

# TÉCNICA DE LOCALIZACIÓN DE MÓVILES EN PLANTAS INDUSTRIALES BASADA EN EL ESTUDIO DE SEÑALES DE AUDIO ESTACIONARIAS

Manuel Manzanares, Yolanda Bolea y Antoni Grau  
Dpto de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial (ESAII)  
Universidad Politécnica de Catalunya, UPC  
{manolo.manzanares;yolanda.bolea;antoni.grau@upc.edu}

## Resumen

*En este artículo se presenta un nuevo método para la localización de robots móviles. La determinación de la posición se basa en el uso de fuentes estáticas de sonido las cuales emiten periódicamente. A través del aprendizaje basado en varias muestras conocidas sus posiciones, el algoritmo localiza la posición del robot para nuevas muestras. La tasa de error es en varios casos inferior al 1%.*

**Palabras Clave:** Localización, robótica móvil, fuentes de sonido.

## 1 INTRODUCCION

En este artículo nos centraremos en la problemática de la localización espacial de robots en entornos industriales, sin dejar de considerar que la técnica propuesta pueda ser aplicada a la autolocalización de personas en dichos entornos en condiciones especiales, como por ejemplo podría ser la provocada en una situación en la que se produjeran condiciones de mala visibilidad.

Actualmente existen numerosas técnicas para resolver el problema de la autolocalización espacial de robots, nosotros propondremos una técnica basada en el tratamiento de las señales de audio típicas presentes en los entornos industriales, que pueda servir para complementar a las técnicas ya existentes, dado que el tratamiento de las señales de audio para este tipo de aplicaciones es un campo que no está muy explorado y que puede reportar algunas ventajas.

En la sección 2 y 3 se plantean las ecuaciones de la respuesta acústica en diferentes recintos. En la sección 4 se muestra la técnica que los autores proponen para la localización del robot, mostrando los resultados obtenidos en la sección 5. El artículo acaba con las reflexiones extraídas de la investigación.

## 2 RESPUESTA ACÚSTICA DE RECINTOS CERRADOS

La respuesta acústica de un recinto cerrado, con forma rectangular, en la que se nos indica la dependencia de la presión en un punto respecto a su posición definida por las coordenadas  $(x,y,z)$ , vendrá dada por la ecuación de ondas. Si llamamos  $L_x$ ,  $L_y$  y  $L_z$  a las dimensiones de longitud, anchura y altura del recinto, de paredes idealmente rígidas, en las que las ondas se reflejan en ellas sin pérdidas, la ecuación de onda escrita en coordenadas Cartesianas toma la forma [1]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0 \quad (1)$$

Sin considerar inicialmente la dependencia temporal de la presión respecto al tiempo, la solución está formada por tres factores:

$$p(x, y, z) = p_1(x)p_2(y)p_3(z) \quad (2)$$

Si este producto se sustituye en la ecuación de onda, esta última toma la forma de tres ecuaciones diferenciales ordinarias. Por ejemplo,  $p_1$  debe satisfacer la ecuación:

$$\frac{d^2 p_1}{dx^2} + k_x^2 p_1 = 0 \quad (3)$$

Junto con las condición de contorno en  $x = 0$  y  $x = L_x$

$$\frac{dp_1}{dx} = 0 \quad (4)$$

Las constantes  $k_x$ ,  $k_y$  y  $k_z$  están relacionadas por la siguiente expresión:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 \quad (5)$$

La ecuación definida por  $p_1$  tiene una solución general de la forma:

$$p_1(x) = A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x) \quad (6)$$

Podemos deducir a partir de ella y acotando esta solución a las condiciones de contorno que las constantes  $k$  toman los siguientes valores:

$$k_x = \frac{n_x \pi}{L_x}; \quad k_y = \frac{n_y \pi}{L_y} \quad \text{y} \quad k_z = \frac{n_z \pi}{L_z} \quad (7)$$

Siendo  $n_x$ ,  $n_y$  y  $n_z$  enteros positivos. Sustituyendo estos valores en la ecuación (5) obtenemos los autovalores de la ecuación de onda:

$$k_{n_x, n_y, n_z} = \pi \left[ \left( \frac{n_x}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{n_y}{L_y} \right)^2 + \left( \frac{n_z}{L_z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

