

Navegación de un Robot Móvil por Estereovisión¹

Mobile Robot Navigation by Stereovision

Andrés Felipe Suárez Sánchez

Ingeniero Electrónico

Universidad del Valle

anfesusa@gmail.com

Humberto Loaiza Correa

PhD en Robótica y Visión Artificial

Profesor Titular, Escuela Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Codirector Grupo PSI

Universidad del Valle

humberto.loaiza@correounivalle.edu.co

Recibido Mayo 09 de 2011 – Aceptado Mayo 30 de 2012

RESUMEN

En el presente artículo se presenta el diseño e implementación de un sistema de estereovisión de bajo costo para ser usado en robots móviles, el cual permite estimar la distancia a la que se encuentran los objetos presentes en su campo de visión. La localización de estos se logra por medio de una abstracción de un sensor estereoscópico de visión a un sensor tipo sonar, con el cual se logra reducir la información estéreo a lecturas coplanares de distancia como si fuera un sonar.

El sistema de visión se empleó para realizar la navegación de un robot móvil dentro de un ambiente estructurado empleando las técnicas de

¹ Producto derivado del proyecto de investigación "NAVEGACIÓN DE UN ROBOT MÓVIL EN UN AMBIENTE ESTRUCTURADO POR VISIÓN ESTEREOSCÓPICA". Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico. Universidad del Valle (Cali). Directores: PhD Humberto Loaiza Correa; Ing. MSc. Nini Juliana Vélez.

planeación de trayectoria reactiva y por campos de potencial. El sistema de estereovisión implementado mostró un error promedio de 5.34 cm en la estimación de distancias, siendo probado como sensor principal en el robot Pioneer 3DX en diferentes ambientes estructurados y bajo las dos estrategias de navegación anteriormente mencionadas.

Palabras clave: estereovisión, mapa de disparidad, navegación de robots móviles, reactiva, campos de potencial.

ABSTRACT

This paper presents the design and implementation of a low cost stereovision system for being used in mobile robots, which can estimate the distance at which objects are present in its field of vision. The location is achieved by means of an abstraction of a stereoscopic vision sensor to a sensor ring type, which will reduce the stereo information to coplanar distance readings as if it was a sonar.

The vision system was used for navigating a mobile robot in a structured environment, using the techniques of reactive path planning and potential fields. The stereovision system implemented showed an average error of 5.34 cm in estimating distances, being tested as main sensor in the Pioneer 3DX robot in different environments under both structured and navigation strategies mentioned above.

Key words: stereovision, disparity map, mobile robots navigation, reactive, potential fields.

1. INTRODUCCIÓN

Para lograr que un robot móvil realice una navegación e interactúe en un entorno totalmente desconocido debe suministrársele la información necesaria del ambiente donde se encuentra. Para ello se dispone de diversos sistemas de percepción como los sensores de contacto, el arco de sonares y el láser entre otros. Sin embargo estos sistemas tienen debilidades tales como información limitada, ruido o alto costo.

Los sistemas de sensado por estereovisión son una buena herramienta para brindar información de una escena a un robot, por su cualidad de poder estimar la profundidad de un entorno, posibilitando la recreación tridimensional de una escena, lo que aumenta las posibilidades de lograr

una mejor navegación. Los sistemas de estereovisión traen consigo dos grandes problemas, *la correspondencia de imágenes estéreo y la reconstrucción 3D de la escena capturada* (Trucco, 1998), lo cual hace que sea un tema de constante trabajo e investigación. En lo que respecta a desarrollos que emplean la visión estereoscópica para la navegación de un robot móvil se encuentra el trabajo de *Cañas et Al* (Cañas, 2008), en el cual se presenta un algoritmo para fijar la vista del sensor a una zona de interés de la escena y realizar la reconstrucción 3D permitiendo a un robot móvil navegar autónomamente. En el trabajo de *Kahora et al* (Kahora, 2009) se propone un método que genera un mapa de celdas ocupadas basado en la información proporcionada por el sistema de estereovisión que detecta y sigue el movimiento de objetos. El trabajo de *Viejo & Carloza* (Viejo, 2004) presenta un método para realizar una reconstrucción 3D de un entorno por medio de la extracción de características obtenidas por un sensor de estereovisión. El trabajo de *Usai & Di Giamberardino* (Usai, 2006) recrea un mapa elevado de la escena utilizando la información de un sensor de estereovisión para la navegación de un robot.

