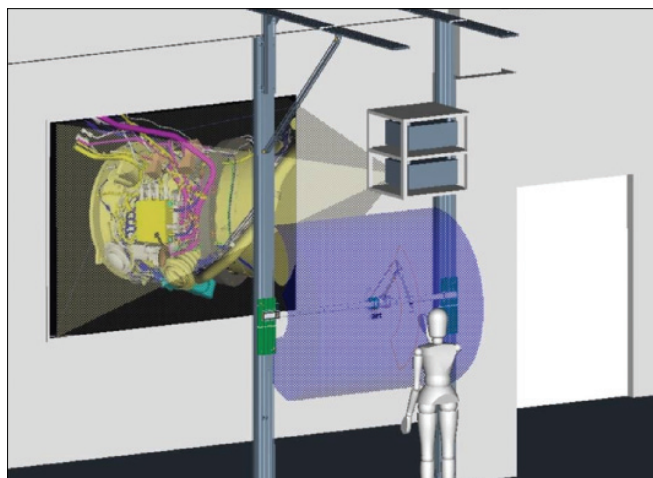


Control de bajo coste para dispositivos hápticos



Low-cost control for haptic devices

Javier Melo-Urbe *
Emilio Sánchez-Tapia*

Ingeniero Industrial
Doctor Ingeniero Industrial

* Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Gipuzkoa.
Tfno: +34 943 212800. jmelo@ceit.es; esanchez@ceit.es

Recibido: 15/09/09 • Aceptado: 11/01/2010

ABSTRACT

• Haptic interfaces are robotic devices that let the user touch virtual reality scenarios. Comparing with classic industrial robotics, in which robots are confined in workcells doing repetitive tasks, we can say that the haptic interfaces have a handle as end-effector to let the user grasp it. That is why, haptic interfaces are also considered as human-computer interface, that not only let a cursor in the computer move in a virtual 3D space, but also if this cursor 'collides' to a virtual object, the user will perceive this interaction as if they were interacting to real objects. Typical applications of haptic robotics are in video games, CAD design tools and simulators (ex. driving, machine assembly, surgery planning, etc) where the aim is to achieve a higher immersion level. Thus the aim of this paper is to present the control board EOS v.2.0, providing a low cost solution for the control of haptic systems. The EOS was implemented using FPGA technology (Field Programmable Gate Array).

• **Key words:** Haptics, Virtual Reality, FPGA, Sampling Frequency, IP Core.

RESUMEN

Los interfaces hápticos son dispositivos robóticos que permiten tocar la realidad virtual. A diferencia de la robótica industrial tradicional, en la que los robots se encuentran confinados en células haciendo trabajos repetitivos, las interfaces hápticas están diseñadas para que el usuario los sujete con la mano.

Por ello, también se les puede considerar como un interfaz de ordenador, que no sólo permite mover el cursor en un espacio virtual 3D, si no que también si el cursor 'colisiona' algún objeto virtual, el usuario lo percibirá como si lo estuviera tocando.

Las aplicaciones más habituales de los hápticos se encuentran en los videojuegos, herramientas de diseño CAD y simuladores (ej. conducción de vehículos, ensamblaje de máquinas, planificadores de cirugía, etc), donde el objetivo que se persigue es lograr una mayor sensación de inmersión.

De esta forma el objetivo de este trabajo es presentar la tarjeta

de control EOS V.2.0, aportando así, una solución de bajo coste para el control de sistemas hápticos.

Utilizando tecnología FPGA (del inglés, Field Programmable Gate Array o Matriz Programable de Puertas Lógicas) se ha desarrollado con la tarjeta EOS, un sistema reconfigurable que permite controlar dispositivos hápticos de hasta 6 grados de libertad (GdL).

Para comprobar el correcto funcionamiento de la misma, se presenta una sencilla aplicación en la que se utiliza la tarjeta EOS para controlar el dispositivo háptico LHifAM de 6 GdL.

Palabras clave: hápticos, realidad virtual, FPGA, frecuencia de muestreo, IP Core.

1. ¿QUÉ SON LOS SISTEMAS HÁPTICOS?

La comunidad científica define *interfaz háptica* como un dispositivo robótico/mecatrónico que permite a un usuario tocar y manipular (interactuar) objetos dentro de un entorno virtual (ej. Gil, 2003).

El término háptico proviene del griego *hapthesthai*, tocar, aunque su uso se ha generalizado a todos los aspectos en los que influye el sentido del tacto. Por ello se distinguen dos tipos de interfaces: los interfaces táctiles, que pueden reproducir texturas (Fig.1.) y los que reproducen fuerzas (Fig.2.)