Las autofunciones o modos propios o normales asociados con estos autovalores vienen dados por:

$$P_{n_x, n_y, n_z}(x, y, z) = C \cdot \cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right) \cdot e^{j\omega t} \quad (9)$$

Siendo  $C$  una constante arbitraria e introduciendo la variación de la presión en función del tiempo descrita por el factor  $e^{j\omega t}$ . Esta expresión representa un espacio tridimensional de ondas estacionarias que se establecen en el recinto. Las autofrecuencias correspondientes a los autovalores de la ecuación (8) vienen dadas por la expresión:

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2\pi} k_{n_x, n_y, n_z} \quad (10)$$

Por tanto, la respuesta acústica de cualquier recinto cerrado presenta unas frecuencias de resonancia o autofrecuencias en las que la respuesta a una fuente de sonido ubicada en el recinto y que emita una señal a esa frecuencia es máxima. Dichas frecuencias de resonancia dependen de la forma y de las dimensiones del recinto, y de los coeficientes de reflexión de los distintos materiales, entre otros factores. Para el caso de un recinto ideal, y si únicamente consideráramos una dimensión, la respuesta del recinto a una onda estacionaria de una determinada autofrecuencia presentaría el aspecto que se indica en la figura 1.

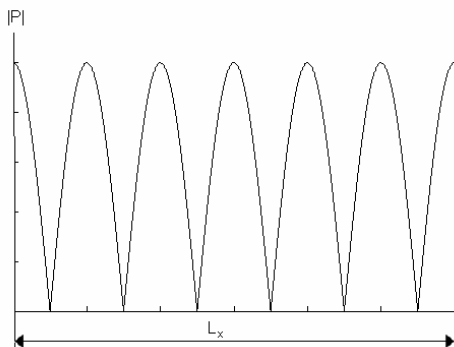


Figura 1: Respuesta a onda estacionaria

### 3 ACÚSTICA EN PLANTAS INDUSTRIALES.

Es típica la presencia en plantas industriales de máquinas eléctricas rotativas que se encuentran en funcionamiento durante intervalos de tiempo apreciables. Las señales de audio emitidas por estas máquinas aunque no se puedan considerar estrictamente como señales estacionarias si que presentan un cierto grado de estacionariedad si consideramos el funcionamiento cíclico de la máquina en un intervalo de tiempo suficiente.

Dependiendo del tipo de máquina, el contenido espectral de la señal de audio emitida puede ser muy grande, y por tanto la complejidad de su tratamiento también. Además hay que considerar que el contenido espectral de la señal emitida también puede variar apreciablemente según nos posicionemos en la parte anterior o posterior de la máquina, o en los laterales de la misma.

En el apartado anterior hemos visto que la respuesta de un recinto cerrado será máxima para las frecuencias naturales o de resonancia del recinto, frecuencias a las que se producen las distintas ondas estacionarias. El recinto responderá fuertemente a aquellos sonidos cuya frecuencia se encuentre próxima a cualquiera de estas frecuencias naturales, y en el caso que nos ocupa, a las componentes espectrales del sonido que emita la máquina que se encuentre en las proximidades de dichas frecuencias naturales.

El análisis de la respuesta teórica de la señal estacionaria captada en un punto del recinto es muy complejo, dado que dependerá por un lado, de las distintas componentes frecuenciales del espectro de la señal emitida por la máquina, y por otro, de la función de transferencia de la planta (room transfer function: RTF), que depende de la geometría del recinto y de los distintos coeficientes de absorción de los materiales de las paredes que lo forman, sin olvidar la influencia de los posibles objetos presentes en la planta que pueden atenuar la señal de audio emitida por la máquina.