De acuerdo con la literatura existente, puede considerarse que según el procedimiento de reconstrucción de profundidad, las técnicas se dividen en dos: aquellas que recuperan las coordenadas 3D y aquellas que sólo calculan la profundidad. Estas últimas se denominan sonares de largo alcance (SLA). Este tipo de técnica se encuentra en el trabajo pionero de *Murray & Little* (Murray, 1998), donde a partir de la imagen de disparidad se obtiene un vector de sonares de tamaño del ancho de la imagen de disparidad, en el cual el valor de profundidad de cada posición del vector se calcula tomando el valor máximo de disparidad de cada columna de la imagen. Otro trabajo relacionado con este método, es el de *Castillo & Saéz* (Castillo, 2003) donde se realiza una mejora al desarrollado por *Murray & Little* (Murray, 1998), calculando la distancia a partir del valor de mayor frecuencia en cada una de las columnas de la imagen de disparidad, eliminando así lo que ellos denominan un error estadístico al tomar el máximo de un conjunto.

El trabajo que se describe en el presente texto, sigue el enfoque de SLA a partir de la implementación de un sensor de estereovisión de bajo costo desarrollado con cámaras tipo Webcam. El sensor se empleó para lograr la navegación de un robot móvil en diferentes entornos estructurados empleando una técnica de navegación reactiva y otra deliberativa basada en campos de potencial.

Con el sensor estereoscópico se logró realizar el posicionamiento de objetos en un rango de 60 a 240 cm con un error promedio de 5.34 cm. Con los algoritmos de navegación se logró que el robot se desplazara en el interior de diversos escenarios creados, un laboratorio y un pasillo.

En la sección dos se presenta la descripción del hardware y software empleados para el desarrollo de este trabajo; la sección tres presenta el método utilizado para realizar la reducción de la información del sensor de estereovisión a un sensor sonar de largo alcance (SLA) mediante técnicas de procesamiento de imágenes y las técnicas de navegación implementadas para el robot; la sección cuatro describe las pruebas y resultados para validar la navegación del robot con estereovisión. Finalmente en la sección cinco se presentan las observaciones y conclusiones del trabajo realizado y las perspectivas de otros relacionados con este eje temático.

La investigación realizada confirma que los sensores basados en estereovisión pueden ser utilizados en robots móviles para aplicaciones de navegación, logrando extraer la misma información que los sensores tipo sonar. Igualmente abre las puertas a las cámaras tipo web para que puedan ser empleadas en futuras aplicaciones e investigaciones como un sensor adicional, en la realización de una fusión sensorial con sensores como el láser y el sonar entre otros, como lo muestra el trabajo de Ascensio (Ascensio 2001), el cual logra realizar la navegación de un robot basado en fusión de información multisensorial, en el que se utiliza un sistema de visión para detectar las características relevantes del entorno para ubicar el punto guía inicial. A la vez usa el sensor laser para la navegación reactiva. Chica & Et all (Chica, 2009) también fusionan la información sensorial de IR y una cámara con un algoritmo de lógica difusa.

2. DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA DE EXPERIMENTACIÓN

El sistema de navegación por estereovisión está conformado por tres componentes hardware: el sensor de estereovisión, la unidad de procesamiento y la plataforma robótica Pioneer 3DX. En la Figura 1 se ilustran los principales componentes del robot guiado por estereovisión.

