

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ANILLO DE SENSORES ULTRASÓNICOS PARA EL LEVANTAMIENTO DE MAPAS DE ENTORNO Y GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS

### RESUMEN

Se describe el diseño y la construcción de un anillo de sensores ultrasónicos, el cual se utilizará en una plataforma móvil para obtener la lectura de las distancias del escenario que circunda a la plataforma mientras ésta se desplaza. Se describe también la implementación de algoritmos para corregir los fenómenos de Crosstalk y falsos ecos, obtener medidas de distancia de alta confiabilidad.

**PALABRAS CLAVES :** Sensor Ultrasonico, Plataforma móvil.

### ABSTRACT

*This paper describes the ultrasonic ring sensors design and construction, to be used in a mobile platform to obtain readings about the distances around the circundant environment while the platform is traveling. It describes the algorithm implementation to correct the crosstalk and wrong ecoes phenomena to obtain high reliability distances measures.*

**KEYWORDS:** Ultrasonic sensor, Mobile Platform

**JUAN PABLO CORDOBA L**

Ingenieros Electricista U.T.P

**ALEJANDRO MEJIA J.**

Ingenieros Electricista U.T.P

almeja@andromeda.utp.edu.co

**JAIME ALFONSO CALDAS M.**

Profesores F.I.E U.T.P

jacaldas@andromeda.utp.edu.co

**LUIS HERNANDO RÍOS G.**

Profesores F.I.E U.T.P

lhgonza@andromeda.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 a que presentan menor sensibilidad a condiciones ambientales como por ejemplo la presión y la temperatura[1]. 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: la absorción o atenuación en el medio, el ancho del haz ultrasónico, la presencia de ruido e interferencia, la alta sensibilidad a la temperatura[2] y a la humedad, y la baja 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 esta 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,

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

donde  $V_0$  es la velocidad absoluta en el medio a  $0^\circ\text{C}$  y  $T$  es la temperatura del medio, en grados centígrados.

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. 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*)[3][4][5][6].

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 fórmula  $d = \frac{1}{2} \cdot v \cdot t_f$ , 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  $t_f$ . Ya que la velocidad del sonido en el aire muestra una dependencia casi lineal con la temperatura, por lo que puede ser fácilmente determinada y si es necesario compensada[7], entonces el punto crítico en la medición de distancias mediante esta técnica es la determinación del tiempo de vuelo.

La forma más común de determinar el tiempo de vuelo es mediante el método del umbral, en el cual el tiempo de llegada es computado 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 puede sufrir de 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[8]. 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.

## 2. DESARROLLO DEL PROYECTO

La medición de distancia de éste módulo se hace con base en el tiempo de vuelo de un tren pulsos emitidos por los sensores de ultrasonido que conforman el módulo de sensores diseñado. El procesamiento del cálculo de la distancia está a cargo de un microcontrolador MC68HC908JK3 con una frecuencia de cristal a 10 MHz.

Debido a los errores que se presentan en la medición con ultrasonido (reflexiones especulares, crosstalk y falsos ecos), se toman varias muestras por cada sensor y se promedian con un algoritmo hecho para aumentar la confiabilidad.

Los principales objetivos del módulo ultrasónico diseñado son:

- . Ser el componente básico de percepción sensorial de una plataforma móvil para la navegación en entornos tanto estáticos como dinámicos.
- Entregar medidas de distancia confiables del entorno explorado, por donde navegará dicha plataforma.
- 
- Ofrecer la información de distancia a los objetos que circundan a la plataforma, para que el sistema de control de esta los procese y genere trayectorias óptimas de viaje.

En la figura 1 se observa el anillo ultrasónico diseñado, el cual es un módulo de ocho pares de sensores de

ultrasonido, que con una única señal de encendido ejecuta las siguientes tareas:

- . Medición de la temperatura ambiente.
- . Toma de varias medidas de distancia con cada uno de los ocho pares de sensores.
- . Aplica un algoritmo de selección y promedio en las muestras de cada sensor.
- . Envía los resultados obtenidos usando el protocolo de comunicaciones SPI (Serial Peripheral Interface), a un sistema de nivel superior, para su posterior procesamiento en la generación de trayectorias de viaje.