Por tanto, la RTF expresa las características de transmisión de un sonido entre una fuente y un receptor en un entorno cerrado, y es muy útil para muchas aplicaciones, como por ejemplo, ecualización de sonido para sistemas de hi-fi, controles inteligentes de ruido [2], en canceladores acústicos de eco (*acoustic echo cancellers*: ACEs), y han sido propuestas diferentes técnicas para su obtención, con objeto de poder reducir el gran número de parámetros necesarios para describirlas, véanse por ejemplo los

métodos propuestos en [3] y [4]. En dichos trabajos se estudian las distintas RTF's obtenidas en función de las distintas posiciones del emisor y del receptor, y se analizan los polos comunes a todas las RTF's que corresponden a las distintas frecuencias de resonancia, que dependen tal como hemos comentado, de las condiciones acústicas del recinto y que no dependen de la posición del emisor y del receptor. En estos trabajos también se referencian las complejas variaciones de los ceros que dependen del tiempo de retardo y de las antiresonancias del recinto, y que por tanto sí que dependen de la posición del emisor y del receptor.

No obstante las distintas simplificaciones propuestas, aun en entornos cerrados con condiciones bastante ideales, no evitan el tener que trabajar con un número de parámetros relativamente elevado para la descripción de la RTF del recinto, y dado que el objetivo de nuestro estudio es la determinación de las coordenadas (x,y) del robot mediante el procesado de la señal de audio emitida por una fuente fija, y captada por el robot al desplazarse por el recinto en el plano, propondremos una metodología que nos permita obtener dicha localización sin la necesidad de tener que trabajar con la descripción completa de la respuesta acústica de la planta.

#### 4 TÉCNICA DE LOCALIZACIÓN PROPUESTA

Dada la elevada complejidad de las señales de audio emitidas por las máquinas rotativas presentes en una planta industrial, intentaremos simplificar el análisis centrandolo en la componente espectral de frecuencia más baja de la señal emitida por la fuente de audio, y que sea o que se encuentre próxima a una de las frecuencias de resonancia más bajas del recinto, esto presentará la ventaja de que dichas componentes frecuenciales serán menos afectadas por los distintos objetos presentes en la planta.

La respuesta acústica de un recinto ideal a esta frecuencia de interés será la que hemos indicado en la figura 1, con lo que disponemos de una función que nos relaciona la señal captada por el micrófono del robot y su posición.

Aunque hayamos centrado nuestro estudio en una única componente frecuencial con objeto de simplificarlo, y aun efectuando el cálculo de la localización del robot mediante el análisis de la señal estacionaria de audio recibida cuando la respuesta transitoria ha finalizado, el análisis teórico completo seguirá siendo muy complejo, dado que en un punto tendremos varios modos posibles excitados y además deberemos contemplar, entre otros aspectos, el que las paredes no son ideales y reflejarán sólo

parcialmente el sonido que incide sobre ellas según el diferente coeficiente de absorción de los materiales que las forman. Por tanto la respuesta descrita en la expresión (9) quedará bastante afectada por estas condiciones reales por lo que parece bastante conveniente a efectos prácticos trabajar con unas muestras etiquetadas que permitan reflejar estos aspectos en la determinación de función de transformación que nos relacione el espacio de características de la señal de audio con el espacio de medidas.

Por otro lado, el robot captará la señal proveniente de la fuente en las diferentes posiciones de su trayectoria, pero no dispondrá en los instantes en que ocupa esas posiciones, de la señal emitida desde la propia fuente, a no ser que, por ejemplo, complicáramos el sistema ubicando un micrófono en la propia fuente y efectuáramos una transmisión de la señal hacia el robot en tiempo real.

La metodología que proponemos se basa por tanto en la propuesta de un modelo acústico que no contempla el desfase real existente entre la señal de audio emitida por la cámara y la señal de audio captada por el robot, pero que describa la respuesta de la presión acústica del sistema en función de la posición del robot a la frecuencia de interés y en que la señal de entrada al modelo será la señal de audio emitida por la fuente y previamente grabada y la señal de salida será la captada por el robot en tiempo real en la posición en que se encuentre.

Dado que en nuestra metodología las señales de entrada y salida al modelo no presentan desfases entre ellas, no existirá un desplazamiento apreciable de los ceros en los distintos modelos obtenidos y debido a que la amplitud de la señal filtrada (del armónico) en las distintas posiciones variará, se forzará a que los polos de los distintos modelos se desplacen en función de la posición del robot, tal como muestra la figura 2 [5].

