

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE PRUEBA PARA DESARROLLOS EN VISIÓN ARTIFICIAL

IMPLEMENTATION OF A TEST PROTOTYPE FOR ARTIFICIAL VISION DEVELOPMENTS



AUTOR

DAVID FERNÁNDEZ MC CANN
PhD
Universidad de Antioquia
Profesor
Departamento de Ingeniería
Electrónica
dsfernan@gmail.com
COLOMBIA

INSTITUCIÓN

Universidad de Antioquia
UdeA
Universidad
Calle 67 Número 53-108 Medellín
COLOMBIA

AUTOR

CARLOS ARTURO RENDÓN BETANCUR
Ingeniero Electrónico
Universidad de Antioquia
Investigador
Departamento de Ingeniería Electrónica
Grupo de Investigación GEPAR
carlosrendonb@gmail.com
COLOMBIA

INSTITUCIÓN

Universidad de Antioquia
UdeA
Universidad
Calle 67 Número 53-108 Medellín
COLOMBIA

Recepción: Junio 25 de 2009

Aceptación: Octubre 10 de 2009

Temática abarcada por el artículo: Nuevas herramientas y Tecnologías de Desarrollo de software

Tipo de Artículo: Artículo de Investigación Científico y Tecnológico

RESUMEN

En este artículo se muestra como puede ser implementado un sistema estereoscópico simple usando dos cámaras de televisión, el cual puede ser usado para realizar pruebas en el desarrollo de diferentes proyectos en visión artificial. El sistema implementado usa camaras fijas y segmentación por color para establecer la correspondencia entre las imágenes, mediante un algoritmo desarrollado en Matlab. La función básica del prototipo es estimar la distancia a la que se encuentran los objetos en un entorno. Con el fin de obtener un buen grado de precisión en la estimación de la distancia, se requiere una calibración adecuada de las cámaras, procedimiento que generalmente resulta bastante complejo. En éste artículo se simplifica la calibración bajo ciertos parámetros, con lo cual el modelo matemático se reduce a un problema de semejanza de triángulos.

PALABRAS CLAVES

Estimación de distancia
 Procesamiento de imágenes
 Segmentación por color
 Visión Artificial
 Visión estereoscópica
 Visión por computador

ABSTRACT

This paper shows how a simple stereoscopic system can be implemented using two TV cameras, system that may be used for testing in the development of different projects in computer vision. The implemented system uses fixed cameras and color segmentation to establish the correspondence between the images, using a MatLab developed algorithm. The basic function of the prototype is to estimate the distance at which the objects are in an environment. To get a good degree of accuracy in estimating the distance, it needs a proper calibration of the cameras, procedure which is generally quite complex. In this article the calibration is simplified under certain parameters, reducing the mathematical model to a problem of similarity of triangles.

KEYWORDS

Artificial vision
 Color segmentation
 Computer vision
 Distance estimation
 Estereoscopic vision
 Image processing

INTRODUCCIÓN

Muchos de los métodos de procesamiento digital de imágenes se limitan a obtener características en dos dimensiones de una escena, debido a que se basan en sistemas donde la información es capturada por una sola cámara. Esta metodología resulta insuficiente si se desea hacer reconocimiento de las características espaciales de la escena, tales como profundidad y volumen de los objetos presentes.

Con el fin de obtener información del entorno para ser usada por diferentes sistemas, existen diferentes técnicas que resultan apropiadas de acuerdo a las necesidades y al grado de precisión requerido en ciertas tareas.

Se mencionan aquí algunos de los métodos más usados para obtener información tridimensional del entorno incluyendo principalmente aquellos que utilizan visión estereoscópica, en los cuales se hace necesario

establecer la correspondencia entre los objetos de una imagen y otra, ya que ésta es la base para obtener la información tridimensional [1], [3], [9].

Usando una de las técnicas de visión estereoscópica, se desarrolló un proyecto de investigación mediante el cual se implementó un prototipo de aplicación donde el problema a resolver, fue hallar la distancia a la que se encuentra un punto específico del entorno observado por las cámaras. Si se requiere un alto grado de precisión en la estimación de la distancia, se debe hacer una buena calibración de las cámaras, para lo cual existen diferentes métodos [4], [5]; los cuales se hacen más complejos a medida que se agregan a las ecuaciones los diferentes tipos de distorsión generados por los lentes [8], [12]. Sin embargo, para el prototipo que se busca implementar aquí, no se requiere un alto grado de precisión, ya que el objetivo es desarrollar un sistema sencillo que permita estimar distancias de manera aceptable para ser usado aplicaciones de robótica móvil por ejemplo.

