

# Control de un robot móvil de ruedas en la Evasión de Obstáculos mediante Campos Potenciales Artificiales y Procesamiento Digital de Imágenes

M. R. Cordero-Ocampo, G. Sepúlveda-Cervantes<sup>†</sup>, E. A. Portilla-Flores <sup>†</sup>, J. A. Butrón-Guillén  
<sup>†</sup>CIDETEC-IPN. Departamento de Posgrado. Área de Mecatrónica.  
Av. Juan de Dios Bátiz s/n. Esq. Miguel de Othón de Mendizábal.  
“Unidad Profesional Adolfo López Mateos”. C.P. 07700, México, D.F., MÉXICO  
e-mail: mcordero0800@ipn.mx, gsepulvedac@ipn.mx

**Resumen**—En este trabajo se presenta una solución al problema de evasión de obstáculos de un robot móvil de ruedas de tipo diferencial empleando control automático, con la ayuda del método de campos potenciales artificiales y procesamiento digital de imágenes.

Empleando el modelo cinemático del robot móvil en un controlador por linealización entrada-salida y junto con el método de campos potenciales artificiales, hacen que el robot móvil siga una trayectoria para evadir obstáculos estáticos en su plano de trabajo. La localización de los obstáculos y la meta se realiza mediante el uso de una cámara web y de técnicas de procesamiento digital de imágenes.

De igual manera este mismo controlador, suministra una magnitud de velocidad angular deseada para un controlador de velocidad tipo PI, el cual permite que los actuadores eléctricos alcancen los perfiles de velocidad requeridos.

Para verificar el desempeño de la evasión de obstáculos, se construye un robot móvil de ruedas tipo diferencial, después se valida mediante simulaciones con modelos construidos a partir de MatLab<sup>®</sup>-Simulink<sup>®</sup> y finalmente se realizan experimentos en tiempo real, mediante la tarjeta controladora para investigación con tecnología de desarrollo rápido de prototipos DS1104-dSPACE<sup>®</sup>.

**Palabras clave:** Localización de obstáculos, Procesamiento Digital de Imágenes, Robots Móviles de Ruedas, Evasión de Obstáculos, Transformaciones Morfológicas, MatLab<sup>®</sup>-Simulink<sup>®</sup>, dSPACE<sup>®</sup>.

## I. INTRODUCCIÓN

La mayor población de robots industriales de servicios y domésticos se encuentra confinada en condiciones ambientales controladas, siendo estas condiciones las posibles causas por las que son excluidos para tareas y ambientes complejos y dinámicos próximos al ser humano. Esta exclusión según (Zalama, 2009), es aprovechada por las máquinas de visión y control de fuerza, integradas a un sistema de control retroalimentado capaces de proporcionar al robot la mayor cantidad de información de su entorno. La siguiente tarea es optimizar la capacidad de sensibilidad del efector final y el tiempo de procesamiento digital de la información visual bajo la forma de retroalimentación. Esta retroalimentación visual es generada por algún tipo de cámara electrónica o arreglo de cámaras, consideradas

como sensores *exteroceptivos*, los cuales miden o registran información del entorno al robot, es decir, detectan lo que ocurre en el exterior del mismo y generan información sin contacto físico. Esta información es interpretada por algoritmos de procesamiento digital de imágenes que proporcionan la posición relativa del efector final o del medio ambiente del robot (Monrroy y Kelly, 2007), (Muhammet, 2004). Los algoritmos que procesan digitalmente imágenes, pueden ser revisados de forma general como *métodos de procesamiento con imágenes* y *métodos analíticos*, según (Gonzlez y Woods, 2002). Ambos métodos son ampliamente usados en robots para realizar tareas de teleoperación (Monrroy y Kelly, 2007), reconocimiento de formas (Astrand y Baerveldt, 2002), seguimiento de trayectorias, localización y navegación (Hollinghurst y Cipolla, 2002), detección de movimiento y de objetos, estimación de posición (Hollinghurst y Cipolla, 2002) y distancia (Krajnik y Preucil, 2008) y evasión de obstáculos (Cadenat y Swain, 1999), (Calleja, 2002), (Muhammet, 2004), (Fasola y Rybski, 2005) y (Garcia, 2008). En este trabajo presentamos una solución en la detección de objetos considerados como meta y obstáculos, empleando procesamiento digital de imágenes para desarrollar la tarea de evasión de obstáculos con la asistencia del método de campos potenciales artificiales y control automático.

