

# DISEÑO MECATRÓNICO DE UN DEDO ANTROPOMÓRFICO

## PARTE II: ELECTRÓNICA Y CONTROL

Francisco García-Córdova, José J. Martínez Alvarez,  
Antonio Guerrero González, y Juan López Coronado

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad Politécnica de Cartagena.  
Campus Muralla del Mar. C/Doctor Fleming S/N, 30202, Cartagena, Murcia, España.  
francisco.garcia/ jjavier.martinez/ antonio.guerrero/ jl.coronado/ @upct.es

### Resumen

*En este artículo se describe el desarrollo general de las plataformas electrónicas y de control utilizadas para crear y desarrollar, un sistema mecatrónico que emula de manera antropomórfica la forma de un dedo de dos articulaciones, de tipo oponente. El resultado final al diseñar estas plataformas, ha sido la de conseguir un soporte para la investigación que permita el ensayo y la experimentación, de algoritmos de control inspirados en modelos neurobiológicos, la cual es una línea de investigación del grupo de NEUROtecnología, COntrol y Robótica (NEUROCOR) de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT). El sistema está compuesto, por tres plataformas claramente diferenciables entre sí (mecánica, electrónica y control). Estas Plataformas abarcan marcadamente cada una de estas áreas. Además, se presenta una visión global de la simbiosis y relación que existe entre las distintas áreas técnicas, que abarca el sistema mecatrónico del dedo antropomorfo.*

**Palabras clave:** Sistema mecatrónico, plataforma de investigación, dedo antropomorfo, control neurobiológico.

## 1 INTRODUCCIÓN

El sistema que se describe a continuación, consiste del diseño mecatrónico de un dedo antropomorfo formado por tres plataformas diferentes entre sí (mecánica, electrónica y control). En este sistema mecatrónico se incluye el desarrollo integral de todos sus componentes y por consiguiente, el desarrollo de cada una de las facetas técnicas de cada área de conocimiento que engloba al sistema. En cuanto al sistema de control y a la plataforma electrónica involucrados en el diseño, los dispositivos FPGAs suponen una de las herramientas más apropiada que hay en la actualidad, para abordar los aspectos de diseño e imple-

mentación de sistemas mecatrónicos, esto es debido principalmente, a la facilidad que tienen estos dispositivos de amoldarse y adaptarse a cualquier especificación de diseño, así como su capacidad de resolver distintos procesos independientes de forma concurrente y con altas tasas de velocidad.

Este artículo está organizado de la siguiente forma. En la Sección 2 se muestra la arquitectura general del sistema mecatrónico. Las características del hardware electrónico se presenta en la Sección 3. En la Sección 4 se presenta la estructura funcional de la electrónica interna en la FPGA. Las características del software de comunicación entre el PC y la interface de comunicación del dedo antropomorfo se muestra en la Sección 5. En la Sección 6 se presenta la arquitectura de control del dedo antropomorfo. Finalmente, en la Sección 7 se muestra las conclusiones y trabajos futuros.

## 2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EQUIPO

La estructura hardware del equipo está formada por. Una plataforma mecánica que incorpora; actuadores, eslabones mecánicos, tendones ... En general, aquellos dispositivos necesarios para emular mecánicamente un dedo antropomórfico de dos articulaciones. Una plataforma electrónica, que aparte de haber sido diseñada para manejar óptimamente el resto del hardware, se ha estudiado dimensionalmente para permitir su mejor alojamiento y acoplamiento a la mecánica. Y una plataforma software relacionada con las anteriores, que permite a través de la interface de comunicación, realizar el control inteligente del sistema, desde el PC. La Figura 1 muestra la arquitectura del sistema mecatrónico del dedo antropomorfo.

