

EXPERIENCIA PILOTO: PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MEDIANTE FPGAs CON FINES EDUCATIVOS

M. A. VEGA, J. M. SÁNCHEZ, J. A. GÓMEZ

*Departamento de Informática. Escuela Politécnica. Universidad de Extremadura.
Campus Universitario s/n. 10071 Cáceres. España.*

En este trabajo exponemos las experiencias docentes realizadas usando FPGAs, aplicadas en particular al procesamiento de imágenes. Resaltamos la innovación en la docencia que se está llevando a cabo gracias a la utilización de hardware y software que son usados actualmente en el mercado tecnológico; así como la conexión con la investigación. Se trata, por tanto, de transmitir a los alumnos unos conocimientos actualizados sobre microelectrónica sustentados por herramientas utilizadas en la industria.

1. Introducción

Debido al constante avance de la electrónica, y en particular de la microelectrónica, es imprescindible que, sin perder de vista los fundamentos y bases que permanecen en el tiempo, se enseñen nuevos conceptos que reflejan el estado actual de la misma. Un ejemplo concreto son los dispositivos utilizados como elementos de proceso. Éstos han evolucionado a lo largo de la historia de las CPUs (CISC, RISC) llegando a procesadores más especializados como DSPs (*Digital Signal Processors*), y ahora se están utilizando FPDs (*Field Programmable Devices*) como procesadores a medida. Los avances en tecnología VLSI hacen posible la existencia de FPDs con suficiente cantidad de recursos computacionales, pudiendo distinguir entre elementos de proceso reconfigurables (FPGAs y CPLDs [1]) y elementos de interconexión reconfigurables (FPICs). En concreto, los recientes avances en la tecnología de fabricación y arquitectura de dispositivos han producido un tremendo crecimiento de las FPGAs, tanto en términos de densidad como de rendimiento. Las FPGAs se han convertido en un medio muy popular para implementar ASICs [2] y otras aplicaciones. Más aún, las FPGAs han emergido como la plataforma natural para las CCMs (*Custom Computing Machines*) [3,4] debido a su reprogramabilidad. Por todos estos motivos nos hemos marcado como objetivo la enseñanza de los conceptos asociados con FPGAs a nuestros alumnos.

Esta enseñanza debe realizarse sin detrimento de una buena pedagogía, por lo que parece recomendable experimentar de manera práctica con FPGAs. Las plataformas de computación basadas en FPGAs han sido utilizadas con éxito en aplicaciones muy diversas, entre ellas: aplicaciones matemáticas (multiplicación modular, criptografía RSA,...), aplicaciones físicas (algoritmos de Monte Carlo para física estática, resolución de la ecuación de Laplace, etc.), aplicaciones de procesamiento de imágenes (convolución, morfología, extracción de características, detección de regiones y etiquetado,...), así como otras aplicaciones generales (algoritmos de optimización genética, aplicación del modelo de Markov para el reconocimiento del habla, etc.). De entre todas ellas hemos elegido las aplicaciones de

procesamiento de imágenes por dos razones: Desde un punto de vista totalmente didáctico, las aplicaciones de procesamiento de imágenes parecen ser las más gratificantes para el alumno. Éste obtiene una recompensa netamente visual del trabajo que va desarrollando, comprobando rápidamente la corrección del mismo. Más aún, las operaciones de procesamiento de imágenes suelen ser fáciles de comprender, no requiriendo modelos teóricos complejos, lo cual permite enfocar la docencia al uso de las FPGAs. Desde un punto de vista científico, el procesamiento de imágenes ha demostrado ser un área de aplicación ideal para las FPGAs debido a que muchas aplicaciones son inherentemente paralelas y consisten en operaciones simples sobre una elevada cantidad de datos enteros de baja resolución (generalmente pixels de 8 bits). Además, el procesamiento de imágenes mediante FPGAs es una de las líneas de investigación que seguimos, lo cual nos decantó definitivamente hacia este tipo de aplicaciones.

Como experiencia piloto estamos aplicando la enseñanza de FPGAs a través del procesamiento de imágenes a un grupo de alumnos de Ingeniería Informática en los proyectos fin de carrera y de doctorado. En la próxima sección mencionamos las plataformas hardware y software que se han elegido para poner en práctica esta experiencia piloto, razonando dicha elección. En la sección 3 se explican brevemente las experiencias que los alumnos están realizando. Finalmente, en la última sección se presentan una serie de conclusiones obtenidas de la aplicación de esta nueva forma de docencia.

