

Ingeniería Neuromórfica: El papel del hardware reconfigurable

Eduardo Ros, Francisco José Pelayo, Alberto Prieto y Begoña del Pino

Resumen—En este trabajo se analiza la aplicación del hardware reconfigurable en el campo de la Ingeniería Neuromórfica. Como ejemplos se describen brevemente tres proyectos europeos que actualmente se desarrollan en el Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores de la Universidad de Granada y que utilizarán hardware reconfigurable para la implementación de distintos sistemas neuromórficos.
Palabras clave— Ingeniería Neuromórfica, Sistemas bio-inspirados, aplicaciones del hardware reconfigurable.

I. INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Neuromórfica es un campo de investigación que trata del diseño de sistemas artificiales de computación que utilizan propiedades físicas, estructuras o representaciones de la información basadas en el sistema nervioso biológico. Aunque otros campos, como el de las Redes Neuronales Artificiales, también se inspiran en la biología, lo que caracteriza a la Ingeniería Neuromórfica es la emulación de funciones muy específicas, usualmente de tipo sensorial, cuya estructura y funcionalidad biológica han sido estudiadas con gran detalle, dando lugar así a la construcción de sistemas tales como retinas y cócleas artificiales. Carver Mead, proponente de la denominación Ingeniería Neuromórfica [1], comentó en 1993: *Como ingenieros, sería necio ignorar las lecciones de miles de millones de años de evolución.* De hecho, los sistemas biológicos tienen habilidades como el reconocimiento del habla, segmentación de la información visual, control del movimiento autónomo en entornos cambiantes, etc.; que se desarrollan con una eficiencia fuera del alcance de los sistemas artificiales convencionales. Uno de los numerosos ejemplos lo constituye la audición, que se efectúa con un extraordinario rango dinámico (más de 100db) a partir de sensores de muy baja calidad (rango dinámico menor de 20db). Los avances obtenidos en nuestro conocimiento acerca de la forma en que los sistemas biológicos evolucionan y se adaptan, y cómo el sistema nervioso central codifica, memoriza, aprende y procesa información deben ser una motivación para la implementación de futuros sistemas bio-inspirados.

Actualmente la Ingeniería Neuromórfica [2,3] trata de desarrollar sistemas embebidos o autónomos para resolver problemas específicos que usualmente implican una tarea sensorial-motora integrada o una tarea de percepción en tiempo real. El campo de aplicaciones de los sistemas neuromórficos es muy amplio, yendo desde

el diseño de sistemas de control no lineales adaptativos hasta el desarrollo de sensores inteligentes.

Cuando se desarrollan sistemas de computación bio-inspirados es importante el “espíritu oportunista” del diseñador, capaz de identificar las características de los sistemas biológicos en las que se basa su capacidad de computación y que pueden ser adaptadas a la tecnología de implementación mediante circuitos electrónicos relativamente sencillos. Por otro lado, debe aprovechar características inherentes a los circuitos electrónicos como su mayor ancho de banda, velocidad de respuesta, etc; y utilizar esquemas como multiplexación temporal, comunicación binaria y comunicación mediante direcciones, etc. La combinación óptima de principios bio-inspirados y características explotables de los circuitos electrónicos constituye la esencia de la Ingeniería Neuromórfica.

Por ejemplo, las siguientes características de los sistemas nerviosos naturales serían de utilidad si se pudieran adoptar en sistemas artificiales:

- *Procesamiento paralelo o procesamiento neuronal*: sin duda muchas de las asombrosas propiedades de los sistemas naturales son debidas a que son sistemas de computación colectivos. La implementación de sistemas con un gran paralelismo no es una tarea fácil. El diseño de primitivas de computación sencillas (neuronas artificiales) capaces de realizar un procesamiento eficiente mediante una topología adecuada es un tema en el que una amplia comunidad científica ha investigado durante años.
- *Computación cooperativa*: el modo en que los sistemas biológicos realizan procesamientos robustos y de precisión basándose en unidades (neuronas) de computación imprecisas y estocásticas, con gran nivel de ruido y respuestas impredecibles frente a estímulos similares, constituye una característica de gran interés para la implementación de sistemas artificiales.
- *Capacidad de auto-configuración*: esta característica presente en los sistemas biológicos es de gran utilidad para adaptar sistemas de computación genéricos a distintas funciones. Además esta propiedad aumenta la efectividad de los sistemas a entornos específicos de cada individuo y permite la adaptación a nuevas condiciones durante su tiempo de vida.

