

Evaluación Experimental de Métodos de Mejoramiento de Imágenes y Detección de Objetos Aplicados a Sistemas Sonar de Barrido Mecánico

Vidal Ayala ⁽¹⁾, Pedro Vargas ⁽²⁾, Andrea Trucco ⁽³⁾

- (1) Estudiante de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- (2) Director de Tesis. Ingeniero en Electricidad especialización Electrónica, Escuela Superior Politécnica del Litoral. Maestría en Ingeniería Electrónica, Instituto Electronico de Leningrado, URSS.
- (3) Director de Tesis en Italia. Master en Ingeniería Electrónica, Universidad de Génova, 1994, Ph.D. en Ingeniería Electrónica y Ciencias de la Computación, Departamento de Ingeniería Biofísica y Electrónica (DIBE), Universidad de Génova, 1998.

Resumen

En esta tesis han sido desarrollados algunos métodos eficientes para el mejoramiento de imágenes acústicas y la detección automática de objetos en dichas imágenes. Estos métodos han sido evaluados en una clase específica de datos reales. El objetivo es el de incrementar la potencialidad de los sistemas sonar de barrido mecánico (*fan-shaped beam* y *pencil-beam*) empleados durante operaciones submarinas.

En cuanto respecta a los sistemas sonar *fan-shaped*, fueron desarrollados y probados un conjunto de métodos orientados al incremento de la calidad visual de las imágenes generadas. El primer paso es un procedimiento de *scan conversion*, para cambiar de un sistema de coordenadas polares como el del sonar, a una matriz de píxeles densa y regular. Un paso de interpolación eficiente, trabajando en las mismas coordenadas polares del sistema sonar, fue desarrollado para establecer el cálculo del valor que hay que asignar a cada píxel en base a la media pesada de las muestras acústicas vecinas. Luego ha sido llevada a cabo una ley de asignación dinámica del brillo del píxel, evaluada imagen por imagen, para explotar óptimamente el rango de brillo disponible. La aplicación conjunta del método de interpolación y la asignación optimizada de brillo nos permite mejorar la calidad de la imagen y nos provee de una herramienta simple y efectiva para generar imágenes acústicas particularmente refinadas. Finalmente, procesos posteriores permiten reducir problemas típicos que afectan esta clase de sistemas de imagen, como el ruido speckle, los ecos múltiples y el bajo contraste.

Con respecto al sistema sonar *pencil-beam*, fueron propuestos y evaluados dos métodos que permiten la detección de un objeto simple contenido en la región que representa la imagen. En particular, uno de estos métodos es novedoso y ha sido desarrollado *ad-hoc* para explotar ventajosamente la organización de los datos que caracteriza el sistema sonar *pencil-beam*. Se han obtenido resultados satisfactorios en términos de precisión en la localización del objeto y en términos de carga computacional. Los requerimientos de tiempo real pueden ser fácilmente satisfechos usando un computador personal común.

La investigación ha sido desarrollada usando datos reales recolectados por los sistemas sonar ya mencionados, durante pruebas en el mar.

Abstract

In this thesis, some efficient methods for acoustic image enhancement and automatic object detection are presented and assessed on a specific class of real data. The aim is to increase the potentiality of mechanically scanned fan-shaped-beam and pencil-beam sonar systems employed during underwater operations.

Concerning the fan-shaped-beam sonar system, a set of methods has been assessed that is devoted to increase the visual quality of the generated images. The first step is a scan conversion procedure, to move from a polar coordinate system as that of the sonar to a dense, regular matrix of pixels. An efficient interpolation step, working on the same polar coordinates of the sonar system, has been developed, that performs the computation of the value to assign to every pixel on the basis of the weighted average of the neighboring acoustic samples. Moreover, a dynamic pixel brightness assignment law, evaluated image by image, is carried out to optimally exploit the available brightness range. The joint application of the interpolation method and the optimized brightness assignment allows one to improve image quality thus providing a simple and effective tool to generate particularly refined acoustic images. Finally, further processing steps allow to reduce typical problems blurring this kind of imaging systems, like speckle noise, multiple echoes and low contrast.

