

CONTROL VISUAL BASADO EN GEOMETRÍA EPIPOLAR PARA ROBOTS MÓVILES *

G. López-Nicolás, C. Sagüés and J.J. Guerrero [†]
DIIS - I3A, Universidad de Zaragoza, C/ María de Luna 1, E-50018 Zaragoza, Spain
{gonlopez, csagues, jguerrer}@unizar.es

Resumen

En la última década se han presentado una significativa cantidad de trabajos en el área del control visual. Sin embargo, la mayoría de las contribuciones se limitan a robots de tipo holonómico. Recientemente, algunos trabajos han propuesto el uso de realimentación visual para control de vehículos no holonómicos tales como la maniobra de aparcamiento de un coche. La mayoría de las propuestas se centran en la parte del control visual considerando algoritmos de visión simples basados en marcas artificiales. En este artículo se propone un control visual basado en la geometría epipolar para robots no holonómicos. El método sigue el clásico enfoque en el que una imagen de referencia define la posición y orientación deseada del robot. La mayor contribución del artículo es que la ley de control considera restricciones no holonómicas del robot en el marco de la geometría epipolar y que no necesita marcas artificiales ni modelos del entorno utilizando un proceso robusto de detección y emparejamiento de características. Se ha realizado una amplia evaluación experimental en entornos realistas para demostrar la validez del control presentado.

Palabras clave: Control visual, Geometría epipolar, Robots no holonómicos.

1 INTRODUCCIÓN

La robótica de servicio se está desarrollando muy rápidamente. Aparte del desarrollo de plataformas fiables, el uso de manipuladores sobre plataforma móvil representa uno de los mayores retos puesto que engloba cuestiones de investigación como la navegación, evitación de obstáculos, control visual, agarre de objetos y manipulación. Aunque ha habido una cantidad considerable de propuestas en cada una de las áreas anteriores, todavía no hay sistemas que puedan moverse en un entorno de forma robusta y completamente segura manipulando objetos al mismo tiempo.

*Este trabajo es una adaptación para las XXVII Jornadas de Automática del presentado en ICRA'06 por G. López-Nicolás, C. Sagüés, J.J. Guerrero, D. Kragic and P. Jensfelt titulado "Nonholonomic Epipolar Visual Servoing", pp. 2379-2384, Orlando 2006.

[†] Este trabajo ha sido financiado por el proyecto MCYT/FEDER - DPI2003 07986 y STINT - IG2003 2060.

Algunas de las claves para llevar a cabo tareas de manipulación móvil son el nivel de cooperación entre los distintos subsistemas y la cantidad de sensores requeridos. En general se acepta que la visión es una de las modalidades de sensor más importantes para temas de navegación, manipulación y agarre de objetos. De aquí que una de las bases de los sistemas de manipulación móvil sea el control visual [9]. Durante los últimos años, un gran número de trabajos de investigación en control visual han sido presentados, [4-7, 10]. Sin embargo, muchos de ellos se centran principalmente en problemas y diferencias entre control visual 2 1/2 D, basado en imagen y basado en posición asumiendo que no hay restricciones en el propio movimiento de la plataforma.

En términos de manipulación móvil es muy importante tener en cuenta el movimiento de la base que lleva el manipulador o una cámara. En general estas plataformas son no holonómicas y la mayor parte de las contribuciones anteriores no son apropiados en este caso. Algunas investigaciones se han centrado en el problema de control de plataformas móviles, [2, 13, 15, 16].

El método propuesto es un control visual basado en la estimación de la geometría epipolar donde la única información previa es una imagen objetivo. Este método es apropiado para plataformas móviles no holonómicas, no necesita una calibración de la cámara completa ni ningún conocimiento específico de la geometría de la escena. Se ha realizado una extensa evaluación experimental en entornos realistas que muestran la efectividad de nuestro método.

La idea básica del control visual en que se enmarca este trabajo es el control de un robot hasta una posición específica en el entorno regulando a cero un término de error que es estimado emparejando información de imagen entre la posición actual y la de referencia. Este enfoque está siendo la forma más habitual de control de robots ya que evita tratar problemas de visión como segmentación de la imagen o reconocimiento de la escena.

Uno de los primeros ejemplos de este enfoque se presenta en [1]. En dicho trabajo se considera navegación basada en imagen en donde el control del movimiento se realiza calculando la posición relativa entre el robot y el objetivo deseado. Esta posición relativa se calcula a través de la matriz esencial, asumiendo que los parámetros internos de la cámara son conocidos con precisión. En com-

paración, nuestro método no requiere un conocimiento preciso de la calibración. Además, nuestro método no necesita el cálculo de ninguna distancia 3D, ya que está directamente basado en las trayectorias de los epipolos en la imagen. En [1] la distancia al objetivo se determina como un número de pasos utilizando dos imágenes consecutivas, siendo cada paso de la misma longitud que el realizado entre las dos imágenes utilizadas. En nuestro método el movimiento en cada paso es independiente de los anteriores. Esto permite realizar tareas auxiliares o la evitación de obstáculos mientras se navega sin afectar a la convergencia al objetivo.