En la figura 2 se observan los vectores que se forman con origen en los polos y el cero y con final en el círculo unidad en el punto correspondiente a  $e^{j\omega_0}$ , siendo  $\omega_0$  la pulsación correspondiente al armónico obtenido en el proceso de filtrado tanto de la señal de la fuente como de las señales captadas en las distintas posiciones que ocupa el robot en su trayectoria. El módulo de la función de transferencia que define el modelo a esa pulsación  $\omega_0$ , se puede determinar por la siguiente expresión:

$$|H(e^{j\omega_0})| = \frac{|A|}{|B| \cdot |C|}$$

Si el cero no se desplaza al variar la posición del robot, el módulo del vector A permanecerá constante,

forzando una variación de los módulos de los vectores  $B$  y  $C$  al variar la señal de audio recibida por el micrófono del robot al recorrer los distintos puntos de su trayectoria.

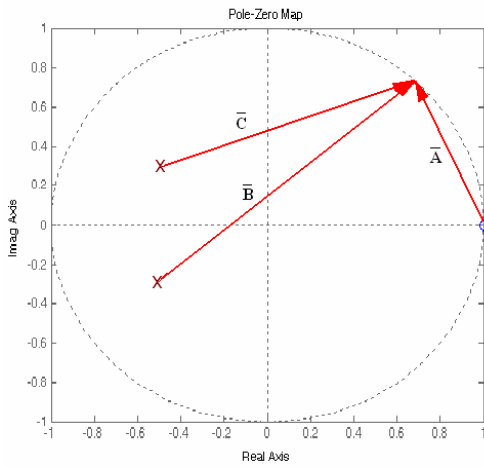


Fig. 2. Modelo de un cero y dos polos conjugados.

Uno de los casos estudiados que detallaremos más ampliamente en el apartado de resultados, corresponde al caso en que la fuente de audio es una cámara climática presente en un laboratorio de ensayos por el que se desplaza el robot. El primer modelo que nos ha proporcionado en este caso resultados aceptables en el proceso de identificación con un mínimo número de parámetros es el modelo ARX de 10 polos, [6], los resultados obtenidos en el diagrama de polos y ceros en las distintas posiciones de las muestras etiquetadas son los señalados en la figura 3.

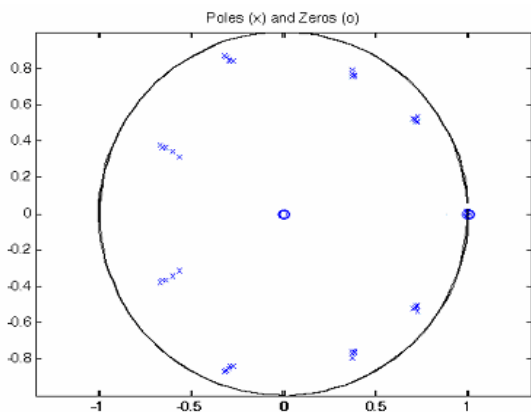


Fig. 3. Posición de ceros y polos obtenidos.

En esta figura se observa que para las distintas posiciones de las muestras se producen variaciones significativas de la posición de los polos para los distintos modelos identificados. En nuestro trabajo buscaremos una función que relacione la distancia en el espacio de características, formado por los

distintos polos obtenidos en los distintos modelos, con la distancia en el espacio de medidas, con objeto de determinar la posición del robot.

Una primera aproximación a esta función la podemos basar en la respuesta acústica ideal dada por la expresión (9), ya que los distintos modelos identificados deben reflejar en los distintos valores de sus polos una variación de tipo sinusoidal según las distintas posiciones que va ocupando el robot en su trayectoria.

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

El ensayo lo realizamos utilizando como fuente de sonido una cámara climática destinada a realizar ensayos climáticos de equipos y componentes electrónicos que está ubicada en un laboratorio docente por el que se desplazará el robot. La cámara emite los sonidos generados por un compresor y un ventilador interno de recirculación de aire.