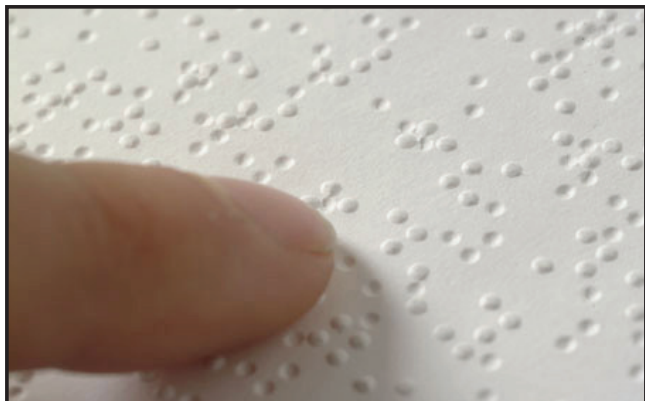


Fig. 1: Sistema Braille. Es un sistema de lecto-escritura utilizado por las personas con deficiencia visual, quienes por medio del tacto identifican símbolos en relieve

En la robótica háptica convergen diferentes ramas de la ingeniería, especialmente el control digital, el diseño mecánico y la informática (visualización y cálculo geométrico). De igual forma, se hace uso de electrónica para la adquisición de señales (sensores) y para el procesamiento de los algoritmos implementados.

La introducción de dispositivos hápticos en ambientes virtuales pretende emular los fenómenos cognitivos percibidos por un usuario cuando este interactúa con su entorno, pero en este caso el entorno es virtual (Fig. 2).



Fig. 2: Sistema háptico con realimentación de fuerzas

El éxito de una sesión háptica se puede medir teniendo en cuenta el grado de inmersión obtenido por el usuario y del mismo modo, analizando la fidelidad y el realismo de la interacción entre este y el ambiente virtual.

Los sistemas hápticos de realidad virtual han generado un creciente interés tanto en el campo científico, como en el empresarial, debido a la variedad de aplicaciones industriales que pueden llegar a tener.

En un futuro no muy lejano será posible interactuar con objetos a distancia (telemanipulación) o con proyecciones holográficas 3D, obteniendo de estas no sólo una realimentación visual sino también táctil.

El comportamiento del dispositivo está influenciado por factores físicos como el amortiguamiento y la fricción inherentes a la mecánica del mismo, junto a otras limitaciones, como la frecuencia de muestreo utilizada en el lazo de control. Es necesario disponer de dispositivos de control y adquisición de datos capaces de procesar en tiempo real los algoritmos que rigen el sistema, siendo la resolución del problema cinemático de la mecánica del háptico y el cálculo de la reflexión de fuerzas, los procesos con mayor prioridad.

La reducción de costes en la implementación de sistemas hápticos es un tópico importante por abordar, con vista a una futura masificación comercial de estos dispositivos (Bengoechea, 2006).

Invertir grandes cantidades de dinero en dispositivos de control que cuenten con las especificaciones mínimas para suplir los requerimientos de una interfaz háptica, se convierte en uno de los mayores problemas, por lo que se sugiere la búsqueda de soluciones de bajo coste que no sólo contribuyan a un ahorro económico, sino que aporten al mismo tiempo mejoras a las prestaciones de los dispositivos actuales (Rebello, 2004).

Actualmente en el CEIT (Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas) de Gipuzkoa, se desarrollan interfaces hápticas que son utilizadas en simuladores de conducción, con lo cual es posible emular las sensaciones táctiles que se transmiten al usuario en una situación real.

2. OBJETIVO

Uno de los principales inconvenientes que se presentan en la implementación de un sistema háptico, es la elección del dispositivo de control sobre el cual se ejecutarán los algoritmos que dan vida a dicho sistema.

Comercialmente existen dispositivos de control (Quanser¹, dSpace²) que permiten satisfacer ampliamente los requerimientos de frecuencia de muestreo y procesamiento de datos inherentes al sistema háptico.

Dispositivos de control como los ya mencionados, son utilizados ampliamente a nivel industrial y en el campo de la investigación (Went, 2008), pero de cara a la masificación de un producto final, resultan de un elevado coste y, en ocasiones, sobredimensionados cuando se trata de una aplicación específica.

1 <http://www.quanser.com>

2 <http://www.dspaceinc.com>

Se justifica así la necesidad de desarrollar un dispositivo de control de bajo coste, adaptable a los requerimientos de una aplicación háptica en particular, sin que ello reduzca drásticamente las prestaciones del dispositivo.

Con el uso cada vez más frecuente de dispositivos lógicos programables FPGA (Matriz Programable de Puertas Lógicas) en aplicaciones de control (Marschner, 2007; O'Malley, 2009), se abre una puerta al desarrollo de una plataforma de control de dispositivos hápticos, basada en este tipo de tecnología.

Otro de los problemas más recurrentes en la implementación de interfaces hápticas, es la frecuencia de muestreo o actualización que se utiliza en el lazo de control.

Se prioriza el mejorar la frecuencia de muestreo del lazo de control, obteniendo de esta manera sistemas con mayor estabilidad y aportando de igual forma mayor realismo a las sensaciones de rigidez percibidas por el usuario (O'Malley, 2009). Los mecano-receptores del ser humano distinguen sensaciones de rigidez satisfactoriamente cuando se emplea una frecuencia de muestreo superior a 1kHz (Weerakkody, 2007). Una mejora en las frecuencias de muestreo empleadas, se verá reflejado en transmitir al usuario sensaciones mucho más realistas.

De esta forma en este artículo se presenta la tarjeta EOS v.2.0, como un dispositivo de control basado en tecnología FPGA y cuyo objetivo es el control y puesta en marcha de sistemas hápticos.

La EOS puede definirse como una tarjeta de control de bajo coste, reconfigurable y que cuenta con diferentes interfaces de comunicación, que la convierten en una solución viable para el control de sistemas hápticos como se verá más adelante. Este trabajo se presenta además, como el desarrollo y continuación de aportes previos realizados en el departamento de mecánica del CEIT (Bengoechea, 2009).