Haciendo una descripción más detallada del sistema y por tanto de cada una de las tres plataformas que forman el sistema, podemos ver más claramente en que consiste y como se realizan las

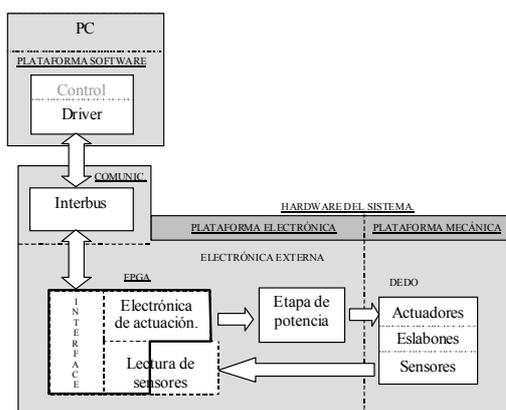


Figura 1: Arquitectura general del sistema mecatrónico.

interacciones y nexos de unión entre las plataformas que forman parte de este sistema.

#### - Plataforma mecánica del dedo antropomorfo

La plataforma mecánica está constituida fundamentalmente por una estructura metálica, un conjunto de eslabones mecánicos (falanges, tendones, poleas, acoplamientos ...) que emulan en conjunto, la forma y funcionamiento de un dedo antropomórfico. Cuatro motores de corriente continua que se utilizan para mover los eslabones del mecanismo oponente. Y por último, un conjunto de sensores necesarios para capturar las señales de interés del sistema y llevarlas a la plataforma de control inteligente para realizar desde allí, el control de alto nivel del sistema.

#### - Plataforma electrónica

Esta parte del sistema está constituida a su vez, por dos bloques principales y claramente diferenciables, que son: la electrónica de comunicación entre el PC el sistema, y la electrónica de proceso que maneja y hace funcionar al resto del hardware. Dentro de la electrónica de proceso, hay que diferenciar dos partes (división establecida por el hecho de estar o no inferidas internamente en la FPGA). El por qué se ha hecho esta división, está claramente determinada, por la imposibilidad que presentan las FPGA de integrar determinados tipos de circuitos electrónicos por ejemplo: circuitos de potencia, circuitos analógicos etc. Los bloques que en definitiva forman la plataforma electrónica son:

A) Interface de comunicación entre el PC y el resto del sistema.

Esta tarjeta a partir del bus ISA AT del PC, reconfigura internamente un bus único genérico de

16 bits, y sirve como medio físico de comunicación entre el PC y el resto del hardware.

B) Electrónica de proceso no inferida en la FPGA.

Dentro de la parte de la electrónica, que no está integrada dentro de la FPGA, se pueden encontrar a su vez cuatro partes.

- - Etapa de potencia de actuación de motores.
- Etapa de acondicionamiento de medidas de corriente.
- Módulo de configuración de la FPGA.
- Conectores de entrada/salida.

Las funciones principales de este bloque son:

- - Suministrar la potencia demandada por los cuatro motores del sistema.
- Captación y acondicionamiento de las señales analógicas de tipo corriente, usadas para la realimentación de posición de las articulaciones.
- Configurar la FPGA del sistema con el programa adecuado de comunicación con el PC y manejo del resto del hardware (electrónica inferida en la FPGA).
- Implantar los conectores físicos para conectar la electrónica con: la plataforma mecánica (motores, sensores), con la tarjeta de comunicación 'Interbus' y fuente de alimentación del sistema.

C) Electrónica de proceso inferida en la FPGA.

Este bloque se encuentra dividido a su vez, en un conjunto de sub-bloques con la característica en común, de que están constituidos por circuitos de carácter digital (y que posibilita el hecho de que estén inferidos en la FPGA, evidentemente). A continuación se pasa a describir cada uno de estos sub-bloques.

- - Interface de comunicación.
- Módulo de gestión y decodificación de direcciones del mapa de memoria.
- Módulo generador de señales de actuación.
- Etapa de lectura y posproceso de encoders.