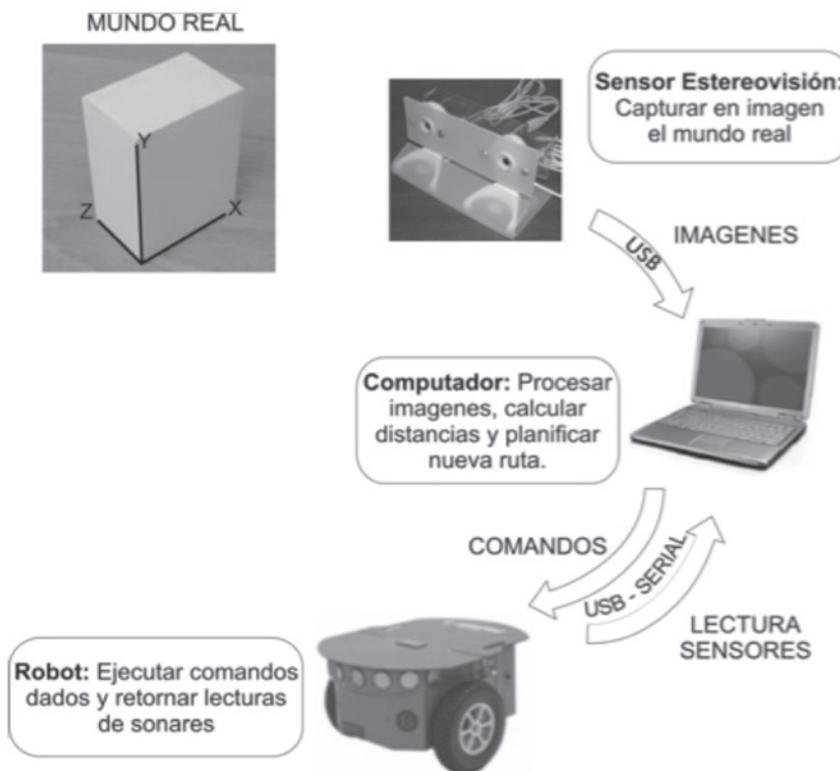


Figura 1. Sistema de navegación por estereovisión

El sensor estereoscópico se implementó con dos cámaras Webcam *Creative Live! Vista* del tipo VGA ancladas en un soporte de acrílico de 3mm y separadas 10,5 cm entre sus ejes ópticos; la unidad de procesamiento es un computador portátil con un procesador doble núcleo a 1.5 Ghz y memoria RAM de 1.5 GB; la plataforma robótica es el robot móvil Pioneer 3DX [Mobile robots], el cual cuenta con arco frontal de ocho sensores de ultrasonido que cubren 180° del mismo.

La aplicación desarrollada para el sistema de navegación por estereovisión corre bajo el SO Linux de 32 bits, igualmente emplea dos librerías especializadas OpenCV [OpenCv] y Player/Stage [Player/Stage]. La primera de ellas de libre distribución desarrollada en lenguaje C por la empresa Intel. Esta librería es multiplataforma y en ella se pueden encontrar una gran cantidad de algoritmos para aplicaciones de visión artificial; con ella se han llevado a cabo trabajos interesantes como el desarrollo de una interfaz teleoperada para una pinza robótica con sensores estereoscópicos

Leeper (Leeper, 2010) y un algoritmo de reconocimiento de objetos escalable llamado “Binarized Gradient Grid Pyramid” (Muja, 2010).

Player es un servidor de red empleado para el control de robots; ofrece una interfaz transparente para los sensores y actuadores del robot sobre la red IP por medio de un socket TCP, este servidor es comúnmente utilizado en investigaciones de robótica por su flexibilidad, simplicidad y versatilidad, característica que se resalta en los trabajos de *Collet* (Collet, 2005) y *Gerkey* (Gerkey, 2003).

3. METODOLOGÍA

En este proceso se abordaron dos problemas independientemente al inicio del proyecto, para finalmente fusionar los dos: la estereovisión y la navegación de un robot.

El abordaje del problema de estereovisión se realizó en dos etapas: calibración del sensor estereoscópico y recuperación de la profundidad mediante la estrategia SLA.

3.1. Calibración

El proceso de calibración consiste en obtener los parámetros intrínsecos y extrínsecos del par estereoscópico (Faugeras, 1993). Los parámetros permiten obtener las matrices de remapeo para realizar la corrección de la distorsión tangencial y radial producida por la lente de la cámara y encontrar las matrices que nos permiten realizar el alineamiento de las imágenes estéreo. Para este proceso se utilizó el algoritmo de Zhang (Zhang, 1998), implementado en la librería de OpenCV.