Concerning the pencil-beam sonar system, two methods are proposed and assessed that allow the detection of a simple object contained in the imaged region. In particular, one of these methods is novel and has been devised *ad-hoc* to advantageously exploit the specific data organization that characterizes the pencil-beam sonar system. Satisfactory outcomes in terms of accuracy in object location and computational load are achieved. The real-time requirement can be easily satisfied by using a common personal computer.

The performance of the proposed techniques has been evaluated using real data collected by the addressed sonar heads during different trials at sea.

I. INTRODUCCION

Acoustic imaging es un campo de investigación activo dirigido al estudio de técnicas que apuntan a la generación y al procesamiento de imágenes generadas desde señales de bajo nivel adquiridas por un sistema acústico. Típicamente, los sistemas de *acoustic imaging* son ampliamente usados en exploraciones a grande y pequeña escala, pero la calidad de los datos no es siempre buena, debido al ruido y a la resolución pobre. Como consecuencia, las imágenes acústicas no son fácilmente interpretables por operadores humanos inexpertos, y al mismo tiempo las operaciones como detección automática de objetos y el reconocimiento pueden ser mucho más difíciles.

Sin importar el tipo de sistema usado para la formación de las imágenes acústicas, la información obtenida se organiza en una densa cuadrícula de celdas de resolución de diferentes dimensiones para cubrir el área completa de interés². La información esencial acerca de cada celda se halla en las coordenadas del centro de la celda y en la amplitud o intensidad (proporcional a la reflectividad acústica de la escena dentro de la celda misma). Esta representación de la información no es siempre eficiente para subsecuentes post-procesamientos o para la visualización. Las coordenadas del centro de la celda se expresan frecuentemente en coordenadas polares y se debe establecer un procedimiento de *scan conversion* para cambiar a una malla regular de píxeles. Para evitar pérdida de resolución, cada píxel debería ser más pequeño que la más pequeña celda de resolución para permitir a uno o más píxeles ser contenidos en una celda de resolución dada. Con este fin puede ser usada la siguiente aproximación: buscar el píxel que contiene el centro de una celda de resolución dada, asignar la amplitud acústica de tal celda al píxel, repetir este procedimiento para todas las celdas y, finalmente, interpolar con el objetivo de asignar también un valor a cada píxel que no contiene el centro de la celda.

Independientemente del tipo de representación de la imagen derivada de las señales de bajo nivel, siempre está presente una etapa de procesamiento preliminar en cada sistema de generación de imágenes acústicas con el afán de establecer operaciones básicas útiles para mejorar la calidad de la imagen y la comprensión humana, así como para resolver parcialmente diferentes problemas enfrentados en algunas aplicaciones, como detección de objetos y reconocimiento. En estos casos, los métodos de niveles de umbral y de filtrado son bastante comunes y usados típicamente para mejorar rápidamente la calidad de la imagen^{3,4,5}. Por ejemplo, uno de los procesos más adoptados es el de descartar todas las celdas de resolución cuyas amplitudes acústicas no exceden un umbral dado, estableciendo así una limpieza inicial del área de la imagen y permitiendo al operador extraer información significativa de la gran cantidad de datos adquiridos por el sensor acústico^{3,4}. Adicionalmente, puede realizarse una operación de filtrado dirigida principalmente a la reducción speckle y al mejoramiento del contraste⁵. El ruido speckle, debido a la naturaleza coherente de los sistemas de generación de imágenes acústicas, se afronta típicamente mediante la aplicación de ventanas deslizantes de un tamaño apropiado, así cada píxel es restaurado por medio de una combinación lineal o no lineal de sus vecinos. Desafortunadamente, la aplicación de las técnicas de reducción del ruido y de suavizamiento usualmente lleva a empobrecer la imagen y por tanto, a reducir la información útil para la interpretación.

Después de la generación de la imagen y el filtrado de bajo nivel, métodos de post-procesamiento más estructurados pueden ser aplicados, especialmente las técnicas de reconstrucción y segmentación, así como tareas de alto-nivel, como clasificación y reconocimiento (de objetos). Las aplicaciones típicas que usan estas técnicas incluyen la detección de objetos.

En esta tesis, dirigimos la atención hacia dos clases de imágenes acústicas, producidas por diferentes sistemas de barrido mecánico, con diferentes procesos.

