

CONTROL DE UN ROBOT MÓVIL UTILIZANDO EL FLUJO ÓPTICO OBTENIDO TRAVÉS DE UN SISTEMA OMNIDIRECCIONAL CATADIÓPTRICO

CARLOS M. SORIA, RICARDO CARELLI

*Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan
Av. Libertador San Martín, 1109 (Oeste) 5400 San Juan, ARGENTINA
E-mails: {csoria, rcarelli}@inaut.unsj.edu.ar*

MÁRIO SARCINELLI-FILHO

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo
Av. Fernando Ferrari, 514 29075-910 Vitória, ES, BRASIL
E-mail: mario.sarcinelli@ele.ufes.br*

Abstract— This paper addresses the use of panoramic images to avoid obstacles in mobile robot indoor navigation. A catadioptric sensor installed onboard a mobile robot is used to acquire panoramic views covering 180 degrees of the horizon in front of the robot. The optical flow field corresponding to two of such views is calculated, which is used to guide the robot to reactively avoid obstacles. A strategy to define how much the current robot orientation should be changed and a controller to guarantee that such a change is accomplished are here proposed. Experimental results validating such a system are also presented. The contribution of the proposed system is that the robot becomes able to avoid wide obstacles, which would be too much difficult using a camera with a narrow field of vision.

Keywords— Panoramic views, obstacle avoidance, optical flow, mobile robots navigation, mobile robotics.

Resumen— Este trabajo trata el problema del uso de imágenes panorámicas para evitar obstáculos en la navegación de un robot móvil en interiores. Una cámara con un espejo omnidireccional instalado en el robot se utiliza para adquirir imágenes panorámicas cubriendo 180 grados del horizonte en el frente del robot. El flujo óptico correspondiente a dos de tales imágenes se calcula, el cual se utiliza para guiar el robot de forma reactiva evitando los obstáculos. Se propone una estrategia para definir cuanto debe cambiar su orientación el robot y un controlador para garantizar que tal cambio sea cumplido. Se presentan resultados experimentales que validan la teoría propuesta. La grande contribución del sistema que se propone es que el robot se torna apto a evitar obstáculos más anchos, lo que es muy difícil utilizándose una cámara con campo de visión estrecho.

Palabras-clave— Imágenes panorámicas, desvío de obstáculos, flujo óptico, navegación de robots móviles, robótica móvil.

1 Introducción

Al menos dos principales aspectos justifican el uso de la visión para proveer de capacidad sensorial a un robot móvil: la amplia disponibilidad de cámaras CCD baratas y la gran cantidad de información del entorno donde se mueve el robot en una sola imagen (en comparación con las medidas de los sensores de ultrasonidos o lasers). Actualmente, la visión generalmente resulta en una buena combinación balanceada de bajo ruido, alta cantidad e información y bajo costo. Sin embargo, la extracción de información relevante en tiempo real a partir de una sola imagen o un conjunto de imágenes es una tarea bastante dura, lo que sigue siendo un gran obstáculo todavía para el uso intensivo de la visión en robots móviles.

El flujo óptico obtenido a partir de una secuencia de imágenes consecutivas es una técnica que ha sido adoptada para extraer información de importancia del entorno del robot móvil. Permite la extracción de información acerca de la estructura de la escena, tal como profundidades relativas de los objetos que esta incluye [1].

Varios trabajos reportando el uso del flujo óptico en la navegación del robot móvil están disponibles en la literatura reciente [2] [3] [4] [5] [6] [7] [1]

[8]. En varios casos, sin embargo, el uso especializado de hardware [7] [4] [5], el uso de cámaras espaciales [2] [5], el procesamiento de sólo pequeñas regiones de imagen [4] [7] [8], o la ejecución de tareas de procesamiento de imágenes fuera del robot [7] [4], son las características más importantes.

En términos de usar el flujo óptico para evitar obstáculos, específicamente hablando, [5] es una referencia representativa. Allí, dos cámaras son empleadas para calcular el flujo óptico normal y el flujo óptico divergente. A partir de tales vectores se obtiene el tiempo para el contacto del robot con algún obstáculo, el cual es una información que se utiliza para evitar obstáculos que se presentan en el camino del robot. Otra aproximación es la que se propone en [3]: la proyección inversa del flujo óptico normal se utiliza para construir una clase de mapa de la superficie del suelo. Una vez que el mapa ha sido aprendido, el robot utiliza tal conocimiento como una información a priori para observar que los valores del flujo óptico no se parezcan a tal patrón. Tales diferencias son debidas a los obstáculos, ya que el patrón a priori fue aprendido sin obstáculos presentes. Otra interesante aproximación es la reactiva adoptada en [1], en la cual una sola cámara se utiliza sobre el robot, conectada con un sistema de control basado en el tiempo para el contacto robot-obstáculo. En este

