

SENSORES DE ULTRASONIDO USADOS EN ROBÓTICA MÓVIL PARA LA MEDICIÓN DE DISTANCIAS

RESUMEN

El presente trabajo describe la técnica de medición de distancias con sensores de ultrasonido utilizando la técnica de Tiempo de Vuelo (T of F); Presenta los resultados obtenidos por el módulo sensor de ultrasonido construido.

PALABRAS CLAVES: Tiempo de Vuelo, (T of F), Sensor de Ultrasonido.

ABSTRACT

The present work describes the use of ultrasonic sensors for distance Measuring by robots and the construction of environmental maps; show Results obtained for the rotating sonar module designed.

KEYWORDS: Time of Flight, mobile platform, rotating sonar module.

DANILO NAVARRO

Ingeniero Electricista
Universidad de Mérida
Mérida Venezuela
Dnavarro@hotmail.com

LUIS HERNANDO RÍOS

Ingeniero Electrónico, MsC
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
lhgonza@utp.edu.co

HERNANDO PARRA

Ingeniero Mecánico, Especialista
Profesor Transitorio
Universidad Tecnológica de Pereira
heparra@utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Esencialmente existen dos sistemas activos para la medición de proximidad o de distancias sin necesidad de contacto físico: los ópticos y los ultrasónicos. Los sistemas ópticos ofrecen mejor precisión debido a que la longitud de onda involucrada es más corta y debido a que presentan menor sensibilidad a condiciones ambientales como por ejemplo la presión y la temperatura. Por otra parte, las aplicaciones ultrasónicas basadas en la medición del tiempo de vuelo, son más simples y en consecuencia son menos costosas. Sin embargo, en estas últimas, existen una serie de problemas potenciales que requieren atención^[Shirley89]: la absorción o atenuación en el medio, el ancho del haz ultrasónico, la presencia de ruido e interferencia, la alta sensibilidad a la temperatura^[Caicedo94] y a la humedad, y la pobre resolución.

La sensorización mediante ultrasonidos se ve afectada por factores medioambientales y por factores relacionados con el objeto reflector. En el caso de aplicaciones de medición de distancias mediante la técnica del pulso-eco, el factor más importante que afecta la exactitud del sistema está relacionado con la variación de la velocidad de la onda ultrasónica debido a la temperatura y a la composición del medio de transmisión. En efecto, la velocidad del sonido en el medio V_s , varía como una función de la temperatura según la función,

$$V_s = V_0 \sqrt{1 + \frac{T}{273}} \quad (1)$$

donde V_0 es la velocidad absoluta en el medio a 0° centígrados, y T es la temperatura del medio en grados centígrados. Por ejemplo, como la velocidad del sonido en el aire a 0° centígrados es 331 m/seg, entonces en un ambiente con temperatura promedio de 20° centígrados, la velocidad promedio es de 343 m/seg a la presión de una atmósfera.

En la mayoría de los sistemas de medición de distancias, el efecto de la temperatura no es de gran consideración debido a que el error relativo es sólo del 0.18 % por cada °C, además de que siempre existe la posibilidad de utilizar un sistema de compensación del efecto de la temperatura como por ejemplo la medición de la temperatura ambiente o la utilización de un objeto de referencia. Sin embargo en los sistemas de alta precisión, no solo hay que compensar los efectos de la temperatura, sino que hay que considerar el efecto adicional de la turbulencia en el medio y de las corrientes de convección. Un problema particular es el que ocasionan las corrientes de convección al producir diferentes bandas de temperatura donde la velocidad de la onda de ultrasonido puede variar abruptamente. Este tipo de problemas no puede ser corregido mediante las técnicas convencionales de compensación de temperatura, pero puede ser mejorado mediante el promedio estadístico simple o mediante técnicas de procesamiento más avanzadas, como la estimación lineal basada en mínimos cuadrados descrita por *Angelo Sabatini*^[Sabatini95].