3.2. Recuperación de profundidad

El proceso de obtención de profundidad a partir de un par de imágenes estereoscópicas se ilustra en la Figura 2. Este proceso es seguido en los trabajos de Pajares (Pajares, 2002) y Mattoccia (Mattoccia, 2010).

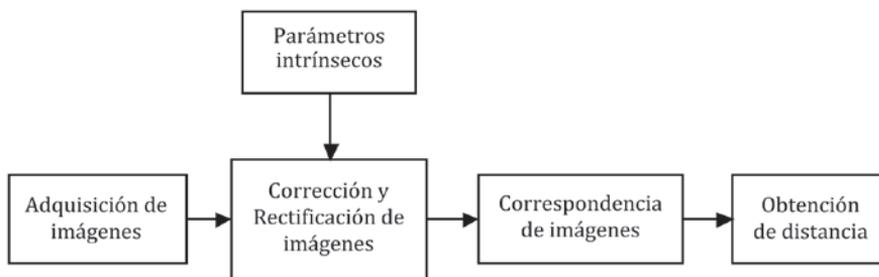


Figura 2. Diagrama de bosques implementado para el proceso de esterovisión

Las imágenes estéreo de la escena se adquirieron de forma secuencial debido a que los puertos USB no pudieron ser sincronizados por software. La corrección y rectificación de imágenes se realiza por medio del algoritmo de Bouget (Bouguet), el cual usa los parámetros de la matriz de rotación y translación obtenidos en el proceso de calibración. Para el proceso de correspondencia de imágenes se empleó el algoritmo de *Stan Birchfield* (Birchfield, 1999), basado en programación dinámica. Gran parte del software utilizado está soportado por la librería de OpenCV. En el bloque de *obtención de distancia* se implementó un algoritmo que permite obtener un vector de distancias coplanares de la imagen de disparidad, basado en los trabajos reportados en (Murray, 1998) y (Castillo, 2003).

En la Figura 3 se ilustra con más detalle el procedimiento desarrollado en el bloque de obtención de distancia, en este la entrada es la imagen de disparidad y su salida es una matriz de distancias. La matriz de distancias posee un tamaño de 10×3 , donde la primera columna lista los identificadores (id) de cada sección vertical o región de interés; la segunda columna agrupa los datos de distancia (Z), calculados para cada una de las regiones y la última columna reúne la posición angular (α) del centro de cada región de la imagen. En resumen este bloque abstrae la información de la imagen a información de distancia y posicionamiento angular de los objetos.

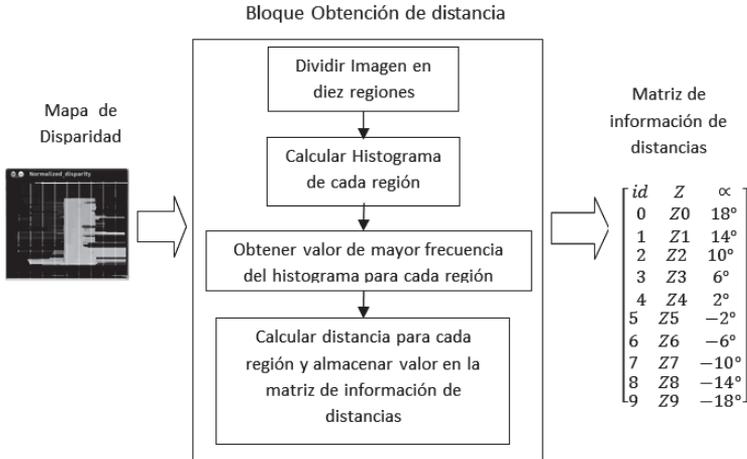


Figura 3. Diagrama de bosques para el proceso de obtención de distancia

En el proceso, la imagen de disparidad se divide en diez regiones verticales correspondientes a las zonas de interés de la escena. Esta forma de fraccionamiento es de cierta forma similar al comportamiento de un anillo de sonares (ver Figura 4).