El presente artículo está estructurado de la siguiente forma:

- en las secciones 3 y 4 se describen las características relevantes de la tarjeta de control EOS v.2.0.
- posteriormente, en las secciones 5, 6 y 7 se presenta una aplicación práctica con la cual se valida el funcionamiento de la tarjeta EOS v.2.0.
- finalmente, se exponen los resultados y las conclusiones obtenidas.

3. DESCRIPCIÓN DE LA TARJETA EOS

La tarjeta EOS v.2.0, desarrollada íntegramente en el CEIT, puede definirse como un dispositivo electrónico para la adquisición de datos y el control de interfaces robóticas de tipo háptico o de teleoperación, que requieran de una alta velocidad de respuesta y flexibilidad para la optimización de los modelos de control allí implementados.

Surgió como una solución a los inconvenientes tanto operativos como económicos que representaba la utilización de tarjetas de tipo comercial en el desarrollo de aplicaciones

con dispositivos hápticos.

La EOS está basada en una FPGA Spartan XC3S500E de Xilinx, en la cual se implementa el procesador embebido MicroBlaze, así como también los controladores para los periféricos con que cuenta la tarjeta.

El MicroBlaze es un Soft-processor de 32 bits, con una arquitectura de memoria tipo Harvard, concebido para su implementación en dispositivos FPGA de Xilinx.

Posee un set de instrucciones reducido (RISC), que apunta a la optimización y mejor aprovechamiento de los recursos de procesamiento que posee.

Como ya se ha mencionado, es posible encontrar dispositivos comerciales que satisfacen los requerimientos de un sistema háptico.

Con la tarjeta EOS se logra tener una plataforma de desarrollo abierta, de bajo coste, con lo cual se puede ajustar adecuadamente a aplicaciones hápticas en particular.

A continuación se presenta un cuadro comparativo de las características más importantes de la EOS con relación a los dispositivos de control comerciales (Tabla 1).

Tarjeta	EOS	dSpace 1004	Quanser Q8
Microprocesador	MicroBlaze 75 MHz	MPC8240 250 MHz	Procesador vía CPU
Memoria Flash	512 K	8 MB	
Entradas Analógicas	8, Módulo expansión	8	8
Salidas Analógicas	6, Módulo expansión	8	8
Entradas/Salidas Digitales	48, Módulo expansión	20	32
Entradas de Encoder	6	2	8
Ethernet	Si	No	No
USB	Si	No	No
Arquitectura	Standalone	Standalone	CPU
Coste	300€	6000€	5000€

Tabla 1: Características de la tarjeta EOS

Como se puede observar, en algunos casos las características técnicas de la EOS resultan inferiores frente a las tarjetas comerciales.

Pero el objetivo principal de este proyecto es aportar una solución viable de bajo coste, con la cual se suplan satisfactoriamente los requerimientos de un sistema háptico, con miras a una posible masificación del mismo.

Se puede destacar que la tarjeta EOS posee módulos de comunicación como Ethernet y USB, con lo cual se tienen distintas opciones para transmitir información de forma óptima, desde y hacia la tarjeta.

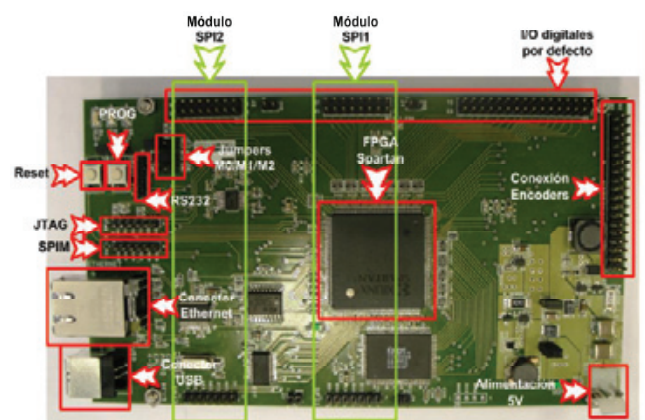


Fig. 3: Periféricos de la Tarjeta EOS

4. ARQUITECTURA DE LA TARJETA EOS V.2.0.

La arquitectura de la tarjeta EOS está constituida como la unión de distintas IP Core descritas en lenguaje VHDL, sintetizadas e implementadas sobre la FPGA (Fig. 3).

Una IP Core es un bloque o celda lógica prediseñada, que puede interconectarse a otras IP Core para conformar un sistema.

El diseño de una IP Core se realiza utilizando software de descripción de hardware (HDL), pero la implementación final se realiza directamente en hardware, aprovechando los recursos de la FPGA.

El entorno de desarrollo proporcionado por Xilinx (EDK) incluye la IP Core del MicroBlaze, así como también la descripción de los distintos buses de comunicación que permiten conectar a éste con las demás IP Core añadidas (EncoderX6, UART, SPI, Funciones Trigonómicas).

