

Plataforma Modular de Procesamiento de un Sistema Sensorial Ultrasónico

Ana Jiménez, Jesús Ureña, Álvaro Hernández,
Carlos Casado, Manuel Mazo, Juan J. García
Departamento de Electrónica
Escuela Politécnica. Universidad de Alcalá
E-28805 Alcalá de Henares (Madrid), España
E-mail: ajimenez@depeca.uah.es

Fernando J. Álvarez
Departamento de Electrónica e Ing. Electromecánica
Universidad de Extremadura
Cáceres, España
E-mail: fafranco@unex.es

Abstract—Los sistemas sensoriales ultrasónicos se emplean normalmente en robots móviles para funciones de diversa índole: desde la más sencilla ubicación de obstáculos, hasta tareas más complejas de ayuda a la navegación mediante construcción de mapas del entorno. En todos ellos suele ser habitual la necesidad de procesar y proporcionar información del entorno en tiempo real, respetando los distintos requerimientos presentados por los algoritmos según el grado de inteligencia dado al sensor. Este trabajo presenta un sistema de computación empotrado, que gracias a su flexibilidad y modularidad es susceptible de ser empleado para el desarrollo de sistemas sensoriales inteligentes, ya sean ultrasónicos o de otro tipo (infrarrojos).

Palabras clave: redes de sensores inteligentes, sistemas sensoriales ultrasónicos, sistema de computación empotrado, FPGA.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas sensoriales ultrasónicos se han empleado habitualmente en el desarrollo de los diversos procedimientos de captación de los robots móviles [1] [2] [3] [4] [5] [6]. Aunque sus primeras aplicaciones consistieron en una simple detección de los obstáculos que rodeaban al robot, con el paso del tiempo se fue dotando al sensor de un mayor grado de inteligencia. Este desarrollo ha permitido un mejor aprovechamiento de las posibilidades de los ultrasonidos, dando lugar a sistemas capaces de clasificar reflectores [4] [7] [8] o de construir mapas del entorno [8] [9] [10] [11].

En la mayoría de los sistemas sensoriales ultrasónicos, el procesamiento propuesto para las señales adquiridas en la recepción de dichos transductores está basado en la medida de tiempos de vuelo (TDV) [12]. El procedimiento de medida de dicho tiempo puede presentar distintos grados de complejidad, en función de la precisión requerida. Las técnicas más simples consisten en una integración y posterior umbralización [13], mientras que para soluciones de gran precisión se utilizan técnicas basadas en correlación [14]. Además, existe la posibilidad de centrar el análisis de la señal ultrasónica sobre otros parámetros, como pueden ser las amplitudes, las formas de onda, o las componentes espectrales [15] [16]. En cualquier caso, la determinación de estos parámetros iniciales suele recibir el nombre de procesamiento de bajo nivel.

Independientemente de los algoritmos de procesamiento empleados, éstos implican una elevada carga computacional al tratar de llevar a cabo una implementación en tiempo real. Un correcto diseño del sistema implica una distribución de dicha carga computacional entre distintos nodos de procesamiento, cercanos al sensor, favoreciendo así el diseño y desarrollo de sensores cada vez más inteligentes y autónomos. Este procedimiento permite una mejor distribución de tareas y un reparto más óptimo de las mismas; así como la consecución de sistemas modulares y flexibles, capaces de adaptarse sin excesivas modificaciones a diversas arquitecturas y distribuciones, dependiendo del robot móvil analizado en cada momento.

En este trabajo, se presenta el diseño de un sistema de computación modular y flexible, especialmente contemplado para su aplicación en sistemas sensoriales ultrasónicos. El sistema soporta el procesamiento de más bajo nivel del transductor, dotando al sensor de un notable grado de inteligencia, y permite insertar al mismo en buses de comunicación de ciertas prestaciones para la creación de estructuras sensoriales más complejas. En la sección II se describirán las características más importantes de los sistemas sensoriales ultrasónicos tratados. En la sección III se detallará el sistema de computación propuesto, así como sus prestaciones. Finalmente, las principales conclusiones serán comentadas en la sección IV.