Obtenidas las regiones del mapa de disparidad se procede a calcular el histograma de cada una de estas con el fin de obtener el valor de disparidad más representativo de cada región, representado por el valor de mayores repeticiones, posteriormente se procede a calcular el valor de distancia para finalmente generar la matriz de distancias.

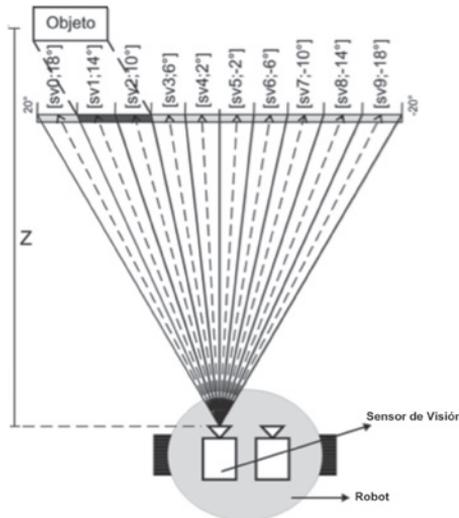


Figura 4. Ilustración del funcionamiento del sensor estereoscópico

4. NAVEGACIÓN

Para la navegación del robot móvil se implementaron dos estrategias de navegación de tipo local, una netamente reactiva y la otra por campos de potencial.

El algoritmo de navegación netamente reactivo realiza una comparación del resultado de la sumatoria de los valores de distancias para la región izquierda y la región derecha de la imagen de disparidad. Con base en el resultado de la comparación se toma la decisión de girar hacia la izquierda o derecha para evadir un obstáculo presente en la trayectoria del robot.

El método de campos de potencial representa al agente móvil como una partícula bajo la influencia de un campo potencial artificial cuyas variaciones locales reflejan la estructura del espacio libre de obstáculos (Mora, 2004). El algoritmo implementado toma la información de la matriz de distancias del sensor de visión, de estos valores se calcula un vector de obstáculos con diez campos que contiene la información de los obstáculos que están dentro de la zona permitida, delimitada por una variable llamada distancia obstáculo, haciendo la magnitud del vector de obstáculos cero si el obstáculo se encuentra fuera de la zona permitida y uno si se encuentra dentro de la zona.

El valor del ángulo de orientación del obstáculo es igual al valor del ángulo de la región del sensor visión que lo detectó. Realizada la actualización del vector de obstáculos se calcula la sumatoria de cada uno de sus campos, con el fin de determinar el vector de repulsión $-F_r$ que generara una fuerza ficticia sobre el robot, el cual hará que cambie de ruta. Este vector resultante es sumado con el vector unitario F_a , que representa el atrayente del robot. Para nuestro caso el atrayente esta dado siempre hacia el frente del robot móvil con el fin de mantenerlo en un movimiento constante de avance, del resultado de esta operación se obtiene el vector resultante sobre el robot, que determinará el valor para la velocidad y el valor del ángulo de rotación que comandará al robot en su siguiente movimiento.

5. PRUEBAS Y EXPERIMENTOS

Con el fin de determinar el desempeño del sistema de navegación por estereovisión se realizaron dos sesiones de pruebas a saber:

- Medición de distancias
- Pruebas de navegación

Medición de distancias: esta prueba consistió en posicionar diversos objetos de forma geométrica y no geométrica en distancias aleatorias entre los 40 y 240 cm y comparar la medida real con la medición realizada por el sistema de estereovisión. El resultado de esta prueba se presenta la Figura 5, donde se grafica el promedio de los valores de distancia obtenidos respecto a la medición real. De la prueba de medición de distancias se estableció que el error promedio en la mediciones era de 5.34 cm y que generalmente se presentó por sobredimensionamiento, es decir, el sensor detectaba los objetos por encima de la distancia real a la que este se encontraba.