Este trabajo está dividido de la siguiente manera, en la sección II se presenta el método de campos potenciales artificiales en la tarea de evasión de obstáculos. En la primera parte de la sección III se lleva a cabo el desarrollo del controlador para el modelo cinemático del robot móvil diferencial basado en linealización de entrada-salida, en la segunda parte se selecciona un controlador PI para generar los perfiles de velocidad angular en la generación de tránsito del robot, finalmente se realiza la integración del controlador. En la sección IV se presenta el procesamiento digital de imágenes en la detección de objetos contenidos en el área de trabajo del robot móvil. En en la sección V, se presenta un experimento de evasión de obstáculos que permite comprobar la efectividad del procesamiento digital de imágenes en robótica móvil. Finalmente, en la sección

VI se presentan las conclusiones del trabajo.

## II. MÉTODO DE CAMPOS POTENCIALES ARTIFICIALES.

Este método analítico tiene como principio una *función potencial artificial*  $U(q)$  cuyo *gradiente* determina la fuerza del mismo. El gradiente de este campo es definido como el vector  $\nabla U(q) = \left[ \frac{\partial U}{\partial q_1}(q), \dots, \frac{\partial U}{\partial q_n}(q) \right]^T$  cuya dirección apunta hacia el máximo local de  $U(q)$  (Choset et. al, 2005).

El enfoque propuesto por la función potencial artificial para un robot móvil, es modelar a éste como una partícula de *carga positiva* desplazándose en un campo vectorial de fuerzas, atraído por una *carga negativa* asociada a la meta. De igual forma los obstáculos tienen asociadas cargas positivas que influyen de forma repulsiva para el robot. Así la combinación de fuerzas atractivas y repulsivas determinan el tránsito del robot hacia la meta, evitando colisionar con los obstáculos. La fuerza resultante  $F_{total}$  aplicada al robot móvil, está dada por,

$$F_{total} = F_{att}(q) + F_{rep}(q), \quad (1)$$

donde  $F_{att}(q)$  es la fuerza de atracción producida por la meta y  $F_{rep}(q)$  es la fuerza de repulsión inducida por el obstáculo. La fuerza resultante se genera de un potencial artificial determinado por,

$$U(q) = U_{att}(q) + U_{rep}(q), \quad (2)$$

donde

$$\begin{aligned} F_{att}(q) &= -\nabla U_{att}(q), \\ F_{rep}(q) &= -\nabla U_{rep}(q). \end{aligned} \quad (3)$$

### II-A. Potencial atractivo.

El campo potencial atractivo cuadrático definido por (4), presenta una forma parabólica cuya fuerza atractiva converge linealmente conforme el robot se aproxima hacia el punto definido como meta  $q_m$ , es decir, cuando el robot está cerca de la meta, éste se aproxima lentamente hacia ésta. Esta característica es útil para robots móviles ya que reduce el sobre tiro (overshoot) del punto  $q_m$ , es ampliamente usada en la solución del problema de evasión de obstáculos ya que posee características de estabilidad según (Latombe, 1991). De acuerdo a (Khatib, 1985) y (Calleja, 2002) la  $F_{att}(q)$  queda determinada por (5),

$$U_{att}(q) = 1/2 \xi \rho^2(q, q_m), \quad (4)$$

$$F_{att}(q) = -\nabla U_{att}(q) = -\xi(q - q_m). \quad (5)$$

### II-B. Potencial repulsivo.

Comúnmente la función de potencial repulsivo  $U_{rep}(q)$  se define como:

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{\rho(q, q_{obs})} - \frac{1}{\rho_o} \right)^2, & \text{si } \rho(q, q_{obs}) \leq \rho_o, \\ 0 & \text{, si } \rho(q, q_{obs}) > \rho_o, \end{cases} \quad (6)$$

donde  $\eta$  es un factor de escala positivo,  $\rho(q, q_{obs})$  denota la mínima distancia entre el  $q$  del robot móvil y el obstáculo,  $q_{obs}$  denota el punto del obstáculo tal que la distancia entre este punto y el robot es mínima, y  $\rho$  es una constante positiva denotando la *distancia de influencia* del obstáculo (Ge y Cui, 2000).