2. Plataformas hardware y software utilizadas

La plataforma hardware seleccionada fue la tarjeta H.O.T. II de la compañía Virtual Computer Corporation [5]. La tarjeta H.O.T. II está especialmente diseñada para el desarrollo y validación de aplicaciones de procesamiento de imágenes, puesto que permite ejecutar este tipo de aplicaciones en tiempo real utilizando datos reales (imágenes reales). La H.O.T. II es además una plataforma para el codiseño hardware/software [6], ya que se acompaña con el software necesario para permitir al diseñador utilizar sus diseños digitales dentro de programas escritos en Visual C++. Más aún, la H.O.T. II posee un método de reconfiguración en tiempo de ejecución que permite cargar los diseños y reconfigurar la FPGA sin tener que inicializar el sistema. Pensamos que estas características son muy importantes puesto que permiten a los alumnos crear una aplicación para Windows que utilizará en el momento adecuado la FPGA con el diseño digital deseado, reconfigurándola sin salir de la aplicación cuando se necesite otro diseño distinto. De esta forma los alumnos observan en un entorno amigable y totalmente gráfico el resultado de sus diseños sobre FPGAs. Otros dos motivos que nos hicieron decantarnos por la tarjeta H.O.T. II fueron su precio especial para Universidades y su aplicación a nuestras líneas de investigación. En la actualidad disponemos de varias tarjetas H.O.T. II en su versión XL. La HOT2-XL es una tarjeta sobre el bus PCI [7] que posee una FPGA XC4062XL y un total de 4 MB de memoria RAM dividida en dos bancos totalmente independientes, permitiendo diseños de gran tamaño (hasta 45K puertas) así como el almacenamiento de varias imágenes en RAM.

La plataforma software elegida fue Xilinx Foundation [8]. Se trata de un conjunto de herramientas que permiten realizar el ciclo de diseño de arquitecturas digitales. Estas herramientas modelan sistemas mediante lenguajes HDL (Verilog, VHDL, ABEL), construyen circuitos mediante captura de esquemas, simulan su comportamiento, etc. Lo más interesante de estas herramientas es su capacidad de sintetizar prototipos sobre FPGAs o

CPLDs. Por tanto, el software de Xilinx, en un principio destinado a ayudar en la investigación que desarrollamos, permite al alumno realizar el ciclo de diseño completo de una sencilla operación de procesamiento de imágenes, llegando a implementarla físicamente en la FPGA existente en la HOT2-XL. Además, este software es utilizado actualmente por las empresas para sus desarrollos dentro de sus ámbitos de actuación particulares, con lo que se les ofrece a los alumnos una formación que puede ser demandada en el mercado laboral.

3. Experiencias

Partiendo de estas plataformas hardware y software los alumnos diseñan una aplicación para Windows con una interfaz gráfica completa y amigable que permite abrir y guardar imágenes en formato BMP, además de realizar operaciones simples de procesamiento de imágenes sobre las mismas. La aplicación reconfigura en cada instante la tarjeta HOT2-XL según la operación de procesamiento que se desee realizar sobre la imagen. Para reducir el número de reconfiguraciones así como los retardos debidos a las mismas, la aplicación gestiona una pequeña caché "virtual", donde se indica qué operación está actualmente cargada en la FPGA y cuáles se encuentran almacenadas en la caché de configuración de la tarjeta, evitando, por ejemplo, reconfigurar la FPGA con la misma configuración que posea o el envío a través del bus PCI de una operación ya existente en la caché de configuración (512 KB). Los alumnos, en primer lugar, diseñan las operaciones de procesamiento de imágenes mediante circuitos digitales, utilizando para ello el software de Xilinx; Por lo que deben poner en práctica todos los conceptos aprendidos sobre FPGAs, y en general, sobre electrónica digital. Una vez realizados los diseños digitales, éstos quedan almacenados como ficheros de configuración en el directorio de la aplicación. La aplicación utilizará uno u otro de estos ficheros para reconfigurar la FPGA según se necesite. La aplicación permite realizar las operaciones de procesamiento también mediante software. De esta forma, los alumnos pueden comprobar la corrección del circuito digital diseñado, observando que éste genera la misma imagen resultante que la versión software de la operación. También les sirve para comparar el rendimiento de ambas versiones de la operación, llegándose a la conclusión de que la versión hardware es más potente.