La contribución presentada en [15] está basada en la geometría epipolar aprovechando la propiedad auto-epipolar. Esta propuesta no requiere ninguna información de los parámetros internos de la cámara. El trabajo presentado en [13] extiende el control visual auto-epipolar de [15] para resolver las restricciones no holónicas. El movimiento es realizado en tres pasos secuenciales para alcanzar la posición objetivo. El segundo paso, que es el que trata la no holonomicidad del sistema, está basado en la geometría epipolar y consiste en una ley de control de realimentación linealizada de entrada-salida. Sin embargo, el movimiento realizado en el segundo paso aleja el robot del objetivo para luego volver en una maniobra que no corresponde con el comportamiento que sería deseable. Ésta es una de las bases de nuestro trabajo, que se propone conducir el robot con una trayectoria directa hacia el objetivo.

El problema de llegar a un objetivo es resuelto en general utilizando la geometría epipolar, la cual está mal condicionada en escenas planas, frecuentes en entornos humanos. Además, la imágenes obtenidas durante el control visual pueden resultar en una línea base reducida, en cuyo caso la matriz fundamental obtenida es inadecuada. Se ha demostrado que trabajando con homografías se elimina este problema [11, 16].

2 ESTIMACIÓN DE LA GEOMETRÍA EPIPOLAR

En esta sección se describen brevemente las características visuales utilizadas así como el proceso de extracción y establecimiento de correspondencias, y el procedimiento para el cálculo de la geometría epipolar.

En un estudio reciente, Mikolajczyk y Schmid [14] analizaron un gran número de descriptores de puntos de interés y su comportamiento ante cambios (escala, iluminación). El descriptor que resultó ser más robusto en este estudio fue el descriptor SIFT (Scale Invariant Feature Transform) propuesto originalmente en [12]. En la implementación actual, utilizamos características SIFT tal como se definen en [12] donde, principalmente por razones de coste computacional, el descriptor utiliza características tipo punto determinadas por picos de diferencias de series Gaussianas en escalas variables. En [3] se

presentan las llamadas características de Harris-Laplace que responden a regiones de gran curvatura, en vez de estructuras tipo *blob* como las presentadas en el SIFT original. Éste es el método utilizado en el trabajo actual. A diferencia de las características de Harris normales, los picos se encuentran distribuidos espacialmente y en escala, por tanto más invariantes a escala. De este modo se tienen características localizadas espacialmente con precisión, lo cual es esencial si las características son utilizadas para estimación de posición, en vez de sólo para establecer correspondencias.

Como puede verse en la Fig. 1, el descriptor corresponde a localizaciones en la imagen muy diferenciadas y es robustamente invariante a transformaciones en la imagen como traslación, rotación y escala. El emparejamiento entre las imágenes se realiza utilizando la medida de la distancia cuadrática entre descriptores. Para obtener un proceso de emparejamiento más robusto, se exige que para cada par de puntos correspondientes, el emparejamiento sea el mejor respecto las direcciones de la primera a la segunda y de la segunda a la primera imagen.

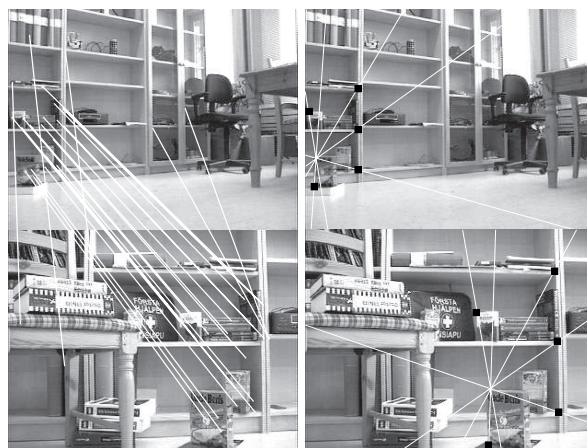


Figura 1: Izquierda, ejemplo de emparejamiento entre una imagen actual (arriba) y una objetivo (debajo). Se han encontrado 25 parejas. Derecha, epipolos estimados y algunas líneas epipolares.

Una vez que las correspondencias están disponibles se pueden estimar las coordenadas de los epipolos. Primero se estima la matriz fundamental utilizando el método robusto propuesto por Torr [18] llamado Maximum a posteriori Sample Consensus (MAPSAC) que está basado en el conocido algoritmo de los 7 puntos, [8]. Similar al RANSAC, el método consiste en calcular repetidamente posibles soluciones a partir de la solución mínima de 7 puntos correspondientes y minimizar un término de error para un determinado conjunto de combinaciones aleatorias de correspondencias. La Fig. 1 muestra los epipolos estimados y algunas líneas epipolares para una imagen actual y una imagen objetivo.