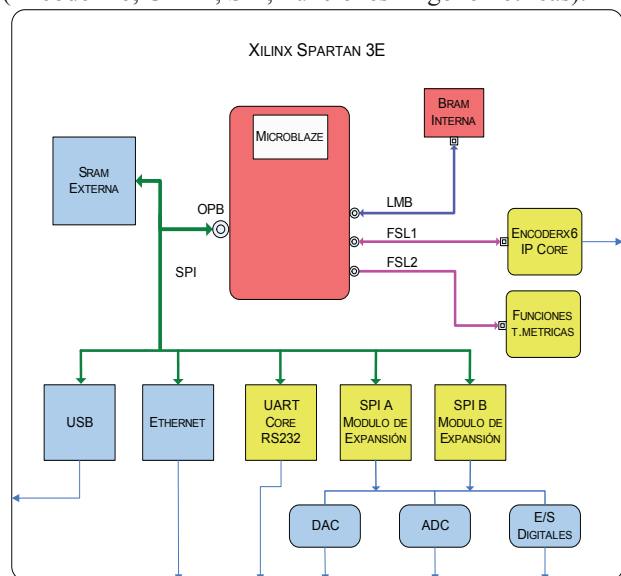


Fig. 4: Arquitectura de la EOS

Para conectar el MicroBlaze con los diferentes periféricos (IP Core y electrónica dedicada) se han empleado dos tipos de bus: el OPB (On Chip Peripheral Bus) y el FSL (Fast Simplex Link).

En el bus OPB se implementa el protocolo SPI (Serial Peripheral Interface Bus), siendo posible utilizar el mismo bus para interconectar varios periféricos al mismo tiempo.

En el caso del bus FSL (Fast Simplex Link), este es un canal de comunicación punto a punto unidireccional, de alta velocidad, utilizado para realizar transferencias de datos entre destinos dispuestos en configuración Maestro – Esclavo.

El MicroBlaze está conectado a un bloque de memoria interna BRAM de alta velocidad (32Kb), la cual se encuentra repartida en memoria de datos y memoria de programa.

La memoria BRAM, a pesar de ofrecer un alto rendimiento, no posee suficiente volumen para el almacenamiento de datos, siendo necesario agregar un bloque externo (circuito integrado) de memoria SRAM.

El bloque externo SRAM aporta 512Kb de memoria, permitiendo así la ejecución de aplicaciones que requieran una mayor capacidad de almacenamiento, aunque su velocidad de acceso es muy reducida.

A continuación se describen las IP Core implementadas en la EOS y las conexiones entre estas y el MicroBlaze.

Se ha desarrollado para la EOS, un módulo IP Core para la lectura de pulsos de encoder. Éste módulo consta de seis canales independientes, habilitados para leer en cuadratura encoders de tipo diferencial.

Esta IP Core puede ser modificada para ampliar el número de canales de lectura de encoders, esto sin la necesidad de agregar más hardware externo a la tarjeta.

Debido a la utilización de funciones trigonométricas en los algoritmos del lazo de control y a la complejidad de cálculo que ello supone, se ha optado por efectuar dichos cálculos directamente en una IP Core.

La IP Core para el cálculo de funciones trigonométricas es una LUT (Look Up Table) o tabla de datos precalculados, de la cual se obtienen los valores de respuesta sin necesidad de realizar operaciones aritméticas que ocupen recursos del MicroBlaze.

Utilizar una LUT no resulta la opción más eficiente desde el punto de vista de la velocidad de respuesta, pero, en este caso, debido al reducido volumen de memoria de alta velocidad con que se cuenta, es una solución que aporta un buen balance entre velocidad de respuesta y precisión de la misma (32 bits).

La comunicación entre el MicroBlaze y las IP Core para lectura de encoders y cálculo de funciones trigonométricas, se realiza a través de conexiones independientes de tipo FSL.

La EOS cuenta además con dos canales o bancos de expansión SPI, sobre los cuales se conectan los convertidores DAC y ADC (circuitos integrados SPI) necesarios para esta aplicación (Fig. 4).

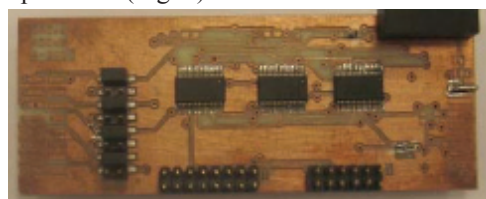


Fig. 5: Tarjeta modular DAC y ADC

En los dos canales SPI (A y B) que posee la EOS, es posible conectar otros dispositivos que se comuniquen a través de este estándar, brindando así posibilidades de expansión y mejora.

Finalmente la EOS está dotada con interfaces de comunicación USB, Ethernet y RS232 facilitando el intercambio de información desde y hacia la tarjeta. Las interfaces USB y Ethernet se han implementado utilizando circuitos integrados dedicados que se conectan al MicroBlaze a través de canales SPI.

5. VALIDACIÓN DEL DISPOSITIVO

Con el propósito de validar la tarjeta EOS en el control de sistemas hápticos, se realizó una sencilla aplicación en la que se tienen en cuenta los elementos básicos de este tipo de sistema (háptico, control, escenario virtual).

La aplicación desarrollada permite a un usuario interactuar con un escenario virtual, utilizando para ello la interfaz háptica LHifAM (Large Haptic Interface for Aeronautic Maintainability) (Savall, 2002). El LHifAM posee 6 grados de libertad (GdL): tres de ellos pasivos (muñeca - rotaciones) y tres activos (posicionamiento) como se observa en la Fig. 5. Tiene un esquema de diseño PRR y la muñeca una configuración roll – pitch – roll.