Profesores del Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, E18071 Granada. E-mail de contacto: eros@atc.ugr.es

Por otro lado existen cualidades de los circuitos electrónicos de las que carecen los sistemas biológicos, por ejemplo:

- *Gran ancho de banda y esquemas de comunicación con multiplexación temporal:* La utilización de esquemas de multiplexación que no limiten el paralelismo puede ayudar a superar el problema de la reducida (comparada con la biología) capacidad de interconexión física entre elementos computacionales.
- *Sensores remotos:* Existen multitud de sensores y formas de comunicación que permiten su utilización remota. Este tipo de dispositivos ofrecen la posibilidad de implementar sistemas de procesamiento distribuidos.
- *Actuadores remotos:* al igual que los sensores, estos dispositivos permiten el control remoto de sistemas.
- *Procesamiento de gran precisión:* para ciertas tareas puede ser necesaria una gran precisión de cálculo. Esto es fácil de realizar con primitivas de computación convencionales basadas en unidades aritmético-lógicas digitales de la precisión que se requiera.

II. DESCRIPCIÓN DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN SOBRE INGENIERÍA NEUROMÓRFICA DESARROLLÁNDOSE EN EL DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA Y TECNOLOGÍA DE COMPUTADORES DE LA UNIVERSIDAD DE GRANADA

En la actualidad investigadores del Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores de la Universidad de Granada participan en el desarrollo de tres proyectos europeos relacionados con la implementación de primitivas de computación del campo de la Ingeniería Neuromórfica mediante hardware reconfigurable. Los proyectos son:

- SpikeFORCE: Real-Time Spiking Neurons for Robot Control [4]
- CORTIVIS: Cortical Visual Neuroprosthesis for the blind [5]
- ECOVISION: Artificial Vision System based on early cognitive cortical processing [6]

A continuación se describen brevemente.

A. SpikeFORCE: Real-Time Spiking Neurons for Robot Control

El consorcio SpikeFORCE está formado por una empresa con interés en robótica (Sony) y las universidades de Paris (ENS), Pavia (INFM-RUPV) y Granada.

El diseño de robots está adquiriendo un interés cada vez más importante en la sociedad europea. Pero, a pesar de los avances tecnológicos, los robots actuales no son capaces de realizar algunas tareas de procesamiento sencillas similares a las que realiza cualquier mamífero. Así, el aprendizaje continuo en tiempo real sigue constituyendo un problema. Para obtener habilidades de movimiento similares a las de los animales, la

información de percepción y acción, de gran número de señales de sensores, motores y señales cognitivas debe ser integrada como un todo. El consorcio multidisciplinar SpikeFORCE, integrado por físicos, expertos en neurociencia, e ingenieros electrónicos e informáticos, investiga los mecanismos de integración de información en el cerebro y su posible implementación en forma de circuitos en robots. El estudio de estructuras basadas en pulsos [7], como las que forman las neuronas biológicas, puede aportar nuevas ideas en este sentido.

Para todo ello los colaboradores de los centros Ecole Normal Supérieure y Universidad de Pavia trabajan en modelos neuronales basados en pulsos. Nuestro grupo en la Universidad de Granada estudia el modo de implementación de estos modelos mediante circuitos de forma que puedan funcionar en tiempo real. Por otra parte, la empresa Sony France, investigará su aplicación en plataformas de robot en desarrollo como el perro Aibo y el humanoide.

Concretamente, se estudian formas de implementar las primitivas de adaptación y aprendizaje de movimientos coordinados que tienen lugar en el cerebelo de los mamíferos. Este tipo de aprendizaje es el que adapta de forma continua el ciclo cerrado acción-percepción. Para ello es necesario integrar de forma no destructiva señales sensoriales, motoras y cognitivas en tiempo real.

El cerebelo tiene la habilidad de integrar información de un gran número de fuentes heterogéneas y es capaz de un aprendizaje extremadamente sensible al contexto general en el que se desarrolla cada acción. De hecho, en el área de control de robots, éstas son dos características importantes que representan campos de investigación abiertos: la integración de información de diferentes fuentes (percepción multi-modal) y el aprendizaje continuo de acciones eficientes.