Otro de los problemas que afecta la sensorización por ultrasonidos es el ancho de haz y los lóbulos laterales que aparecen en el patrón de sensibilidad del transductor. La presencia de los lóbulos laterales llevan a los extremos de

un problema: la subestimación y la sobreestimación de la distancia. La presencia de picos de sensibilidad fuera del lóbulo principal favorece la temprana detección de obstáculos indeseados, dando origen a distancias erróneas que en general son mas cortas que la distancia real a la cual está el objeto que se desea detectar. Por otro lado, debido a que los sistemas pulso-eco generalmente usan la propia señal del eco con el fin de manejar los circuitos de temporización, entonces la presencia de valles de sensibilidad que reducen la intensidad del eco, son la causa de la sobreestimación del tiempo de vuelo y conllevan a una sobreestimación de la distancia. La solución de esta problemática ha quedado en manos de los fabricantes quienes han orientados sus esfuerzos hacia el diseño de transductores de haz angosto con minimización de lóbulos laterales.

Otros efectos no menos importantes son los considerados por Donald P. Massa quien presenta un excelente análisis del efecto de todos los factores que afectan la sensorización ultrasónica. Massa cuantifica estos efectos a fin de puntualizar sobre la óptima escogencia de un sensor de ultrasonidos de acuerdo a la aplicación que se requiera manejar^{[Massa99a][Massa99b]}.

2. TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE DISTANCIAS MEDIANTE ULTRASONIDOS

Hay diferentes modos de generar y recibir ondas ultrasónicas para aplicaciones de medición de distancias. Comúnmente se pueden emplear ondas continuas o también ondas en forma de pulso. Los métodos de onda continua esencialmente son dos: los basados en la medición de la diferencia de fase entre la señal transmitida y la señal recibida de una onda modulada en amplitud^{[Hua02][Yang94]}, y los basados en la medición de la diferencia de frecuencia entre la señal transmitida y la señal recibida de una onda modulada en frecuencia^{[Kao00][Politis98]}. Sin embargo, la gran mayoría de las aplicaciones de medición de distancia mediante ultrasonidos se basa en la estimación del tiempo que transcurre entre la emisión de un corto tren de pulsos de ondas ultrasónicas, y su recepción después de haber sido reflejado por algún objeto del entorno. Este período de tiempo se conoce comúnmente como tiempo de vuelo o ToF (*Time of Fly*)^{[Marioli92][Parrilla91]}.

2.1 Sistema basados en el tiempo de vuelo

En este tipo de sistemas el sensor genera un pulso ultrasónico el cual se transmite a través del medio (típicamente aire) hasta que es reflejado por alguna superficie reflectora. Midiendo el tiempo entre la transmisión y la recepción del eco, la distancia al reflector puede ser estimada indirectamente mediante la formula $d = \frac{1}{2}v.t_f$, donde v representa la velocidad del sonido en el medio de transmisión y t_f el tiempo de vuelo. La exactitud en la medición de distancias mediante esta técnica depende del conocimiento de v y de la correcta

estimación de t_f . La velocidad del sonido en el aire muestra una dependencia casi lineal con la temperatura, por lo cual puede ser fácilmente determinada, y si es necesario compensada^[Sabatini95], entonces el punto critico en la medición de distancias mediante esta técnica es la determinación del tiempo de vuelo.

La forma mas común de determinar el tiempo de vuelo es mediante el método del umbral, en el cual el tiempo de llegada es calculado cuando el eco recibido traspasa por primera vez un cierto nivel de amplitud dado. Aunque este método ha probado ser simple y de bajo costo, la técnica presenta baja resolución, particularmente cuando el eco ha sido considerablemente atenuado. Una solución a este problema es la adopción de un umbral de amplitud ajustable en el tiempo. En este caso el umbral de amplitud va decreciendo a medida que el tiempo de vuelo es mayor, lo que esta directamente relacionado con la distancia que viaja la señal y en consecuencia con la atenuación de la misma^[Polaroid99c]. Sin embargo, existen otras causas de variación de la amplitud de la señal, como por ejemplo el tamaño y la orientación del reflector, que no pueden ser fácilmente modeladas y que hacen que el método no sea fiable.

Otra causa de error presente en el método del umbral proviene del tiempo de crecimiento del eco ultrasónico el cual es relativamente largo. Este tiempo de crecimiento que es consecuencia del bajo ancho de banda del transductor ultrasónico para operación en el aire, causa que los ecos recibidos alcancen el umbral de disparo algún tiempo después del comienzo real de los mismos, por lo que el reflector aparece un poco más lejano de lo que realmente está. Aunque este error puede ser evitado considerando un retraso constante en el computo del tiempo de vuelo, nuevamente las variaciones de amplitud en la señal producen desviaciones importantes al aplicar esta técnica.