3 MODELOS VISUAL Y DE MOVIMIENTO

El modelo general sencillo de una cámara considera la matriz de calibración definida como

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & x_0 \\ 0 & \alpha_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

donde α_x y α_y son la distancia focal de la cámara en píxeles en las direcciones x e y respectivamente; s es el sesgo y (x_0, y_0) son las coordenadas del punto principal. Se tiene que $\alpha_x = fm_x$ y $\alpha_y = fm_y$, en donde f es la distancia focal y m_x, m_y son los píxeles por unidad de distancia. Para el método propuesto en este artículo no se necesita un conocimiento completo ni preciso de los parámetros de la cámara. En la práctica se puede suponer que el punto principal está en el centro de la imagen ($x_0 = 0, y_0 = 0$) y que $s = 0$.

Se define el estado del robot por sus coordenadas de posición y orientación $\mathbf{x} = (x, z, \theta)^T$. De la proyección proyectiva (Fig. 2), la coordenada x del epipolo en la imagen actual (e_{cx}) puede expresarse en función del estado del robot como

$$e_{cx} = \alpha_x \frac{x \cos \theta - z \sin \theta}{z \cos \theta + x \sin \theta}. \quad (1)$$

De forma similar (Fig. 2) se tiene la coordenada x en la imagen objetivo (e_{tx}) como

$$e_{tx} = \alpha_x \frac{x}{z}. \quad (2)$$

Se tiene además que la cinemática diferencial no holonómica se puede expresar de forma general como

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} &= h(\mathbf{x}) \end{aligned}$$

en donde $\mathbf{x} = (x, z, \theta)^T$ denota el vector de estado, $\mathbf{u} = (v, \omega)^T$ el vector de entrada e $\mathbf{y} = (e_{cx}, e_{tx})^T$ el vector de salida. La cinemática diferencial no holonómica particular del robot expresada en la forma de espacio de estados en función de la velocidad de traslación y rotación (v, ω) es:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} v \sin \theta \\ v \cos \theta \\ \omega \end{bmatrix} \\ \mathbf{y} &= [e_{cx} \ e_{tx}]^T \end{aligned} \quad (3)$$

Además, como puede verse en la Fig. 2, se pueden deducir las siguientes relaciones geométricas:

$$z = d \sin \psi, \quad x = d \cos \psi. \quad (4)$$

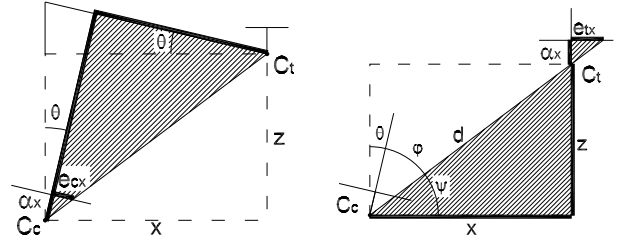


Figura 2: Relaciones geométricas para e_{cx} (izquierda) y e_{tx} (derecha). C_c y C_t son las posiciones de la cámara actual y objetivo respectivamente.

4 LEY DE CONTROL

El objetivo es controlar el sistema usando como entrada sólo las coordenadas de los epipolos. De esta forma el control visual se transforma en un problema de seguimiento en el que se definen las trayectorias deseadas de los epipolos. Con la definición apropiada de estas trayectorias se propone una ley de control que permite la navegación directa hacia el objetivo.

Nos encontramos ante un sistema no lineal por lo que se ha llevado a cabo una linealización de entrada-salida. Esta linealización se realiza mediante la derivación de la salida del sistema hasta que las entradas aparezcan explícitamente. Con lo cual, para el epipolo en la imagen actual (1), se tiene

$$\dot{e}_{cx} = \frac{\partial e_{cx}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\alpha_x \frac{x \cos \theta - z \sin \theta}{z \cos \theta + x \sin \theta} \right).$$

Utilizando (3) y (4) después de derivar se obtiene

$$\dot{e}_{cx} = -v \frac{\alpha_x \cos(\theta + \psi)}{d \sin^2(\theta + \psi)} - \omega \frac{\alpha_x}{\sin^2(\theta + \psi)}. \quad (5)$$

De forma similar para el epipolo en la imagen objetivo (2) se tiene

$$\dot{e}_{tx} = \frac{\partial e_{tx}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\alpha_x \frac{x}{z} \right) = \alpha_x \frac{\dot{x}z - x\dot{z}}{z^2}.$$

De nuevo, utilizando (3) y (4) se obtiene

$$\dot{e}_{tx} = -v \frac{\alpha_x \cos(\theta + \psi)}{d \sin^2 \psi}. \quad (6)$$

Con las expresiones deducidas se puede escribir una relación lineal entre la entrada linealizada y la salida de la siguiente forma

$$\begin{bmatrix} v_c \\ v_t \end{bmatrix} = \mathbf{L} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix},$$

donde v_c y v_t , que se definen más adelante, son funciones dependientes de \dot{e}_{cx} y \dot{e}_{tx} respectivamente. De (5) y (6) se obtiene la siguiente matriz de desacoplamiento

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_x \cos(\theta+\psi)}{d \sin^2(\theta+\psi)} & -\frac{\alpha_x}{\sin^2(\theta+\psi)} \\ -\frac{\alpha_x \cos(\theta+\psi)}{d \sin^2 \psi} & 0 \end{bmatrix},$$

con $\psi = \arctan\left(\frac{\alpha_x}{e_{tx}}\right)$ y $\theta = \arctan\left(\frac{\alpha_x}{e_{cx}}\right) - \psi$, (Fig. 2).