CONTENIDO DEL DOCUMENTO

Se iniciará hablando de los diferentes métodos de reconstrucción tridimensional, mencionando las principales técnicas usadas en visión estereoscópica. En la sección 2 se presenta el problema que se debe resolver desde el punto de vista matemático, al trabajar con cámaras fijas y en la sección 3 se describe el funcionamiento del prototipo implementado. Los resultados obtenidos experimentalmente con el prototipo se presentan en la sección 4 y finalmente, las conclusiones se muestran en la sección 5.

1. METODOS DE RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL

Entre los diferentes métodos usados comúnmente para obtener información tridimensional del entorno existen algunos que emplean sensores, los cuales resultan útiles cuando sólo se requiere una mínima cantidad de información de los objetos presentes alrededor sin mucho grado de detalle. Otras técnicas de captura de entorno determinan la forma de los objetos mediante el barrido de un haz de láser sobre éstos, proceso que es capturado por una cámara de video, la cual envía la información a un computador donde un algoritmo reconstruye el escenario tridimensional. Estos métodos generalmente no son muy precisos, ya que no toman ciertas características del objeto a estudiar y además no otorgan información de color, sombras o contrastes de la imagen.

Para implementar un sistema capaz de responder rápidamente a los cambios en el entorno y con cierto grado de precisión al mismo tiempo, resulta entonces

necesario construir sistemas que reconozcan el entorno en forma similar a como lo hacemos los seres humanos. Estos sistemas son los llamados sistemas de visión estereoscópica [3], en los que se utilizan dos cámaras que hacen el papel de los ojos en la visión humana y un computador que procesa la información obtenida por las cámaras tal como lo hace nuestro cerebro.

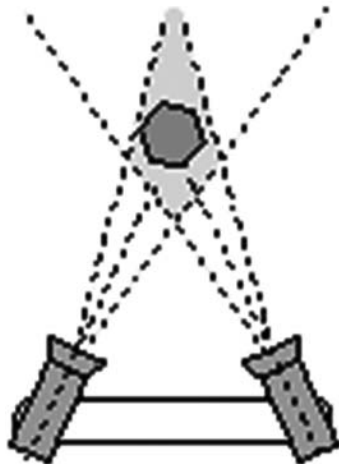
En los sistemas de visión artificial que usan estereoscopia principalmente se diferencian dos metodologías:

1.1 CÁMARAS MOVILES

En esta metodología cada una de las dos cámaras del sistema posee movimiento rotativo independiente, el cual les permite rotar sobre si mismas en un plano horizontal común, buscando que el objeto al cual se le desea conocer su distancia esté siempre en el centro de las imágenes. Así, la distancia a la que se encuentra un objeto, se determina conociendo el ángulo de rotación de cada cámara respecto a su posición inicial (Fig. 1).

De esta manera se tiene como ventaja un gran rango espacial de trabajo, pero puede resultar un método complejo en cuanto a la implementación de un sistema de rotación de las cámaras que garantice unos resultados confiables, ya que pequeños errores en el valor del ángulo, producirían grandes errores en el cálculo de las distancias.

FIGURA 1. Sistema de visión estereoscópica con rotación independiente para cada cámara



1.2 CÁMARAS FIJAS

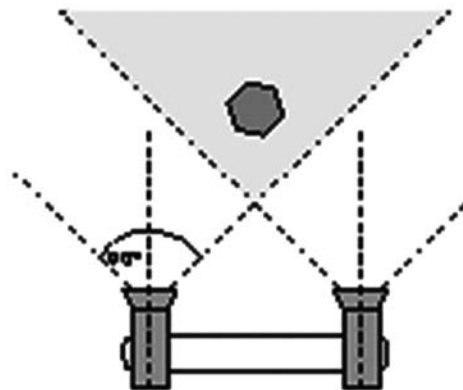
La estrategia que utiliza cámaras fijas se basa en que las cámaras están dispuestas a una distancia conocida y además están fijas una respecto a la otra, de manera tal que el par estereoscópico está acoplado (Fig. 2).