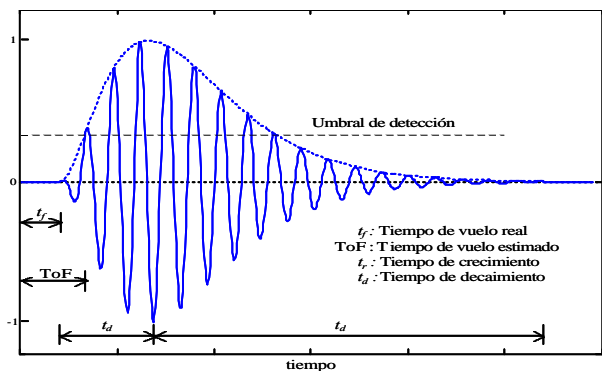


Figura 1. Eco ultrasónico típico.

Para tratar con los errores anteriores y así mejorar la estimación del tiempo de vuelo se han propuestos varias técnicas como por ejemplo la generación de señales de fácil identificación en el tiempo, el análisis detallado de la envolvente del eco^[Martin92], o el uso de técnicas digitales^[Parrilla91].

C. Cai y P. Regtien presentan un método de medición del tiempo de vuelo basado en la detección de la amplitud nula de la envolvente. El proceso consiste en generar una forma de onda particular formada por dos trenes de pulso consecutivos de una onda cuadrada de cuatro periodos. Debido a la interferencia entre las ondas, la envolvente de la señal se hace cero en cierto instante de tiempo, produciéndose una inversión de fase que puede ser detectada de manera sencilla. La información del tiempo de vuelo es extraída de la relación temporal de las ondas al momento de amplitud cero, por lo que con este método se reduce el tiempo de procesamiento y además se mejora la exactitud en la medición de distancias^[Cai93].

I. Stott et al mejoran el método de detección de umbral al considerar el análisis de la forma de onda de la señal ultrasónica recibida. Mediante la inspección de la envolvente del eco se puede verificar que la misma posee una gran pendiente de crecimiento frente a una pendiente de decrecimiento bastante suave. Por su parte, el ruido tiende a tener pendientes de crecimiento y decrecimiento suave en ambos casos. Obviamente al poder diferenciar mediante este atributo la señal del ruido, el voltaje de referencia utilizado como umbral deja de ser crítico, relajando las exigencias de los circuitos de detección^[Stott00].

M. Parrilla et al cuantificaron el error típico que se puede cometer mediante el método del umbral, y propusieron el uso de técnicas de procesamiento digital a fin de mejorar la estimación del tiempo de vuelo. Los investigadores concluyeron que la correlación es el método que ofrece los mejores resultados en un amplio rango de las variables contempladas, incluso con baja relación señal a ruido que es el caso típico en aplicaciones de ultrasonido^[Parrilla91].

D. Marioli et al presentan un algoritmo de procesamiento digital que correlaciona el pulso ultrasónico transmitido con el eco recibido, mejorando mediante este algoritmo la exactitud en la estimación del tiempo de vuelo. El punto máximo de la señal resultante de la correlación entre las señales ya antes mencionadas, corresponde al momento cuando la señal ruidosa recibida tiene el mayor parecido a la señal transmitida. El tiempo transcurrido entre la emisión de la señal y este punto máximo, representa el tiempo de vuelo del eco ultrasónico. Con este algoritmo los investigadores obtuvieron valores más exactos en la medición de distancia mediante ultrasonidos^[Marioli92].

3. EL SENSOR ULTRASÓNICO DISEÑADO

El sensor ultrasónico diseñado es un dispositivo rotativo que consta de dos transductores piezo-cerámicos resonantes a 40 kHz: uno que actúa como trasmisor y el otro como receptor. El sensor ha sido diseñado para realizar mediciones de distancias entre 20 y 440 cm alrededor del robot, mediante la orientación azimutal del

cabezal a pasos discretos de 1.8 grados. Fundamentalmente el sensor puede ser clasificado dentro de los que usan la técnica pulso - eco, ya que el mismo emite un corto tren de pulsos ultrasónicos en una orientación dada, y luego espera por la recepción del eco el cual es digitalizado y procesado para obtener el estimado del entorno del robot. El diseño y desarrollo de este sensor se encuentra ampliamente detallado en el trabajo de Pascual Perez^[Perez98].