Por lo tanto, la entrada del sistema queda

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \mathbf{L}^{-1} \begin{bmatrix} v_c \\ v_t \end{bmatrix},$$

donde (v_c, v_t) son las nuevas entradas a determinar. Asumiendo como objetivo del control el seguimiento de las funciones \dot{e}_{cx}^{des} , \dot{e}_{tx}^{des} , se puede escribir

$$\begin{bmatrix} v_c \\ v_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{e}_{cx}^{des} - k_c(e_{cx} - e_{cx}^{des}) \\ \dot{e}_{tx}^{des} - k_t(e_{tx} - e_{tx}^{des}) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

con k_c y k_t las ganancias del control. Un sistema Lyapunov estable es un sistema para el cual el estado permanece acotado en el tiempo para cualquier condición inicial finita. En el caso del sistema linearizado, los valores propios deben ser estrictamente mayor que cero para poder garantizar la estabilidad. En nuestro sistema de control la inversa de la matriz \mathbf{L} queda como sigue

$$\mathbf{L}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d \sin^2 \psi}{\alpha_x \cos(\theta+\psi)} \\ -\frac{\sin^2(\theta+\psi)}{\alpha_x} & \frac{\sin^2 \psi}{\alpha_x} \end{bmatrix},$$

Los valores propios que se obtienen de \mathbf{L}^{-1} son:

$$\lambda = \frac{\sin^2 \psi}{2\alpha_x} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sin^4 \psi}{\alpha_x^2} + \frac{4d \sin^2(\theta+\psi) \sin^2 \psi}{\alpha_x^2 \cos(\theta+\psi)}}$$

A partir las soluciones obtenidas se han realizado simulaciones (Fig. 3) comprobando que la parte real de los valores propios es siempre igual a cero o positiva. Teniendo en cuenta la aportación en la entrada de las ganancias $-k_c$ y $-k_t$ (7) resulta que $Re(\lambda) \leq 0$, por lo que el sistema es estable excepto cuando los valores propios son cero, en cuyo caso no se puede concluir nada. Esto ocurre cuando $\theta = 0$, por lo tanto la estabilidad queda garantizada excepto en ese caso.

La ley de control necesita que la matriz \mathbf{L} sea invertible. Del determinante $det(\mathbf{L}) = -\alpha_x^2 \cos(\theta + \psi) / (d \sin^2 \psi \sin^2(\theta + \psi))$ se observa que \mathbf{L} es singular si $(\theta + \psi) = 90^\circ$ (o de forma equivalente $e_{cx} = 0$). El objetivo es realizar la navegación con el robot alineado a la línea base, sólo cuando no está alineado la ley de control necesita corregir la orientación; en otro caso el robot avanza con velocidad constante evitando así la singularidad de la matriz de desacoplamiento. La distancia entre la cámara actual y el objetivo (d) es desconocida, pero puede ser sustituida por un parámetro constante sin afectar a la convergencia del sistema.

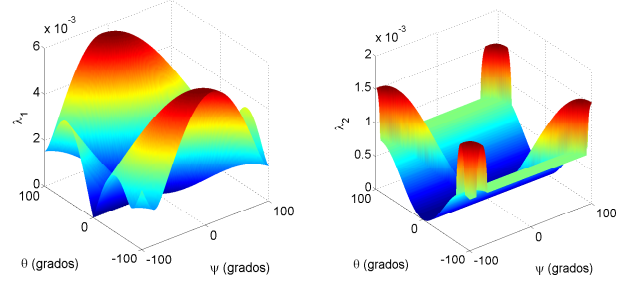


Figura 3: Valores propios λ_1 y λ_2 obtenidos en función de θ y ψ .

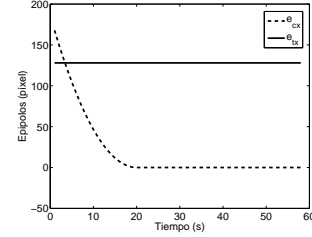


Figura 4: Trayectorias deseadas de los epipolos.

El comportamiento del sistema depende completamente de las trayectorias deseadas de los epipolos. Se pueden elegir diferentes posibilidades en función de la trayectoria deseada para el robot. La trayectoria de cada epipolo se implementa como una determinada función que hace evolucionar de forma apropiada los epipolos (Fig. 4)

$$e_{cx}^{des} = \begin{cases} (e_{cx}(0) - x_0) \left(\frac{t^2}{T_c^2} - \frac{2t}{T_c} + 1 \right) + x_0 & 0 \leq t < T_c \\ x_0 & t \geq T_c \end{cases}$$

$$e_{tx}^{des} = e_{tx}(0) \quad \forall t. \quad (8)$$

La idea es realizar primero una rotación hasta que $e_{cx} = x_0$ mientras $e_{tx} = constante$. A continuación, cuando se alcanza el instante T_c , el robot está alineado con la línea base y la cámara actual apunta hacia el objetivo. Entonces, el robot avanza en una trayectoria rectilínea hasta que se alcanza el objetivo. Para más detalles consultar el trabajo previo [17].