Cada cámara capturará la escena desde su punto de vista, de manera que los objetos aparecerán en diferentes posiciones de las dos imágenes [9]; Así, conociendo la desviación del objeto observado respecto al centro de cada imagen, la distancia focal de las cámaras y la separación entre ellas, es posible determinar la distancia a la que se encuentra dicho objeto con la ayuda de un procedimiento matemático.

Este método tiene la ventaja de no requerir un sistema de movimiento para las cámaras y su precisión depende de la correcta fijación de estas y de los cálculos matemáticos realizados en el algoritmo, con lo cual se descarga todo el trabajo del sistema en el procesamiento digital de las imágenes y en los algoritmos de cálculo.

Como desventaja, esta técnica requiere que las cámaras posean un amplio ángulo de visión, ya que de lo contrario, el área de cobertura total del sistema será muy limitada.

FIGURA 2. Sistema de visión estereoscópica con cámaras fijas



2. MODELO MATEMÁTICO

La correcta calibración de las cámaras es un aspecto importante en la visión artificial. Dependiendo del tipo de aplicación, existen diferentes requerimientos para la calibración de las cámaras. En aplicaciones de metrología, la precisión en la calibración es uno de los factores más importantes, pero en algunas aplicaciones de robótica, el proceso de calibración debe ser rápido y sencillo.

Se han desarrollado diversos métodos para la calibración de los sistemas estereoscópicos, algunos de ellos muy conocidos como la técnica propuesta por R. Tsai [11] y algunos muy complejos, ya que buscan caracterizar matemáticamente las distorsiones generadas por los lentes [4], [5], [8], [12].

Para muchas aplicaciones de visión artificial, como la inspección visual en robots, se asume que las cámaras están calibradas de antemano. La calibración es la estimación de un conjunto de parámetros que describen la manera en que se forma la imagen dentro de la cámara. Con dichos parámetros, una matriz de proyección de la perspectiva puede relacionar un punto M del espacio 3D con su proyección no distorsionada m en el plano imagen así:

$$\lambda m = K [RT]M$$

Donde λ es un factor de escala arbitrario, $m=[u,v]^T$ es la coordenada del punto en la imagen 2D, $M=[X,Y,Z]^T$ es la coordenada del punto en el espacio 3D, $[RT]$ son los parámetros extrínsecos y K los parámetros intrínsecos.

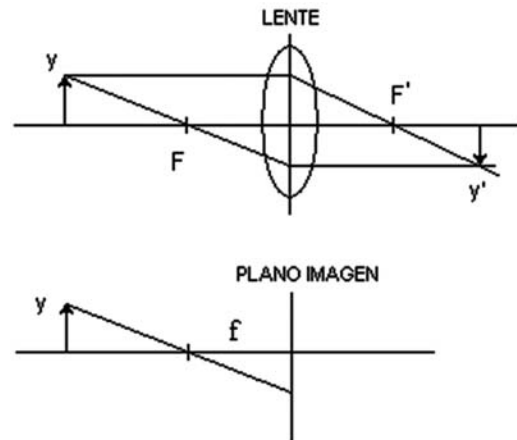
La anterior ecuación también puede ser expresada como:

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K[RT] \cdot \begin{bmatrix} X^w \\ Y^w \\ Z^w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X^c \\ Y^c \\ Z^c \end{bmatrix}$$

Donde la matriz K depende totalmente de 5 parámetros intrínsecos de la cámara $(\alpha, \gamma, \beta, u_0, v_0)$, con (α, β) siendo dos escalares en los dos ejes de la imagen. $[X^c, Y^c, Z^c]^T$ denota un punto en el frame de la cámara relacionado con su correspondiente punto $[X^w, Y^w, Z^w]^T$ en el espacio real, con $[RT]$ siendo la matriz de rotación y el vector de traslación.

Con el fin de simplificar los cálculos en aplicaciones donde no se requiere de una gran precisión en la estimación de la profundidad, se utiliza el modelo 'pin-hole' para las cámaras, con lo cual se está suponiendo que no existe distorsión en las imágenes, pudiendo así pasar del modelo de proyección según la geometría óptica, a un modelo simple donde se supone que la imagen siempre se forma en el plano imagen, el cual se ha establecido sobre el lente (Fig. 3).