La fuerza repulsiva  $F_{rep}$  inducida por el potencial  $U_{rep}(q)$ , según (Khatib, 1985), es definida como una función no negativa, continua y diferenciable, cuyos valores de potencial crecen de forma ascendente, asimismo, debe ser diseñada para cumplir con la condición de estabilidad del robot y en cada punto de la superficie debe crear para el robot, una barrera de potencial repulsiva con la finalidad de evitar perturbaciones más allá del contorno del obstáculo, esta fuerza se expresa como,

$$\begin{aligned} F_{rep} &= -\nabla U_{rep}(q), \\ &= \eta \left[ \frac{1}{\rho(q, q_{obs})} - \frac{1}{\rho_o} \right] \left[ \frac{1}{\rho^3(q, q_{obs})} \right] (q - q_o). \end{aligned} \quad (7)$$

## III. CONTROL DEL ROBOT MÓVIL DE RUEDAS.

En esta sección se propone por separado un controlador lineal para el modelo cinemático del robot móvil de ruedas, y otro controlador asociado al sistema de impulsión eléctrico del mismo. Ambos vinculados jerárquicamente para la generación del tránsito del robot móvil de ruedas.

### III-A. Controlador lineal del modelo cinemático del robot móvil de ruedas.

De acuerdo a (García, 2008), el modelo cinemático asociado a un robot móvil de ruedas de tipo diferencial, ver la Figura 1, esta dado por,

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \end{pmatrix} = A(\varphi) \begin{pmatrix} \omega_d \\ \omega_i \end{pmatrix} \quad (8)$$

donde:  $r$  es el radio de las ruedas motrices y  $2l$  es la separación entre ellas.

$$A(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -L \sin \varphi \\ \sin \varphi & L \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{r}{2l} & \frac{r}{2l} \\ \frac{r}{2l} & -\frac{r}{2l} \end{pmatrix}$$

Igualmente en la Figura 1, se muestran las variables  $\omega_d$ ,  $\omega_i$  como las velocidades angulares derecha e izquierda de las ruedas motrices. Este modelo asociado al punto  $q = (x_1, y_1)$ , presenta la propiedad que  $\det A(\varphi) = -\frac{Lr^2}{2l} \neq 0$ , así, se puede proponer un esquema de linealización por entrada-salida para  $(\omega_d, \omega_i) - (\dot{x}_1, \dot{y}_1)$ .

$$\begin{pmatrix} \omega_d \\ \omega_i \end{pmatrix} = A^{-1}(\varphi) \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

donde:

$$A^{-1}\varphi = \frac{1}{Lr} \begin{pmatrix} L\cos\varphi - l\sin\varphi & l\cos\varphi + L\sin\varphi \\ L\cos\varphi + l\sin\varphi & -(l\cos\varphi - L\sin\varphi) \end{pmatrix}.$$

Considerando que el móvil es asistido por la fuerza de campo potencial cuyas componentes se definen como  $f_1, f_2$ . Éstas regulan proporcionalmente la velocidad lineal del móvil. Dada la condición inicial, en donde el robot móvil se encuentra lejos de la meta, se deriva de la fuerza una velocidad infinita y en la condición cuando el robot móvil arriba a la meta, se presenta una indeterminación, es decir cuando las componentes de fuerza se hacen igual a cero, se propone regular a esta velocidad con una fuerza normalizada representada por  $(v_d)$  que permita evitar fuerzas grandes al inicio del movimiento y fuerzas pequeñas cuando se está cerca de la meta. Para evitar la indeterminación cuando se arriba al punto deseado, se modifica la magnitud de la fuerza resultante añadiendo una constante positiva definida por  $(\varepsilon)$  (Calleja, 2002). Logrando con esto proponer la siguiente *ley de control por linealización por entrada-salida con retroalimentación estática*,

$$\begin{pmatrix} \omega_d \\ \omega_i \end{pmatrix} = \frac{v_d}{\sqrt{f_1^2 + f_2^2} + \varepsilon} A^{-1}(\varphi) \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

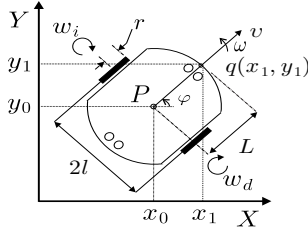


Figura 1. Variables físicas del robot móvil de ruedas.

### III-B. Control asociado al sistema de impulsión eléctrico.

El motor eléctrico es el sistema de impulsión asociado a cada rueda de tracción del robot móvil. El eje de rotación de este sistema de impulsión eléctrico se encuentra ensamblado a la rueda de tracción, que en conjunto proporcionan para el robot móvil, el tránsito en la tarea de evasión de obstáculos. De igual forma éste conjunto de piezas mecánicas, conforme a su montaje dentro de la estructura mecánica, define al modelo cinemático del robot móvil diferencial.

Para que el robot móvil genere solidariamente el tránsito en la evasión de obstáculos, es necesario definir para cada motor eléctrico, un controlador de velocidad angular, que garantice que los perfiles de velocidad angular  $\varpi$  tiendan a  $\varpi^*$  impuestos por (10).