II. SISTEMAS SENSORIALES ULTRASÓNICOS

Los sistemas sonar basados en un único transductor, que funciona de forma aislada e independiente [17], proporcionan una información escasa acerca de la ubicación de los reflectores en el área explorada. Solamente son capaces de determinar la distancia a la cual se encuentra un objeto dentro del cono de emisión/recepción. Por lo tanto, es necesario agrupar dos o más transductores que compartan una misma zona de exploración, formando así vectores sensores (véase Figura 1).

La agrupación de transductores para formar vectores sensores ha sido una práctica habitual para enriquecer la información proporcionada por los ultrasonidos [3] [8] (véase la Figura 1). El principal objetivo es que compartan la mayor parte de sus zonas de exploración, produciéndose así

correspondencia en los ecos (ecos procedentes del mismo reflector) [8]. Bajo esta configuración, y teniendo en cuenta las características geométricas de la asociación y del propio reflector, es posible la localización del mismo dentro del cono de recepción (resolución lateral) [3].

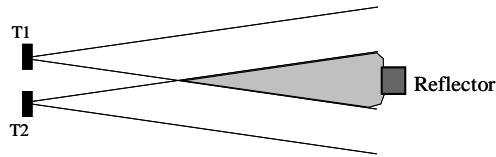


Figura 1. Asociación de transductores para formar un vector sensor.

Estos vectores sensores son nuevamente asociados para obtener estructuras sensoriales más complejas, capaces de acometer clasificaciones de reflectores básicos: salientes, planos o esquinas [4] [7] [8]; o incluso la construcción de mapas del entorno [8] [9] [10] [11]. En la Figura 2 se puede observar una estructura sensorial formada por dos vectores sensores dispuestos en línea.

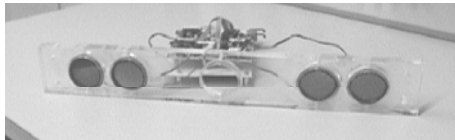


Figura 2. Estructura sensorial con dos vectores sensores desarrollada en el Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá.

De esta forma, se puede considerar al vector sensor como un elemento elemental de medida, el cual puede asociarse según distintas distribuciones geométricas para cumplir los requerimientos de diversas aplicaciones robóticas. Típicamente, en los sistemas previos, los sistemas sensoriales desarrollados tienen un número fijo de transductores y vectores, cuyo procesamiento de señal es realizado de forma centralizada por un sistema de computación rígido y poco adaptado a posibles modificaciones de la distribución sensorial.

En este trabajo se ha considerado el vector sensor como el elemento básico de captación, y se ha diseñado una plataforma de procesamiento a medida de sus requerimientos. Ésta dispone de los recursos de computación necesarios para realizar el procesamiento de bajo nivel en las señales ultrasónicas, y proporcionar resultados (TDVs, componentes de frecuencia, o amplitudes) a otros módulos de más alto nivel. Esta arquitectura modular la hace flexible, y, por lo tanto, especialmente interesante para el desarrollo de redes de sensores inteligentes, donde la carga computacional, se distribuye entre los diferentes sensores en lugar de estar centralizada (véase la Figura 3). En este sentido, la plataforma desarrollada puede ser empleada por sistemas sensoriales de otro tipo, como acústicos [18] o de infrarrojos [19].

A. Determinación de los TDVs ultrasónicos

De cara a contabilizar la carga computacional que deberá asumir cada módulo local, es necesario describir qué tipos de algoritmos se ejecutan en el procesamiento de bajo nivel de un vector sensor ultrasónico formado por dos transductores para la determinación de los TDVs.

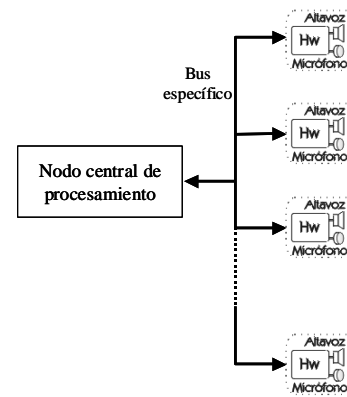


Figura 3. Redes distribuidas de sensores inteligentes.