Como medidor de distancias, el funcionamiento básico del sensor comienza por aplicar al transductor de emisión un tren de 16 pulsos de onda cuadrada @ 40 KHz. Debido a la dinámica electro-mecánica del transductor, éste se comporta como un circuito resonante amortiguado. Esto se traduce en que la vibración acústica emitida sigue una curva de crecimiento durante la excitación con los pulsos de onda cuadrada, para después amortiguarse monotonamente a partir del cese de la excitación.

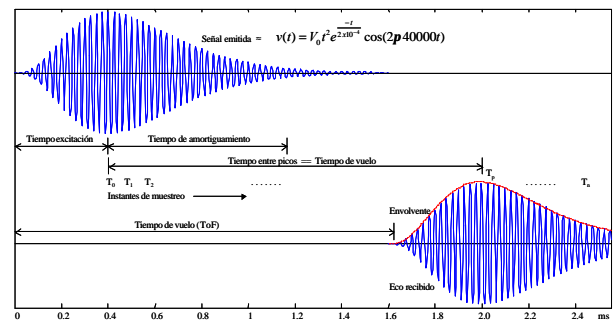


Figura. 2. Diagrama de tiempos típico de la medición de distancias por ultrasonidos.

A pesar de la desventaja medida en términos de la resolución de rango que se le atribuye a este tipo de señal, la misma presenta la ventaja oportuna de ser excelente para la determinación simple del tiempo de vuelo o ToF mediante algoritmos de diferenciación o de comparación de umbrales de referencia.

En efecto, una manera simple de determinar el tiempo de vuelo asumiendo que el sistema acústico es lineal, consiste en medir el tiempo entre el pico máximo de la señal emitida y el pico máximo del eco recibido. En este sentido el hardware de recepción del sensor es muy adecuado ya que el mismo se basa en un demodulador coherente que extrae la envolvente del eco recibido, muestreándola a partir del mismo instante T_0 en que cesa la excitación. De esta manera basta con determinar el instante de muestreo p para el pico máximo de la envolvente del eco recibido para obtener así el tiempo de vuelo T_p . Ya que $T_p = T_s \cdot p$, con T_s igual al periodo de muestreo y p igual al índice de la muestra, entonces la distancia d al reflector se obtiene mediante la ecuación,

$$d = \frac{1}{2} v_s T_p \tag{2}$$

donde v_s es la velocidad del sonido.

Dado que la resolución del tiempo de vuelo T_p se ve limitada por el período de muestreo T_s , se requiere de una mejora para poder obtener una exactitud mejor que la mitad de este período. Esto se requiere ya que la envolvente del eco se muestra a 10 KHz y por lo tanto la imprecisión es de $\pm 50 \mu\text{seg}$; lo que arrojaría a su vez una imprecisión de $\pm 0.85 \text{ cm}$ a la velocidad típica del sonido de 343 m/seg. Esta mejora puede ser obtenida mediante una interpolación parabólica sobre tres puntos: el punto de máxima amplitud estimado inicialmente y los dos puntos que lo rodean.

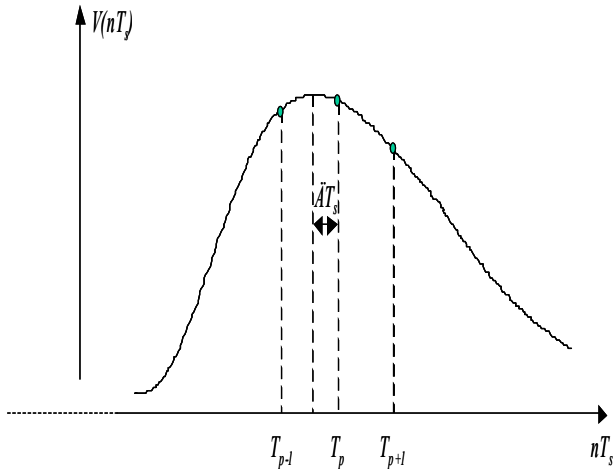


Figura 3. Mejora en la estimación del ToF mediante interpolación parabólica.