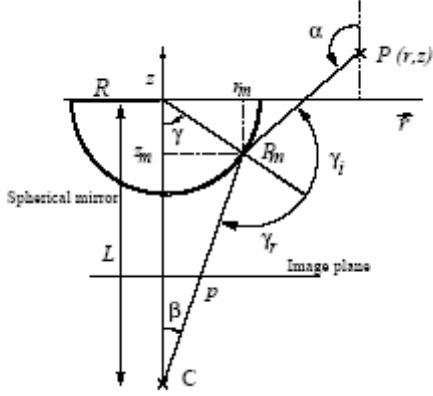


Figura 1. Geometría proyectiva para una cámara con espejo esférico.

trabajo, se considera un amplio campo de visión, en el contexto de la navegación del robot móvil basado en flujo óptico. Se lo obtiene utilizando un sistema de captura de imágenes omnidireccionales que está formado por una cámara convencional y un espejo convexo (o esférico). El uso de tal sensor en el contexto de la navegación del robot móvil y la detección/desvío de obstáculos, es aún más atractivo [9], ya que permite obtener mucha más información sobre el entorno alrededor del robot con una sola imagen. Esta es la principal razón por la cual se utiliza esta clase de sensor.

Comparado con trabajos previos, este es similar a [1], en términos de cómo el tiempo para el contacto se calcula y por el hecho de que en los dos casos todos los cálculos se realizan en la computadora propia del robot. Sin embargo, hay una diferencia en el sentido que el campo de visión obtenido es mucho más grande (se crean vistas panorámicas de 180 grados al frente del robot) y en el sentido que un sistema de control no lineal ha sido diseñado para garantizar que la orientación del robot pueda cambiar para evitar el obstáculo. Tal garantía es consecuencia de la estabilidad asintótica del sistema de control de lazo cerrado implementado, el cual será discutido en el texto.

2 Vistas Panorámicas y Flujo Óptico

Las vistas obtenidas con sensores catadióptricos son referidas como imágenes omnidireccionales. El sensor utilizado consiste de una cámara de 8 bits de escala de grises apuntando hacia arriba a un espejo convexo esférico montado justo sobre la cámara, tal que se adquiere una imagen omnidireccional de 8 bits de escala de grises, la cual representa los 360 grados de vista alrededor del robot. La caracterización de tal sensor catadióptrico es dada por el conjunto de ecuaciones [9]

$$\begin{aligned} r_m &= (z_m + L) \tan \beta \\ z_m^2 + r_m^2 &= R^2 \\ \gamma_r = \gamma_i &\Rightarrow -2 \arctan(r_m / z_m) = \alpha - \beta \end{aligned} \quad (1)$$

La geometría de la proyección está representada en la Fig. 1, donde P es un punto en el mundo real, Pm es su imagen reflejada en la superficie del espejo, C es el centro de proyección de la cámara, R es el radio del espejo y L es la distancia entre el centro del espejo y el centro de proyección, α es el ángulo de elevación, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ es la distancia radial de P al eje óptico y z es la coordenada vertical de P .

Para conseguir la proyección del punto $P = [x \ y \ z]^T$ del espacio en el plano de la imagen mediante el punto $p = (u, v)$, la proyección de P en el espejo, el punto Pm , se determina primero. Este primer paso es para caracterizar P en coordenadas esféricas, esto es,

$$P = [\varphi \ r \ z]^T = \begin{bmatrix} \arctan(y/x) & \sqrt{x^2 + y^2} & z \end{bmatrix}^T. \quad (2)$$

Siguiendo, el ángulo de visión vertical α en la Fig. 1 se expresa como

$$\alpha_p = \arctan\left(\frac{z - z_m}{r - r_m}\right) + \frac{\pi}{2}. \quad (3)$$

Introduciendo tal valor de α en (1) y resolviendo el sistema no lineal de ecuaciones para determinar los valores de (r_m, z_m) y, a partir de ellos el valor de β , finalmente se proyecta el punto Pm en el punto p en el plano de la imagen. Utilizando la proyección de perspectiva y teniendo en consideración los parámetros de la cámara, se obtiene