En trabajos previos, ha quedado ampliamente demostrado que una determinación precisa de TDVs pasa por el empleo de técnicas de correlación en la recepción [7] [14] [20]. Éstas se basan en la codificación de la emisión ultrasónica con secuencias binarias con elevadas funciones de auto-correlación. Si además se desea que ambos transductores emitan y reciban simultáneamente, las secuencias asociadas a cada uno de ellos deben ser mutuamente ortogonales. Así se evitan las interferencias procedentes de correlaciones cruzadas no nulas entre ambas emisiones.

La importancia de disponer de la posibilidad de realizar emisiones y recepciones simultáneas radica en dos cuestiones. En primer lugar se reduce el tiempo de exploración, obteniéndose más información del entorno en el mismo intervalo de tiempo. En segundo lugar, para acometer ciertas clasificaciones de reflectores (incluyendo esquinas) es necesario disponer de TDVs de un reflector obtenidos desde distintos puntos de emisión [4].

Son numerosas las secuencias binarias que pueden emplearse con tales fines. Las secuencias Barker, que fueron empleadas en los primeros trabajos, presentan el inconveniente de tener unas longitudes limitadas, y de no disponer de varias secuencias ortogonales [7] [20]. Esta limitación las inhabilita en los procesos de emisión simultáneos. Otras secuencias ampliamente utilizadas son las pseudo-aleatorias, que permiten trabajar con distintas longitudes (diferentes ganancias de proceso según el entorno), y con secuencias ortogonales, o pseudo-ortogonales [21] [22]. Por último, los conjuntos complementarios de secuencias también pueden ser utilizados en estas aplicaciones, como ya se ha demostrado [23].

La codificación de la emisión ultrasónica con una secuencia característica debe ser adaptada a las especificaciones del transductor, ya que cada uno posee un rango de frecuencias óptimas de trabajo. Por lo tanto, la secuencia o conjunto complementario de secuencias asociado a cada transductor debe ser adaptado a dichas frecuencias mediante un proceso de modulación [24]. Dicho proceso puede presentar diversos esquemas dependiendo del número de secuencias a emitir simultáneamente.

Teniendo en cuenta las diversas consideraciones descritas anteriormente, la Figura 4 describe el diagrama de bloques correspondiente a la determinación de TDVs en un transductor

ultrasonico. Dicho transductor forma parte de un vector sensor, en el cual las emisiones de ambos se realizan simultaneamente.

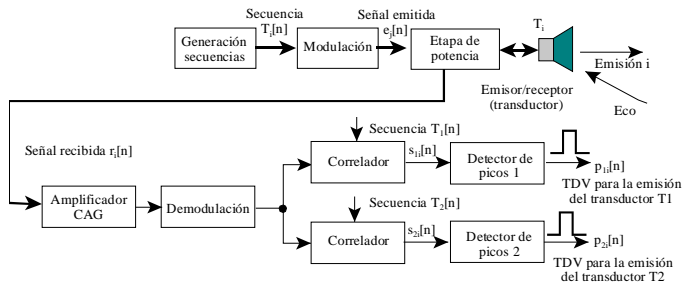


Figura 4. Diagrama de bloques del procesamiento de bajo nivel de un transductor ultrasonico en un vector sensor de dos transductores (T1 y T2).

Se puede observar que existen dos procesos de correlación en la señal recibida y sendos detectores de máximos locales que determinan el instante de llegada de los ecos [25]. El último módulo lleva a cabo la medida de los TDVs.

III. PLATAFORMA DE COMPUTACIÓN DESARROLLADA

A la hora de elegir un sistema de computación, debe prestarse especial atención a las prestaciones que más tarde serán requeridas del mismo. En este caso, el desarrollo está enfocado al tratamiento en tiempo real del procesamiento de bajo nivel de dos transductores de ultrasonidos. Los algoritmos empleados en este nivel, ya descritos cualitativamente en el apartado anterior, han sido analizados minuciosamente en [26]. De aquí se extrae la conclusión de que no es adecuado implementar este tipo de algoritmos en sistemas programables, basados en procesadores o DSP de propósito general. Resulta en cambio mucho más idóneo el empleo de sistemas configurables, basados en dispositivos lógicos FPGA [27].