Cuyas funciones principales dentro del sistema son:

- – Permitir la comunicación bidireccional del sistema con el PC y por tanto, la transferencia de datos de interés como son; la posición real de cada uno de los cuatro motor, o las consignas de velocidad usadas por el modulo de PWM.
- Gestiona y decodifica el espacio o mapa de memoria reservado al sistema, con el objetivo de asignarlo posteriormente a los recursos internos de la FPGA y evitar posibles conflictos en la electrónica.
- Generar a partir de las consignas de velocidad proporcionada por el PC, las señales de PWM y sentido de giro utilizada por la etapa de potencia para mover los cuatro motores del sistema.
- Reconoce y lee las señales procedentes de los encoders para procesarlas y obtener la posición real de cada uno de los cuatro servomotores del sistema.

#### - Plataforma software

Esta plataforma tiene carácter de sistema abierto, y gracias a que se ha ideado como librería de enlace dinámico (DLL), permite el uso del sistema hardware, a alto nivel y de forma transparente a cualquier usuario. Fundamentalmente la plataforma software consiste en un driver de la interface de comunicación que permite hacer uso de las comunicaciones a nivel de bus del sistema, y por tanto, hacer uso de todas las posibilidades conferidas a la FPGA en su programa de configuración. Las características principales de la plataforma software o del driver del sistema de comunicación son:

- – Ser accesible a cualquier usuario (DLL).
- Incorpora funciones de comunicación a nivel de bus de 16 bits.
- Permite hacer uso, de cualquier mapa de direcciones del sistema.

La Figura 2 muestra la estructura funcional de las plataformas que comprenden el diseño mecatrónico del dedo antropomorfo.

### 3 CARACTERÍSTICAS DEL HARDWARE DEL SISTEMA

La disposición final del hardware fue un aspecto importante que se estudió minuciosamente, el diseño del sistema debía buscar el acoplo entre los componentes mecánicos y los electrónicos. Esto se consiguió gracias a la implicación de las distintas etapas de producción de los diferentes partes hardware que forman el equipo (mecánica, electrónica).

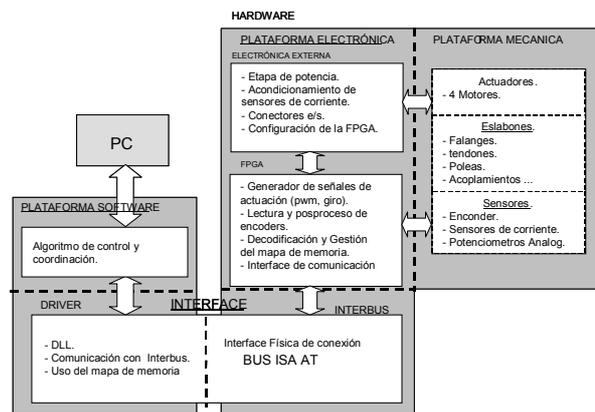


Figura 2: Estructura funcional del sistema mecatrónico del dedo antropomorfo.

De esta interacción, se obtiene como resultado, un sistema que para diferentes condiciones, hace uso óptimo de los materiales y energía que consume y que además, tiene un aspecto más estético y ergonómico.

En la Figura 3 se muestra una foto del hardware del dedo antropomorfo.

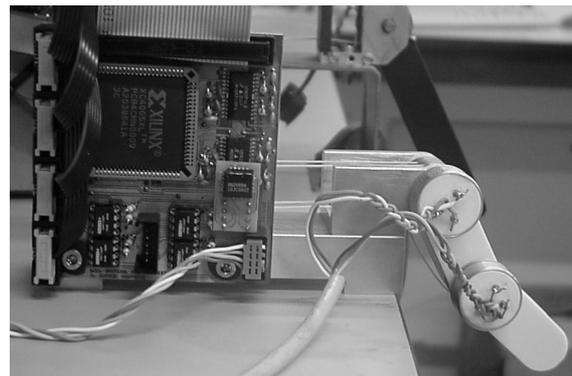


Figura 3: Hardware del sistema mecatrónico del dedo antropomorfo.

La parte electrónica que forma el hardware del dedo antropomorfo se compone de una interface de comunicación y de la electrónica no inferida en la FPGA. A continuación se detalla estos componentes.