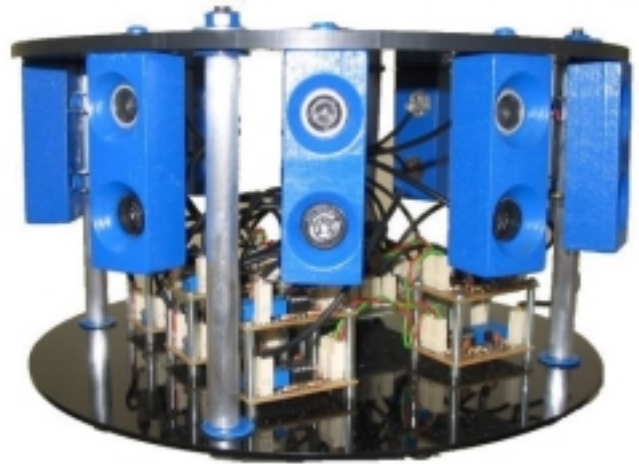


Figura 1. Módulo ultrasónico diseñado.

### 2.1 Hardware del anillo ultrasónico diseñado

Está compuesto de:

- . Ocho parejas (transmisor y receptor) de sensores ultrasónicos.
- . Una tarjeta controladora principal.
- . Ocho tarjetas de acondicionamiento de señal, para los receptores ultrasónicos.

En la figura 2 se muestra el diagrama de bloques del módulo de ultrasonido.

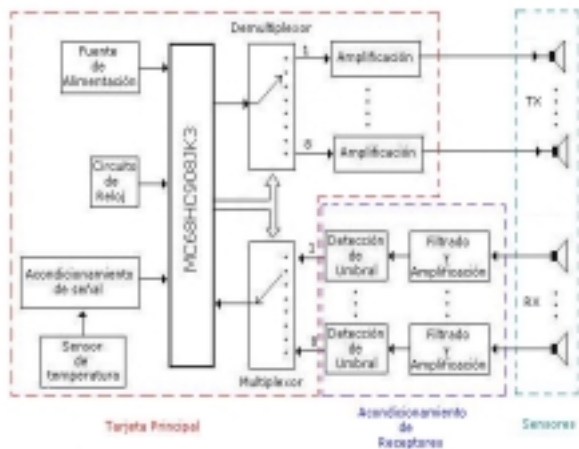


Figura 2. Diagrama de bloques del módulo de ultrasonido.

### 2.1.1 Sensores ultrasónicos

El módulo diseñado es un anillo de sensores, el cual utiliza un total de dieciséis transductores ultrasónicos, ocho transmisores y ocho receptores.

Los sensores son marca MURATA, cuyas características son: 40 khz de frecuencia de trabajo, 115 dB de presión sonora, -64 dB de sensibilidad. La figura 3 muestra la configuración física del sensor.

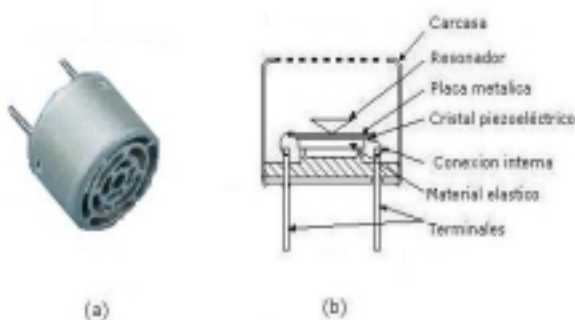


Figura 3. Sensor ultrasónico (a) Configuración física. (b) Estructura interna.

### 2.1.2 Tarjeta principal de control del anillo de sensores ultrasónicos

Posee los circuitos necesarios para medir la temperatura del ambiente, activar de manera secuencial cada una de las 8 parejas de sensores ultrasónicos y calcular el tiempo de vuelo de la onda ultrasónica.