El controlador de velocidad debe compensar las perturbaciones dadas entre la respuesta deseada del controlador  $\varpi^*$  y la magnitud real de velocidad del motor eléctrico  $\varpi$  con respecto al tiempo, además, debe reunir: una respuesta transitoria rápida, con sobresaltos mínimos, con un

error en estado estacionario mínimo y que sus parámetros de sintonización se puedan actualizar. Estas características mínimas, las reúne el algoritmo de control PI. En las referencias (Calleja, 2002), (Barrientos, 2008) y (Garcia, 2008) llevan a cabo implementaciones de algoritmos PI, como control aplicado a los motores eléctricos, este controlador es definido por,

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (11)$$

con  $e(t) = \varpi^* - \varpi$  como el error de seguimiento, entre el valor deseado de velocidad angular  $\varpi^*$  y la velocidad angular del rotor.

### III-C. Integración de los controladores en la evaluación de la evasión de obstáculos.

En la evaluación de la tarea de evasión de obstáculos es necesario la integración jerárquica de los controladores. Dicha integración es valorada mediante funciones de procedimientos y bloques pre-diseñados y elaborados con el software; MatLab<sup>®</sup>–Simulink<sup>®</sup>. La Figura 2 muestra el modelo para la experimentación de evasión de obstáculos, mismo que está conformado por los siguientes bloques:

- **Procesamiento morfológico de imágenes y distribuidor.** Es un bloque de fuente de datos de Simulink<sup>®</sup>. Éste importa del espacio de trabajo de MatLab<sup>®</sup>, en forma de matriz  $u$ , el conjunto de duplas de coordenadas de meta y obstáculos registrados por el procesamiento morfológico de imágenes. El bloque identificado como *Distribuidor* es una función de procedimientos, que tiene como argumento de entrada a la matriz de coordenadas y retorna los elementos de ésta, ordenados en duplas ordenadas para meta  $(x_m, y_m)$  y obstáculos  $(x_{10}, y_{10}), \dots, (x_{40}, y_{40})$ .
- **Campo potencial artificial.** Es un subsistema compuesto por funciones de potencial atractivo y repulsivo construidas a partir de las ecuaciones (5), (7), respectivamente. Este subsistema tiene como entrada las duplas ordenadas de coordenadas de obstáculos, de meta y de velocidad lineal del robot móvil  $(x_1, y_1)$ . Retorna las magnitudes de la fuerza del campo potencial artificial  $(f_1, f_2)$ .
- **Controlador por linealización por entrada-salida. Nivel Superior.** Es una función de procedimientos que acepta como argumento las componentes de fuerza potencial artificial  $(f_1, f_2)$  y el ángulo de dirección del robot móvil de ruedas  $(\varphi)$ . Retorna como valores las magnitudes de velocidad angular deseada derecha e izquierda  $(\varpi_d^*, \varpi_i^*)$ . Esta función implementa la estrategia de control de nivel superior, basada en un esquema de linealización entrada-salida por retroalimentación estática. La estrategia de control se construye de la ecuación (10).
- **Controlador PI. Nivel inferior.**

El algoritmo del controlador PI para cada motor eléctrico es un subsistema compuesto por funciones de Simulink®. Las entradas para este subsistema son las velocidades angulares deseadas ( $\varpi_d^*$ ,  $\varpi_i^*$ ) y las velocidades angulares ( $\varpi_d$ ,  $\varpi_i$ ) provenientes de la retroalimentación en velocidad angular del codificador de posición angular.

- **Sistema de impulsión eléctrico.**

Este subsistema contiene bloques de la biblioteca de ControlDesk®. Tiene como argumentos de entrada los perfiles de velocidad angular deseados por el controlador PI. Los argumentos de salida son los perfiles de velocidad angular derivados de la retroalimentación de posición angular provenientes del codificador de posición angular.

- **Modelo cinemático del robot móvil diferencial.** Es un subsistema compuesto por funciones de Simulink® y funciones de procedimientos. Este subsistema tiene como entradas las magnitudes de velocidad angular de los motores derecho e izquierdo ( $\varpi_d$ ,  $\varpi_i$ ). Los argumentos de salida son la posición ( $x_1, y_1$ ) y dirección ( $\varphi$ ) del robot móvil en el plano ( $X, Y$ ). El modelo cinemático se construyó a partir de la ecuación (8).