Las imágenes producidas por los sistemas sonar *fan-shaped beam*, son imágenes a niveles de gris que representan una sección de la escena o una vista oblicua de esta, de acuerdo a la orientación del sensor sonar⁶. Para este tipo de imágenes, hemos intentado mejorar la calidad visual mediante la aplicación de una mezcla de técnicas de procesamiento ideadas *ad-hoc* y convencionales. Específicamente, desarrollamos una técnica de interpolación que trabaja en el mismo sistema de coordenadas polares del sistema sonar, haciendo el cálculo del valor que debe ser asignado a cada píxel en base al promedio pesado de los ecos acústicos vecinos. Mas aun, desarrollamos una ley dinámica de asignación del brillo del píxel que, analizando los ecos acústicos usados para crear una imagen dada, explota óptimamente el rango entero de brillo disponible. Para reducir el ruido, ha sido evaluada una aproximación adaptiva para reducción speckle, basada en el filtro de Frost⁷. Finalmente, una técnica recientemente propuesta para aplicaciones ópticas convencionales⁸ ha sido tentativamente aplicada para un mejoramiento refinado del contraste. El conjunto de estas técnicas ha sido probado usando datos reales recolectados mediante un sistema sonar de barrido mecánico de tipo *fan-shaped beam* durante algunas pruebas en el mar, y los resultados obtenidos se han comparado con aquellos producidos originalmente por tal sistema sonar.

Las imágenes producidas por el sonar de tipo *pencil-beam* (también conocidos como sonar perfilador), son los perfiles exteriores de las escenas barridas⁶. En particular, los datos analizados en esta tesis han sido recogidos con un sistema

perfilador compuesto por dos sensores sonar separados, que barren una escena dada desde dos puntos de vista diferentes puestos a lo largo de una línea de base común. Los dos barridos se sobreponen parcialmente y los dos perfiles producidos por los sensores sonar pueden ser examinados distintamente o en modo mezclado, con el afán de alargar la extensión de la región perfilada. Para esta clase de imágenes, intentamos automáticamente evaluar la presencia de un objeto simple y localizarlo mediante la detección de su sección (conocida *a priori*). Para hacer esto, han sido desarrolladas dos técnicas diferentes basadas en la estrategia del *template matching*. También en este caso, estas técnicas han sido probadas usando datos reales recolectados por un sistema sonar de tipo pencil-beam durante pruebas en el mar, obteniéndose resultados satisfactorios en términos de precisión en la localización de un objeto y en carga computacional.

II. MEJORAMIENTO DE IMAGENES

Los metodos de procesamiento de imágenes propuestos pueden ser divididos en dos grupos, dependiendo del diferente nivel de los datos que van a ser procesados. Una primera aproximación de mejoramiento de imagen ha sido desarrollado trabajando directamente sobre las señales de bajo nivel adquiridas por el sensor acustico en vez de hacerlo sobre las imágenes generadas, reduciendo así la carga computacional. Un manejo dinamico de los ecos recibidos ha sido llevado a cabo para explotar optimamente el rango de brillo disponible. Los datos de entrada fueron organizados en un rango de 0-255, donde 255 representa el retorno más fuerte, y fueron interpretados en una escala lineal. Los valores de entrada más bajos (L) y más altos (H) han sido calculados imagen por imagen. El cálculo de H ha sido establecido promediando el 1% de los valores de entrada más altos. Esto permitió obtener un valor aislado insignificante. Los valores de entrada menores que L han sido puestos a 0, los valores de entrada mayores que H fueron puestos a 255. Los valores de entrada contenidos entre L y H han sido estrechados en un rango entre 0-255 siguiendo una función de mapeo expresada por (1):

$$\text{output} = 255 \cdot \left(\frac{\text{input} - L}{H - L} \right)^\gamma \quad (1)$$

donde γ es un parámetro positivo real, input es el dato de entrada y output es el de salida.

Una técnica de interpolación, trabajando con los valores de brillo optimizados, ha sido hecha basada en una media pesada de las muestras acústicas vecinas. Esta operación ha sido llevada a cabo en el mismo sistema de coordenadas polares del sonar, permitiendo así obtener imágenes con un aspecto suavizado y preciso.