El elemento principal de ésta tarjeta es un microcontrolador MC68HC908JK3, el cual se encarga de controlar los circuitos integrados de la tarjeta, generar las señales de excitación de los sensores y procesar la información de estos.

La tarjeta principal del anillo de sensores ultrasónicos consta de:

- Microcontrolador: MC68HC908JK3
- Multiplexor: 74LS151
- Demultiplexor: 74LS154
- Amplificadores operacionales: LM324

Esta tarjeta cuenta además con una etapa de filtrado que elimina todas las señales con frecuencias superiores a 40 khz, un circuito RC configurado como filtro pasa bajo. La ganancia de la etapa de amplificación es de 1000 (60 dB). En la figura 4 se muestra el diagrama esquemático.

Cuenta además con una etapa de detección la cual está formada por un circuito de comparación, que toma la envolvente de la señal y la compara con un nivel prefijado, cuando éste nivel es superado, indica que el eco reflejado en un obstáculo ha sido capturado; el circuito comparador entrega aproximadamente 12 V (voltaje de saturación); éste voltaje pasa a una etapa de adaptación, conformada por un circuito divisor de tensión que se encarga de reducirlo a un nivel apropiado para el microcontrolador. La figura 5 muestra la forma de onda de la señal de eco amplificada y su modo de comparación.

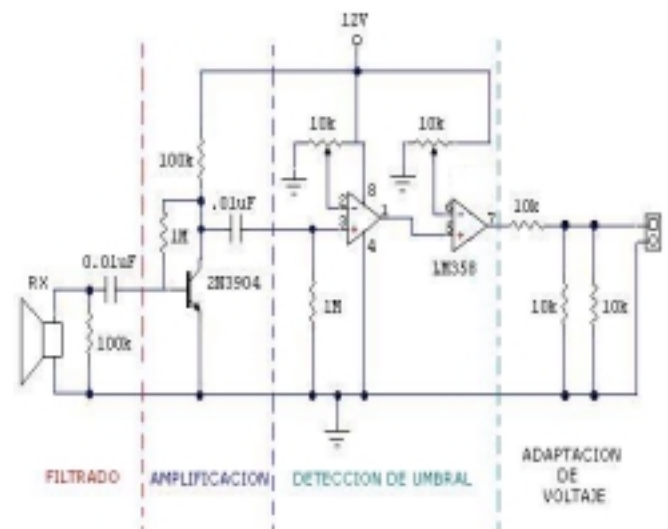


Figura 4. Diagrama esquemático de la tarjeta de acondicionamiento de receptores.

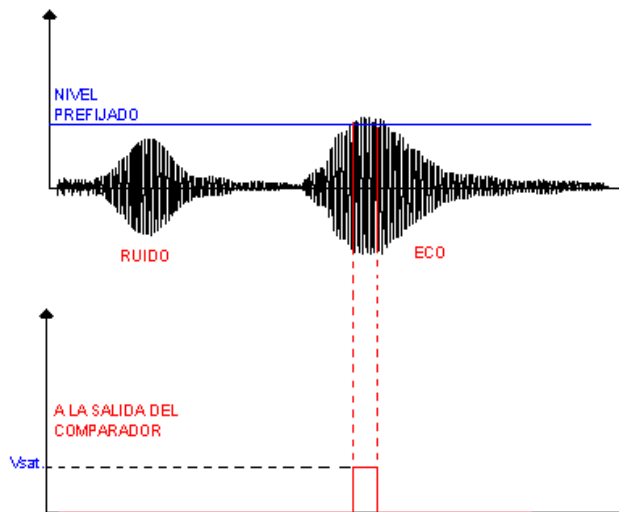


Figura 5. Señal a la entrada y a la salida del circuito comparador

## 2.2 Técnica de medición de distancia empleada en el anillo ultrasónico

**2.2.1 Medición de distancia.** El método usado por el módulo ultrasónico para medir distancias, se basa en la medición del tiempo de vuelo

(T of F) de una onda que regresa al punto de emisión cuando choca contra una superficie reflejante. Para la implementación se utilizó el contador-temporizador del microcontrolador MC68HC908JK3 de Motorola (MR) .