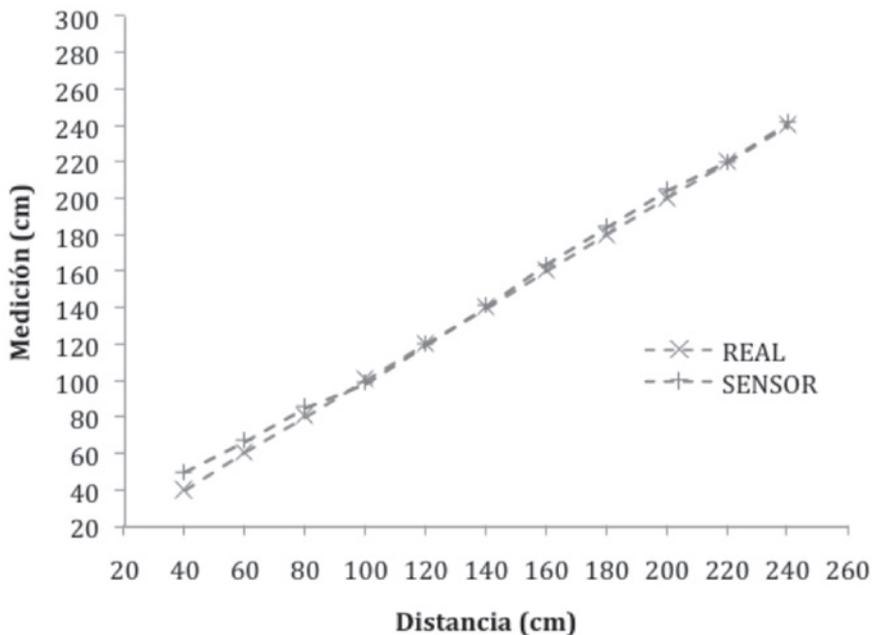


Figura 5 Comparación de las Gráficas de medición del sensor con respecto a la distancia real

Pruebas de navegación: Para la pruebas de navegación del robot se escogieron diversos lugares de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, entre los cuales se encuentra un espacio totalmente libre de objetos y se establecieron cuatro escenarios de prueba con obstáculos, el interior de un laboratorio, un pasillo y por

último un pasillo con cruce por puerta. Los lugares de prueba fueron tomados con todos sus elementos presentes, además se adicionaron por los menos dos obstáculos en estos lugares.

Para probar el algoritmo de navegación reactiva se escogió un espacio libre con el propósito de recrear cuatro escenarios en diferentes configuraciones. Se realizaron cuatro pruebas de navegación para cada escenario, para un total de 16 con el algoritmo, del cual se registró un 50% de pruebas exitosas en las que el agente logra evadir los obstáculos sin presentar colisiones.

Las pruebas para el algoritmo por campos de potencial se llevaron a cabo en el interior de un laboratorio, un pasillo y un cruce por puertas, igualmente se hicieron cuatro pruebas por lugar, para un total de 12; para este algoritmo se registró un 58% de éxito en la evasión de obstáculos.

En la Figura 6 se presenta una serie de imágenes, resultado del proceso de seguimiento de la trayectoria, aplicado posteriormente a los vídeos de las pruebas realizadas, con esto se visualiza la trayectoria seguida por el agente móvil en los diversos escenarios de prueba escogidos para el algoritmo de navegación netamente reactivo.