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tan \beta \cos \varphi \\ \tan \beta \sin \varphi \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

donde $f_u = \alpha_u f$ y $f_v = \alpha_v f$ denotan los factores de escalas horizontales y verticales, siendo f la distancia focal de la cámara utilizada, y u_0 y v_0 representan las coordenadas del centro de la imagen (la posición del punto principal en el sistema de coordenadas de la imagen)

2.1 Generando las vistas panorámicas

Las imágenes omnidireccionales adquiridas con el sistema catadióptrico son caracterizadas por su gran alta distorsión como se muestra en la Fig. 2(a). Conociendo el modelo de deformación de la imagen, tales distorsiones se pueden corregir para conseguir imágenes panorámicas [10]. En las imágenes panorámicas, cada línea contiene la proyección de todos los puntos visibles bajo un ángulo de elevación constante, tal que la rectificación de esas imágenes consiste en mapear círculos a líneas.

El procedimiento adoptado en este trabajo para conseguir imágenes panorámicas es el descrito en



(a) Imagen Omnidireccional



(b) Vista panorámica de 360 grados.



(c) Vista panorámica de 180 grados.

Figura 2. Ejemplo de conversión de una imagen omnidireccional en una vista panorámica.

[10]. En lugar de considerar círculos, se considera elipses en la imagen distorsionada, las cuales son mapeadas a líneas en el plano de la imagen (admitiendo que tales imágenes están centradas). Dado el centro de la imagen (x_o, y_o) y N puntos en las elipses, los cuales están caracterizados por

$$(x_i, y_i): i = 1, \dots, N \quad N \geq 2,$$

y escribiendo la ecuación de las elipses para cada de tales puntos, esto es escribiendo

$$\frac{(x_i - x_o)^2}{a^2} + \frac{(y_i - y_o)^2}{b^2} = 1, \quad (5)$$

el sistema de N ecuaciones

$$\frac{(x_i - x_o)^2}{a^2} + \frac{(y_i - y_o)^2}{b^2} = 1 \quad (6)$$

está dado. Si se elige un número adecuado de N puntos, los parámetros a y b de las elipses se pueden estimar, utilizando un algoritmo de mínimos cuadrados, por ejemplo. Dados tales parámetros, se genera una familia de F elipses concéntricas, cubriendo el área de interés, normalmente en la forma de un anillo, en la imagen distorsionada, para conseguir una imagen panorámica, la cual está caracterizada por

$$F_{(a,b,x_{\min},x_{\max})} = \left\{ E_{a,b} : x_{\min} - x_o \leq a \leq x_{\max} - x_o, \right. \\ \left. a/b = \text{constante} \right\} \quad (7)$$

$$E_{a,b} = \{ e_{a,b,n} : 0 \leq n \leq a + b \} \quad (8)$$

$$e_{a,b,n} = \left[a \cdot \cos\left(2\pi \frac{n}{a+b}\right) \quad b \cdot \sin\left(2\pi \frac{n}{a+b}\right) \right]^T. \quad (9)$$

En tales ecuaciones, $E_{a,b}$ es una elipse y $e_{a,b,n}$ es un punto en dicha elipse.

Finalmente, el remapeo se expresa mediante la ecuación

$$I(u, v) = I_0\left(e_{\frac{u}{a}, \frac{v}{b}}\right), \quad (10)$$

donde I e I_0 representan las imágenes original y desenvuelta, respectivamente, u y v representan la columna y la línea, respectivamente. En este trabajo, la ecuación (10) fue implementado utilizando una tabla de dos dimensiones, tal que se puede conseguir inmediatamente vistas panorámicas a partir de cualquier imagen omnidireccional adquirida.

Un ejemplo de la imagen omnidireccional y su correspondiente vista panorámica se muestra en la Fig. 2. Se observa aquí que la vista panorámica en la parte b de la figura corresponde a un campo visual de 360 grados, con la región central de la figura correspondiente al lado de atrás del robot. También es importante observar que los objetos que aparecen en el lado derecho de la imagen de la vista panorámica están realmente localizados a la izquierda del robot, lo cual es una consecuencia de utilizar un espejo para crear un sensor catadióptrico.

En el caso específico de este trabajo, sin embargo, el interés es para una vista panorámica de 180 grados, correspondiente al área de trabajo que involucra el frente del robot, ya que el robot está programado para ir hacia delante. De esta manera, la vista panorámica utilizada es la que se muestra en la Fig. 2(c), cuya dimensión es de 272x142 pixels. Esta es obtenida a partir de la Fig. 2(b) mediante simplemente tomando 272 columnas en el medio de tal figura.

