Posicionamiento láser dinámico de robots móviles mediante ángulos absolutos

Josep Maria Font, Joaquim A. Batlle

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Avda. Diagonal 647, planta 0, pabellón D. 08028 Barcelona
Teléfono: 93 401 67 18. FAX: 93 401 58 13. E-mail: josep.m.font@upc.es

Resumen
El posicionamiento es uno de los problemas fundamentales en la navegación de robots móviles. En este trabajo se presenta un algoritmo de posicionamiento láser, basado en ángulos absolutos, que permite calcular la posición y la orientación de un robot móvil en condiciones dinámicas –robot en movimiento–. La principal aportación del algoritmo es que no presenta posiciones indeterminadas si se emplea un mínimo de tres reflectores no alineados. En el trabajo también se presentan los resultados experimentales que muestran la precisión del método.

Palabras Clave: Robot móvil, posicionamiento, navegación de robots, goniómetro láser.

Abstract
Positioning is a fundamental problem in mobile robot navigation. In this paper, a laser positioning algorithm, based on absolute angles, that yields the robot position and orientation under dynamic condition –robot in motion– is presented. The main feature of the presented approach is that there are no undetermined positions if a minimum of three unaligned landmarks are used. Experimental results showing the accuracy of this method are also presented.

Keywords: Mobile robots, positioning, robot navigation, laser-based goniometer.

1. Introducción

Los robots móviles son una herramienta eficiente para realizar el transporte en los procesos de fabricación flexible. Los sistemas de posicionamiento y de guiado que incorporan permiten su funcionamiento autónomo. Los métodos de posicionamiento de robots móviles se clasifican en dos grupos [1]: posicionamiento *relativo* y posicionamiento *absoluto*. Los primeros calculan la posición y la orientación del robot a partir de una configuración inicial conocida, este es el caso de la odometría y la navegación inercial. Los métodos de posicionamiento absoluto utilizan marcas distribuidas en el entorno de trabajo del robot para determinar su localización absoluta. Estas técnicas son más fiables pero resultan más lentas. En la mayoría de aplicaciones se combina la odometría con un método absoluto para reducir periódicamente el error.

En este trabajo se presenta un algoritmo de posicionamiento láser basado en ángulos absolutos que permite calcular la posición y la orientación del robot móvil de forma absoluta y sin posiciones indeterminadas si se emplean tres reflectores no alineados. El método se ha validado experimentalmente mediante un robot móvil real.

2. Sistema de posicionamiento láser

Un sistema de posicionamiento láser está compuesto por un goniómetro láser rotativo, de estátor fijo al bastidor del robot, y un conjunto de reflectores catadióptricos situados sobre las paredes del entorno. El goniómetro emite un haz que barre horizontalmente el entorno y se refleja cuando incide en un reflector. El goniómetro mide el ángulo del haz láser relativo al bastidor en el instante de inicio de la reflexión.

Los algoritmos de triangulación determinan la posición a partir de los ángulos correspondientes a un cierto número de reflectores –de posiciones conocidas– para una misma configuración del robot. Esta condición, que es obvia para condiciones estáticas, debe satisfacerse por cálculo basado en la cinemática del robot cuando este se encuentra en movimiento [2].

El procedimiento habitual para el cálculo de la posición utiliza tres reflectores. Por diferencia entre los ángulos medidos se obtienen los ángulos relativos entre reflectores, y a partir de ellos el algoritmo de triangulación basado en la intersección de arcos capaces determina la posición del robot [3,4]. Este procedimiento presenta la ventaja de ser independiente de la orientación del robot, y el inconveniente de ser indeterminado para posiciones sobre la circunferencia que pasa por los tres reflectores.

El método que se presenta aporta una solución a este problema. Utiliza los ángulos absolutos, en vez de relativos, para tres reflectores no alineados y permite el cálculo de la posición sin que existan indeterminaciones. También permite el cálculo preciso de la orientación del robot en todas las posiciones, a excepción de las que se encuentran sobre la circunferencia que pasa por los tres reflectores.