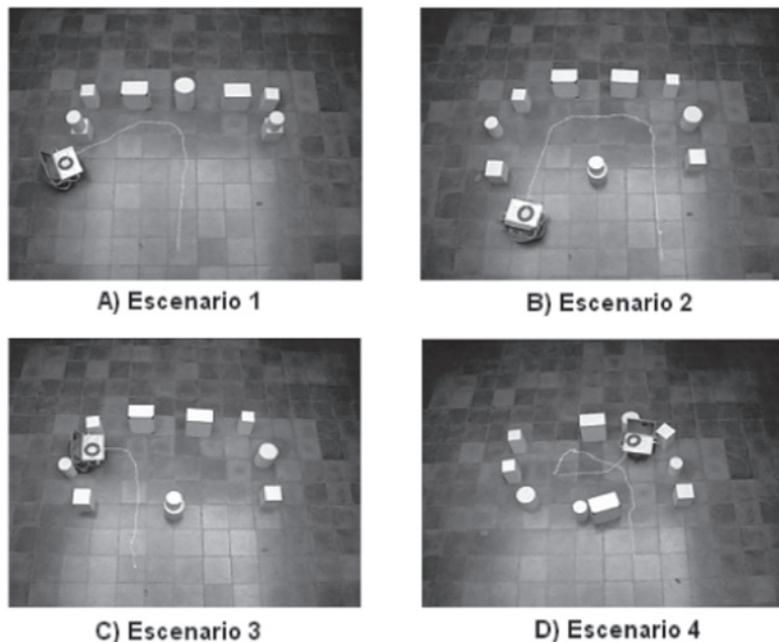


Figura 6. Trayectorias seguidas por el robot con el algoritmo netamente reactivo para diversos escenarios de prueba

En la Figura 7 se presenta igualmente una serie de imágenes donde se muestra la trayectoria seguida por el robot con el algoritmo de navegación por campos de potencial para una de las pruebas en el interior del laboratorio, en un pasillo y en un pasillo con un cruce por puerta.



A) Laboratorio



B) Pasillo



C) Cruce por puerta

Figura 7. Trayectorias seguidas por el robot con el algoritmo de campos de potencial para diversos lugares de prueba

6. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

- Como puede corroborarse, se desarrolló un sistema de visión estereoscópico que permite la navegación de un robot móvil autónomo en un ambiente estructurado desconocido, evitando colisiones.
- El error promedio de 5.04 cm presente en la medición por parte del sistema de estereovisión se considera aceptable y se puede sobrellevar en los algoritmos de navegación con un aumento en el rango permisible para la detección de los obstáculos. También se debe aclarar que el campo de acción del sistema de estereovisión es 60 cm a 240 cm y tiene un campo de visión de 40° lo cual limita el sensado del entono.

- La velocidad de respuesta del robot móvil está limitada por el tiempo de adquisición de las imágenes, su resolución espacial y la velocidad del procesador. Se encontró que la tasa promedio de procesamiento de pares estereoscópicos de imágenes es de aproximadamente 6 pares/segundo con un tiempo de 180 ms por par.
- Los algoritmos de navegación implementados permitieron que el robot móvil pudiera evadir obstáculos presentes en su trayectoria y desplazarse dentro de un entorno desconocido por medio de la información brindada por el sensor estereoscópico. Comparando el desempeño de los algoritmos, la navegación por campos de potencial presentó mayor éxito que la realizada por el algoritmo netamente reactivo, con un porcentaje de 58%.
- Se verificó que el enfoque de reducción de la información 3D de un sistema de estéreo a lecturas coplanares es una buena opción para tratar el problema de navegación con sistemas de estereovisión, permitiendo así la implementación de dos algoritmos de navegación local como el reactivo y el de campos de potencial comúnmente pensados para sensores de tipo sonar.
- Los trabajos futuros están orientados a la fusión sensorial entre un arco de sonares y un sistema de estereovisión; de esta manera se podría corregir y corroborar la información arrojada por el sistema estéreo. Igualmente se podría pensar en la implementación de otras estrategias de navegación y realizar tareas más complejas como la construcción de un mapa del entorno y una la localización global simultáneamente.

BIBLIOGRAFÍA

- Birchfield, Stand; & Tomassi Carlo. (1999). **Depth Discontinuities by Pixel-to-Pixel Stereo**. International Journal of Computer Vision 35(3), 269–293.
- Bradski, Gari; & Kaehler, Adrian. (2008). **Learning OpenCV Computer Vision with the OpenCV Library**. United States of America: O'Reilly.
- Cañas, José María., Leon, Olmo., Calvo, Roberto. (2008). **Reconstrucción 3D Visual Atentiva para la Navegación de un Robot Móvil**. IX Workshop en Agentes Físicos, Vigo, pp 205-212.