**2.2.2 Medición de temperatura.** La medición de distancia con ultrasonido se ve afectada por la temperatura del aire en que se desplazan las ondas, por esto el módulo diseñado toma una medida de temperatura por cada tren de pulsos activado, para compensar el efecto de la temperatura en el cálculo de la distancia.

La medición de la temperatura se hace a través de un canal del módulo ADC<sup>1</sup> del MC68HC908JK3, cuya resolución es de 8 bits. El resultado de la conversión es tenido en cuenta para el cálculo de la distancia.

Para medir el tiempo de vuelo de la onda ultrasónica, se utiliza el contador de dos bytes (65535 ciclos de máquina) del MC68HC908JK3, lo que da como resultado que después de la medición queden 16 bytes de información de tiempos de vuelo para transmitir al microcontrolador maestro el MC68HC908GP32.

El tiempo de funcionamiento del módulo para cada ciclo de activación del módulo es de 835 ms, durante éste período se ejecutan todos los procesos necesarios para la medición y envío de datos a un microcontrolador maestro

(MC68HC908GP32). Para reducir el tiempo hasta éste valor se controlaron los siguientes aspectos:

- Tiempo de espera entre disparos, para esperar a que la onda en aire se disipe
- Tiempo de espera de eco: el microcontrolador se programó para que espere sólo el tiempo necesario para medir distancias de hasta 150 cm, éste tiempo es 13.61 ms, que en ciclos de máquina equivale a 34048 ciclos de máquina (cristal de 10 MHz).

Si se requiere que el tiempo de ejecución sea menor de 835 ms, el usuario puede desconectar los transductores receptores (Rx) que no necesite; mientras menos sensores estén conectados, menor es el tiempo de ejecución.

Las tareas que ejecuta éste módulo cada vez que se activa, para medir las distancias del entorno utilizando los sensores de ultrasonido se muestra en la figura 6.

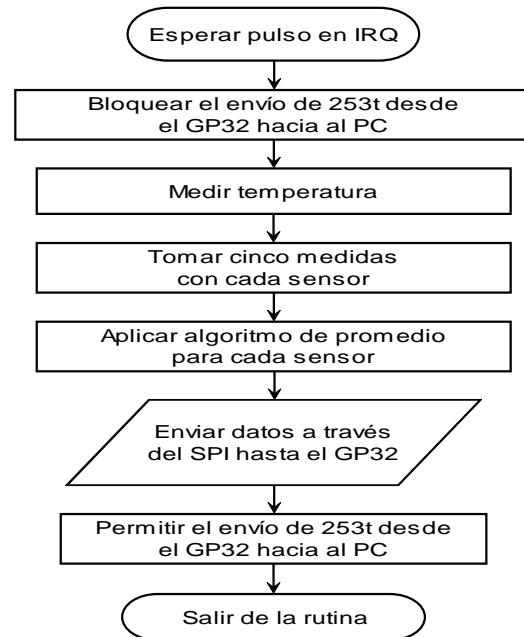


Figura 6. Algoritmo general del módulo de ultrasonido.

## 2.3 Implementación de algoritmos para corregir los fenómenos de Crosstalk y falsos ecos

Después de experimentar con el módulo ultrasónico se observó que los errores más frecuentes son la pérdida del eco, el crosstalk y los falsos ecos. Para la corrección de los errores por falsos ecos y la obtención de medidas de distancia de alta confiabilidad, el módulo aplica un algoritmo de selección y promedio a partir de la toma de varias muestras por cada sensor. Para evitar errores de **crosstalk** durante el proceso de muestreo con el módulo de ultrasonido se tienen en cuenta los siguientes factores:

<sup>1</sup> MC68HC908JL3 Technical data. Rev 1. [www.motorola.com/semiconductors](http://www.motorola.com/semiconductors). 2002.