3. Posicionamiento mediante ángulos absolutos

El goniómetro láser mide el ángulo, relativo al bastidor del robot, de la recta definida por el centro del goniómetro P y un reflector cualquiera R_i. A partir de una estimación

odométrica de la orientación del robot ψ_{est}, puede determinarse una aproximación del ángulo absoluto $\Phi_{i,est}$ de esta recta.

Si la estimación de la orientación ψ_{est} fuera correcta y la resolución del goniómetro infinita, las rectas asociadas a tres reflectores de posición conocida (R_1, R_2 y R_3) se cortarían en el punto P (centro del goniómetro), tal como se muestra en la Figura 1.a. Si $\delta = \psi_{est} - \psi_{real}$ es el error entre la estimación de ψ y su valor real, las rectas se cortan formando un *triángulo de error* (Figura 1.b).

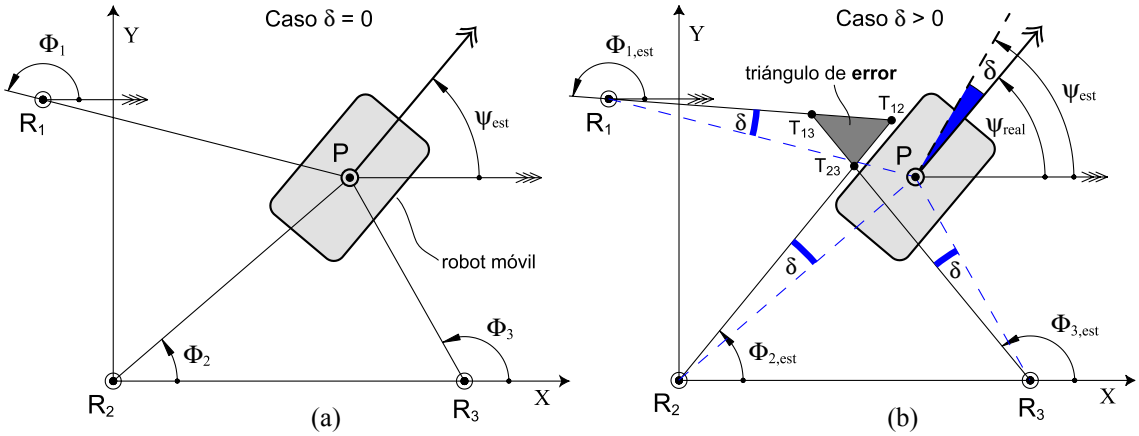


Figura 1. a) *Caso en que la estimación de la orientación es correcta.* ***b)*** *Aparece un error $\delta > 0$ y las rectas se cortan formando el triángulo de error.*

Es obvio que un determinado vértice del triángulo de error T_{ij} pertenece a la circunferencia, de centro C_{ij}, que pasa por P, R_i y R_j (Figura 2). El análisis geométrico pone de manifiesto que el triángulo de error y el triángulo que tiene como vértices C_{12}, C_{13} y C_{23}, llamado *triángulo de centros*, son semejantes con una relación de semejanza r que depende del error δ cometido en la estimación odométrica de ψ:

$$r(\delta) = 2\text{sen}|\delta| \Rightarrow |\delta| = \text{arcsen}(r/2) = \text{arcsen}\left(0,5\sqrt{A_e/A_c}\right), \qquad (1)$$

Siendo A_e la área del triángulo de error y A_c la del triángulo de centros.

El signo de δ se determina a partir del ángulo de orientación del triángulo de centros respecto al triángulo de error: $90-|\delta|$ en sentido antihorario si $\delta > 0$, y en sentido horario si $\delta < 0$ (Figura 2). Así pues, el signo de δ coincide con el de la componente Z del producto vectorial de un lado del triángulo de error por el homólogo del triángulo de centros.