Cuando el robot está cerca del objetivo, la geometría epipolar no está bien condicionada. En nuestro método, el robot alcanza el objetivo sin la orientación deseada y ésta no puede ser corregida mediante una ley de control basada en la geometría epipolar. Por lo tanto, se necesita un procedimiento adicional para corregir el error final en la posición objetivo, y en este caso se puede utilizar un control basado en homografía [16]. Ésta es una solución viable en cuanto que cerca del objetivo, todo el entorno se ve como plano por el par de imágenes. En la siguiente sección se proporciona la solución adoptada ante este problema.

5 EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

Se han realizado simulaciones y experimentos reales para mostrar la validez y el comportamiento del método propuesto. Los experimentos simulados demuestran la respuesta de la ley de control en diferentes condiciones y los experimentos reales demuestran el buen comportamiento del método en entornos realistas.

Observando el recorrido realizado durante la navegación, éste se puede dividir en tres fases. La dos primeras consisten en una rotación en la posición inicial hasta que el robot apunta al objetivo y en un avance hasta la posición objetivo. Finalmente, se realiza un giro hasta alcanzar la orientación deseada. Las dos primeras fases se realizan a través de la ley de control presentada. Sin embargo, la última fase no se puede llevar a cabo por el control debido a que en esa posición la geometría epipolar no está bien condicionada. Por lo tanto, se utiliza en su lugar un esquema de correlación basado en los puntos característicos de la imagen. La transición entre la ley de control y el esquema de correlación ocurre cuando los valores de los epipolos varían rápidamente sobre un umbral, revelando que la geometría epipolar no está ya bien definida.

5.1 SIMULACIONES

Los datos simulados consisten en una escena sintética formada por puntos aleatorios que se generan y proyectan en los planos imagen en cada iteración del bucle de control durante la navegación. A partir de las parejas de puntos obtenidas se calcula la geometría epipolar. El tamaño de las imágenes producido por la cámara virtual es de 320×240 píxeles. Para las siguientes simulaciones la posición inicial es $(x, z, \theta) = (-2, -10, 5^\circ)$ y la posición objetivo es $(0, 0, 0^\circ)$.

En el primer experimento se ha añadido ruido Gaussiano a los puntos de la imagen y se ha repetido el experimento con diferentes valores de la desviación típica (σ). La rotación, el recorrido y la evolución de los epipolos obtenidos se muestran en la Fig. 5 y Fig. 6 con los diferentes resultados superpuestos. Los resultados muestran que la navegación con la ley de control es robusta al ruido de imagen. Como se ha dicho anteriormente, la matriz fundamental está mal condicionada cuando la línea base es demasiado pequeña; esto se puede ver en la Fig. 6, donde la matriz fundamental no da buenos valores para los epipolos en la última fase de la navegación (a partir de los 40 segundos)

En el segundo experimento la distancia focal real se modifica con diferentes valores mientras que el control mantiene un mismo valor $f = 6$ mm. El objetivo es mostrar la robustez ante errores de calibración. De hecho, los resultados revelan que no es necesario conocer la distancia focal. El recorrido realizado es el mismo en todos los casos (Fig. 7) y el único efecto es una variación proporcional en la salida del control. Esto se resuelve de

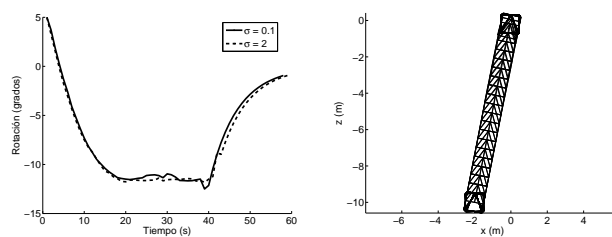


Figura 5: Rotación y recorrido del robot con ruido de imagen de $\sigma = 0.1$ y 2 píxeles.

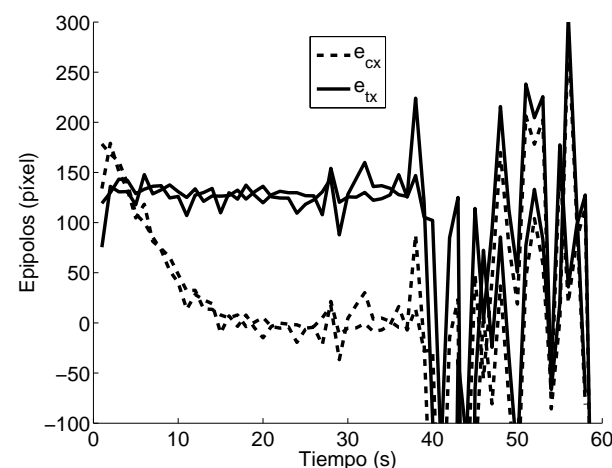


Figura 6: Evolución de los epipolos con ruido de imagen de $\sigma = 0.1$ y 2 píxeles.

forma sencilla con el ajuste de las ganancias del controlador.