La aplicación conjunta de la técnica de interpolación y la ley optimizada de asignación del brillo, han permitido mejorar la calidad de la imagen, proveendo así una herramienta simple y efectiva para crear imágenes acústicas precisas, donde los objetos o detalles de la escena son limpios y bien refinados, y la comprensión humana de la escena, así como las aplicaciones como detección automática de objetos puede ser hecha fácilmente.

Una segunda aproximación para el mejoramiento de imágenes ha sido desarrollada, dirigida principalmente a la reducción speckle y al mejoramiento del contraste. Los filtros adaptivos speckle se han aplicado a las imágenes generadas tomando ventanas deslizantes de tamaño apropiado y calculando la información estadística del valor de todos los píxeles, tales como la media local y la varianza local. El valor de salida del píxel central depende de la información estadística. En el filtro de Frost, el valor de salida del píxel central de la ventana puede ser computado como sigue:

$$R_{IJ} = \frac{\sum_{i=I-N_1}^{I+N_1} \sum_{j=J-N_1}^{J+N_1} (z_{ij} \cdot m_{IJ})}{\sum_{i=I-N_1}^{I+N_1} \sum_{j=J-N_1}^{J+N_1} m_{IJ}} \quad (2)$$

donde el tamaño de la ventana es igual a $2 \cdot N_1 + 1 \times 2 \cdot N_1 + 1$. z_{ij} es el valor de cada píxel en la ventana y m_{IJ} es el peso para cada píxel.

$$m_{IJ} = e^{-A \cdot T_{IJ}} \quad (3)$$

donde T_{IJ} es el valor absoluto de la distancia del píxel desde el píxel central hasta sus vecinos en la ventana, y

$$A = D \cdot \left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^2 \quad (4)$$

donde σ y μ son la desviación estándar y la media dentro de la ventana, respectivamente, y D es un factor exponencial damping.

Finalmente, una técnica recientemente propuesta para aplicaciones ópticas convencionales⁸ fue aplicada tentativamente para un mejoramiento refinado del contraste. Esta combina la ventaja de las aproximaciones globales, tales como Ecuilibración del Histograma⁹, y aproximaciones locales como la Ecuilibración Adaptiva del histograma^{10,11}, y se basa en la así llamada distribución de pares de intensidad. Los resultados obtenidos son muy satisfactorios tanto desde el punto de vista de la calidad del mejoramiento y del costo computacional.

III. DETECCIÓN DE OBJETOS

Como se estableció previamente, han sido desarrolladas dos diferentes técnicas que permiten la detección de un objeto simple presente en la región que muestra la imagen, en base a la información provista por un sistema perfilador de tipo *dual-head*. El sistema perfilador ha sido configurado para procesar el primer eco retornado que ha sido medido sobre un nivel de umbral de detección. La única información retornada por los sensores sonar es el tiempo de viaje junto con los ángulos de incidencia del haz. Esta es la única información requerida para dibujar un punto Cartesiano en la superficie de la pantalla.

El primer método propuesto aquí trabaja directamente con la información retornada por el sistema perfilador dual head., sin separar la información de cada sensor sonar. Se ha desarrollado una estrategia de *template-matching* explotando la información conocida *a priori* acerca de las características geométricas del objeto que va a ser detectado. La técnica de *template-matching* involucra la traslación de la plantilla (template) a cada posición posible a lo largo del perfil y la evaluación de una medición de la coincidencia entre la plantilla y el perfil en dicha posición. En este trabajo ha sido tomada en cuenta una medición de similitud basada en el error mínimo cuadrático.

El segundo método propuesto aquí explota los datos del sistema de coordenadas polares nativo del sensor sonar, proveendo así de una aproximación original y *ad-hoc* para este problema. Se basa en la detección de las discontinuidades en rango entre haces adyacentes del transductor, dentro de la información retornada por cada sensor sonar, separadamente. Cada punto de discontinuidad relacionado con un sensor sonar se compara entonces con cada punto de discontinuidad relacionado con la otra. Un requerimiento apropiado en el dominio Cartesiano tiene que ser satisfecho con el afán de clasificar los pares de discontinuidad como una posible localización del objeto. Puede ser encontrado un número posible de soluciones. Con el objetivo de discriminar entre las posibles localizaciones, una aproximación de tipo *template matching* ha sido adoptada. En este caso, la plantilla fue posicionada en cada localización potencial y se ha debido establecer una medición de similitud para tomar en cuenta también las variaciones de la curvatura. Es valioso notar que, a diferencia del primer método, en este caso puede ocurrir la sobreposición parcial entre los dos barridos.