La tarjeta EOS recibe las señales de posición (Encoder) provenientes de cada uno de los grados de libertad del LHifAM y, a su vez, comanda las señales de fuerza que serán aplicadas a cada uno de los motores de los grados de libertad activos.

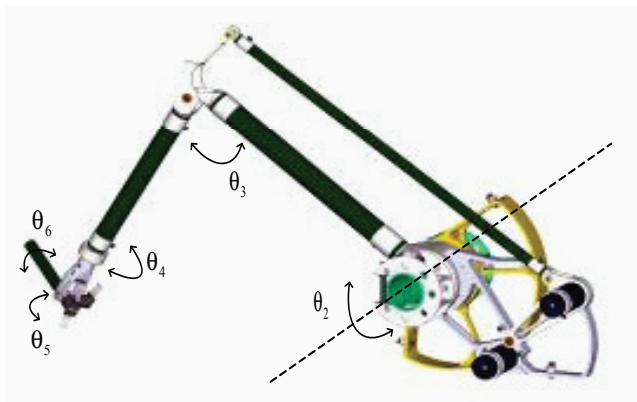


Fig. 6: Interfaz Háptica LHifAM diseñada por el CEIT

De esta forma pueden definirse las tareas específicas que lleva a cabo la tarjeta EOS dentro de la estructura del sistema háptico:

- Lectura de Encoders y desarrollo del problema cinemático del LHifAM, para determinar la ubicación espacial del dispositivo.
- Detección de colisiones: si se presenta una colisión utilizando un modelo de contacto, se calculan las fuerzas que serán aplicadas a los motores. Si no existe colisión, todos los grados de libertad actuarán de forma pasiva.

- Transmite la posición en coordenadas cartesianas del efector final del LHifAM hacia el escenario virtual, que en este caso está desarrollado sobre la VR toolbox de Simulink®. Esta transmisión se realiza a través del protocolo USB.

A continuación se presenta la arquitectura del sistema implementado para la validación de la tarjeta EOS (Fig. 6):

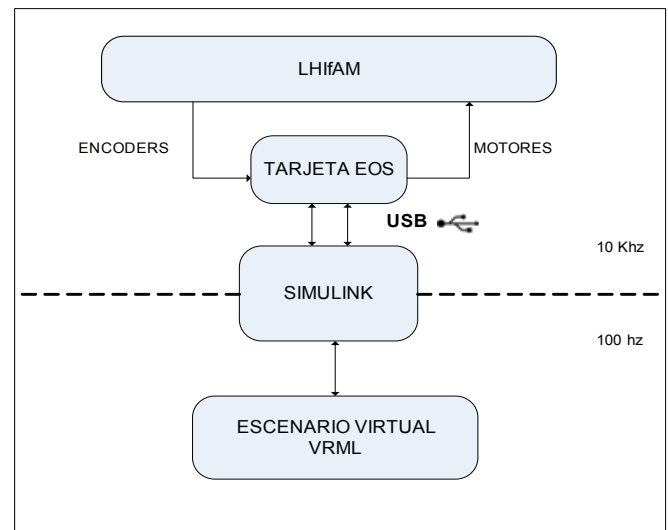


Fig. 7: Arquitectura del sistema implementado

Para este caso en particular se emplean frecuencias de actualización diferentes, tanto para el lazo de control, como para el escenario virtual.

Debido a que la frecuencia de actualización del lazo de control resulta crítica para la estabilidad del sistema, es necesario emplear valores de frecuencia superiores a 1 kHz.

En esta aplicación se ha empleado una frecuencia de 10 kHz para el lazo de control, mientras que para el escenario virtual, que no constituye una tarea crítica del sistema, se utiliza una frecuencia de actualización de 100Hz.

6. SISTEMA DE CONTROL IMPLEMENTADO

El algoritmo de funcionamiento de un sistema háptico puede dividirse en tres partes: detección de colisiones, cálculo de fuerzas de restitución y, finalmente, el cálculo de los pares que se aplicarán a los actuadores (Fig. 7).

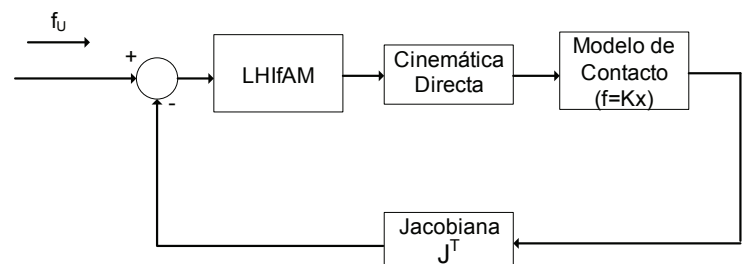


Fig. 8: Lazo de control del sistema háptico

En la aplicación desarrollada, se introduce la fuerza que el usuario ejerce (f_U) directamente a la planta del sistema (LHifAM), con el fin de ejercer un desplazamiento controlado de la misma sobre el espacio de trabajo.

Es necesario determinar en cada ciclo de trabajo, la posición del efector final del LHifAM, que será la referencia para identificar las colisiones.