El diferencial de tiempo ΔT_s entre el máximo de la parábola y el máximo estimado en el muestreo se puede calcular mediante la ecuación,

$$\Delta T_s = \frac{V(T_{p-1}) - V(T_{p+1})}{2 \cdot [V(T_{p-1}) - 2 \cdot V(T_p) + V(T_{p+1})]} \quad (3)$$

donde $V(T_p)$ es el valor de amplitud medido en el instante p , el cual representa la máxima amplitud determinada en el proceso de muestreo.

Con el objeto de validar el método propuesto y a la vez calibrar la función de medición de distancias en términos del instante de muestreo, se realizaron una serie de pruebas con los obstáculos y distancias típicas del entorno real del robot. Como resultado se obtuvo la función de medición de distancias

$$d = 1.65p + 0.47 \text{ cm}$$

donde p representa el instante de muestreo. También, la desviación estándar de los errores de medición en relación a la función calculada corresponde a la desviación típica $\sigma = 0.40 \text{ cm}$.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos se desarrollaron a partir de la creación de un escenario, con las siguientes características: Eje X, largo: 210cm; Eje Y ancho: 120cm. El escenario se encuentra rodeado de paredes en diferentes materiales: Una en concreto, dos de madera y una en madera e icopor, material que compone una pequeña parte de esta pared.

El escenario se divide en rejillas de 10 x 10cm. la siguiente figura mostrara el escenario descrito.

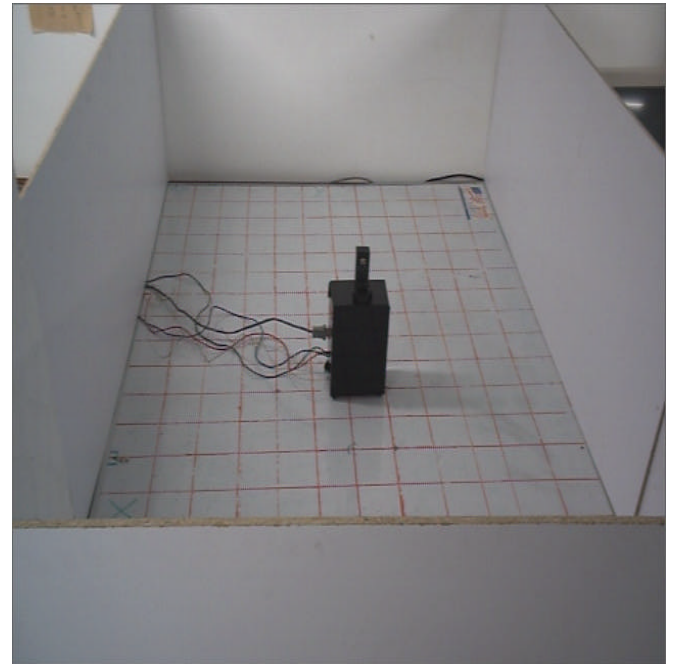


Figura 4 - Escenario de Pruebas

Las medidas de este escenario son tomadas con metro y verificadas en los mapas obtenidos

Las pruebas se realizan en cinco diferentes posiciones, con el fin de corroborar las medidas tomadas en cada posición, y de comparar el mapa de entorno con la siguiente figura, la cual muestra el comportamiento típico de un mapa de entorno para un escenario rectangular como el diseñado.

La figura 5 presenta dos esquemas el primero en un mapa cartesiano como el utilizado para estas pruebas y el segundo en un mapa polar.

Los resultados se muestran de dos formas: Un mapa obtenido en LabView y una matriz de datos obtenida antes y después de aplicar un filtro FIR de 12 etapas y un algoritmo de promedio, que determina la posición del primer máximo; adicionalmente los datos obtenidos se procesan en Matlab.

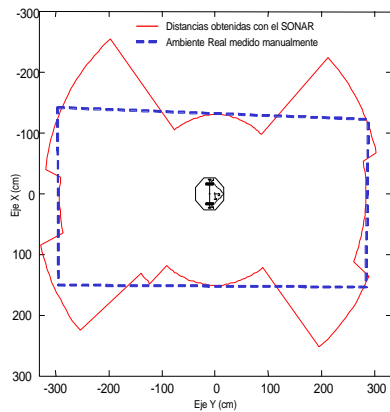


Figura 5. Comportamiento típico de un escenario rectangular.