Se han obtenido resultados adecuados en términos de precisión en la localización del objeto y en carga computacional. Los requerimientos de tiempo real pueden ser satisfechos usando un computador personal común.

IV. RESULTADOS

La gran cantidad de datos recolectados durante las pruebas en el mar mencionadas anteriormente nos permitieron evaluar el potencial de los métodos propuestos para el mejoramiento de imágenes y la detección automática de objetos.

En lo que respecta al sistema sonar de tipo *fan-shaped-beam*, una imagen producida por tal sonar operando a una frecuencia de 325 Khz. se muestra en la Figura 1(a). El ancho del barrido es igual a 90° y el ángulo de paso se ha fijado en 0.9° . El rango máximo es igual a 10 metros. Para cada ángulo de paso, el sonar *fan-shaped-beam* envía un estrecho haz vertical de 20° para barrer la región de interés. La imagen representa una estructura "estrella-triángulo", de alrededor de 3 metros de altura, posada en el fondo marino, con el triángulo puesto horizontalmente. Las Figura 1(b) y 1 (c) muestran las imágenes generadas partiendo de los datos de bajo nivel recolectados por el sonar y aplicando todas las técnicas de mejoramiento de imágenes arriba descritas. En particular, la ley de asignación dinámica del píxel ha sido empleada con el parámetro γ puesto a 1.7 y la reducción speckle se estableció aplicando una ventana deslizante de 3×3 , mientras que la diferencia entre las imágenes (b) y (c) provienen de la elección de los parámetros usados en el método desarrollado para mejoramiento de imágenes (que depende de 4 parámetros). Comparando las imágenes, uno puede ver satisfactoriamente la reducción del ruido y el mejoramiento del contraste que provee un aspecto más exacto del objeto y detalles más precisos de la escena, así como se preserva la información útil como la sombra acústica presente en la imagen. La aplicación conjunta

del método de interpolación y la ley de asignación de brillo optimizada, que actúan en las señales de bajo nivel y trabajan en el mismo sistema de coordenadas polares del sistema sonar, da a la imagen un aspecto más suavizado si se compara con la imagen producida originalmente por el sistema.

