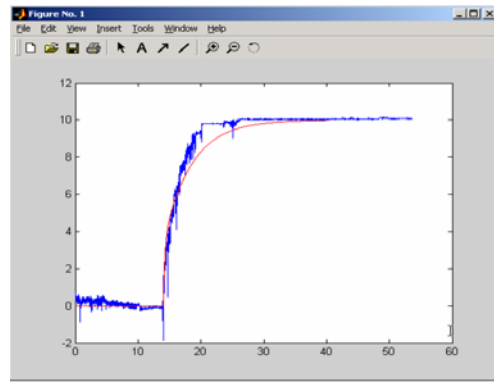


Figura 7: Salida ante entrada escalón

La figura 8 muestra la salida ante una entrada escalón de 10mm del sistema identificado (rojo) y del sistema real (azul).

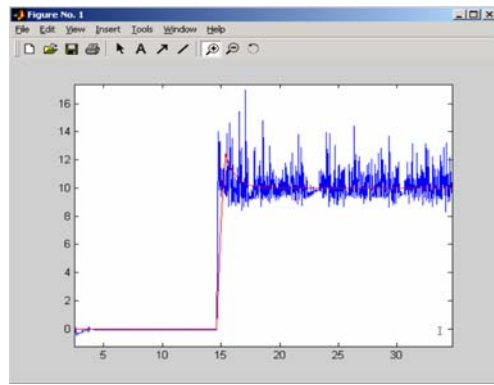


Figura 8: Salida ante entrada escalón

#### 5 APLICACIONES DEL SISTEMA DESARROLLADO

Las posibles aplicaciones de un sistema no rígido como el presentado en este artículo pueden clasificarse en dos ámbitos:

- Por un lado, constituye una plataforma muy útil para la docencia del control de sistemas neumáticos. La arquitectura presentada permite, como se ha podido ver, implementar diferentes reguladores y comprobar el funcionamiento de los mismos.
- Por otra parte, y de acuerdo con el objetivo inicial del trabajo, el dispositivo diseñado constituye un mecanismo robótico de 2 grados de libertad adecuado para la interacción hombre-máquina, dado que presenta una baja rigidez frente a los contactos. Esta característica permite que el dispositivo pueda utilizarse como:

- Manipulador. El auge de los robots de servicio destinados a trabajar cooperativamente con personal humano hace que sea de especial importancia el estudio de los contactos no-rígidos entre el manipulador y el usuario del mismo. Añadiendo sensores de presión a los músculos y haciendo uso del modelo matemático desarrollado se pueden estudiar las fuerzas que aparecen en dicha interacción.
- Dispositivo háptico. El dispositivo también puede trabajar como un joystick esférico de dos grados de libertad. Aunque el bajo ancho de banda de los músculos es una limitación para muchas aplicaciones, la característica de permitir contactos no rígidos puede ser útil en determinadas circunstancias.

## 6 CONCLUSIONES

Se han presentado los primeros trabajos realizados en el diseño, modelado y control de un dispositivo construido con músculos neumáticos. Las características particulares de estos actuadores merecen un estudio detallado de su posible aplicación a determinadas tareas. Se ha presentado tanto el estado actual del sistema como posibles ámbitos de aplicación del mismo.

## Referencias

- [1] Manual de instrucciones del músculo neumático. MAS-... Festo, Esslingen 2000.
- [2] Hesse, S., (2003) El músculo neumático y sus aplicaciones. 150 ejemplos prácticos con el músculo neumático. *Blue Digest on automation*. Festo, Esslingen 2000.
- [3] D.G. Caldwell, N. Tsagarakis, G.A. Medrano-Cerda, J. Schoeld, S. Brown, "A pneumatic muscle actuator driven manipulator for nuclear waste retrieval", *Control Engineering Practice* 9(2001) 23-26
- [4] Toshiro Noritsugu and Toshihiro Tanaka, "Application of Rubber Artificial Muscle Manipulator as a Rehabilitation Robot", *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, Vol. 2, N. 4,1997
- [5] Northrup, S., E.E. Brown Jr., O. Parlaktuna, and K. Kawamura, "Biologically-Inspired Control Architecture for an Upper Limb, Intelligent Robotic Orthosis", *International Journal of Human-friendly Welfare*
- [6] Gabriëlle J.M. Tuijthof, Just L. Herder "Design, actuation and control of an anthropomorphic robot arm", *Mechanism and Machine Theory* 35 (2000) 945-962
- [7] E.V. Mangan, D.A. Kingsley, R.D. Quinn, G.P. Sutton, J.M. Mansour and H.J. Chiel, "A Biologically inspired gripping device". *Int. Conference on Intelligent Manipulation and Grasping*, July 1-2, 2004. Genoa.
- [8] Manuello Bertetto, A.; Ruggiu, M., "Characterization and modeling of air muscles". *Mechanics Research Communications* Volume: 31, Issue: 2 March - April, 2004 pp. 185-194
- [9] Robert B. van Varseveld and Gary M. Bone, "Accurate Position Control of a Pneumatic Actuator Using On/Off Solenoid Valves", *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, Vol. 2, N. 3,1997
- [10] Castillo, M., Diseño, identificación y control de un sistema de dos grados de libertad formado por cuatro músculos neumáticos en oposición. PFC - UMH 2004.
- [11] R.T. Pack, J.L. Christopher and K. Kawamura. "A rubber actuator based structure-climbing inspecton robot". In *Proc. IEEE conf. on Robotics and Automation*, 3, 1997