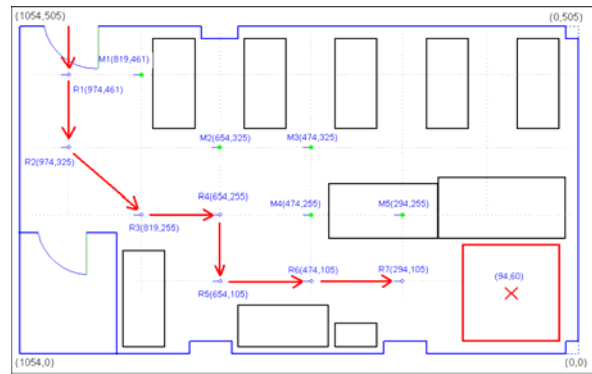


Fig. 4. Mapa de la ruta del robot.

El robot sigue la trayectoria indicada en la figura, que le lleva desde la entrada del laboratorio hasta las proximidades de la cámara climática, y determina su posición en los puntos señalados como R1, R2, R3, R4, R5, R6 y R7. Las muestras etiquetadas son las indicadas como M1, M2, M3, M4 y M5.

El robot, para determinar su localización, realizará el procesamiento de la señal de audio de la cámara climática y de la señal captada por el micrófono en las distintas posiciones. Por otro lado, el robot lleva incorporada una plataforma giratoria que permite orientar el micrófono hacia la fuente de audio, pudiendo determinar dicho ángulo de orientación con precisión. La señal emitida por la cámara y que utilizaremos para el proceso de identificación de los distintos modelos es la mostrada en la figura 5.

La señal es continua y en primer término no estacionaria, pero podemos admitir que posee un cierto grado de estacionariedad al trabajar con un número de muestras lo suficientemente elevado, en

nuestro caso: 50000 muestras (1,13 segundos). La figura 6 muestra su espectro.

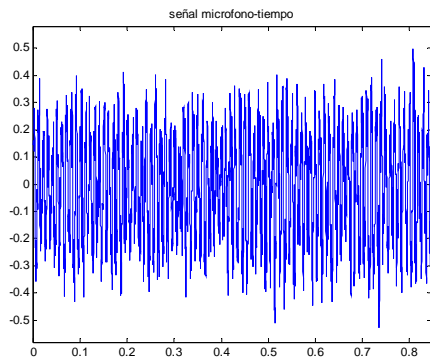


Fig.5. Señal emitida por la fuente de sonido.

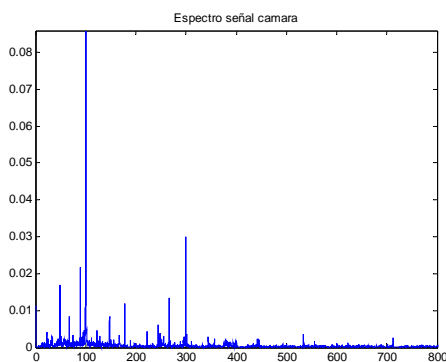


Fig. 6. Espectro de la señal de sonido.

Se observa la presencia de un armónico de elevada amplitud a una frecuencia de aproximadamente 100 Hz y la presencia de armónicos significativos tanto para frecuencias superiores como inferiores. Para simplificar el proceso de identificación nos centraremos en la componente fundamental de 100 Hz ya que hemos comprobado experimentalmente que se encuentra muy próxima a una de las frecuencias de resonancia del recinto.

La frecuencia de muestreo que utilizamos en la captura de la señal es de 44100 Hz, se podría haber muestreado a frecuencias más bajas para evitar tener que trabajar con un número de muestras más elevado de lo necesario, tal como se indica en [6], pero se prefiere mantener un elevado ancho de banda para el caso de tener que tratar componentes de audio de frecuencia más elevada en otras aplicaciones.

Con objeto de facilitar el proceso de la determinación de los modelos de la respuesta acústica de la planta centrada en su respuesta a la señal estacionaria de 100 Hz, someteremos tanto a la señal de entrada como la de salida a un filtrado de tipo pasabanda, dado que en sistemas lineales podemos admitir que [6]:

$$y(t) = G_o(q)u(t) + H_o(q)e(t) \Rightarrow L(q)y(t) = G_o(q)L(q)u(t) + L(q)H_o(q)e(t)$$

Dicho filtrado se implementa mediante un filtro digital de Cauer de orden 6. El resultado del proceso de filtrado se puede ver en las figuras 7 y 8 para la señal captada por el robot en la posición R4.