2.2 Obteniendo el flujo óptico

Al principio del ciclo de control, se obtienen dos vistas panorámicas como se muestran en la Fig. 2(c). Entonces se calcula el correspondiente campo de flujo óptico. El algoritmo adoptado para realizar este cálculo es la estima de mínimos cuadrados con fusión propuesto en [11]. Esta implementación divide la imagen en regiones de 9x9 píxeles, cada una asociada a un solo vector de flujo óptico, tal que se obtiene un campo de 15x30 vectores de flujo óptico. Entonces, el algoritmo crea dos matrices de 15x30 valores reales, para almacenar los componentes horizontales y verticales de tales vectores de flujo óptico.

Cada región de 9x9 píxeles se dividen de nuevo, en 9 subregiones de 3x3 píxeles. Todos los píxeles en cada subregión son procesados para generar una estima de mínimos cuadrados de flujo óptico asociado a la región bajo consideración. Entonces son generadas 9 estimas de tal vector, cada una teniendo un valor de covarianza asociado a él [12], los cuales son fusionados para generar la mejor estima del vector de flujo óptico correspondiente. Diferentemente de

[11], sin embargo, el algoritmo de fusión utilizado aquí es el filtro de Kalman descentralizado [13].

Otra característica importante a tener en cuenta en el cálculo del flujo óptico es que las 2 vistas panorámicas consideradas en tal cálculo pueden ser adquiridas durante la rotación del robot. Para compensar el campo de flujo óptico resultante para tal rotación, y obtener un campo de flujo óptico traslacional, se utilizará las componentes horizontales de los vectores de flujo óptico correspondiente a la línea vertical en el medio de la imagen para estimar explícitamente la velocidad angular del robot, como en [4].

Para realizar tal estimación, sin embargo, se adopta un esquema de fusión utilizando un filtro de Kalman descentralizado, en lugar de realizar un promedio. El valor estimado es entonces restado de las componentes horizontales de todo el flujo óptico, para poder realizar dicha compensación.

3 Detección de obstáculos

La forma en que el ángulo de orientación del robot cambia, para poder evitar el obstáculo, se discute en esta sección.

3.1 Obteniendo los vectores de Tiempo para el Contacto

Para determinar los tiempos para el contacto se debe primeramente conseguir las coordenadas del foco de expansión (FOE) del campo de flujo óptico, lo cual significa el punto en la imagen a partir del cual todos los vectores emergen (ya que el robot está más cerca de un objeto). Como el campo de flujo óptico ha sido compensado por la rotación del robot, una buena estima del FOE es el centro de la imagen. Entonces, sus coordenadas son $x_{FOE}=136$ e $y_{FOE}=71$ píxeles. El próximo paso es calcular los valores τ_{ij} del tiempo para el contacto correspondiente a cada vector de flujo óptico. Tales valores están dados en [4] como

$$\tau_{ij} = \frac{\sqrt{(x_{ij} - x_{FOE})^2 + (y_{ij} - y_{FOE})^2}}{\sqrt{u_{ij}^2 + v_{ij}^2}}, \quad (11)$$

donde $x_{ij}=9.(j-1)+5$ e $y_{ij}=9.(i-1)+5$ son las coordenadas del centro de la región ij considerada, y u_{ij} y v_{ij} son los componentes horizontales y verticales, respectivamente, del correspondiente vector de flujo óptico. De esta manera, se genera una matriz de 15×30 tiempos para el contacto. A partir de esto, se obtiene un vector de tiempos para el contacto τ , el cual contiene los valores mínimos de τ_{ij} en cada columna j , cada uno representa el objeto más cercano en una franja de 6 grados del horizonte en el frente del robot. Un ejemplo mostrando una escena, el campo flujo óptico y el correspondiente vector de tiempo para el contacto se muestra en la Fig. 3.

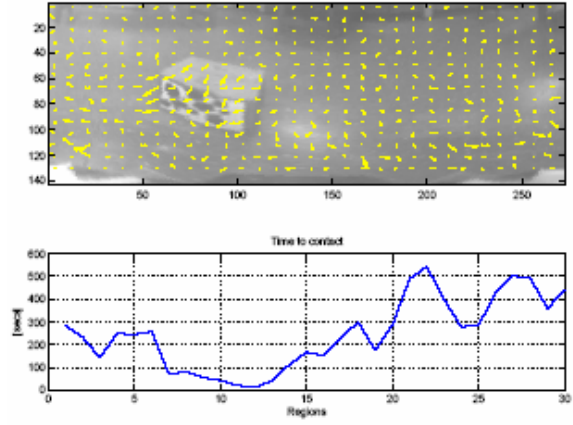


Figura 3. El vector de tiempos para el contacto correspondiente a una escena dada.