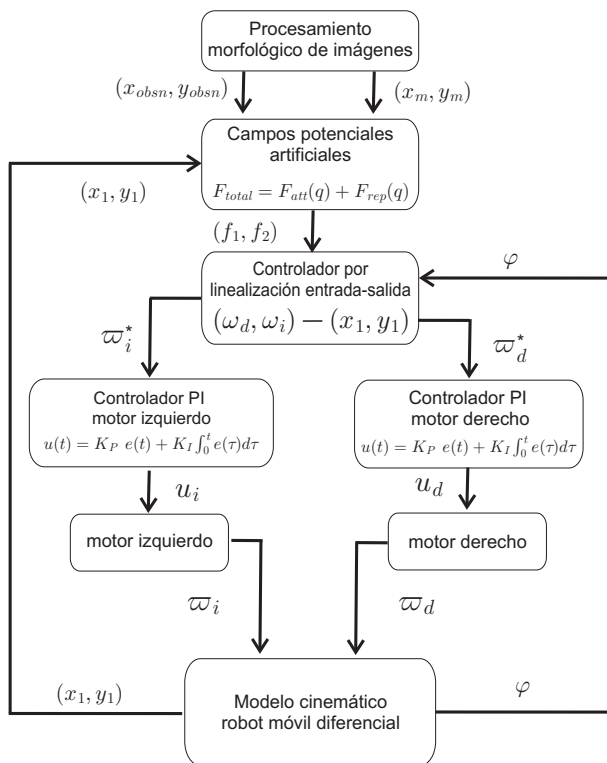


Figura 2. Modelo de experimentación en bloques de Simulink®.

#### IV. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES EN LA LOCALIZACIÓN DE OBJETOS.

Para aplicar el método de campos potenciales artificiales son necesarias las componentes ( $f_1$  y  $f_2$ ) sien-

do forzoso el pleno conocimiento de las coordenadas cartesianas de la meta ( $x_m, y_m$ ) y de los  $n$ -obstáculos, ( $x_{o1}, y_{o1}, \dots, x_{on}, y_{on}$ ). Éstas son localizadas a partir de la imagen del área de trabajo del robot móvil de ruedas, mediante la combinación de técnicas de procesamiento morfológico y funciones de software.

##### IV-A. Métodos de procesamiento digital.

El origen del procesamiento de imágenes aparece en la industria del periodismo a principios de la segunda década del siglo XX. Fue hasta finales de la década de los años sesenta donde surge el *procesamiento y análisis digital de imágenes* empleando equipo de cómputo ejecutando algoritmos de procesamiento en el dominio de la frecuencia. Con los resultados obtenidos surgieron nuevas técnicas y categorías de algoritmos para el análisis, descripción y representación de imágenes en formato digital.

El *procesamiento morfológico*, destaca dentro de las técnicas de procesamiento digital de imágenes, por ser el punto en que se divide y enumera a dos tipos de métodos en el procesamiento digital (Gonzalez y Woods, 2002):

- *Métodos de procesamiento con imágenes*, comprende procedimientos de enriquecimiento y restauración de atributos, compresión y segmentación de imágenes, se caracteriza por estar compuesto de funciones que tienen como argumentos de entrada de datos imágenes y retornan productos compuestos por nuevas imágenes.
- *Métodos analíticos*, engloba procedimientos compuestos por funciones que aceptan como entrada imágenes y retornan atributos en su forma sencilla o bien interpretativos de regiones de interés. Pertenecen a este tipo de métodos las *funciones de software*, que miden y registran propiedades de forma de objetos como: áreas, perímetros, excentricidad y centros de masa.

El propósito de emplear este conjunto de métodos en el posicionamiento de objetos definidos como meta y  $n$ -obstáculos, es obtener información representativa de éstos, los cuales cohabitan en el área del robot móvil de ruedas. Para lograr este objetivo, se emplea una cámara web comercial, dedicada a la captura de video y a partir de la información generada por ésta, se selecciona una imagen vectorial siendo convertida mediante funciones de software en una imagen escalar y posteriormente en una imagen binaria. Sobre ésta última imagen se aplican *transformaciones morfológicas de apertura, erosión y dilatación*, con el propósito de remover componentes de ruido. Habiendo removido objetos que no representan la meta o ningún obstáculo, mediante *funciones de software*, se obtiene de cada objeto su área promedio y su centro de masa con respecto al plano ( $X, Y$ ).