La discriminación de entradas muy similares es necesaria para el perfeccionamiento de movimientos de precisión, en tanto en cuanto pequeñas diferencias, a pesar de grandes similitudes entre las entradas, adquieren una importancia crucial para este proceso de refinamiento. Los axones de muchas células granulares (100 millones en la rata) constituyen el canal de entrada al cerebelo llevando información sensorial, propioceptiva y contextual a las principales células de corteza del cerebelo, las células de Purkinje (300.000 en la rata), que generan la única salida del sistema. Cada célula de Purkinje recibe unas 200.000 entradas diferentes (para ello existen unos 60 miles de millones de sinapsis de este tipo en la rata). Actualmente se cree que las modificaciones en las sinapsis de conexión entre las células granulares y las de Purkinje almacenan la información adquirida durante el aprendizaje motor, permitiendo la asociación entre una salida motora correcta y una entrada particular.

Para todo ello, se estudiarán las ventajas e inconvenientes de esquemas de computación basados en pulsos para la integración y discriminación de señales. En el área de control de robots este tipo de estructuras puede tener importancia si se puede utilizar la dimensión temporal de forma eficiente como recurso de computación, ya que el objetivo es generar acciones

motoras correlacionadas en el tiempo entre ellas y con las señales de entrada.

Dos son las líneas de investigación de este proyecto relacionadas con el Hardware reconfigurable:

- Implementación de modelos neuronales basados en pulsos en plataformas de tipo FPGA. Estas implementaciones servirán para posibilitar la simulación de sistemas neuronales de grandes dimensiones basados en pulsos.
- Evaluar la posibilidad de implementación de sistemas de control de robots basados en computación por pulsos mediante circuitos neuronales específicos.

B. CORTIVIS: Cortical Visual Neuroprosthesis for the blind

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de prototipos en el campo de la rehabilitación visual. En concreto se pretende estudiar la viabilidad de neuroprótesis implantadas en el cortex visual primario para lograr una visión, que aunque limitada, es de sumo interés para personas ciegas. Los resultados de este proyecto pretenden generar información sobre este tipo de dispositivos no disponibles actualmente. Además, se recogerá información sobre la plasticidad del sistema nervioso visual de adultos, que será fundamental para el desarrollo de dispositivos de rehabilitación visual y de sistemas de entrenamiento.

Dentro de este contexto se pretende desarrollar una plataforma de procesamiento visual en tiempo real que genere una salida bio-compatibile. Esto es, se pretende que el sistema de procesamiento genere impulsos que puedan estimular de forma eficiente el cortex visual. Ello implica realizar investigaciones en distintos campos con objeto de identificar la codificación óptima para este tipo de dispositivos y el nivel de adaptación que se puede esperar de pacientes implantados, es decir, el nivel de plasticidad del cortex visual para la utilización de esta nueva fuente sensorial. El sistema de procesamiento, basado en hardware de tipo FPGA, deberá emular el tracto visual desde la retina hasta el cortex visual, teniendo en cuenta que el número de conexiones final que es muy limitado comparado con las que contiene el nervio óptico.

La facultad de reconfiguración es especialmente relevante en este caso dado que cada paciente puede requerir distintas especificaciones de codificación y proyección de la información visual sobre los microelectrodos de estimulación. Además estas especificaciones deben de determinarse mediante experimentación, ensayando distintas configuraciones del hardware de procesamiento visual.

C. ECOVISION: Artificial Vision System based on early cognitive cortical processing

Los dispositivos de visión artificial ideados por el hombre están lejos de conseguir la eficiencia y exactitud en el análisis de escenas visuales encontrada en animales vertebrados. El objetivo de ECOVISION es utilizar el

conocimiento del modo de funcionamiento de sistemas biológicos de visión para construir un sistema híbrido hardware-software de visión con propiedades pre-cognitivas. Los sistemas pre-cognitivos utilizan conocimiento implícito del mundo. Para ello el consorcio ECOVISION (formado por 7 miembros de 5 países incluyendo una empresa) con experiencia en diseño de circuitos VLSI, visión artificial, neurociencia y psicología pretende desarrollar una arquitectura de procesamiento distribuida para análisis visual adaptativo con capacidad de utilización de información pre-cognitiva.

En concreto, el papel del hardware reconfigurable en el área de visión artificial adquiere especial importancia por su capacidad de poder procesar imágenes en tiempo real. Por ello, en el campo de la implementación de front-ends para sistemas de procesamiento de más alto nivel constituye una de alternativa muy válida, capaz de generar información pre-procesada. En el ámbito de ECOVISION se pretende estudiar la implementación de un sistema de extracción de flujo óptico (información de movimiento) y de estereo (para la localización en el espacio basado en discrepancias entre imágenes desde distintas perspectivas). El proyecto tiene como campo de aplicación primario el mundo automovilístico en donde se prevé que la visión artificial constituirá una opción válida en unos 10 años. Actualmente trabajamos definiendo una aplicación de monitorización de adelantamientos basada en un esquema de visión artificial en tiempo real.