La posición del efector final se determina transformando las coordenadas angulares (representadas en pulsos de encoder) de cada uno de los grados de libertad, en coordenadas cartesianas (x_h, y_h, z_h): esto mediante el cálculo de la cinemática directa de la estructura del LHifAM.

Ecuaciones de la cinemática directa del LHifAM, para los tres primeros grados de libertad (posicionamiento):

$$x_h = r\theta_1 \quad (1)$$

$$y_h = l_2 + l_1 s_2 - l_2 s_3 \quad (2)$$

$$z_h = -l_1 + l_1 c_2 - l_2 c_3 \quad (3)$$

En donde l_1 y l_2 corresponden a longitud de los enlaces; r es la relación de transmisión del primer GdL (prismático). θ_1 es el ángulo de giro del motor (guía lineal) del primer GdL. c_i y s_i son respectivamente, el coseno y seno de θ_i , donde i va de 1 a 6.

Matriz de Rotaciones (muñeca del dispositivo):

$$r_{11} = s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6$$

$$r_{12} = -s_4 c_5 s_6 + c_4 c_6$$

$$r_{13} = s_4 s_5$$

$$r_{21} = c_2 (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) + s_2 s_5 c_6$$

$$r_{22} = c_2 (-c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6) - s_2 s_5 s_6$$

$$r_{23} = c_2 c_4 s_5 - s_2 c_5$$

$$r_{31} = -s_2 (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) + c_2 s_5 c_6$$

$$r_{32} = -s_2 (-c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6) - c_2 s_5 s_6$$

$$r_{33} = -s_2 c_4 s_5 - c_2 c_5$$

Una vez obtenida la posición del efector final en coordenadas cartesianas, es posible efectuar la detección de colisiones entre el punto (x, y, z) que representa al efector final y los planos o paredes virtuales que se han insertado en el escenario.

El algoritmo para la detección de colisiones que se ha empleado (modelo de contacto), es un modelo elástico lineal ($f = Kx$) o modelo de un muelle, con el cual se determinan las componentes de fuerza (f_x, f_y, f_z) que se realimentarán al sistema (Gil, 2003).

$$f_x = K_n (0.05 - x_h) \quad (4)$$

$$f_y = K_n (0.05 - y_h) \quad (5)$$

En esta aplicación $f_z = 0$, debido a que no se ha insertado ninguna pared virtual sobre este eje como puede observarse en la Fig. 8, K_n representa la constante de rigidez que posee la pared virtual.

Es necesario traducir las componentes de fuerza calculadas, a pares-fuerza que se aplicarán directamente a

¿Qué ES UNA FPGA?

Una FPGA es un dispositivo lógico programable. Por consiguiente, está basado en la unión de diferentes elementos lógicos (AND, OR, NOT, LATCH, FLIP-FLOP) que conforman bloques funcionales organizados matricialmente y que pueden ser programados por el usuario.

De esta forma en una FPGA es posible implementar desde funciones lógicas básicas, hasta complejos sistemas que involucren un procesamiento lógico convencional.

Las FPGA surgen de la convergencia de tecnologías previas, como lo son, los dispositivos de memoria PROM y los circuitos integrados de aplicación específica ASIC, constituyendo así un dispositivo versátil, de bajo coste y con fases de diseño de tiempo reducido.

Para la programación de una FPGA se utiliza lenguaje de descripción de Hardware (HDL), mediante el cual es posible diseñar circuitos electrónicos que luego de un proceso de compilación y síntesis se transfieren a la FPGA para su ejecución.

La utilidad de las FPGA se encuentra especialmente en el diseño e implementación de prototipos para circuitos electrónicos ASIC. Con las FPGA es posible reducir el tiempo y los costes invertidos en el diseño de estos dispositivos, debido a que las FPGA son reprogramables y la realización de pruebas no sugiere un coste adicional.

Las FPGA pueden ser utilizadas en el procesamiento digital de señales, emulación de hardware electrónico, implementación de memorias, circuitos combinatoriales y en sistemas que requieran de procesamiento en paralelo.

los actuadores. El cálculo de pares-fuerza se lleva a cabo desarrollando la matriz Jacobiana del LHIFAM. En este caso es necesario analizar el problema estático del dispositivo para hallar la relación existente entre las fuerzas y los pares, que permiten a este mantener una posición fija. Algunos autores expresan dicha relación de la siguiente forma (Craig, 2005):

$$\tau = J^T \begin{bmatrix} f_e \\ n_e \end{bmatrix} \quad (6)$$

En donde τ es el vector fuerza/par aplicado a cada actuador; f_e y n_e son las fuerzas y pares aplicados en el efector final.

Una vez desarrollada la Jacobiana, se obtienen las ecuaciones que representan los pares que se aplicarán a cada uno de los actuadores, en el caso del LHIFAM dichas ecuaciones son:

$$T_1 = f_x r \quad (7)$$

$$T_3 = K_3 l_2 (f_z s_3 - f_y c_3) \quad (8)$$

$$T_2 = K_2 l_1 (-f_z s_2 + f_y c_2) + K_2 \frac{T_3}{K_3} \quad (9)$$

En donde K_2 y K_3 son constantes de relación angular.