Tanto las *transformaciones morfológicas* como las *funciones de software* son ejecutadas, administradas y desarrolladas por la Graphical User Interface Development Environment (GUIDE) de MatLab®. Con esta interface

gráfica de usuario, se disminuyen los errores de captura de los centros de masa de los objetos contenidos en el área de trabajo del robot móvil de ruedas. Además, con esta misma interface el flujo de cómputo queda controlado por las acciones lógicas generadas por el usuario. Tales acciones son capturadas por los *objetos de interface*, cuyas propiedades son seleccionadas y definidas por el usuario.

La interacción con los objetos de interface, queda definida con la ejecución de la llamada función del tipo *Callback*, cuyos argumentos de entrada son declarados como del tipo *estructura compuesta*, misma que es compartida entre las demás funciones contenidas en la interface gráfica de usuario. Al completar la ejecución de estas funciones, el control del flujo de cómputo retorna a la interface gráfica de usuario, para continuar con el desarrollo de acciones. La descripción de los procedimientos realizados por cada función se describen a continuación:

- *OpeningFcn*. En esta función se definen e inicializan las variables dentro de la estructura compuesta *handles*, misma que es común para todas las funciones de la interface. Además, esta función realiza la actualización de los objetos de la interface. Finalmente, reconoce y configura el dispositivo de video detectado.
- *MainFcn*. Esta función administra las invocaciones a todas las funciones *Callback*. También, captura las acciones de los objetos de interface manipulados por el usuario, y ejecuta el flujo de comandos predeterminados en cada función. Al concluir cualquiera *Callback* el proceso regresa a la función *MainFcn*, que estará en estado de espera hasta que el usuario obtenga los parámetros de las coordenadas de la meta,  $(x_m, y_m)$ , y de los  $n$ -obstáculos,  $(x_{o1}, y_{o1}), \dots, (x_{on}, y_{on})$ .
- *CaptureCallback*. La invocación de esta función permite capturar una fotografía vectorial del espacio de trabajo del robot móvil de ruedas.
- *ContrastCallback*. Esta función efectúa el ajuste manual de la brillantez de la imagen capturada.
- *ConvertCallback*. Ejecuta la conversión secuencial de la imagen contrastada en una representación en escala de grises, para obtener de esta una imagen binaria.
- *ComplementCallback*. Esta función realiza el complemento lógico de la imagen binaria para contrastar áreas menores, calificadas como ruido, con las áreas asociadas a la meta y a los  $n$ -obstáculos.
- *RemoveCallback*. Realiza una transformación morfológica para remover áreas menores al elemento estructural, eliminando componentes de ruido contenidas en la imagen binaria.
- *FilledCallback*. Con esta se lleva a cabo la transformación morfológica de dilatación para enriquecer con pixeles las áreas asociadas a la meta y a los  $n$ -obstáculos, con la finalidad de diferenciar estos en función de sus áreas.
- *AreaCallback*. Esta función primero cualifica el área asociada a los objetos detectados. De acuerdo a esto, por comparación de estas áreas con las predetermi-

$q_i(x_1, y_1)$	$q_m(x_m, y_m)$	$q_{obs1}(x_{o1}, y_{o1})$
$x_1 = 0m$	$x_m = 0,7512m$	$x_{o1} = 0,4093m$
$y_1 = 0m$	$y_m = 1,0519m$	$y_{o1} = 0,1853m$
		$\rho_{o1} = 0,20m$
$q_{obs2}(x_{o2}, y_{o2})$	$q_{obs3}(x_{o3}, y_{o3})$	$q_{obs4}(x_{o4}, y_{o4})$
$x_{o2} = 0,5174m$	$x_{o3} = 0,1797m$	$x_{o4} = 0,1560m$
$y_{o2} = 0,6795m$	$y_{o3} = 0,6868m$	$y_{o4} = 1,0773m$
$\rho_{o2} = 0,2m$	$\rho_{o3} = 0,2m$	$\rho_{o4} = 0,2m$

TABLA I  
PARÁMETROS DE UBICACIÓN DE LA META, OBSTÁCULOS Y RADIO DE INFLUENCIA, PARA EL EXPERIMENTO: TRES OBSTÁCULOS.

nadas en la función *OpeningFcn* se determina si los objetos corresponden a una meta o un obstáculo. Posteriormente, mediante funciones de software, y la introducción de un factor de escala asociado a la componente  $+Z$ , se obtienen las coordenadas de los centros de masa de la meta,  $(x_m, y_m)$ , y de los  $n$ -obstáculos,  $(x_{o1}, y_{o1}), \dots, (x_{on}, y_{on})$ . Finalmente, esta información es empleada por la ley de control, para realizar la tarea de evasión de obstáculos mediante el método de campo potencial artificial.