El dispositivo FPGA XC2S50/3000E es el elemento central de proceso y control de todo el sistema [28]. Aparte del mismo, existe una etapa de emisión, un bloque de recepción, un banco de memoria auxiliar, y diversos puertos de comunicación destinados al enlace del sistema con otros módulos de procesamiento. En la Figura 5 se puede observar el diagrama de bloques general del sistema desarrollado.

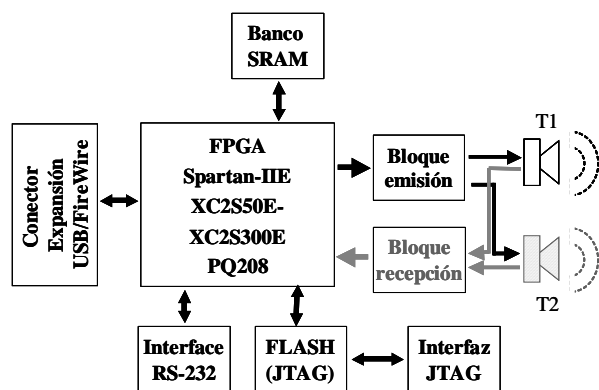


Figura 5. Diagrama de bloques general de la plataforma de computación desarrollada.

El módulo de emisión consta de dos elementos principales: conversor digital-analógicos DAC AD5332 [29], y un

amplificador (véase la Figura 6). El primero se encarga de convertir la señal digital generada por la FPGA para cada transductor. Los amplificadores se encargan del acondicionamiento de la señal para una correcta excitación de los transductores. Estos elementos se encuentran duplicados para realizar emisiones independientes y simultáneas en ambos transductores.

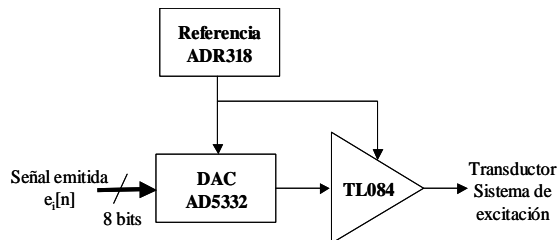


Figura 6. Módulo de emisión para un transductor.

La etapa de recepción consta de un primer bloque de pre-amplificación para a continuación pasar a un amplificador con control automático de ganancia (AD600) [30]. Este elemento permite compensar las pérdidas y atenuaciones sufridas por la onda ultrasonica a medida que se propaga por el aire. Por último, la señal es digitalizada por medio del ADC AD7825 con frecuencias de muestreo de hasta 2MHz [31]. En la Figura 7 se muestra la estructura de la etapa de recepción para un único transductor (téngase en cuenta que existe otra exactamente igual para el otro transductor del vector).

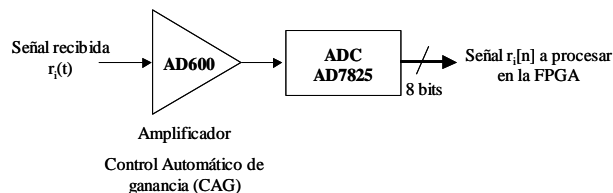


Figura 7. Etapa de recepción.

El banco de memoria está basado en un dispositivo SRAM IDT71V124 con una capacidad de 128kx8 [32]. Este banco se encuentra conectado a la FPGA, dentro de la cual se implementa la interfaz de acceso y control. Se emplea para el almacenamiento temporal de los datos intermedios resultantes de los diferentes procesos de modulación y correlación. Existe igualmente una memoria de configuración Flash XCF01S, compatible con el bus JTAG, e insertada en la cadena de programación del mismo, al igual que la FPGA [33].