Dentro de las operaciones de procesamiento de imágenes, y atendiendo al tipo de operandos con los que tratan, podemos distinguir entre operaciones de punto, de región, de imagen, de medida y de reconocimiento de patrones [9,10]. De todas éstas, las más simples son las operaciones de punto, y por ello, han sido las elegidas para que los alumnos empezaran a trabajar con la tarjeta HOT2-XL. Las operaciones de punto incluyen todas las transformaciones de la imagen donde el valor de cada pixel en la imagen resultante depende únicamente de un pixel de la imagen original. Dentro de este tipo de operaciones los alumnos implementan operaciones tan variadas como la complementación, la umbralización manual, la modificación del contraste/brillo, la umbralización a dos vías, etc [9]. Con estas operaciones se hace un repaso de los aspectos de la electrónica digital asociados con puertas lógicas, sumadores, restadores, multiplicadores, divisores, multiplexores, comparadores, registros, contadores, RAMs, etc.

Los alumnos también tienen que enfrentarse a la implementación mediante la FPGA de la HOT2-XL de operaciones de región. En este caso, el valor de cada pixel en la imagen resultante depende de una región de la imagen original, es decir, de un conjunto de pixels de la misma. Esta característica complica el diseño de los circuitos digitales, obligando a

profundizar en conceptos como FIFOs, divisores de la frecuencia del reloj, elementos de retardo, etc. Dentro de este tipo de operaciones destaca la convolución de imágenes [10]. La convolución de imágenes es casi la más popular de las operaciones en el campo del procesamiento de imágenes, y se utiliza en un gran número de aplicaciones con muy distintos fines: filtrado de ruido, mejora del contraste, detección de discontinuidades (puntos, líneas, perfiles), etc. Por este motivo, es ésta la primera operación de región que los alumnos diseñan mediante el uso de FPGAs.

4. Conclusiones

La experiencia más inmediata nos ha dado muestra de los beneficios de esta forma de docencia. Los alumnos pueden comprobar experimentalmente, y ampliar, los distintos aspectos teóricos sobre electrónica digital, y en particular sobre FPGAs, tratados en varias asignaturas de la titulación de Ingeniería Informática, con lo cual los conceptos se afianzan de una forma más segura. En conclusión, el uso de FPGAs por parte de los alumnos para el procesamiento de imágenes es una innovación educativa que produce una mejora en la calidad de la enseñanza de la microelectrónica. Además, es un claro ejemplo de cómo los resultados de la investigación desarrollada pueden revertir en la docencia.

Referencias

- [1] S. Brown y J. Rose. *FPGA and CLPD Architectures: A Tutorial*. Proc. of the IEEE Design & Test of Computers, **13**(2), 42-57 (1996).
- [2] M. J. S. Smith. *Application-Specific Integrated Circuits*. Addison-Wesley (1997).
- [3] J. Villasenor y W. H. Mangione-Smith. *Configurable Computing*. Scientific American, **276**(6), 54-59 (1997).
- [4] Proc. IEEE Symp. FPGAs for Custom Computing Machines. IEEE Computer Society Press (1997).
- [5] *H.O.T. II Hardware Guide. Version 2.0*. Virtual Computer Corporation (1999).
- [6] G. de Micheli y R. K. Gupta. *Hardware/Software co-design*. Proc. of the IEEE, **85**(3), 349-365 (1997).
- [7] PCI Special Interest Group. *PCI Local Bus Specification - Revision 2.1*. <http://www.pcisig.com> (1995).
- [8] *The Programmable Gate Array Data Book*. Xilinx, Inc (1995).
- [9] G. A. Baxes. *Digital Image Processing. Principles and Applications*. John Wiley & Sons, Inc (1994).
- [10] R. M. Haralick y L. G. Shapiro. *Computer and Robot Vision. Vol. 1*. Addison-Wesley (1992).