FIGURA 3. De la geometría óptica al modelo 'pin-hole'

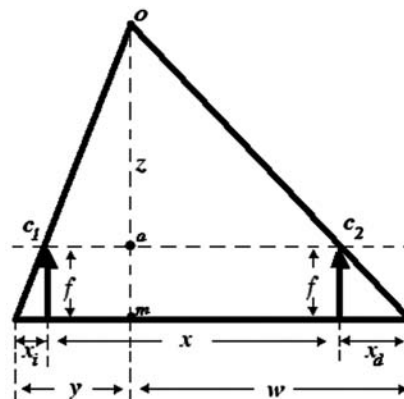


Este modelo también se conoce como 'Distortion-free', el cual aparece explicado en la primera parte de [12].

El método en el cual se basó el desarrollo del prototipo es el de cámaras fijas en paralelo apuntando siempre al frente. Gracias a esta posición fija, donde las cámaras no rotan y su separación es siempre constante y teniendo en cuenta los resultados de ciertas pruebas experimentales preliminares, se puede simplificar el modelo matemático, suponiendo que no existe distorsión de la imagen. De ésta manera, la distancia a la que se encuentra el objeto, se determina partiendo sólo de las diferencias entre la posición del objeto en la imagen derecha y la imagen izquierda correspondientes a cada una de las cámaras.

Las ecuaciones que se requieren para resolver este problema se obtienen mediante semejanza de triángulos, partiendo del siguiente análisis (Fig. 4):

FIGURA 4. Variables del modelo matemático.



En la anterior figura, $C1$ y $C2$ son las cámaras del sistema, ' X ' es la separación entre ellas, ' f ' es la distancia focal de las cámaras, ' m ' es el punto de proyección del objeto ' O ' sobre el plano de la imagen, X_i es la desviación del objeto en la imagen de la cámara izquierda, X_d es la desviación del objeto en la imagen de la cámara derecha, ' Y ' es la distancia de ' m ' a X_i , ' W ' es la distancia de ' m ' a X_d , y finalmente ' Z ' es la distancia que se quiere calcular, que es la distancia del objeto al plano de la imagen, plano que coincide con la base del triángulo.

Para el cálculo de las distancias, se tienen en cuenta tres posibilidades, que dependen de la posición del objeto dentro del rango de visión de las cámaras, así:

2.1 POSICIÓN A

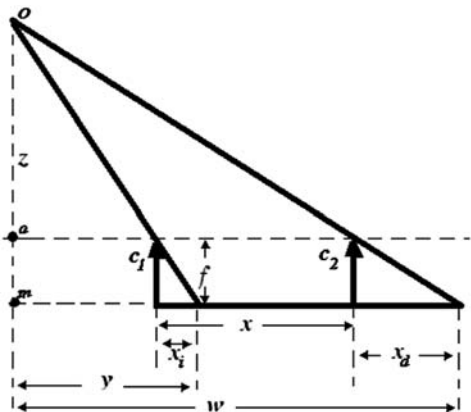
Donde el objeto ' O ' se encuentra en la región comprendida entre las cámaras $C1$ y $C2$ (extendiendo un par de líneas paralelas en la dirección de las flechas que representan las cámaras) (Fig. 4).

- a) $w = \frac{x_i + x_d + x}{x_i + x_d} \cdot x_d$
- b) $y = \frac{x_i + x_d + x}{x_i + x_d} \cdot x_i$
- c) $\frac{x_d}{w} = \frac{f}{z}$
- d) $\frac{x_i}{y} = \frac{f}{z}$

2.2 POSICIÓN B

Donde el objeto ' O ' se encuentra a la izquierda de ambas cámaras (Fig. 5).

FIGURA 5. Semejanza de triángulos para el caso B.



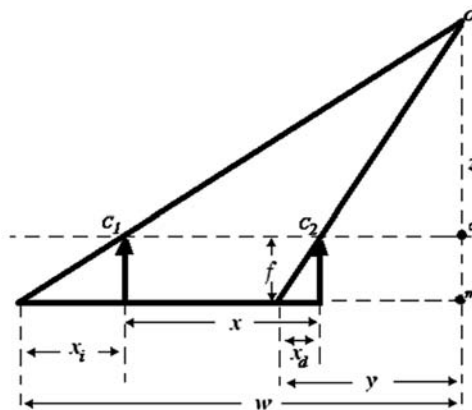
Para el objeto en posición B se tiene:

- a) $w = \frac{x_i + x_d - x_i}{x_d - x_i} \cdot x_d$
- b) $y = \frac{x_i - x_d - x}{x_i - x_d} \cdot x_i$
- c) $\frac{x_d}{w} = \frac{f}{z}$
- d) $\frac{x_i}{y} = \frac{f}{z}$

2.3 POSICIÓN C

Donde el objeto ' O ' se encuentra a la derecha de ambas cámaras (Fig. 6).