#### - Interface de comunicación

Establecer la comunicación entre la electrónica del sistema mecatrónico y el sistema monitor del usuario (es decir el PC). Para hacer esto posible, además del uso de esta tarjeta, la electrónica inferida internamente en la FPGA deberá agrupar un conjunto de registros o posiciones mapeadas en memoria, que permitan acceder a la información sensible del sistema y por tanto, permitir la comunicación bidireccional entre el PC y el sistema. La

tarjeta de comunicación reconstruye un bus único de las siguientes características:

- – Bus de datos de 16 Bits.
- Bus de direcciones de 16 Bits.
- Bus de control (RD, WR)
- **Electrónica de proceso no inferida en la FPGA**

Esta parte de la electrónica no se ha inferido dentro de la FPGA debido a su naturaleza no digital o a su carácter de potencia y alta corriente. Sus bloques y características principales son:

- – Etapa de potencia de actuación de motores.
  - o 4 Puentes H independientes.
  - o Control de los motores mediante señales de PWM y sentido de giro.
  - o Dispone de cuatro nivel de detección de sobre corriente mediante una resistencia).
  - o Corriente máxima: 750mA ( 1 A. De Pico).
  - o Tensión máxima del motor: 45V
  - o Diodos Internos de recirculación.
  - o Baja tensión de saturación en la salida de los transistores.
  - o Circuito de protección contra sobre temperatura.
  - o Encapsulado: SOIC 24
- Etapa de acondicionamiento de sensores analógicos
  - o 4 Ampl. de instrumentación.
  - o Bajo nivel de offset: 50uV max.
  - o Bajo desplazamiento con la temperatura: 0.25uV/C°
  - o Alto rechazo en modo común: 115dB min.
  - o Protección de las entradas ante sobre tensiones:  $\pm 40V$ .
  - o Bajo consumo de corriente: 3mA max.
- Modulo de la FPGA.
  - o Dispositivo: XC4005XL-3-PC84.
  - o Alimentación: 3,3v.
  - o Grado de velocidad: 3ns
  - o Matriz CLBs: 14\*14.
  - o Celdas lógicas: 466.
  - o Máximo numero de e/s: 112.
  - o Memoria de programa: 151.910 bit
  - o Memoria serie EEPROM AT17C256.
  - o Capacidad: 262.144 bit.
  - o Frecuencia Max de reloj: 12,5 MHz.

- o Encapsulado: PLCC 20.
- Conectores de entrada-salida.
  - o Conector de comunicación con el PC.
  - o Conectores de motor.
  - o Conector de alimentación.
  - o Conector de salida del sensor de corriente.

## 4 CONFIGURACIÓN INFERIDA EN LA FPGA

La característica en común de todos los circuitos que se describen a continuación, es la de que son circuitos de naturaleza digital capaces de ser inferidos dentro de la FPGA, utilizada en este desarrollo (en concreto la XC4005XL). La estructura general que implementa la FPGA, sigue una filosofía de diseño como se puede observar en la Figura 4. El conjunto de todos esos bloques, tienen como objetivo, resolver la implementación de la siguiente serie de puntos.

- – Interface de comunicación.
- gestión y decodificación de direcciones del mapa de memoria.
- generador de señales de actuación de motores.
- Etapa de lectura y posproceso de encoders.

Los módulos utilizados para implementar esas funciones son:

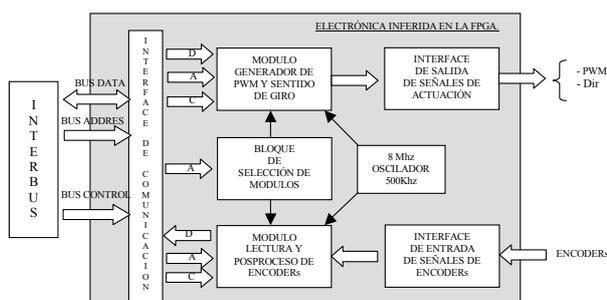


Figura 4: Estructura funcional de la electrónica interna.

### - Interface de comunicación interna

Es compatible con las señales del bus único creado por la Interface externa, y supone la puerta de enlace para la comunicación bidireccional entre el PC y la electrónica interna de la FPGA.