Finalmente, el sistema dispone de dos posibles buses de comunicación para el enlace de la plataforma a otros sistemas de comunicación, ya sean de la misma índole, o a nodos centrales y de control. El primero de ellos es un enlace serie RS-232. Además, es posible enlazar el sistema mediante los buses USB o Firewire a través de un conector de expansión con 50 terminales. A partir de los cuales la FPGA es capaz de controlar una tarjeta secundaria conectada al mismo. De esta forma, la plataforma es capaz de engancharse a buses comerciales, permitiendo la transmisión de resultados a otros nodos, o a etapas de procesamiento de más alto nivel, confiriéndole así una mayor versatilidad.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una plataforma de computación para el tratamiento de bajo nivel de la señal ultrasónica. Ésta se encuentra especialmente diseñada para su empleo en un vector sensor ultrasónico formado por dos transductores. El sistema es capaz de acometer la excitación de ambos transductores, así como acondicionar la recepción permitiendo emisiones y recepciones simultáneas. Los recursos computacionales aportados por la FPGA permiten la implementación de técnicas de modulación y correlación para la codificación de la emisión ultrasónica. Finalmente, el sistema dispone de diversos buses de comunicación que le dotan de la flexibilidad necesaria para adaptarlo a distintas distribuciones sensoriales y robots móviles.