FIGURA 6. Semejanza de triángulos para el caso C



Para el objeto en posición C se tiene:

- a) $w = \frac{-x_d(x + x_i - x_d)}{x_i - x_d} \cdot x_d$
- b) $y = \frac{x_i - x_d + x}{x_i - x_d} \cdot x_i$
- c) $\frac{x_d}{w} = \frac{f}{z}$
- d) $\frac{x_i}{y} = \frac{f}{z}$

Adicionalmente, para todos los casos se cumple que:

$$y = \frac{x_i \cdot w}{x_d} \qquad w = \frac{x_d \cdot y}{x_i}$$

3. FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

El proceso de determinación de la distancia comienza con la captura de las imágenes por parte de las cámaras, las cuales tienen un campo visual limitado, lo cual limita también el rango espacial en el que deben encontrarse los objetos para poder determinar su posición. De esta forma, los objetos no podrán estar demasiado lejos, ya que la diferencia entre ambas imágenes sería muy pequeña y se producirían errores grandes en el cálculo de la distancia. En el caso que el objeto se encuentre muy cerca, tampoco se puede calcular la distancia, debido a que dicho objeto estaría fuera del rango de una de las cámaras o de ambas.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que las cámaras deben permanecer acopladas apuntando siempre al frente y que la distancia entre cámaras debe ser siempre la misma, ya que esta distancia es una constante usada en el algoritmo de cálculo. Es por esto, que buscando el correcto posicionamiento de las cámaras de video, se diseñó una plataforma mecánica que garantiza una correcta adquisición de las imágenes (Fig. 7).

FIGURA 7. Prototipo implementado



Luego de tener las imágenes capturadas, se debe establecer la correspondencia entre los objetos presentes en ambas imágenes [9], [10], proceso que permite conocer las variables necesarias para realizar el cálculo de la distancia. Dicho proceso implica una clasificación de los objetos en la imagen, para lo cual el sistema implementado utiliza segmentación por color [2], [6], haciendo uso de un algoritmo desarrollado en MatLab para esta aplicación.

Esta segmentación permite identificar regiones de color semejante en ambas imágenes, pudiendo conocer así la posición de un objeto específico en cada una de ellas; hecho que permite obtener los datos necesarios para proceder con los cálculos matemáticos.

A continuación se describe el funcionamiento del sistema partiendo de la interfaz de usuario y siguiendo las diferentes etapas que se llevan a cabo para lograr determinar la distancia a la que se encuentra el objeto seleccionado.

Al correr el programa, el usuario se encuentra inicialmente con la siguiente interfaz:

FIGURA 8. Interfaz de usuario



Al presionar en el botón 'seleccionar objeto' aparecerá la imagen de la escena vista por la cámara izquierda y se podrá seleccionar uno de los objetos de la imagen, dando click sobre él (Fig. 9).

FIGURA 9. Selección del objeto de interés



En el momento en el que se selecciona el objeto en la imagen izquierda, el color del píxel seleccionado es almacenado e inmediatamente se llama a la función encargada de establecer la correspondencia, la cual recibe el color almacenado como argumento. Esta función toma las componentes RGB del píxel seleccionado, restando el valor de cada una de ellas en forma independiente a la componente respectiva de la imagen original I_R, I_G, I_B , donde $I(i,j)$ corresponde al valor de color del píxel (i,j) de la imagen I . Este proceso se hace pixel a pixel, comparando el resultado obtenido para cada componente con un nivel de tolerancia t , de manera tal que si el valor absoluto de la resta en los tres casos (R,G,B) se encuentra por debajo del nivel de tolerancia, el píxel analizado tiene un color muy semejante al color buscado; en cuyo caso es altamente probable que dicho píxel pertenezca al objeto de interés.