3.2 Obteniendo el ángulo de orientación deseado del robot

El robot móvil está planificado para mantenerse andando hacia delante, hasta que un obstáculo es detectado en un semicírculo al frente de él. Entonces, el robot reacciona a la presencia del obstáculo cambiando su orientación actual para evitar dicho obstáculo. Después de finalizar la maniobra para evitar el obstáculo, el robot se mantiene andando hacia delante de nuevo. Entonces, el sistema de sensado es responsable para definir la orientación deseada del ángulo del robot, θ_d , basado en la información contenida en el vector de tiempos para el contacto. Tal ángulo de orientación deseado es la referencia para el controlador encargado de cambiar la orientación del robot.

Ahora, se calcularán un vector de contribuciones a la posible desviación hacia la izquierda, $\alpha_l = \{\alpha_{li}, i=1, \dots, 15\}$, y un vector de contribuciones para una posible desviación a la derecha $\alpha_r = \{\alpha_{ri}, i=1, \dots, 15\}$, cuyas componentes dependen de la posición del obstáculo en el campo visual del robot (el elemento del vector τ considerado) y de la distancia robot-obstáculo (el valor correspondiente del tiempo para el contacto). Tales ángulos son calculados como

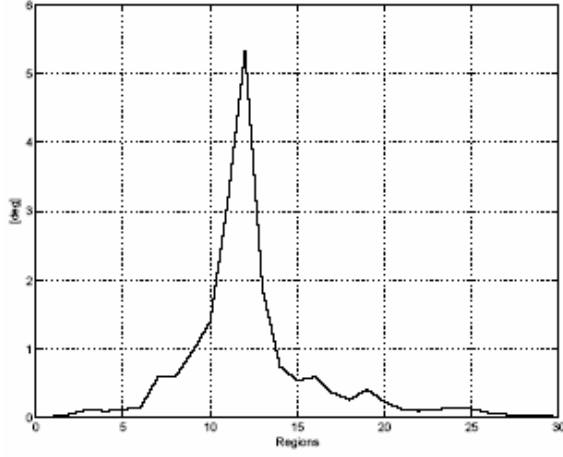
$$\alpha_{ri} = \frac{6i}{\tau_i + 1}, \quad i=1, \dots, 15 \quad (12)$$

y

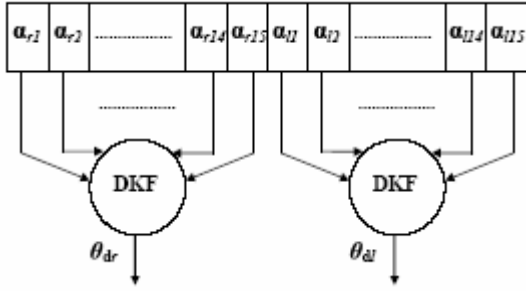
$$\alpha_{li} = \frac{6i}{\tau_i + 1}, \quad i=1, \dots, 15, \quad (13)$$

ya que 6 grados es el ángulo correspondiente a cada franja en el campo visual de 180 grados.

Para definir el valor final del ángulo de desviación deseado θ_d , se obtienen primero 2 valores posibles, θ_{dr} , con respecto a la desviación al lado derecho, y θ_{dl} con respecto a la desviación hacia el lado izquierdo. Tales ángulos son obtenidos mediante la fusión de los ángulos en (12) y (13), respectivamente, utilizando un filtro de Kalman descentralizado como algoritmo de fusión (la covarianza asociada a



(a) Los ángulos α_{ri} y α_{li}



(b) El paso de fusión utilizado para conseguir θ_{dr} y θ_{dl}

Figura 4. Obteniendo los candidatos θ_{dr} y θ_{dl} para ser el ángulo de orientación deseado del robot.

cada valor α_{ri} y α_{li} es el valor del correspondiente tiempo para el contacto τ_i , como en [1]). La Fig. 4 ejemplifica los valores de α_{ri} y α_{li} y muestra los ángulos θ_{dr} y θ_{dl} generados.

A partir de los ángulos θ_{dr} y θ_{dl} emergiendo de la fusión ilustrada en la Fig. 4(b), el valor final de la orientación deseada θ_d a ser impuesta al robot se calcula como

$$\theta_d = \text{sign} \left[\log \frac{\theta_{dl}}{\theta_{dr}} \right] \min(\theta_{dl}, \theta_{dr}), \quad (14)$$

teniendo en cuenta que las desviaciones a la izquierda corresponde ángulos positivos y viceversa. Observar que θ_d se selecciona como el valor más cercano a la orientación actual del robot, pero en la dirección más alejada del obstáculo.