## V. RESULTADOS

*V-A. Experimentación con un robot móvil de ruedas en la tarea de evasión de obstáculos.*

El objetivo principal en la tarea de evasión de obstáculos con un robot móvil, es llevar a éste desde un punto inicial a un punto final identificado como meta sin colisionar con obstáculos, con la ayuda de técnicas de procesamiento digital de imágenes. Para lograrlo se construyó un robot móvil de ruedas tipo diferencial. Las hipótesis de diseño, metodología, planos mecánicos y construcción del robot se reportan en (Cordero, 2011).

En la Tabla I, se presentan los resultados los parámetros cartesianos definidos por el procesamiento morfológico de la imagen del escenario del robot móvil. Asimismo los parámetros asociados al método de campos potenciales artificiales son los siguientes: velocidad deseada  $v_d = 0,2 m/s$ ,  $\varepsilon = 1$ ,  $\xi = 1$ ,  $\eta = 2$ . Y para el controlador de velocidad angular tipo PI, las ganancias obtenidas experimentalmente son:  $kp_{der} = -5$ ,  $ki_{der} = -20$ ,  $kp_{izq} = -5$ ,  $ki_{izq} = -20$ .

La evolución de la trayectoria para la evasión de tres obstáculos se muestra en la Figura 3 y en la Figura 4, se presenta el ángulo de orientación del robot móvil.

## VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una solución al problema de evasión de obstáculos de un robot móvil de ruedas de tipo diferencial empleando control automático, con la ayuda del método de campos potenciales artificiales y procesamiento digital de imágenes. La localización de objetos contenidos en el área de trabajo del robot, se realizó empleando técnicas de morfológicas y funciones de software en el procesamiento de la imagen representativa del área de trabajo del móvil, capturada con una cámara web. Se desarrolló una interface

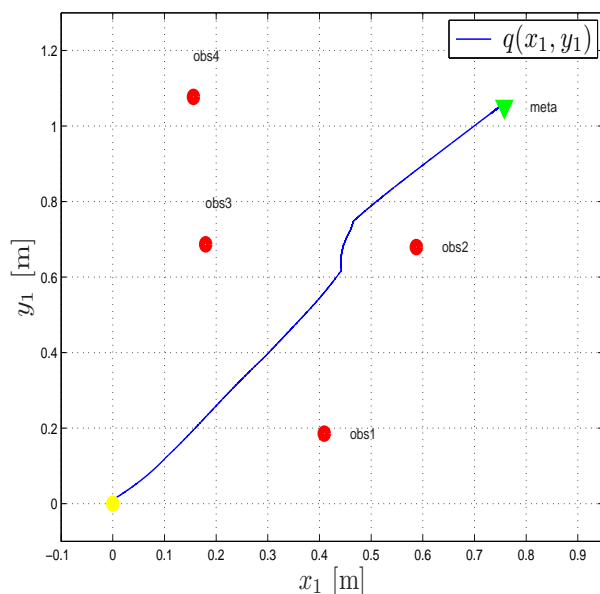


Figura 3. Evolución de la trayectoria del robot móvil.

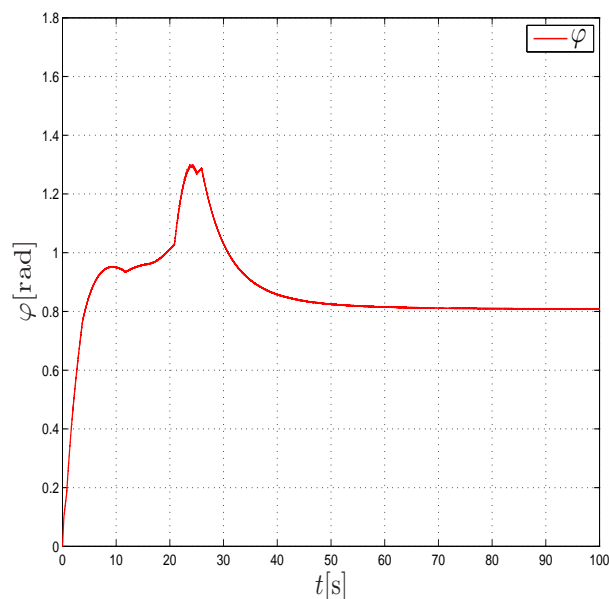


Figura 4. Ángulo de orientación.

gráfica de software operada de forma manual administra las funciones de procesamiento digital de imágenes. Y se construyó un robot móvil de ruedas, para vincular modelos matemáticos y ley de control retroalimentado con la parte tangible de un robot móvil de ruedas en la evaluación de la tarea de evasión de obstáculos.