Posición 1. Resultados obtenidos para un entorno de 210x120cm, con la cabeza sensora en la posición 100cms en X y 70cms en Y,

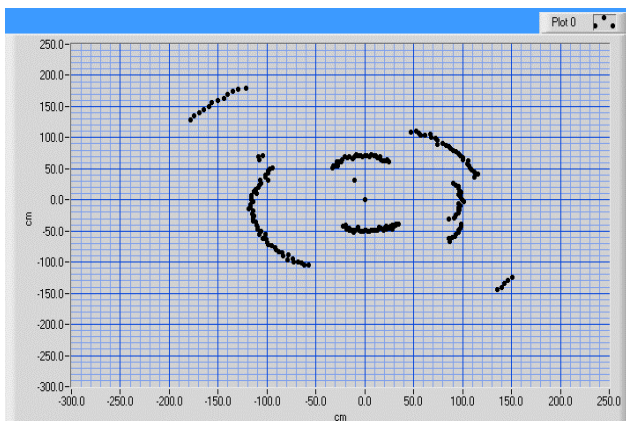


Figura 6. Mapa de entorno con el sensor en la posición 100cm. X y 70cm. Y.

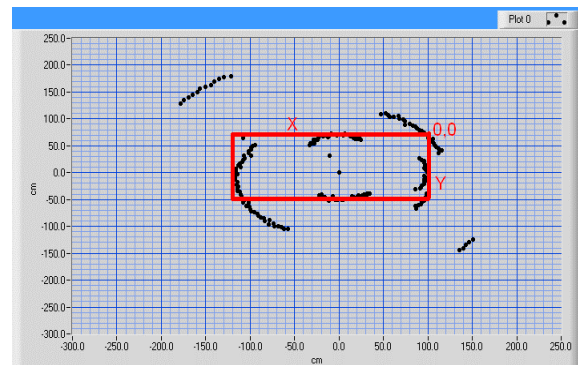


Figura 7. Representación de las paredes y los ejes X y Y en el mapa de entorno con el sensor en la posición 100cm en X y 70cm en Y.

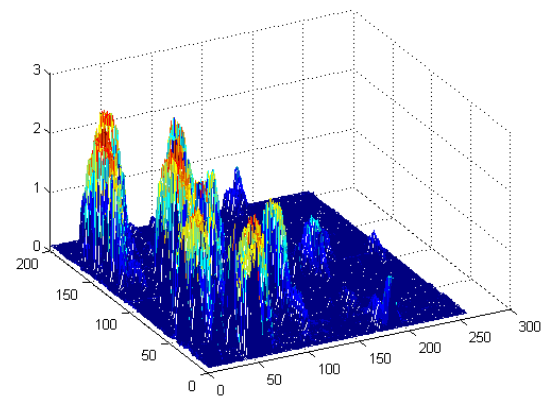
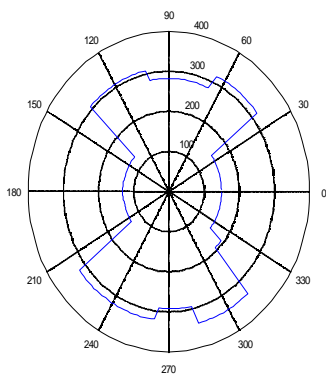


Figura 8. Resultados procesados en Matlab para un entorno de 210x120cm, con el sensor en la posición 100cms en X y 70cms en Y, antes de aplicar el filtro FIR de 12 etapas y el algoritmo de promedio.

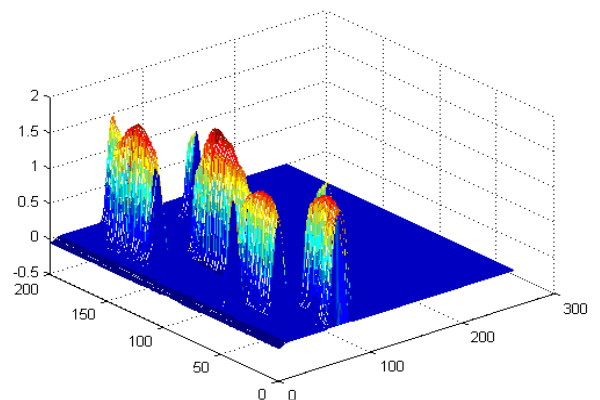


Figura 9. Resultados procesados en Matlab para un entorno de 210x120cm, con el sensor en la posición 100cms en X y 70cms en Y, despues de aplicar el filtro FIR de 12 etapas y el algoritmo de promedio.