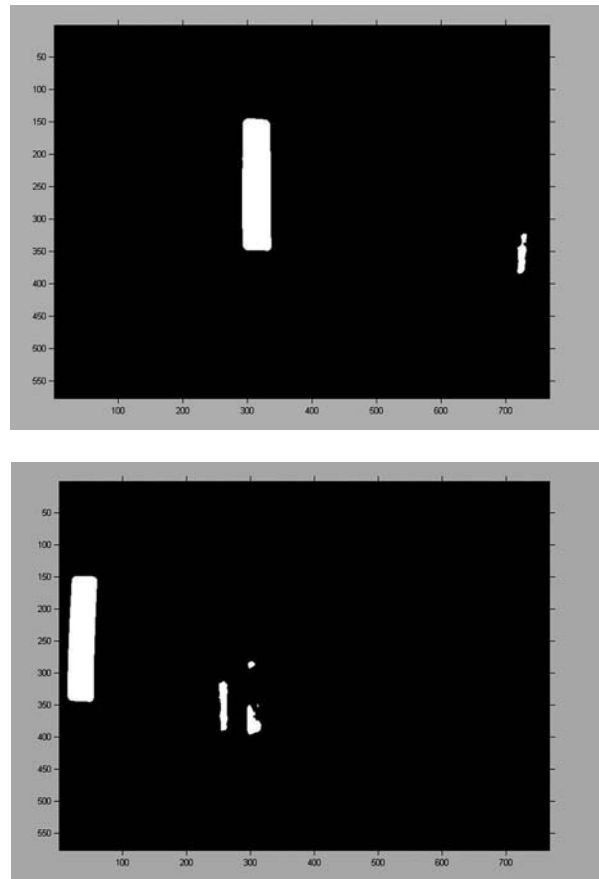
$$\begin{aligned} |I_R(i, j) - R| &< t \\ |I_G(i, j) - G| &< t \\ |I_B(i, j) - B| &< t \end{aligned}$$

Se usa un nivel de tolerancia en las comparaciones dado que los colores en las imágenes no son perfectamente homogéneos debido a pequeños cambios en la iluminación y a la generación de sombras, esto causa que los valores de los píxeles difieran un poco para un mismo color.

A medida que se efectúan estas comparaciones, se va generando una imagen donde los resultados positivos de la comparación aparecen como 'unos' (blanco) y lo demás como 'ceros' (negro). Esto se hace para ambas imágenes, dando como resultado un par de máscaras donde las regiones con color semejante al seleccionado aparecen en blanco y lo demás en negro (Fig. 10).

Luego de generar las dos máscaras, se aplica a cada una de ellas un filtrado de mediana [2] para eliminar los objetos más pequeños reduciendo el ruido conocido como 'pepper'.

FIGURA 10. Segmentación del objeto



De los objetos presentes en las máscaras, se selecciona el de mayor área en cada una de ellas, el cual deberá corresponder al objeto de interés.

Identificado el objeto, calculamos la desviación en píxeles que presenta su centroide respecto al centro de la imagen respectiva. Este valor en píxeles se convierte luego a centímetros usando como parámetros la distancia focal de las cámaras y la relación píxel/centímetro hallada experimentalmente en el proceso de calibración inicial del sistema.

Conociendo la desviación de los centroides respecto al centro de cada imagen, la distancia focal de las cámaras y la separación entre ellas, se procede al cálculo de la

distancia a la que se encuentra el objeto, usando el algoritmo de cálculo, el cual usa el modelo matemático mencionado en la sección 2.

Finalmente, se muestra el resultado del cálculo de la distancia y se habilita la visualización de la imagen

capturada por la cámara derecha (Fig. 11). En este punto el usuario tiene la posibilidad de seleccionar un nuevo objeto presionando el botón 'seleccionar objeto', con lo cual iniciará el proceso nuevamente, de forma que el algoritmo le mostrará la distancia a la que se encuentran los objetos luego de hacer el procesamiento respectivo.

FIGURA 11. Resultado del cálculo de la distancia



4. RESULTADOS

A continuación se muestra una tabla comparativa de algunas de las pruebas realizadas (Tabla 1), donde aparece la distancia real a la que se encontraban los objetos y la distancia calculada por el sistema (las cifras están en centímetros):

TABLA 1. Resultados obtenidos

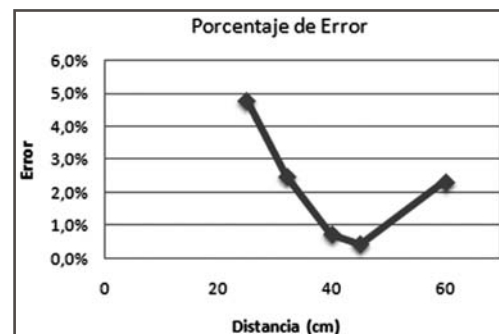
DISTANCIA REAL	DISTANCIA OBTENIDA
25	26,2
32	32,8
40	40,3
45	44,8
60	58,6

Las diferentes pruebas realizadas arrojaron un error promedio de unos 8 milímetros en el cálculo de la distancia para objetos en diferentes posiciones, lo cual es un resultado satisfactorio teniendo en cuenta

que se trabajó con cámaras de video comerciales no calibradas, las cuales no están destinadas normalmente a la investigación.