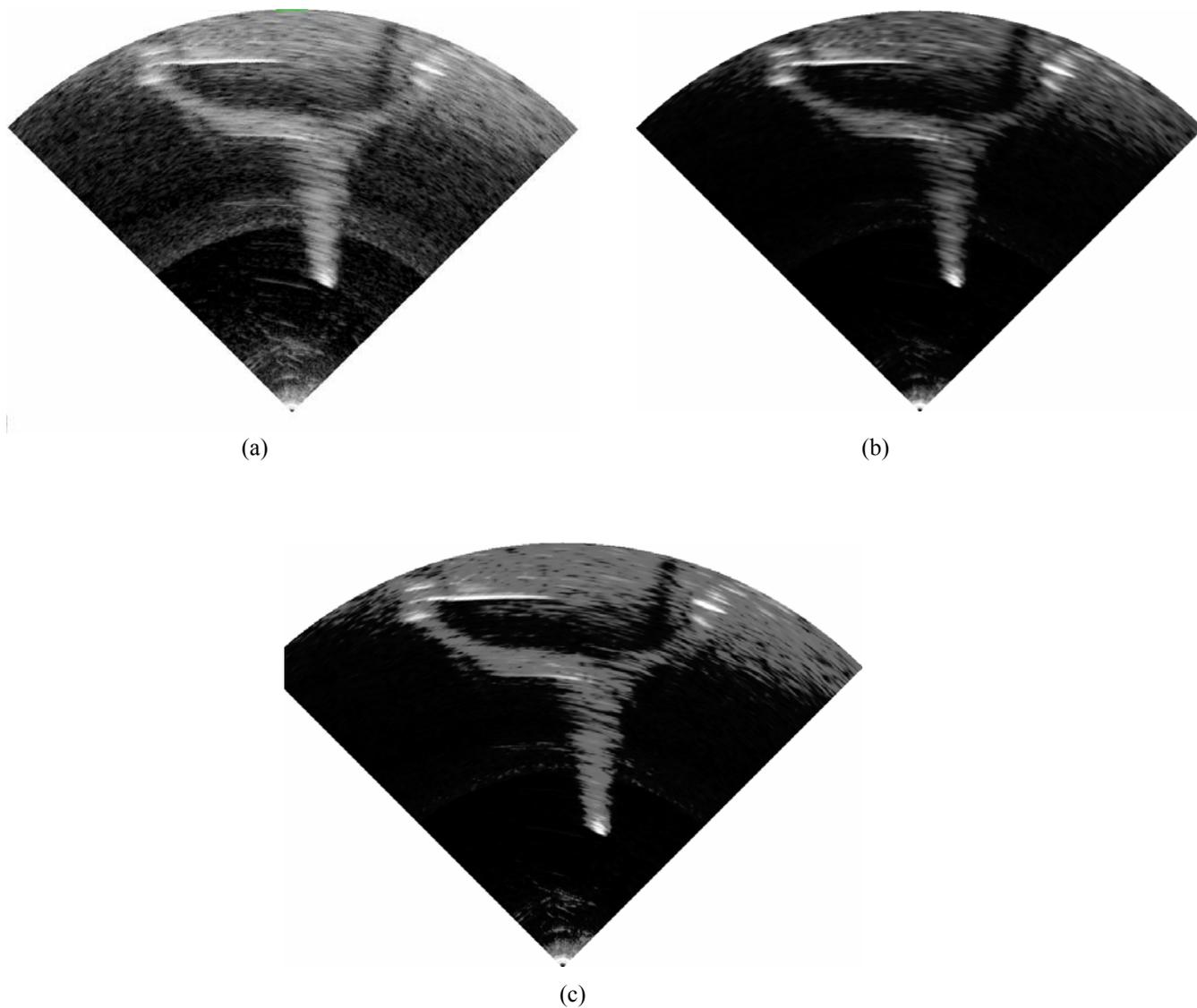


Figura 1. Imágenes acústicas generadas usando datos reales obtenidos con un sistema sonar *fan-shaped beam*. (a) Imagen original producida por el sistema sonar. (b) y (c) Imágenes probadas generadas aplicando los métodos de mejoramiento de imágenes propuestos

Para los sistemas *pencil-beam*, algunos resultados obtenidos aplicando el método novel para detección automática de objetos aquí propuesto se muestran en la Figura 2. Los datos experimentales se refieren a escenas submarinas que contienen una tubería posada en el fondo marino. El diámetro de la tubería es conocido y es igual a 0.54 metros. El sistema perfilador *dual head* ha sido configurado para trabajar a la frecuencia de operación de 1.1 MHz. Los dos barridos se superponen parcialmente. El ancho del barrido de cada sensor sonar es de 169.2° (Fig. 2(a)) y 162° (Fig. 2(b)). El ángulo de paso se ha fijado a 0.9° . Para cada ángulo de paso, los sensores sonar (también referidos como *master* y *slave*) envían un estrecho haz cónico de 1° hacia el fondo marino, alternadamente. En la Fig. 2, el perfil en verde se refiere al sensor *master* y el perfil en rojo al *slave*. Un círculo blanco con el mismo diámetro que el de la tubería es dibujado automáticamente en el lugar donde debería estar ésta. Los resultados mostrados en la Fig. 2 prueban el alto rendimiento del método propuesto.

Resultados similares en términos de precisión en la localización del objeto y carga computacional han sido también alcanzados mediante el uso de la técnica basada en el *template-matching*.



Figura 2. Detección de una tubería posada en el fondo marino usando el nuevo método propuesto para detección automática de objetos

V. CONCLUSIONES

En esta tesis, han sido presentados algunos métodos eficientes para el mejoramiento de imágenes acústicas y detección automática de objetos. El potencial de las técnicas propuestas ha sido evaluado en una clase específica de datos reales recolectados durante diferentes pruebas en el mar. El objetivo es el de incrementar la potencialidad de los sistemas sonar de barrido mecánico de tipo *fan-shaped-beam* y *pencil-beam* empleados durante operaciones submarinas.