El tercer experimento se lleva a cabo asumiendo que la coordenada x del punto principal es $x_0 = 0$ mientras que se modifica su valor real. La Fig. 8 revela que se produce un error lateral en la posición final, sin ningún error de rotación, dependiendo de la imprecisión de x_0 . Esto es debido a que la expresión de las trayectorias deseadas de los epipolos en la entrada del control (8) dependen de x_0 . Por eso, si la posición final deseada del epipolo actual es el punto principal, su imprecisión se propaga al control, produciendo un error lateral. Por otro lado, al epipolo objetivo se le pide mantener su valor constante independientemente del punto principal, ayudando a reducir el error lateral final.

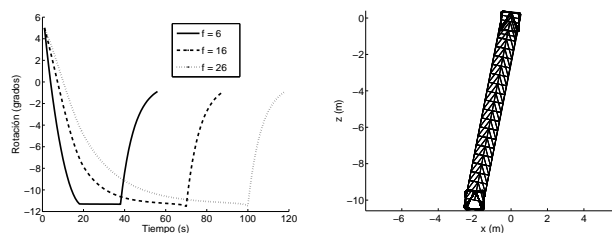


Figura 7: Rotación y recorrido del robot con $f = 6, 16$ y 26 mm.

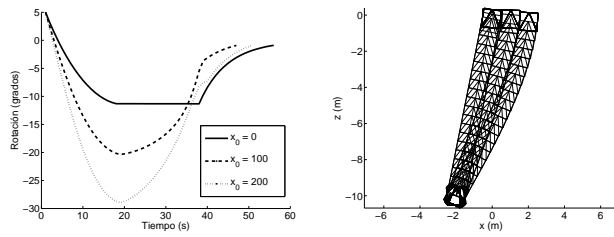


Figura 8: Rotación y recorrido del robot con $x_0 = 0, 100$ y 200 píxeles.

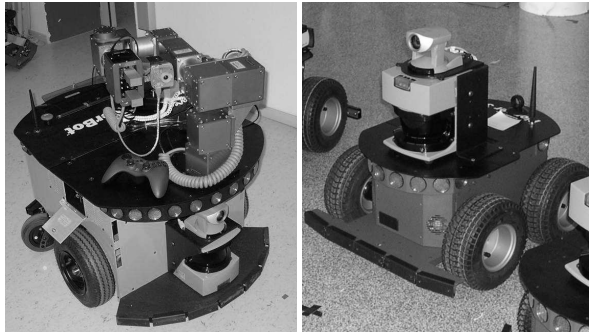


Figura 9: Plataformas experimentales: PowerBot y Pioneer de ActiveMedia.

5.2 EXPERIMENTOS REALES

Las plataformas experimentales utilizadas en la validación experimental son un PowerBot y un Pioneer de ActiveMedia (Fig. 9). Ambos robots tienen una base no holonómica con dos ruedas de tracción delanteras el PowerBot y con tracción en las cuatro ruedas el Pioneer. Los robots están equipados con una cámara Canon VC-C4 CCD montada sobre un láser. En los experimentos la plataforma es controlada enviando las velocidades de traslación y rotación (v, ω).

Los experimentos reales se han llevado a cabo con la plataforma anterior en entornos domésticos de interior y exteriores. Mencionar que no se tiene ningún conocimiento particular previo del entorno excepto una imagen adquirida en la posición deseada. Los parámetros de calibración de la cámara son desconocidos y han sido elegidos arbitrariamente, sin realizar ningún tipo de calibración, como $f = 6$ mm para la distancia focal y $x_0 = 0$ para el punto principal. El tamaño de las imágenes es de 320×240 píxeles. Se ha llevado a cabo una amplia validación experimental utilizando el control propuesto. En la Fig. 10 se muestra la evolución de dos experimentos con las imágenes adquiridas durante la navegación en un entorno interior y en un entorno de exterior.

Los resultados de un experimento se muestran en la Fig. 11. La distancia al objetivo en x (a) y en z (b) muestran la evolución de la posición del robot y (c) muestra la rotación. El robot se mueve directamente hacia el objetivo en un recorrido de mínima distancia como se esperaba (d). Los datos de posición se han obtenido de