III CONCLUSIÓN

Los sistemas biológicos realizan muchas tareas de procesamiento complejas con una eficiencia que aún no está al alcance de sistemas artificiales. Por ello la biología constituye un buen referente para implementar sistemas que realicen tareas que los seres vivos desarrollan de forma natural, como es el caso de la visión, el aprendizaje de movimientos, coordinación motora, etc. Los proyectos citados en esta comunicación tratan de abordar numerosos retos a lograr por los sistemas artificiales y que son inherentes a los sistemas naturales, entre otros se encuentran el procesamiento eficiente y en tiempo real de numerosas entradas procedentes de múltiples sensores, procesamiento de señales representadas mediante eventos asíncronos, e integración temporal de información en escalas de tiempo muy distintas, desde las propias de la dinámica de las sinapsis y del cuerpo celular neuronal hasta las asociadas con la adaptación o aprendizaje.

El hardware reconfigurable es una buena opción para el prototipado e implementación de sistemas neuromórficos, ya que con aquel se pueden definir arquitecturas de gran complejidad e implementar sistemas que requieran mecanismos de adaptación, plasticidad y aprendizaje a medio-largo plazo; es decir, cubren muchas de las necesidades de los sistemas neuromórficos.

La aplicación del hardware reconfigurable al campo de la visión artificial está cada vez más extendida, para situaciones en las que el procesamiento en tiempo real es

necesario. En este sentido los proyectos ECOVISION y CORTIVIS exploran las posibilidades de plataformas de tipo FPGA para aplicaciones relacionadas con la visión artificial. Por otro lado, la robótica es un campo en el que también tiene sentido la utilización de chips FPGA ya que el procesamiento en tiempo real es necesario para estudiar en situaciones reales las interacciones entre el robot y el medio (ciclo cerrado percepción-acción), y la reconfiguración permite la adaptación a medios cambiantes.

Por otra parte, la implementación de estructuras de computación basadas en pulsos mediante tecnología digital es un campo de investigación abierto [7-9]. La eficiencia de este tipo de primitivas de computación para ciertas tareas viene inspirada por los sistemas biológicos. Estos esquemas serán estudiados en el ámbito de los proyectos SpikeFORCE y CORTIVIS

IV AGRADECIMIENTOS

Los trabajos descritos se están desarrollando con financiación de la Unión Europea obtenida a través de los proyectos SpikeFORCE (IST-2001-35271), CORTIVIS (QLK6-CT-2001-00279) y ECOVISION (IST-2001-32114).

IV REFERENCIAS

- [1] C.Mead, *Neuromorphic Electronic Systems*, Proceedings of the IEEE, 78 (10), Oct. 1990.
- [2] A.Prieto, A.Andreou, *Microelectronics for Bio-Inspired Systems*, Analog Integrated Circuits and Signal Processing, , 30 (2), pp.87-90, 2002.
- [3] Analog Integrated Circuits and Signal Processing, , 13 (1/2), *Número especial dedicado a Ingeniería Neuromórfica*, p.5-222, 1997.
- [4] SpikeFORCE (<http://www.spikeforce.org>)
- [5] CORTIVIS (<http://cortivis.umh.es/>)
- [6] ECOVISION (<http://www.pspc.dibe.unige.it/ecovision/>)
- [7] F.J.Pelayo, E.Ros, X.Arreguit, A.Prieto, *VLSI Implementation of a Neural Model Using Spikes*, Analog Integrated Circuits and Signal Processing, , 13 (1/2), pp.87-90, 1997.
- [8] C.Wolff, G.Hartmann, U.Rückert, *ParSpike – A Parallel DSP-Accelerator for Dynamic Simulation of Large Spiking Neural Networks*, Proc. of the 7th International Conference on Microelectronics for Neural, Fuzzy, and Bio-Inspired Systems (MicroNeuro'99), pp. 324-331, IEEE Comp. Soc., 1999.
- [9] T.Schoenauer, S.Atasoy, N.Mehrtash, H.Klar, *NeuroPipe-Chip: A Digital Neuro-Processor for Spiking Neural Networks*, IEEE Transactions on Neural Networks, 13 (1), pp. 205-213, 2002.