### - Bloque de selección de módulos

Este bloque tiene como única entrada el bus de direcciones obtenido de la interface de comunicación anterior. Como salidas, dos señales que determinan en función del espacio reservado en el mapa de memoria, cuando se va habilitar el modulo generador de PWM o cuando lo va hacer el modulo de lectura y posprocesado de Encoders. Supone el primer nivel de decodificación y gestión del mapa de memoria.

- **Modulo generador de PWM y sentido de giro**

Este modulo se encarga de recoger los datos proveniente del PC con la información de velocidad y sentido de giro de cada uno de los cuatro motores, (esta información esta codificadamente numéricamente en el dato) y transfórmalos en las señales de tipo anchura de pulso modulado (PWM) y sentido de giro requeridas por la etapa de potencia. Este modulo incluye a su vez.

- o Una etapa de decodificación de segundo nivel.
- o Contador binario ascendente de modulo 255.
- o Conjunto de cuatro submodulos generadores de PWM y Dir.

- **Modulo de lectura y posprocesado de Encoders**

Este modulo realiza la tarea de capturar la información en cuadratura de fase enviada por cada uno de los cuatro encoder del sistema, procesar la información, y obtener un valor numérico entendible por el PC de la posición real de cada uno de los cuatro motores. Al igual que ocurría en el modulo anterior, en este también se subdivide en dos partes.

- o Una etapa de decodificación de segundo nivel.
- o Conjunto de cuatro submodulos Lectores de Encoder

- **Interface de salida de señales de actuación**

Este modulo simplemente se encarga de pasar a través buffer de salida las señales de actuación de los motores y asignar pines de la FPGA a estas señales.

- **Interface de entrada de señales de Encoders**

Este modulo actúa de manera similar a como lo hace el anterior, y se encarga de recoger a través de buffers de entrada, las señales de los encoders y asignar los pines de la FPGA para estas entradas

- **Oscilador interno**

Este bloque, supone la base de tiempos para la generación de señales de PWM, y por otro lado también, se utiliza para discretizar y sincronizar las señales provenientes de los Encoders.

## 5 CARACTERISTICAS DEL SOFTWARE

Esta parte del sistema, se encarga de asumir los protocolo de comunicación entre el PC y la interface de comunicación, y su misión fundamental es utilizar de manera optima el bus único asociado y reconstruido por la tarjeta de interface. EL protocolo que implementa este software pueden ser considerados como protocolo de nivel físico, ya que se encarga del enlace más bajo y básico de la comunicación. Este protocolo a su vez (motivado por su propiedad de se DLL) permite ser usado como sustrato o capa inferior de otros protocolos superiores.

Las características más destacable de este driver son:

- **Ser accesible para cualquier usuario (DLL)**

Una de las características más interesantes del driver, es que se ha concebido como Librería de Enlace Dinámico (DLL), característica que se le ha dado, para poder ser usada por software y aplicaciones de diferente naturaleza. esto permitir al usuario trabajar de forma transparente con las funciones y posibilidades conferidas.

- **Configurar la tarjeta de interface en modo reconstructor de bus**

Esta parte del driver esta compuesta únicamente por una función accesible al usuario. Función que se encarga de configurar y conseguir un bus único en la tarjeta.

- **Incorporar funciones de manejo del bus único reconstruido**

Son dos funciones accesibles al usuario; que permiten trabajar con el bus creado en la tarjeta de manera cómoda y transparente (sin necesidad de recurrir a niveles bajos de comunicación).

## 6 ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE CONTROL

El control usado para el dedo antropomorfo es una red neuronal de inspiración neurobiológica para la generación y control de movimientos voluntarios. La Figura 5 muestra el sistema de control del dedo artificial oponente. Se ha investigado la evolución de las redes neuronales en la producción de movimientos voluntarios. En esta teoría, un generador de patrones del cortex cerebral y los ganglios basales calculan la trayectoria deseada del movimiento, un controlador de fuerza neuromuscular del cordón espinal y un modulo del cerebellum adaptativo cooperan para predecir los errores en los movimientos multi-articulares del dedo antropomorfo. Las interacciones entre las redes corticales donde el planeamiento del movimiento es calculado y las redes espinales que implementan esas trayectorias motoras son modelizadas a través de los modelos VITE (Cortical) y FLETE(espinal).