Para los sistemas *fan-shaped-beam* han sido desarrollados y evaluados un conjunto de métodos dirigidos a incrementar la calidad visual de las imágenes generadas. Para este tipo de imágenes se ha desarrollado una mezcla de técnicas de procesamiento *ad-hoc* y convencionales. Una primera aproximación de mejoramiento de imagen se ha implementado trabajando directamente en las señales de bajo nivel adquiridas por el sensor acústico: se ha llevado a cabo un manejo dinámico de los ecos recibidos, imagen por imagen, para explotar óptimamente el rango de brillo disponible y se ha desarrollado un procedimiento de *scan-conversion* incluyendo la etapa de interpolación. La aplicación conjunta del método de interpolación y de la ley de asignación de brillo optimizada ha permitido mejorar la calidad de la imagen, proveendo así de una herramienta simple y efectiva para crear imágenes acústicas particularmente refinadas. Ha sido también propuesta una segunda aproximación de mejoramiento de imágenes que trabaja sobre las imágenes generadas y ha sido apuntada principalmente a la reducción del ruido speckle y al mejoramiento del contraste. Una técnica adaptativa para reducción speckle, basada en el filtro de Frost, fue presentada y un método de mejoramiento del contraste, recientemente propuesto para aplicaciones ópticas convencionales, ha sido aplicado. Se obtuvieron resultados satisfactorios en términos de mejoramiento de la calidad de la imagen y en carga computacional. Los resultados obtenidos fueron comparados con los producidos realmente por el sistema sonar.

Con respecto al sistema sonar *pencil-beam*, han sido propuestas dos técnicas diferentes que permiten la detección automática de un objeto simple presentado en la región de la imagen. En particular, uno de estos métodos es novedoso y ha sido desarrollado *ad-hoc* para explotar ventajosamente la organización específica de los datos que caracteriza el sistema sonar *pencil-beam*. Se han obtenido resultados satisfactorios en términos de precisión en la localización del objeto y en carga computacional. Los requerimientos de tiempo real pueden ser satisfechos fácilmente mediante el uso de un computador personal.

REFERENCIAS

1. V. Ayala, "Mejoramiento de Imágenes Sonar Obtenidas Mediante Barrido Mecánico" (Tesis, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2006).
2. V. Murino y A. Trucco, "Three-Dimensional Image Generation and Processing in Underwater Acoustic Vision," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 88, Diciembre 2000, pp. 1903-1946.
3. K. M. Houston, "Three-dimensional acoustical imaging using micromechanical hydrophones," en *Proc. OCEANS'95 MTS/IEEE*, San Diego, CA, Octubre 1995, pp. 1174-1182.
4. L. Henriksen, "Real-time underwater object detection based on an electrically scanned high-resolution sonar," *Proc. IEEE 1994 Symp. Autonomous Underwater Vehicle Technology*, Cambridge, MA, Julio 1994.
5. D. Sauter y L. Parson, "Spatial filtering for speckle reduction, contrast enhancement, and texture analysis of GLORIA images," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 19, no. 4, Octubre 1994, pp. 563-576.

6. Imagenex Technology Corp., "Sonar Theory and Applications. Excerpt from Imagenex Model 855 Color Imaging Sonar User's Manual," http://www.imagenex.com/sonar_theory.pdf.
7. V.S. Frost, J.A. Stiles, K.S. Shanmugan, y J.C. Holtzman, "A model for radar images and its application to adaptive filtering of multiplicative noise", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-4(2), p. 157-166, 1982.
8. T-C. Jen, B. Hsieh, y S-J. Wang, "Image contrast enhancement based on intensity-pair distribution, " *IEEE Int. Conf. On Image Processing*, Genova, Italia Septiembre 2005, pp. 913-916.
9. R. C. Gonzales y R. E. Woods, *Digital image processing*, Addison-Wesley, 2002.
10. J. Y. Kim, L. S. Kim, y S. H. Hwang, "An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 11, Publicacion 4, Abril 2001, pp. 475-484.
11. T. K. Kim, J. K. Paik, y B. S. Kang, "Contrast enhancement system using spatially adaptive histogram equalization with temporal filtering," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 44, Publicacion 1, Febrero 1998, pp. 82-87.