4 Diseño del Sistema de Control

La ley de control no lineal (comando de velocidad angular) aquí propuesta para cambiar la orientación del robot móvil para poder evitar el obstáculo está dada por

$$\omega = m \tanh(\tilde{\theta}) + \dot{\theta}_d \quad (15)$$

donde m es una constante positiva, θ_d es la referencia del ángulo de orientación, obtenido a partir de (14), θ es la orientación del robot (cero grados para navegar,

considerando el eje de movimiento del robot), $\tilde{\theta} = \theta_d - \theta$ es el error en la orientación del robot, y $\omega = \dot{\theta}$ es el modelo cinemática del robot. Dos importantes características son el uso de la $\tanh(\cdot)$ para prevenir la saturación de los comandos (existe una cota en la velocidad angular del robot) y el hecho que θ_d es constante entre dos adquisiciones de imágenes consecutivas (ver subsección 3.2). A su vez, el período de muestreo asociado al lazo de control del ángulo θ es de 0,1 segundos, el cual es mucho más bajo que el intervalo entre dos adquisiciones de imágenes.

El ángulo θ_d puede variar rápidamente, exhibiendo derivadas muy altas, las cuales no son compatibles con las velocidades angulares acotadas de los robots reales. Un ejemplo es cuando un camino libre aparece de repente, lo cual significa que la diferencia discreta de dos valores subsecuentes de θ_d puede ser muy alta. La solución adoptada aquí para garantizar un comportamiento suave para θ_d es filtrándolo. Entonces, sea θ_r la orientación deseada del robot móvil (determinada como en (14)) y θ_d sea su valor filtrado (filtro de primer orden), donde se tiene

$$\frac{\theta_d}{\theta_r} = \frac{1}{1 + as}$$

$$\theta_r = \theta_d + a \dot{\theta}_d$$

$$\dot{\theta}_d = \frac{\theta_r - \theta_d}{a}$$

$$\dot{\theta}_d \cong \frac{\theta_d(k) - \theta_d(k-1)}{T} = \frac{\theta_r(k) - \theta_d(k)}{a}$$

y, finalmente,

$$\theta_d(k) = \frac{aT}{a+T} \left(\frac{\theta_r(k)}{a} + \frac{\theta_d(k-1)}{T} \right),$$

donde T es el período de muestreo. Ahora, conociendo $\theta_d(k)$ se pueden obtener los valores de $\tilde{\theta}$ y $\dot{\theta}_d$ necesarios al cálculo de la ley de control en (15).

4.1 Análisis de estabilidad

Reemplazando la ley de control expresada en (15) en la ecuación del sistema $\dot{\theta} = \omega$, se consigue la ley de control de lazo cerrado dada por

$$\dot{\theta} = m \tanh(\tilde{\theta}) + \dot{\theta}_d$$

la cual es equivalente a

$$\dot{\tilde{\theta}} = m \tanh(\tilde{\theta}).$$

Sea $V = \frac{\tilde{\theta}^2}{2}$ una función candidata de Lyapunov. Su derivada en el tiempo es

$$\dot{V} = -\tilde{\theta} m \tanh(\tilde{\theta}),$$

la cual es una función definida negativa, por lo tanto se puede concluir que $\theta(t) \rightarrow \theta_d(t)$ cuando $t \rightarrow \infty$. Entonces el sistema de control de lazo cerrado es asintóticamente estable, y está garantizado que la orientación del robot cambiará acordemente.

4.2 Ley de control de velocidad lineal

También se desea que el robot cambie su velocidad lineal v de acuerdo con la situación actual. Él se debería mover hacia delante con baja velocidad lineal cuando el mínimo valor en el vector de tiempos para el contacto τ es pequeño (un objeto está cerca del robot en cualquier dirección) o el robot está maniobrando para orientarse en la dirección correcta ($\tilde{\theta}$ no es nulo). De otra manera, se puede mover rápido, alcanzando la máxima velocidad lineal posible V_{max} cuando no existen obstáculos en su frente. Entonces, la ley de control propuesta es

$$v = V_{max} \tanh(\tau) \cos(\tilde{\theta})$$

la cual cumple con los requerimientos antes mencionados. Observar que si efectivamente τ se incrementa v tiende a saturar. En este sentido, V_{max} debe ser definido teniendo en cuenta los límites físicos del robot. Una vez más, $\tanh(\cdot)$ se utiliza para prevenir las saturaciones de los comandos.