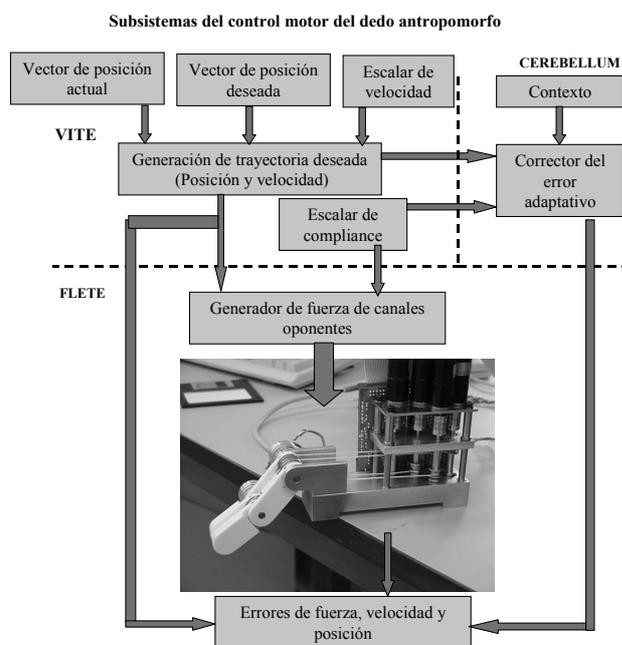


Figura 5: Sistema de control del dedo antropomorfo. Una red neuronal para la generación y control de movimientos voluntarios inspirada neurobiológicamente es implementada en el dedo antropomorfo accionado por motores de corriente continua que emulan el sistema muscular.

## 7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este artículo se ha presentado el desarrollo general de las plataformas electrónicas y de control utilizadas para crear y desarrollar, un sistema

mecatrónico que emula de manera antropomórfica la forma de un dedo de dos articulaciones, de tipo oponente. El sistema mecatrónico del dedo antropomorfo ha sido presentado y desarrollado por el grupo NEUROCOR del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Politécnica de Cartagena. En lo referente a la investigación, actualmente este sistema está figurando como una herramienta de trabajo inestimable para el soporte de los ensayos y experimentos que en cuanto a coordinación y control de inspiración neurobiológico, que está realizando el grupo NEUROCOR en unas de sus grandes líneas de trabajo. En futuros trabajos se espera expandir las experiencias conseguidas con esta plataforma de experimentación, y aportar e incorporar nuevas técnicas de control inteligente a sistemas cada vez más complejos y avanzados, como pueden ser manos antropomórficas de tres, cuatro o cinco dedos. En futuros trabajos se espera expandir las experiencias conseguidas con esta plataforma de experimentación, para crear un dedo con mayor grado de libertad y planear el diseño de una mano antropomorfa bajo la consolidación de las plataformas experimentales antes creadas, así como la incorporación de técnicas de control de inspiración neurobiológicas.

### Agradecimientos

Se agradece el apoyo recibido por los miembros del grupo de investigación de Neurotecnología, Control y Robótica (*NEUROCOR*) del departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Politécnica de Cartagena. Este trabajo fue financiado en parte por la CICYT-TIC99-0446-C02-01, y por el proyecto SYNERAGH - BRE2-CT980797 BRITE EURAM- de Investigación Básica.

### Referencias

- [1] Manual de referencia "XC4000E and XC4000x Series Field programmable Gate Arrays" de Xilinx 1999.
- [2] Ruiz Merino, R.J., Garrigos Guerrero, J., Doménech Asensi, G., Zapata Perez, J.R., López Alcatud, J.A., Hinojosa Jiménez, J., (2000). "Diseño de sistemas electrónicos digitales", Ediciones Diego Marín Colecciones texto.(Universidad de Murcia).