Finalmente el lazo de control se cierra, realimentando los pares calculados a la planta. De esta forma la señal de control aplicada resultará de la diferencia entre la fuerza aplicada por el usuario y las fuerzas producidas por eventuales colisiones.

El lazo de control descrito anteriormente se ejecuta por completo en la tarjeta EOS, independiente a la parte gráfica la cual se ejecuta en un PC adjunto al sistema.

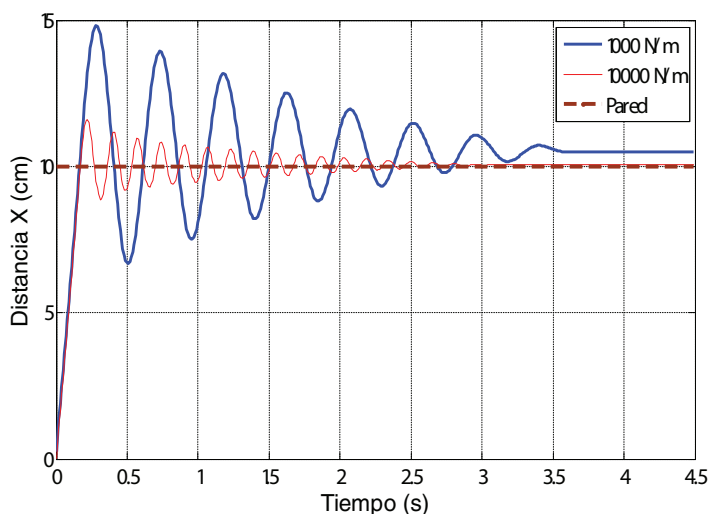


Fig. 10: Respuesta del sistema ante una entrada constante, frecuencia de muestreo 10 kHz

7. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El entorno gráfico empleado para recrear el escenario virtual de la aplicación, es la Virtual Reality Toolbox de Simulink®. Esta herramienta permite crear escenarios en 3D y, además, aporta las ventajas de ejecutarse sobre una plataforma de desarrollo como lo es Simulink® (Fig. 8).

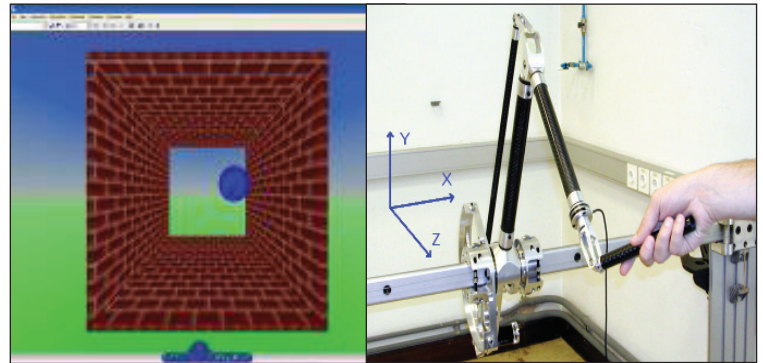


Fig. 9: Escenario virtual e interacción con el LHIFAM

Como parte de la validación de la tarjeta EOS en el control de dispositivos hápticos, se realizaron pruebas para comprobar la estabilidad del sistema, cuando se varía la constante de rigidez que posee el modelo de contacto empleado (modelo elástico lineal). En este ensayo se aplica una fuerza constante de 5 N sobre el primer grado de libertad del LHIFAM (grado de libertad prismático), que, a su vez, se ha definido como el eje x del espacio de trabajo.

Además de esto se ha definido una pared virtual a 10 cm sobre el eje x . La intención del ensayo es observar el comportamiento del dispositivo cuando se presenta una colisión (entre el dispositivo y la pared virtual) y, al mismo tiempo, verificar que la tarjeta EOS ofrece un rendimiento adecuado en este tipo de aplicación.

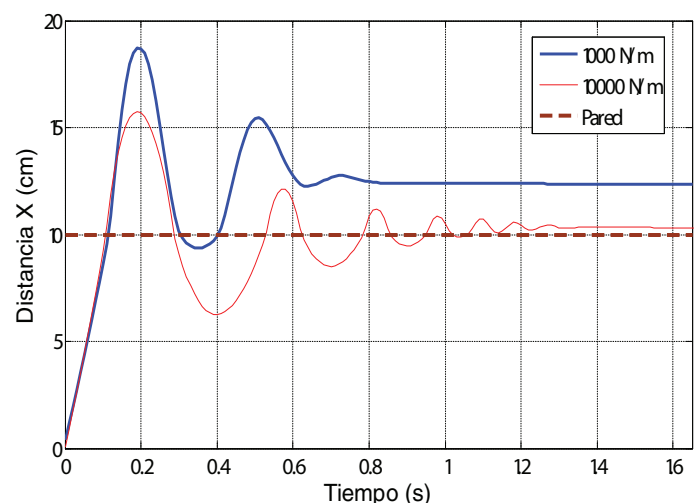


Fig. 11: Respuesta del sistema ante una fuerza aplicada por el usuario, frecuencia de muestreo 10 kHz

El análisis de estabilidad en dispositivos hápticos apunta a considerar como un contacto ideal a una respuesta de tipo críticamente amortiguada. De esta forma el comportamiento del sistema se asemejará al de un contacto real.