5 Resultados Experimentales

Para poder validar los subsistemas de sensado y control propuestos, se utiliza un robot móvil Pioneer 2DX, el cual está equipado con un sensor catadióptrico, compuesto por una cámara de 8 bits de escala de grises y un espejo esférico (ver Fig. 5). La programación de los algoritmos fueron realizados en la computadora de a bordo del robot que está basada en un procesador Intel Pentium MMX 266Mhz, con 128 Mbytes de RAM y un frame grabber, donde los valores de las constantes aquí adoptadas, después de un ajuste experimental, son $m=10$ grados por segundo y $a=0,1$ segundos. Otros parámetros son $T=1$ segundo y $V_{max}=75\text{mm/seg}$.

El experimento consiste en que el robot navegue alrededor del laboratorio, evitando obstáculos dentro de un semicírculo cuyo centro es el propio centro del robot. Estuvo andando por minutos, y no ha tenido colisiones. Esto significa que el subsistema de sensado fue capaz para definir correctamente los cambios a hacer en la orientación actual del robot y que el controlador fue capaz de garantizar el acompañamiento de tal cambio.

La Fig. 6 muestra el plan del laboratorio donde



Figura 5. El robot móvil equipado con un sensor catadióptrico.

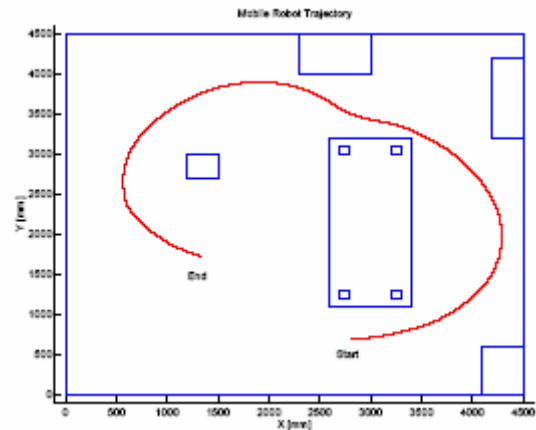


Figura 6. Trayectoria seguida por el Robot Móvil durante la navegación.

el robot estuvo navegando, como también la trayectoria descrita a lo largo del tiempo (reconstruida a través de la odometría). Finalmente, para ilustrar la efectividad del controlador implementado, la Fig. 7 muestra la gráfica correspondiente a la orientación del robot θ , la orientación deseada θ_d y el comando de velocidad angular ω como parte del experimento. A partir de tales figuras se puede observar que ambos subsistemas muestran un muy buen desempeño.

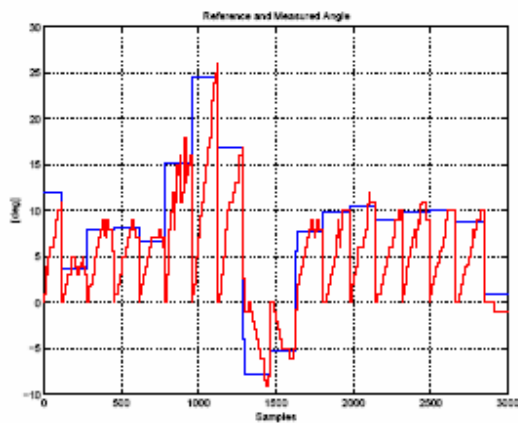
6 Conclusiones

Se ha propuesto en este trabajo de investigación un sistema de sensado basado en el cálculo del flujo óptico a partir de dos vistas panorámicas cubriendo 180 grados del entorno de trabajo al frente de un robot móvil, el cual permite determinar el cambio a ser impuesto a la orientación actual del robot para evitar un obstáculo. Las vistas panorámicas son adquiridas utilizando un sensor catadióptrico que está sobre el robot, permitiendo superar el problema de apertura asociado al uso de una cámara de perspectiva.

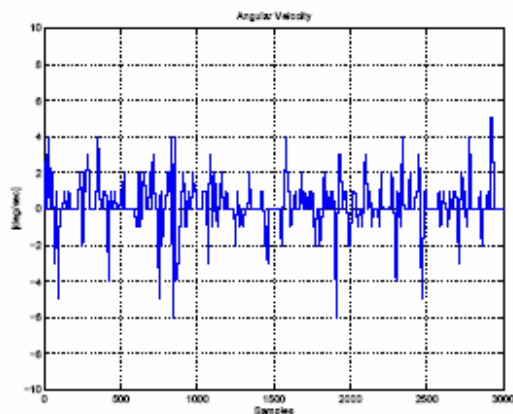
También se ha propuesto un controlador no lineal, cuyo objetivo es garantizar que el cambio necesario en la orientación del robot sea realizado efectivamente. Tal garantía es una consecuencia de la estabilidad asintótica del sistema de lazo cerrado implementado, el cual también ha sido probado.