- Acotar el tiempo de recepción de la señal de eco esperada.
- Habilitar un sensor a la vez (Transmisor-Receptor).

Para seleccionar el transmisor y el receptor apropiados se usa un multiplexor y un demultiplexor cuyas líneas de dirección son controladas por un MC68HC908JK3. El disparo de los ocho sensores transmisores se hace en forma secuencial, iniciando con el número uno y terminando con el número ocho. El proceso del muestreo simplificado se ve en la figura 7:

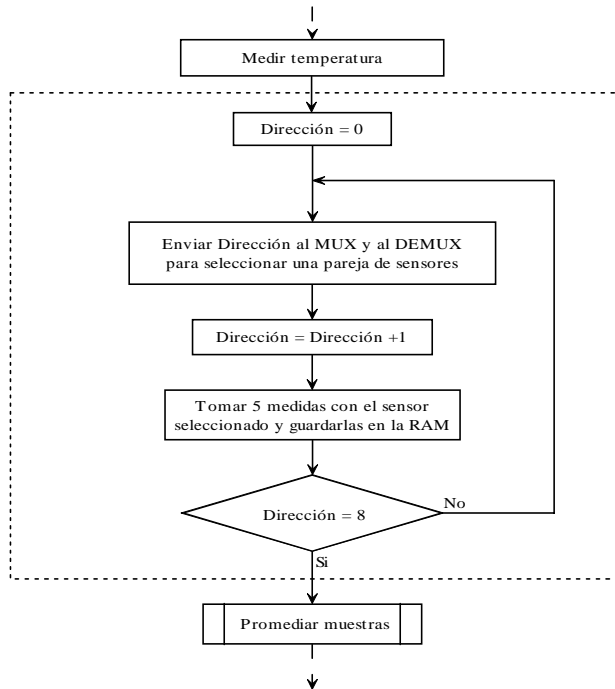


Figura 7. Proceso general de muestreo de los sensores ultrasónicos.

### 2.3.1 Algoritmo de selección y promedio

Los problemas de la medición con ultrasonido finalmente conllevan a dos errores numéricos:

- Que la medida de cero cuando tiene que dar un valor diferente.
- Obtener medidas falsas.

La experiencia práctica mostró que con el módulo de ultrasonido el error más frecuente es que la medida se pierda. A partir de la anterior observación, aplicar un promedio aritmético simple sobre el total de las muestras es un gran riesgo.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
muestra 1	50	50	50	0	0
muestra 2	51	51	51	0	0
muestra 3	48	48	48	0	0
muestra 4	50	50	50	50	50
muestra 5	46	46	46	46	0
muestra 6	50	50	0	0	0
muestra 7	52	0	0	52	0
<b>Promedio aritmético</b>	<b>49.6</b>	<b>42.1</b>	<b>35.0</b>	<b>21.1</b>	<b>7.1</b>

Tabla 1. Resultados de un promedio aritmético.

De los resultados de la Tabla 1, se concluye que al tener en cuenta un gran número de ceros, se altera de manera considerable el promedio, ocasionando una lectura errónea. Ver casos 2,3,4 y 5 de la Tabla 1.

Después de tomar las cinco muestras de cada sensor, quedan 80 bytes de información de la medición; el algoritmo de selección y promedio entrega 16 bytes, que junto con el byte de la temperatura, se transmiten hasta un sistema de nivel superior que puede ser un PC u otro dispositivo.

Para solucionar el anterior problema se desarrolló un algoritmo que:

- Entrega cero si hay dos o menos medidas diferentes de cero, cuando hay más de dos disparos exitosos entrega un valor diferente de cero.
- El promedio lo hace dividiendo únicamente sobre la cantidad de disparos exitosos, diferentes de cero.