En la Fig. 9 se puede observar el comportamiento del sistema empleando una frecuencia de muestreo de 10 kHz (frecuencia óptima). Además de esto, se emplean dos valores distintos de rigidez (1 y 10 kN/m) para la pared virtual implementada.

La penetración obtenida utilizando la menor rigidez (1kN) es más profunda (4.76cm), pero del mismo modo evidencia un tiempo de establecimiento más prolongado y un error en estado estable de 0.5cm.

Por el contrario, utilizando 10 kN como rigidez de la pared virtual, se obtiene una menor penetración (1.6cm), mientras que el error en estado estable se reduce a 0.05cm.

Cabe resaltar que el comportamiento obtenido, a pesar de ser estable, posee un número considerable de oscilaciones (subamortiguado) que compromete el realismo del contacto simulado.

Es necesario tener en cuenta la influencia del usuario sobre el comportamiento final del sistema. Hasta el momento del ensayo realizado se ha aplicado una fuerza constante para excitar el sistema, pero en una situación práctica la fuerza aplicada como entrada, será suministrada por el usuario.

En la Fig. 10 se observa la respuesta del sistema, teniendo como entrada la fuerza que aplica el usuario sobre el LHifAM. En este ensayo se utilizan las mismas constantes de rigidez empleadas anteriormente y la pared se ha ubicado en la misma posición.

Los resultados obtenidos muestran como la influencia del usuario reduce notablemente el tiempo de establecimiento del sistema y además reduce las oscilaciones generadas en la colisión.

Es de resaltar que empleando una rigidez baja (1 kN) se produce una mayor penetración (8.7 cm), aunque se reducen las oscilaciones y el tiempo de establecimiento.

Por el contrario aumentando la rigidez de la pared (10 kN), se reduce la penetración (5.75 cm) y las oscilaciones y el tiempo de establecimiento aumentan; de esta forma las sensaciones percibidas por el usuario, cuando se produce una colisión, se hacen menos realistas.

8. CONCLUSIONES

Este artículo presenta la tarjeta EOS v.2.0, como un dispositivo electrónico basado en FPGA (Spartan 3E Xilinx), para el control de sistemas hápticos de hasta seis grados de libertad. La tarjeta EOS aporta las ventajas de ser un sistema reconfigurable de bajo coste, fácilmente adaptable a los requerimientos de una aplicación háptica en particular.

Se ha validado la tarjeta EOS usando para ello el robot LHifAM (también desarrollado en el CEIT), alcanzando una frecuencia de muestreo óptima de 10 kHz. para el lazo de control implementado.

A partir de las pruebas realizadas, se concluye que la tarjeta EOS representa una opción válida para el control de dispositivos hápticos, aportando una plataforma de desarrollo y garantizando los requerimientos de frecuencia de muestreo, conectividad y versatilidad en la implementación de interfaces hápticas.

La tarjeta EOS ha sido empleada por la empresa Lander Simulation and Training Solutions (www.landersimulation.com), en la construcción de simuladores de conducción (trenes y camiones).

De igual forma, la tarjeta EOS es utilizada en el laboratorio de Mecánica Aplicada del CEIT, en la construcción de sistemas hápticos y de teleoperación, reduciendo los costes tanto de la fase de desarrollo como del producto final.

Las líneas futuras de investigación apuntan a la continuidad en el desarrollo de la tarjeta EOS, con el fin de mejorar sus prestaciones y ampliar el abanico de aplicaciones en la que pueda ser utilizada.



Fig. 11: Simulador de conducción del CEIT

9. BIBLIOGRAFÍA

- Bengoechea E, Sánchez E, "Palanca Háptica Versátil de Bajo Coste para Simuladores de Conducción y Entrenamiento", VII Congreso Internacional de Interacción Persona-Ordenador, Puertollano, Spain, 2006, pp. 449-458.
- Bengoechea E, Sánchez E, Savall J, "Optimal Cost Haptic Devices for Driving Simulators", Engineering the User Interface From Research to Practice, Springer, 2009, pp. 29-43.
- Craig J.J, Introduction to robotics, mechanics and control, 3th ed. Prentice Hall, 2005, pp. 135-159.
- Gil J.J, "Control de dispositivos físicos de gran espacio de trabajo para la interacción táctil con entornos virtuales", Tesis Doctoral, Universidad de Navarra, San Sebastián, España, 2003.
- Marschner A, "An FPGA-based Target Acquisition System", Master Degree Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.
- O'Malley M, Sevcik K, "Improved haptic fidelity via reduced sampling period with an FPGA-Based real-time hardware platform", Transactions of the ASME, vol. 9, March 2009, pp. 1-7.
- Rebello R, "FPGA-Based High Performance Computing for Haptic Simulation in a Virtual Environment", University Chennai, India, 2004.
- Savall J, Borro D, Gil J.J, Matey L, "Description of a Haptic System for Virtual Maintainability in Aeronautics", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne, Switzerland, September, 2002, pp. 2887-2892.
- Weerakkody N, Mahns D, "Impairment of human proprioception by high-frequency cutaneous vibration", The Physiological Society. Journal compilation, 2007, pp 971-980.
- Went K, Neculescu D, Sasiadek J, "Haptic force control based on impedance/admittance control aided by visual feedback", Multimedia Tools Applications, Springer, vol. 37, 2008, pp. 39-52.