Varios experimentos con un robot móvil en el cual los sistemas aquí propuestos fueron programados y corridos, y uno de ellos es aquí analizado, para poder ilustrar su desempeño. Por lo tanto, los experimentos validan el sistema propuesto: el robot se mantiene navegando durante un tiempo importante sin colisionar ningún obstáculo.

Otra característica importante a tener en cuenta del sistema de control y sensado propuesto es que todos los cálculos son realizados en el robot, lo que permite asegurar una completa autonomía para no demandar ninguna clase de transmisión de imágenes o comandos, los cuales podrían limitar la distancia a la cual el robot móvil pueda viajar.



(a) Ángulos θ_d y θ



(b) Comando de velocidad angular ω .

Figura 7. Ángulo de orientación del robot móvil (deseada y real) y el comando de velocidad angular.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las instituciones CAPES (Brasil) y SPU (Argentina) por su soporte financiero al proyecto de intercambio entre la Universidad Nacional de San Juan - UNSJ, San Juan, Argentina, y la Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Vitória, ES, Brasil. A través de este proyecto Carlos M. Soria ha cumplido una estancia de tres meses en Vitória, donde este trabajo se ha desarrollado.

Bibliografía

- [1] M. Sarcinelli-Filho, H. J. A. Schneebeli, E. M. O. Caldeira, and B. M. Silva, "Optical flow-based reactive navigation of a mobile robot," in *Proceedings of the 5th IFAC/EURON Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles - IAV2004*, Lisbon, Portugal, 2004.
- [2] J. A. Santos-Victor, G. Sandini, F. Curotto, and S. Garibaldi, "Divergent stereo in autonomous navigation: From bees to robots," *International Journal of Computer Vision*, vol. 14, pp. 159–177, March 1995.
- [3] J. A. Santos-Victor and G. Sandini, "Visual-based obstacle detection: A purposive approach using the normal flow," in *Proceedings of the International Conference on Intelligent Autonomous Systems - IAS95*, 1995.
- [4] A. Dev, B. J. A. Krose, and F. C. A. Groen, "Navigation of a mobile robot on the temporal development of the optic flow," in *Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'97)*, Grenoble, France, September 1997, pp. 558–563.
- [5] D. Coombs, M. Herman, T. H. Hong, and M. Nashman, "Real-time obstacle avoidance using central flow divergence and peripheral flow," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 1, pp. 49–59, February 1998.
- [6] M. C. A. Giachetti and V. Torre, "The use of optical flow for road navigation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, pp. 34–48, February 1998.
- [7] R. Carelli, C. Soria, O. Nasisi, and E. O. Freire, "Stable agv corridor navigation with fused vision-based control signals," in *Proceedings of the 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society - IECON 02*, Sevilla, Spain, 2002, pp. 2433–2438.
- [8] D. F. T. Gamarra, M. Sarcinelli-Filho, and T. F. Bastos-Filho, "Controlling the navigation of a mobile robot in a corridor with redundant controllers," in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA '05*, Barcelona, Spain, 2005, pp. 3855–3860.
- [9] J. Gaspar, N. Winters, and J. A. Santos-Victor, "Vision-based navigation and environmental representations with an omnidirectional camera," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 6, pp. 890–898, December 2000.
- [10] J. Gaspar, "Catadioptric panoramic cameras for mobile robot selfpositioning," *ISR/IST-VISLAB*, Lisbon, Portugal, Tech. Rep., June 1999.
- [11] D. F. T. Gamarra, T. F. Bastos-Filho, M. Sarcinelli-Filho, C. M. Soria, and R. Carelli, "Optical flow calculation using data fusion with decentralized information filter," in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA '05*, Barcelona, Spain, 2005, pp. 2864–2869.
- [12] A. Dev, B. J. A. Krose, and F. C. A. Groen, "Confidence measures for image motion estimation," in *Proceedings of the 1997 RWC Symposium*, Japan, 1997, pp. 199–206.
- [13] R. Brown and P. Hwang, *Introduction to Randon Signals and Applied Kalman Filtering*, 3rd ed. New York, USA: John Wiley and Sons, 1997.

- [14] E. de Michelli and A. Verri, "Vehicle guidance from one dimensional optical flow," in *Proceedings of the IEEE Symposium on Intelligent Vehicles*, 1993.