## VII. AGRADECIMIENTOS

M. R. Cordero-Ocampo agradece el apoyo económico a la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN (SIP-IPN) mediante el otorgamiento de la Beca PIFI 2010, así como al Órgano Operativo de Becas del IPN, por la beca tesis otorgada.

## REFERENCIAS

Zalama.,(2009). Entrevista David Marshall “Boletín GTRob”, Boletín Número 14, Invierno 2009, España, pp. 8 – 9, [www.ceafiac.es/www.grupos/robotica](http://www.ceafiac.es/www.grupos/robotica).

C. Monroy, R. Kelly, M. Arteaga and E. Bugarin.,(2009). Remote Visual Servoing of a Robot Manipulator via Internet2, *J. Intel Robot Syst.*(2007) 49:171-187 DOI 10.1007/s10846-007-9134-0. ©Springer Science + Business Media B.V. 2007.

Muhammet.,(2004). Visual Servoing of Mobile Robots Using Potential Fields. MScThesis, directed by Ahmet Onat, Ayahan Bozkurt and Asif Sabanovic, Submitted to Graduate School of Engineering and Natural Sciences, Sabanci University, Istanbul, Turkey, 2004.

R. C. Gonzalez, R. E. Woods.,(2002). Digital Image Processing. Second Edition. New Jersey. Prentice Hall, 2002.

B. Astrans and A. BaerVELDT, An Agricultural Mobile Robot with Vision-Based Perception for Mechanical Weed Control, Halmstad University, Halmstad, Sweden. *Autonomous Robots* 13,21-35,2002 Kluwer Academic Publishers. Netherlands.

P. I. Coke and G. D. Hager, Vision-based Robot Control, CSIRO Manufacturing Science and Technology, Australia.Department of Computer Science, Yale University, USA.

T. Krajník and L. Preucil, A Simple Visual Navigation System with Convergence Property. H.Bruyninckx et al.(Eds.):European Robotics Symposium 2008, STAR 44, pp. 283-292, 2008. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008.

J. Fasola, P. E. Rybski, and M. M. Veloso, Fast Goal Navigation With obstacle Avoidance Using A Dynamic Logic Visual Model, School of Computer Science Carnegie Mellon University,5000 Forbes Ave. Pittsburgh, PA, 15213.

V. Cadeant, R. Swain, P. Sourères and M. Devy, A Controller to Perform a Visual Guided Tracking Task in a Cluttered Environment, *Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.

A. T. Calleja-Vidal, Generalización del método de campos potenciales artificiales para un vehículo articulado, Tesis de Maestría dirigida por E. Aranda-Bricaire y M. Velasco-Villa, Depto. de Ingeniería Eléctrica, Secc. Mecatrónica, CINVESTAV, México, 2002.

J. R. García-Sánchez, Diseño y construcción de un robot móvil aplicando el método de campos potenciales en la evasión de obstáculos,Tesis de Maestría, dirigida por R. S. Ortigoza y V. M. Hernández-Guzmán, Sección Mecatrónica, CIDETEC-IPN, México, 2008.

H. Choset, K. M. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W. Burgard, L. E. Kavraki and S. Thrunpp, In Potential Functions. Principles of Robot Motion Theory, Algorithms, and Implementations. pp. 77-90. The MIT Press. ISBN-10: 0-262-03327-5 ISBN-13: 978-0-262-03327-5.

J. C. Latombe, Robot motion planning. The Kluwer international series in engineering and computer sciences: SECS 0124 ISBN 0-7923-9129-2, 1. Robots-Motion I. Title II. 1991.

O. Khatib, Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots , *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Louis, pp. 500-505. March 25-28,1985.

S. S. Ge and Y. J. Cui, New Potential Functions for Mobile Robot Path Planning. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.16 No.5 October 2000.

V. R. Barrientos-Sotelo, Análisis, diseño, construcción y control en tiempo real de un robot móvil tipo Shakey en el seguimiento de trayectoria, Tesis de Maestría dirigida por R. Silva-Ortigoza y J. M. Albarran-Jimenez, Sección Mecatrónica, CIDETEC-IPN, México, 2008.

M. R. Cordero-Ocampo, Control de un robot móvil de ruedas mediante campos potenciales artificiales y procesamiento digital de imágenes en la evasión de obstáculos, Tesis de Maestría dirigida por G. Sepúlveda-Cervantes y J. A. Butrón-Gullén, Sección Mecatrónica, CIDETEC-IPN, México, 2011.