Los resultados obtenidos una vez aplicado el algoritmo de promedio se muestra en la tabla 2.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
muestra 1	50	50	50	0	0
muestra 2	51	51	51	0	0
muestra 3	48	48	48	0	0
muestra 4	50	50	50	50	50
muestra 5	46	46	46	46	0
muestra 6	50	50	0	0	0
muestra 7	52	0	0	52	0
<b>Promedio aritmético</b>	<b>49.6</b>	<b>42.1</b>	<b>35.0</b>	<b>21.1</b>	<b>7.1</b>
<b>Algoritmo de promedio</b>	<b>49.6</b>	<b>49.2</b>	<b>49.0</b>	<b>49.3</b>	<b>0.0</b>

Tabla 2. Resultados del algoritmo de selección y promedio.

El algoritmo de promedio aplicado, produce resultados muy superiores a un promedio sencillo.

### 3. CONCLUSIONES

Se diseñó el sistema de percepción sensorial (módulo ultrasónico) de una plataforma móvil para adquirir suficiente información, confiable dentro de su rango, sobre la distancia a la que se encuentran los objetos que hacen parte de su zona de desplazamiento; la información proporcionada por el anillo de sensores sirve para la construcción de mapas del entorno y la generación de trayectorias de desplazamiento de la plataforma móvil.

En un principio, en la medición con ultrasonido se tomaba solo una medida por cada sensor, esto hacía que las mediciones fueran poco confiables, para aumentar la confiabilidad se amplió el número de muestras por sensor. Éste procedimiento incrementó la cantidad de datos resultantes de la medición (de 16 bytes a 80 bytes) y por lo tanto, el tiempo de transferencia de ésta información hasta un sistema superior (PC) creció demasiado.

Se optó por implementar un algoritmo especial de selección y promedio en el microcontrolador responsable de la medición, obteniendo solamente 16 bytes de información (confiable) para transmitir al PC.

Para aumentar el rango de la medición de distancia con ultrasonido se diseñaron unos soportes con orificios cónicos para captar más fácilmente las señales de eco.

#### 4. BIBLIOGRAFÍA

[1] Lim, J.H y Cho, D.W, "Physically based sensor modelling for a sonar map in a specular environment". 1992 En Proc. Int. Conf on robotics and automation, Pag 1714-1719.

[2] C. Canali et al., " A Temperature compensated ultrasonic sensor operating in air for distance and proximity measurements." IEEE Trans, ind. Electron., vol IE-29, pp 336-341, Nov 1982.

[3] Marioli Daniele, Narduzzi Claudio, Offelli Carlo, Petri Dario, Sardini Emilio, and Taroni Andrea " Digital time of Flight Measurement for Ultrasonic sensors" IEEE Trans, on Instrum, and Measurement, Vol 41, no 1 feb 1992.

[4] Parrilla, M., Anaya, J.J., Frish, C., "Digital Signal Processing Techniques for High Accuracy Ultrasonic Range Measurements " IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI) Vol 40(4), pages 759-763, August 1991.

[5] D. Marioli, E. Sardini, and A taroni, "Shape determination and robot arm control positioning by means of ultrasonics" in Proc. Int. Conf. Robot Vision and Sensory controls, Feb 1988, pp 171-182.

[6] M. Parrilla, J.J. Anaya, and C. Fritch " Digital Signal processing Techniques for High Accuracy Ultrasonic Range Measurements." IEEE Trans., on Intr., and Measur., vol 40 no 4 aug 1991.

[7] A.M. Sabatini, V. Genovese, E. Guglielmini. "A Low-Cost, Composite Sensor Array Combinig Ultrasonic and Infrared Proximity Sensor". 1995.

[8] Kleeman, Lindsay Kuc Roman "Mobile robot sonar for target localization and classification" Intelligent Robotics Research Centre. Monash University. Australia. Intelligent Sensors Laboratory. Yale University. The international journal of robotics research. Vol 14, N° 4, Agosto 1995.

[9] BILLUR, Barshan and ROMAN, Kuc. Differentiating sonar reflections from corners and planes by employing an intelligent sensor. En : IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 12, No. 6 (June 1990); p.560-569..