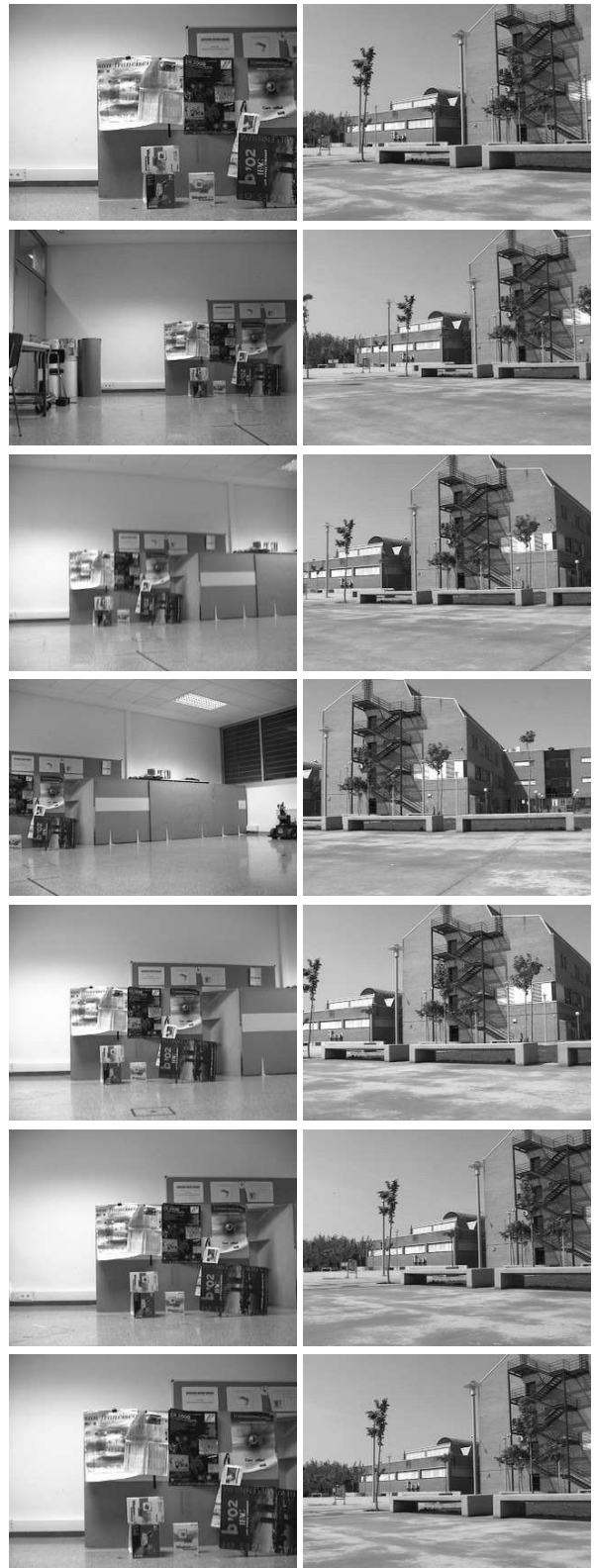


Figura 10: Secuencias de imágenes obtenidas durante un experimento de interior (columna izquierda) y otro de exterior (columna derecha). En cada columna la primera foto es la imagen objetivo, la segunda es la imagen inicial y la última es la imagen al final de la navegación.

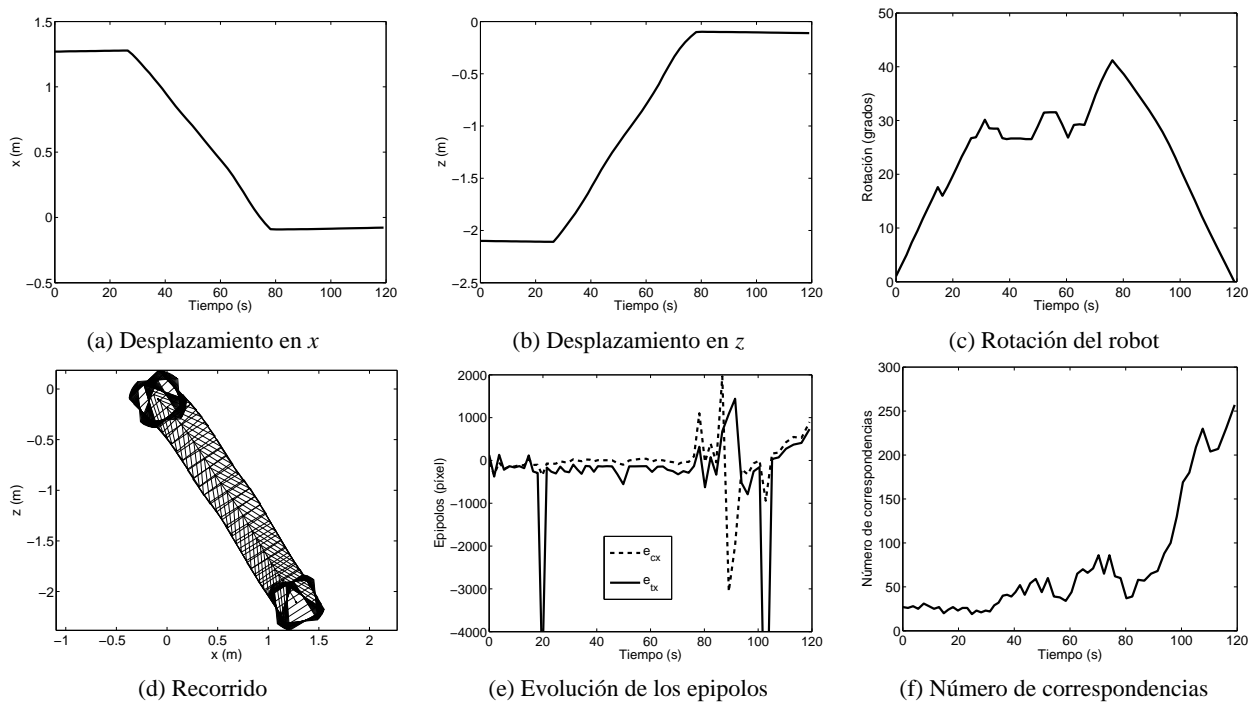


Figura 11: Experimento real con posición inicial $(1.27, -2.1, 1^\circ)$ y posición objetivo $(0, 0, 0^\circ)$.