- Castillo, M. A., Saéz, J. M. (2003). **Modelo de Sonar de Largo Alcance Basado en Tecnología Estéreo**. 4th Workshop de Agentes Físicos.
- Chica, María T.; Pineda, Antonio L.; Esmeral Mario A. (2009). **Sistema de Navegación para Robots Móviles Utilizando Fusión Sensorial**. Con-Ciencias Tecnura, año 13 No. 25 segundo semestre de 2009 páginas 133 a 149.
- Collett, Toby H. J., MacDonald, Bruce A., Gerkey, Brian P. (2005). **“Player 2.0: Toward a Practical Robot Programming Framework”**. In Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA 2005), Sydney, Australia.
- Faugeras, Oliver. (1993). **Three-Dimensional Computer Vision: a Geometric Viewpoint**. MIT Press.
- Gerkey, Brian; Vaughan, Richard T; Howard, Andrew. (2003). **“The Player/Stage Project: Tools for Multi-Robot and Distributed Sensor Systems”**. In Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2003), pages 317-323, Coimbra, Portugal.
- Kahora, H., Suganuma, N. (2009). **Obstacle Detection based on Occupancy Grid Maps from Virtual Disparity Image**. (2009). ICROS-SICE International Joint Conference 2009.
- Mora, Marta C.; Ángel, Leopoldo.; Montserrat, Josep. (2004). **Sistema de Navegación de Robots Móviles en Entornos Industriales**. XXV Jornada de Automática, Ciudad Real.
- Murray, D., Little, J. (1988). **Using Real-Time Stereo Vision for Mobile Robot Navigation. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’98)**. Santa Barbara CA.
- Pajares, Gonzalo., De la Cruz, Jesus. (2002). **Visión por Computador: Imágenes Digitales y Aplicaciones**. México: Alfaomega Grupo Editor.
- Trucco, Emanuele., Verri, Alessandro. (1998). **Introductory Techniques for 3-D Computer Vision**. New Jersey: Prentice Hall.
- Usai, A., Di Giamberrdino, P. (2006). **Autonomous Robot Motion in an Unknown Environment by local 3D Elevation Map Construction**. Integrated Computer-Aided Engineering 13. Pp 663-275.

- Viejo, Diego. Carloza, Miguel. (2004). **Construcción de Mapas 3D y Extracción de Primitivas Geométricas del Entorno**. 5th Workshop de Agentes Físicos.

WEBGRAFÍA

- Asensio, José Ramón. (2001). **Navegación de Robots Móviles en Entornos Interiores basada en el Reconocimiento de Características Relevantes**. Recuperado en marzo 2011, de [<http://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=11163>]
- Bouguet, Jean-Yves. **Camera Calibration Toolbox for Matlab**. Recuperado en marzo de 2011, de [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/].
- Leeper, Adam. (2010). **Gripper Stereo and Assisted Teleoperation**. Recuperado en marzo de 2011, de [<http://www.willowgarage.com/blog/2010/12/20/gripper-stereo-and-assisted-teleoperation>].
- Mattocchia, Stefano. (2010). **Stereo Vision: Algorithms and Applications**. Recuperado en octubre de 2011 de [<http://www.vision.deis.unibo.it/smatt/>].
- Mobilerobots, **Referencia Robot Pioneer 3DX**. Recuperado en marzo de 2011, de [<http://www.mobilerobots.com/researchrobots/researchrobots/pioneer3dx.aspx>].
- Muja, Marius. (2010). **Scalable Object Recognition**. Recuperado en marzo de 2011 de, [<http://www.willowgarage.com/blog/2010/09/20/scalable-object-recognition>].
- OpenCV, página principal de la librería OpenCV. Recuperado en marzo de 2011, de [<http://opencv.willowgarage.com/wiki/>].
- Playe/Stage, página principal del servidor/simulador para robots Player/Stage. Recuperado en marzo de 2011, de [<http://playerstage.sourceforge.net/>].
- Zhang, Zhengyou. (1998). **A Flexible New Technique for Camera Calibration**. Recuperado en marzo de 2011, de [<http://research.microsoft.com/en-us/um/people/zhang/Papers/TR98-71.pdf>].