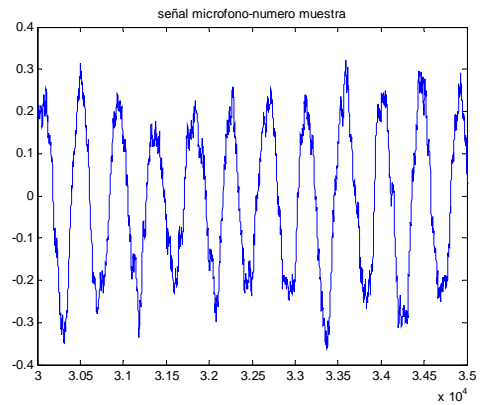


Fig.7. Señal de sonido emitido por la fuente.

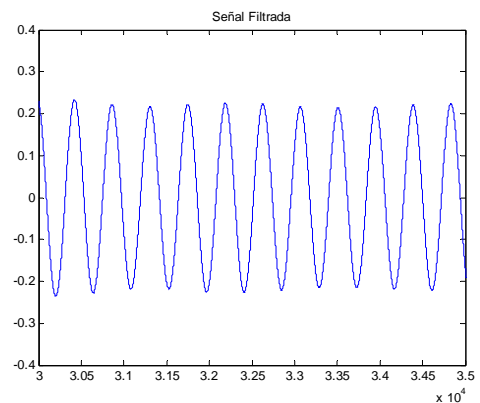


Fig.8. Señal de sonido filtrado.

Con un modelo ARX 10 2 4 tenemos buenos resultados en las muestras "etiquetadas":

- M1(Pos4) : Loss function 4.19601e-010 and FPE 4.19802e-010
- M2(Pos9) : Loss function 4.21587e-010 and FPE 4.21789e-010
- M3(Pos13) : Loss function 5.50937e-010 and FPE 5.51201e-010
- M4(Pos14) : Loss function 5.57981e-010 and FPE 5.58249e-010
- M5(Pos18) : Loss function 6.55211e-010 and FPE 6.55526e-010

Por ejemplo, para la muestra etiquetada ubicada en la posición M5 se muestra en la figura 9.

Tal como hemos comentado anteriormente, nos centraremos en los polos para establecer el vector de características en el espacio de características, dado que son los que más información proporcionan en el análisis de la señal de audio al variar la posición de la señal captada en el espacio de medidas, con objeto de encontrar una función de transformación que nos relacione la distancia en el espacio de características con la distancia en el espacio de medidas.

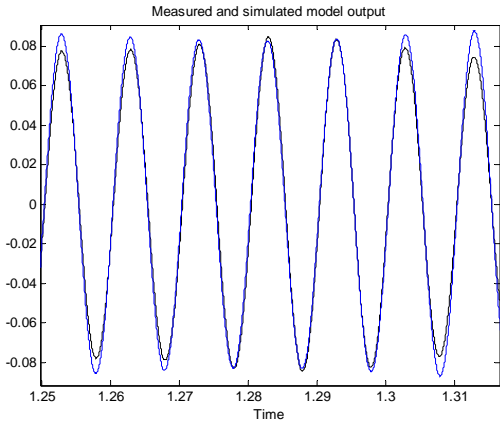


Fig.9. Señal y su modelo.

Los distintos valores de los polos de las distintas muestras “etiquetadas” obtenidos en el proceso de identificación de los modelos se pueden ver en la figura 10.

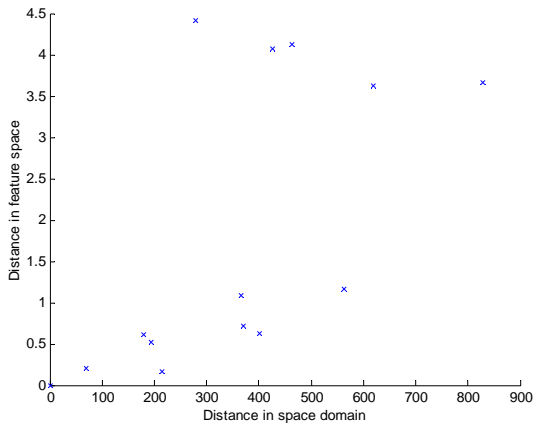


Fig. 10. Muestra sobre la representación de distancia en los dos espacios de trabajo.