Los resultados anteriores son razonablemente buenos para las aplicaciones de construcción de mapas en

robótica móvil. No obstante, cabe destacar que las señales que se pueden extraer del hardware de recepción diseñado pueden dar lugar a la aplicación de otras técnicas de procesamiento más elaboradas.

6. CONCLUSIONES

Se estudiaron las diferentes técnicas de medición de distancia con sensores de ultrasonido, haciendo énfasis en la técnica de Tiempo de Vuelo, calculando la distancia, por extracción de la máxima amplitud del eco, con lo cual se obtuvieron buenos resultados.

Se utilizó la técnica tiempo de vuelo (T of F) y se aplicó un algoritmo de promedio para medición de distancias con sensores de ultrasonido, obteniéndose muy buenos resultados, lo cual va a permitir el procesamiento en tiempo real de la señal obtenida del entorno.

Se obtuvo la información necesaria del entorno a través de una matriz de datos de 200x256, la cual se utilizará en procesos posteriores, para el levantamiento de mapas del entorno explorado utilizando herramientas de Software como Matlab.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1]F. Blanes : *Percepción y Representación del Entorno en Robótica Móvil*. PhD. Tesis. Departamento de Informática de Sistemas y Computadores. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. Septiembre de 2000.

[2]C. Cai, P. Regtien : *Accurate Digital Time-of-flight Measurement Using Self-Interference*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 42, Nº 6, December 1993, pp. 990 - 994.

[3] H. Hua, Y. Wang, D. Yan : *A low-cost dynamic range-finding device based on amplitude-modulated continuous ultrasonic wave*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 51, Nº 2, April 2002, pp. 362 - 367.

[4] G. Kao, P. Probert : *Feature Extraction from a Broadband Sonar sensor for Mapping structured Environments Efficiently*. The International Journal of Robotic Research. Vol. ??, Nº ?, MES 2000.

[5] D. Marioli, C. Narduzzi, C. Offelli, D. Petri, E. Sardini, A. Taroni : *Digital Time-of-flight Measurement for ultrasonics sensors*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 41, Nº 1, February 1992, pp. 93 - 97.

[6] J. Martin, R. Ceres, T. Freire : *Ultrasonic ranging: Envelope analysis gives improved accuracy*.

MCB University Press, Sensor Review. Vol. 12, Nº ?, 1992, pp. 17 - 21.

[7] D. Massa. *Choosing an Ultrasonic Sensor for Proximity or Distance Measurement. Parte1: Acoustic considerations*. Sensors. Vol. 16, Nº 2. February 1999.

[8] M. Parrilla, J. Anaya, C. Fritsch : *Digital Signal Processing Techniques for High Accuracy Ultrasonic Range Measurement*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 40, Nº 4, August 1991, pp. 759 - 763.

[9] P. Perez : *Modulo Inteligente para la Captura del Entorno Mediante Ultrasonidos en Robots Autónomos*. Proyecto fin de carrera, Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Valencia, España. 1998.

[10] Polaroid Corporation, Polaroid OEM Components Group: *Technical Specifications for 6500 Series Sonar Ranging Module*. <http://www.polaroid-oem.com/products/ultrasonic.htm>.

[11] Z. Politis, P. Probert : *Perception of an indoor robot workspace by using CTFM sonar imaging*. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2801 - 2806. Leuven, Belgium. May 1998.

[12] A. Sabatini : *A Digital signal-processing technique for compensating ultrasonic sensors*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 44, Nº 4, August 1995, pp. 869 - 874.

[13] P. Shirley : *An introduction to ultrasonic sensing*. Sensors, Vol. 6, Nº 11, November 1989.

[14] I. Stott, D. Sanders, G. Tewkesbury : *Low cost ultrasonic sensors for tele-operated vehicles*. MCB University Press, Sensor Review. Vol. 20, Nº 3, 2000, pp. 227 - 234.

[15] M. Yang, S. Hill, B. Bury, J. Gray : *A Multifrequency AM-Based Ultrasonic System for Accuracy Distance Measurement*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 43, Nº 6, December 1994, pp. 861 - 866.

[16] E. Caicedo, T. Freire, J. Martín, L. Calderón, R. Ceres : *Ultrasonics - Temperature shapes the envelope*. MCB University Press, Sensor Review. Vol. 14, Nº 4, 1994, pp. 19 - 23.