los datos de odometría del robot. La evolución de los epipolos se muestra en (e). El número de puntos SIFT emparejados en cada iteración se muestran en (f). Como era de esperar el número de correspondencias encontrado aumenta con la similitud entre las imágenes actual y objetivo conforme el robot se acerca a la posición deseada. Notar que habiendo un patrón a cuadros en la escena el proceso de emparejamiento demuestra ser robusto incluso ante patrones repetitivos.

6 CONCLUSIÓN

Hemos demostrado las ventajas del control visual en manipulación móvil. Para este propósito creemos que se deben considerar tanto restricciones holonómicas como no holonómicas. Por otro lado, métodos que no necesiten un modelado del entorno o que no consideren el uso de marcas artificiales son de gran trascendencia.

En este artículo, se ha presentado un método de control visual para plataformas móviles no holonómicas basado en la geometría epipolar. La ley de control implementada se obtiene de la linealización de entrada-salida del sistema. La idea básica es conducir el robot a la posición objetivo siguiendo simultáneamente las trayectorias deseadas de los epipolos en la imagen actual y objetivo. Para estimar la matriz fundamental y obtener los epipolos se lleva a cabo un proceso automático robusto de detección y emparejamiento de características. Este proceso está basado en el emparejamiento de características invariantes a escala y rotación de forma que se pueda realizar el control con éxito ante cambios significativos de escala.

Se ha mostrado que el método propuesto no requiere una calibración completa ni precisa de la cámara ni ningún conocimiento particular del entorno. El controlador lleva a cabo una navegación directa hacia el objetivo con sólo una imagen adquirida en la posición deseada. Se han realizado experimentos en entornos realistas para mostrar la validez del control. Simulaciones y experimentos reales prueban la robustez del método.

Una de las cuestiones que estamos estudiando actualmente es el desarrollo de un controlador capaz de cambiar entre el control basado en geometría epipolar y un control basado en homografía para los casos en que la matriz fundamental esté mal condicionada.

Referencias

- [1] R. Basri, E. Rivlin, and I. Shimshoni. Image-based robot navigation under the perspective model. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 4, pages 2578–2583, 10–15 May 1999.
- [2] S. Benhimane, E. Malis, P. Rives, and J. R. Azinheira. Vision-based control for car platooning using homography decomposition. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Barcelona, Spain*, April 2005.
- [3] M. Bjorkman and D. Kragic. Combination of foveal and peripheral vision for object recognition and pose estimation. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 5, pages 5135–5140, 26 April–1 May 2004.

- [4] F. Chaumette and E. Malis. 2 1/2 D visual servoing: a possible solution to improve image-based and position-based visual servoings. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 1, pages 630–635, San Francisco, USA, April 2000.
- [5] A. Comport, M. Pressigout, E. Marchand, and F. Chaumette. A visual servoing control law that is robust to image outliers. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pages 492–497, Las Vegas, Nevada, October 2003.
- [6] K. Deguchi. Optimal motion control for image-based visual servoing by decoupling translation and rotation. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pages 705–711, Victoria, B.C., Canada, October 1998.
- [7] N. R. Gans and S. A. Hutchinson. An asymptotically stable switched system visual controller for eye in hand robots. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, October 2003.
- [8] R. I. Hartley and A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, second edition, 2004.
- [9] S. Hutchinson, G.D. Hager, and P.I. Corke. A tutorial on visual servo control. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 12(5):651–670, 1996.
- [10] V. Kyrki, D. Kragic, and H. I. Christensen. New shortest-path approaches to visual servoing. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pages 349–354, Sendai, Japan, September 2004.
- [11] B. Liang and N. Pears. Visual navigation using planar homographies. In *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pages 205–210, 2002.
- [12] D. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. Journal of Computer Vision*, 60(2):91–110, 2004.
- [13] G. L. Mariottini, D. Prattichizzo, and G. Oriolo. Epipole-based visual servoing for nonholonomic mobile robots. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2004.
- [14] K. Mikolajczyk and C. Schmid. A performance evaluation of local descriptors. In *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 257–263, June 2003.
- [15] J. Piazzzi and D. Prattichizzo. An auto-epipolar strategy for mobile robot visual servoing. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, volume 2, pages 1802–1807, 27–31 October 2003.
- [16] C. Sagüés and J.J. Guerrero. Visual correction for mobile robot homing. *Robotics and Autonomous Systems*, 50(1):41–49, 2005.
- [17] C. Sagüés, G. López-Nicolás, and J.J. Guerrero. Visual servoing based on epipolar geometry. Technical Report V05, DIIS - I3A, Universidad de Zaragoza, 2005.
- [18] P. Torr. *Motion Segmentation and Outlier Detection*. University of Oxford, Department of Engineering Science, 1995.