De acuerdo a los valores obtenidos en las pruebas y conociendo la distancia real a la que se encontraban los objetos, se puede calcular el error de cada una de las mediciones hechas por el sistema, con lo cual se obtiene la siguiente gráfica de error porcentual (figura 12).

FIGURA 12. Porcentaje de error



Se puede observar como el error es mayor a medida que se acercan los objetos a las cámaras, sin embargo, el porcentaje de error sigue siendo pequeño y bastante aceptable para esta aplicación.

5. CONCLUSIONES

- Los sistemas de visión estereoscópica resultan útiles cuando se desea conocer información tridimensional del entorno y aún más si se requiere un conocimiento detallado del mismo ya que los sistemas que utilizan una sola cámara y sensores adicionales, aportan información tridimensional parcial y no resultan tan eficientes. Es precisamente en este sentido en el que se observa la gran ventaja de los sistemas de visión estereoscópica, los cuales permiten obtener una gran cantidad de información del entorno con solo tener dos imágenes.
- El método escogido para la implementación del prototipo de aplicación resulta muy conveniente, ya que al usar cámaras fijas no se requiere diseñar un mecanismo preciso de rotación para las cámaras, lo cual habría implicado un trabajo mecánico importante, y en cambio se descarga toda la responsabilidad del funcionamiento del sistema en el procesamiento digital de la imágenes y en el algoritmo que realiza los cálculos.
- Se obtuvo una precisión muy buena en el cálculo de la distancia teniendo en cuenta que la posición de las cámaras podía presentar alguna pequeña desviación ya que no se utilizó un sistema riguroso de calibración.
- Sistemas como el implementado resultan útiles en tareas sencillas de reconocimiento tridimensional del entorno, donde no se requiera de una gran precisión en las mediciones, teniendo en cuenta además que el utilizar cámaras convencionales lo hace un sistema económico y fácil de implementar.

6. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos especialmente al Comité para el Desarrollo de la Investigación de la Universidad de Antioquia, por el apoyo económico para el desarrollo de este proyecto y al departamento de Ingeniería Electrónica, por el préstamo del laboratorio para la realización de las pruebas.

7. REFERENCIAS

- [1] Ekstrom, Michael. (1984) *Digital image processing techniques*, Estados Unidos. Academic Press. 372 p.
- [2] González, Rafael C, et al. (1996) *Tratamiento Digital de Imágenes*, Madrid. Adisson – Wesley. 773 p.
- [3] Haralick, R.M.; Shapiro, F.G. (1992) *Computer and Robot Vision*. Addison-Wesley Publishing Co, Reading, Massachusetts.
- [4] Heikkila, J. (2000) *Geometric camera calibration using circular control points*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 22, N° 10. 1066-1077.
- [5] Horaud R. (2000) *Stereo Calibration from rigid motions*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol 22. 1446-1452
- [6] Jain, Anil K. (1989) *Fundamentals of digital image processing*, Estados Unidos. Prentice Hall. 569 p.
- [7] Johnson, Johny Ray. (1989) *Introduction to digital signal processing*, Estados Unidos. Prentice Hall. 407 p.
- [8] Ma, Lili; Chen, YangQuan. (2003) *Flexible camera calibration using a new analytical radial undistortion formula with application to mobile robot localization*, in IEEE International Symposium on Intelligent Control, Houston, USA, Oct. 2003.
- [9] Mery, Domingo. (2002) *Visión Artificial*. Santiago de Chile. Departamento de Ingeniería Informática, Universidad de Santiago de Chile. 115p.
- [10] Parker, James R. (1997) *Algorithms for image processing and computer vision*. Estados Unidos de América. John Wiley & Sons, Inc. 418 p.
- [11] Tsai, R.Y. (1987) *A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras an lenses*, IEEE J, Robotics and Automation, vol 3, N° 4. pp 323-344.
- [12] Weng, Juyang; Cohen, Paul. (1992) *Camera calibration with distortion Models and accuracy evaluation*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol 14, N° 10.