REFERENCES

- [1] J. Borenstein, Y. Koren. "Obstacle avoidance with ultrasonics sensors". *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 4, no. 2, pp. 213-218.
- [2] K. Audenaert, H. Peremans, Y. Kawahara, and J. Van Campenhout. "Accurate ranging of multiple objects using ultrasonic sensor". *Proc. 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Nice, 1992, pp. 1733-1738.
- [3] H. R. Everett. "Sensors for mobile robot". Ed. A K Peters, Ltd., 1995.
- [4] L. Kleeman, R. Kuc. "Mobile robot sonar for target localization and classification". *The International Journal of Robotics Research*, vol. 14, no. 4, pp. 295-318, 1995.
- [5] J. Borenstein, Y. Koren. "Error Eliminating Rapid Ultrasonic Firing for Mobile Robots Obstacle Avoidance", in *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 11(1), pp. 132-138, Feb. 1995.
- [6] H. Hamadene, H. Colle. "Optimal estimation of the range for mobile robots using ultrasonic sensors". *Proc. 3rd IFAC Symposium on Intelligent Components and Instrument for Control Applications (SICICA'97)*, Annecy (France), 1997, pp. 141-146.
- [7] H. Peremans, A. Koenraad, J. Van Compenhout. "A High-Resolution Sensor Based on Tri-aural Perception". *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 1, pp. 36-48. Feb. 1993.
- [8] J. Ureña, M. Mazo, J. J. García, A. Hernández, E. Bueno. "Classification of reflectors with an ultrasonic sensor for mobile robot applications". *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 29, pp. 229-279, 1999.
- [9] A. Elfes. "Sonar based real-world mapping and navigation". *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-3, no. 3, pp. 249-264, June 1987.
- [10] J. Borenstein, Y. Koren. "Histogramic in-motion mapping for mobile robot obstacle avoidance". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 4, pp. 535-539, August 1991.
- [11] K. T. Song, C. C. Chen. "Application of heuristic asymmetric mapping for mobile robot navigation using ultrasonic sensors". *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 17, pp. 243-264, 1996.
- [12] B. Barshan, B. Ayulu. "A comparison of four methods for accurate ultrasonic range estimation". *Proc. of 1st IEEE Balkan Conference on Signal Processing, Communications, Circuits and Systems*, (en CD-ROM), Istanbul (Turkey), June 2000.
- [13] Polaroid Corporation. Ultrasonic ranging systems. 1991.
- [14] S. A. Hovanesian. "Radar system design and analysis". Artech house, Inc. Norwood, 1984.
- [15] N. A. Oufroukh, C. Barat, E. Colle. "Distinction between objects with ultrasonic biaural system and only amplitude". *Proc. IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pp. 757-760, 2001.
- [16] C. Barat, N. A. Oufroukh. "Classification of indoor environment using only one ultrasonic sensor", *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 1750-1755, Budapest (Hungary), Mayo 2001.
- [17] A. M. Sabatini. "Active hearing for external imaging based on an ultrasonic transducer array". *Proc. of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'92)*, pp. 829-836, Raleigh (USA), July 1992.
- [18] C. Marziani, J. Ureña, M. Mazo, A. Hernández, J. M. Villadangos. "Sistema de localización en redes de sensores acústicos inteligentes utilizando secuencias Golay". *Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI'04)*, Toulouse (France), 2004.
- [19] J. J. García, J. Ureña, A. Hernández, M. Mazo, J. C. García, F. Álvarez, J. A. Jiménez, P. Donato, M. C. Pérez. "IR sensor array configuration and signal processing for detecting obstacles in railways". *2004 IEEE Sensor Array and Multichannel Signal processing Workshop Proceedings (SAM'04)*, Sitges (Spain), 2004.
- [20] J. Ureña, M. Mazo, J. J. García, A. Hernández, E. Bueno. "Correlation detector based on a FPGA for ultrasonic sensors". *Microprocessors and Microsystems*, no. 23, pp. 25-33, 1999.
- [21] K. Jörg, M. Berg. "Mobile robot sonar sensing with pseudo-random codes". *Proc. of 1998 IEEE Conference on Robotics and Automation (ICRA'98)*, pp. 2807-2812, Leuven (Belgium), May 1998.
- [22] S. Shoval, J. Borenstein. "Using coded signals to benefit from ultrasonic sensor crosstalk in mobile robots obstacle avoidance". *Proc. of 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'01)*, pp. 2879-2884, Seoul (Korea), May 2001.
- [23] A. Hernández, J. Ureña, J. J. García, M. Mazo, D. Herranz, J. P. Dérutin, J. Sérot. "Ultrasonic ranging sensor using simultaneous emissions from different transducers". *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 51, no. 12, pp. 1660-1670, 2004.
- [24] F. J. Álvarez, J. Ureña, J. J. García, Manuel Mazo, C. de Marziani, A. Hernández, J. M. Villadangos. "A comparative analysis of two modulation schemes for the efficient transmission of complementary sequences in a pulse compression ultrasonic system". *IADAT-tcn2004 International Conference on Telecommunications and Computer Networks*, San Sebastián (Spain), 2004.
- [25] A. Hernández, J. Ureña, M. Mazo, J. J. García, J.-P. Dérutin, J. Sérot. "Implementación de un algoritmo de máximos locales procedentes de ecos ultrasónicos". *Actas del Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación*, Vigo (Spain), September 2003.
- [26] A. Hernández, J. Ureña, J. J. García, M. Mazo, J. P. Dérutin, J. Serot. "Estudio comparativo de arquitecturas para el tratamiento en tiempo real de la información procedente de transductores ultrasónicos con funcionamiento multi-modo". *Actas del Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI'02)*, vol. 2, pp. 201-204, Alcalá de Henares (Spain), September 2002.
- [27] A. DeHon. "The density advantage of configurable computing". *IEEE Computer*, vol. 33, no. 4, pp. 41-49, April 2000.
- [28] Xilinx, Inc. "Spartan-II 1.8V FPGA family: complete data sheet". Product Specification, 2004.
- [29] Analog Devices. "2.5V to 5.5V, 230µA, parallel interface dual voltage-output 8/10/12-bit DACs". Product Specification, rev. 0, 2000.
- [30] Analog Devices. "Dual, low noise, wideband, variable gain amplifiers". Product Specification, rev. A, 2005.
- [31] Analog Devices. "3V/5V, 2MSPS, 8-bit, 1/4/8 channels sampling ADCs". Product Specification, rev. B, 2001.
- [32] Integrated Device Technology, Inc. "IDT71V124SA, 3.3V CMOS static RAM". Datasheet Document, 2000.
- [33] Xilinx, Inc. "Platform Flash In-System Programmable Configuration PROMS". Product Specification, v2.5, 2004.