La función de transformación que proponemos es una función sinusoidal de la forma:

$$y = A \cdot \sin(\omega x \pm \phi)$$

La función interpolada a partir de dichas muestras, es la siguiente:

$$y = 2,2 + 2,2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{170} - \frac{144\pi}{170}\right)$$

Su representación gráfica se muestra en la figura 11.

Esta función propuesta proporciona buenos resultados, aunque hay que considerar que una misma distancia en el dominio de características, nos proporciona varias posibles soluciones en el dominio del espacio, por lo que habría que considerar la posición anterior del robot y/o considerar la posición estimada por otro sensor (por ejemplo odométrico).

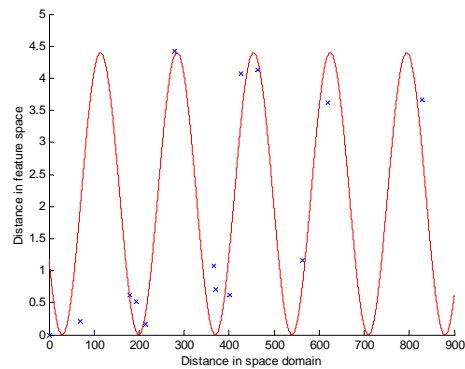


Fig. 11. Función de interpolación de las muestras.

Para la determinación de las coordenadas del robot realizaremos la operativa siguiente, ver figura 12.

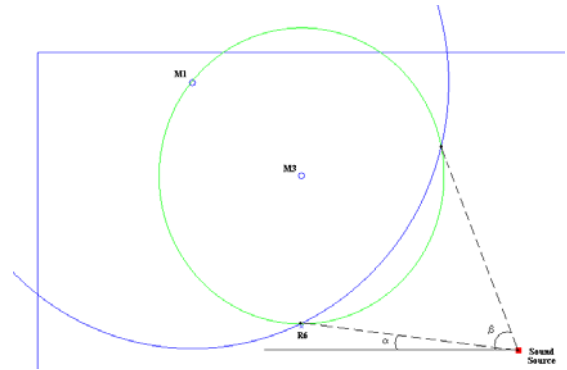


Fig.12. Diagrama de la determinación de la posición del robot.

- 1) El robot capta la señal de audio en su posición actual y realiza el proceso de identificación tomando como señal de entrada al sistema la señal filtrada de la fuente de audio (cámara climática) y como señal de salida la señal captada y filtrada. Los parámetros correspondientes a los polos obtenidos en este proceso de identificación serán los que se utilizarán como vector de características para las etapas siguientes.
- 2) Se determinan las distancias euclideas en el espacio de características entre este vector de características y los vectores de características de las distintas muestras etiquetadas.
- 3) Se eligen las dos muestras más próximas al robot en el espacio de características y se determina la distancia entre ellas y el robot en el dominio del espacio a través de la función de transformación, esto nos proporciona dos posibles soluciones que vienen dadas por la intersección de las dos circunferencias en el dominio del espacio.
- 4) Dichos puntos de intersección formarán unos ángulos teóricos de orientación del robot respecto a la fuente de audio ( $\alpha$  y  $\beta$  en la figura), que se

compararán con el ángulo real obtenido por la plataforma giratoria de los micrófonos, tomando como solución el punto de intersección teórico en el que más se aproxime el ángulo calculado al ángulo medido proporcionado por la plataforma, tal como se indica en el ejemplo de la figura 12, en que M1 y M3 son las muestras etiquetadas, y R6 es la posición real del robot.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Resultados en la localización del robot, método I.

Posición del robot	Coordenadas reales	Coordenadas calculadas	Error X(%)	Error Y(%)
R1(Pos1)*	(974,461)	(1006,435)	3,29	-5,64
R2(Pos2)	(974,325)	(1009,366)	3,59	12,62
R3(Pos6)	(819,255)	(825,249)	0,73	-2,35
R4(Pos10)	(654,255)	(661,278)	1,07	9,02
R5(Pos11)*	(654,105)	(629,110)	-3,82	4,762
R6(Pos15)	(474,105)	(456,88)	-3,80	-16,19
R7(Pos19)	(294,105)	(270,106)	-8,16	0,95

(\*) En las posiciones Pos1 y Pos11 no existía intersección entre las circunferencias que se forman en el espacio de medidas con respecto a las dos primeras muestras más cercanas al robot en el espacio de características, por lo que se toma la primera y la tercera muestra más cercana del espacio de características. Podemos valorar que para paliar este problema, debido a la incertidumbre de la función de transformación, podríamos haber trabajado de entrada con las tres muestras más cercanas en lugar de con las dos muestras más cercanas, o dejar que el algoritmo lo resuelva de esta forma propuesta.

Los resultados mejoran mucho, aunque la carga computacional es mayor, si consideramos la determinación de la distancia del robot a las cinco muestras etiquetadas, y elegimos como solución aquella que forma un ángulo más próximo al determinado por la plataforma giratoria de los micrófonos. Los resultados obtenidos son en este caso los mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2: Resultados en la localización del robot, método II.

Posición del robot	Coordenadas reales	Coordenadas calculadas	Error X(%)	Error Y(%)
R1(Pos1)*	(974,461)	(1008,451)	3,49	-2,17
R2(Pos2)	(974,325)	(987,332)	1,33	2,15
R3(Pos6)	(819,255)	(817,249)	-0,24	-2,35
R4(Pos10)	(654,255)	(641,240)	-1,99	-5,88
R5(Pos11)*	(654,105)	(656,109)	0,31	3,81
R6(Pos15)	(474,105)	(456,108)	-1,90	2,86
R7(Pos19)	(294,105)	(283,104)	-3,74	-0,95

## 6 CONCLUSIONES

Para localizar un robot mediante señales de audio se pretende encontrar una función que relacione el espacio de características con el espacio real X-Y. El espacio de características está formado por los coeficientes del modelo de la señal de audio que el robot oye en cada punto de una habitación. La hipótesis de trabajo es que existe una relación entre la distancia en dicho espacio y la distancia en el espacio X-Y. La obtención de dicha función de transferencia y el método para encontrarla hace pensar a los autores que existe dicha relación y los resultados muestran que los errores de localización son bajos.

### Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a Ministerio de Ciencia y Tecnología del gobierno de España por la concesión del proyecto DPI2007-61452, MCYT, así como al Gobierno autónomo de la Generalitat de Catalunya por financiar al Grupo consolidado VIS (Vision and Intelligent Systems). También quieren agradecer a la Comisión Europea por la concesión de la coordinación del proyecto europeo FP6-2005-IST-6, URUS-045062, con todos los cuales se ha financiado esta investigación.

### Referencias

- [1] Heinrich Kuttruff. *Room Acoustics*. Applied Science Publishers Ltd. 1979
- [2] M. Ayala Botto, J. M. C. Sousa, J. M. G. Sá da Costa. *Intelligent Active Noise Control Applied to a Laboratory Railway Coach Model*. *Control Engineering Practice* 13 (2005), 473-484. Elsevier.
- [3] Yoichi Haneda, Yutaka Kaneda, and Nobuhiko Kitawaki. *Common-Acoustical-Pole and Residue Model and Its Application to Spatial Interpolation and Extrapolation of a Room Transfer Function*. *IEEE Trans on Speech and Audio Processing*, Vol. 7, N° 6, November 1999.
- [4] T. Gustaffson, H. R. Pota, J. Vance, B. D. Rao, M. M. Trivedi. *Estimation of Acoustical Room Transfer Functions*. *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*. Sydney, Australia, December 2000.
- [5] J. B. Mariño Acebal, F. Vallverdú Bayés, J.A. Rodríguez Fonollosa, A. Moreno Bilbao. *Tratamiento Digital de la Señal. Una Introducción Experimental*. Edicions UPC. 2ª Edición. Septiembre de 1996.
- [6] Lennart L. Jung. *System Identification, Theory for the User*. Ed. Prentice Hall Ptr. 2ª Edición. 1999.