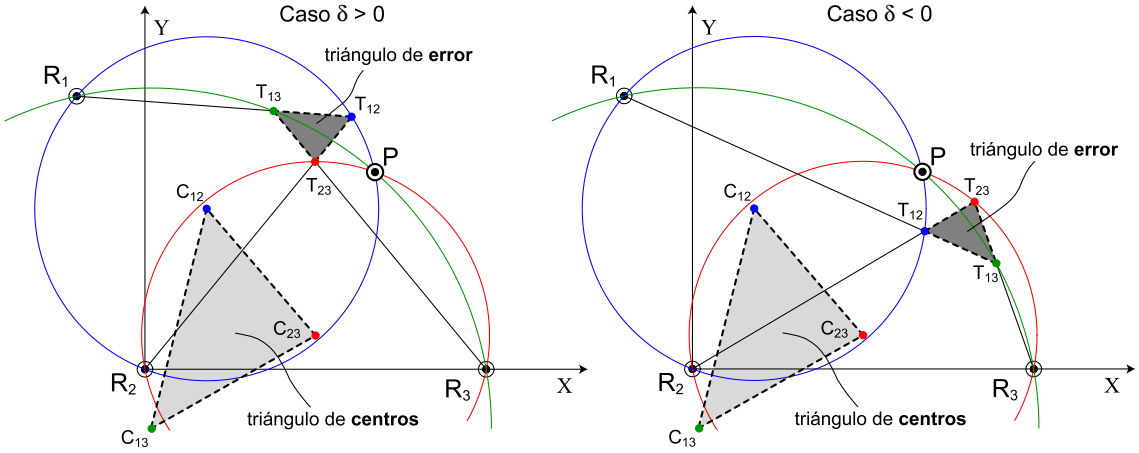
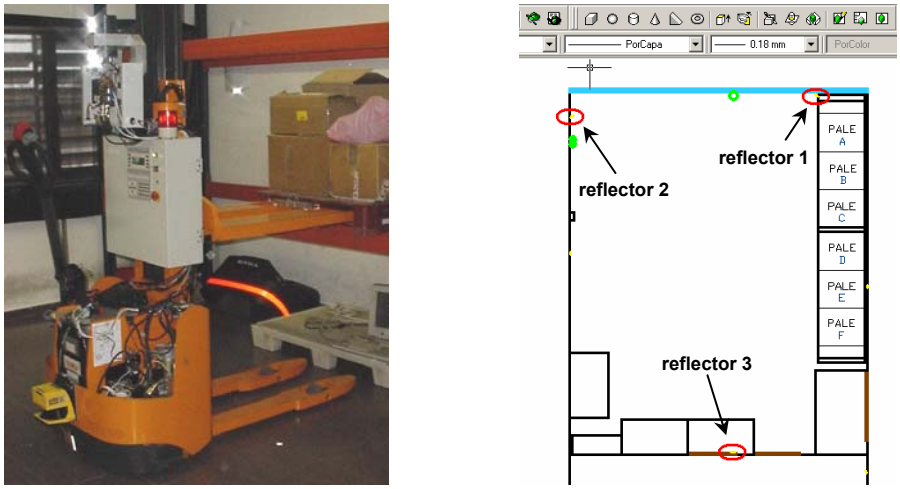


Figura 2. *Relación entre el triángulo de error y el triángulo de centros para $\delta > 0$ y $\delta < 0$.*

Conocido el error δ, se determina la orientación real del robot y los ángulos absolutos Φ_i asociados a cada reflector. La orientación del robot resulta indeterminada si P se encuentra sobre la circunferencia que pasa por los tres reflectores, en este caso se recurrirá a la previsión odométrica ψ_{est}. Para determinar la posición de P se calcula la intersección de cada una de las tres parejas de rectas (que pasan por R_i y de ángulo Φ_i), y se pondera cada estimación de la posición con un peso inversamente proporcional al error máximo que se puede cometer debido a la resolución del goniómetro.

4. Descripción del vehículo y del sistema de posicionamiento

El método se ha experimentado en un robot móvil tipo transpalet con cinemática de triciclo, con dos ruedas coaxiales y una rueda motriz y directriz delantera, Figura 3.a.



(a) (b)

Figura 3. a) *Robot móvil utilizado.* ***b)*** *Mapa CAD del laboratorio de experimentación.*

El goniómetro láser instalado tiene una frecuencia de giro de 8 Hz y ofrece una precisión angular de 0,095 mrad. El vehículo también incorpora un encoder de tracción y un encoder de dirección para la odometría. La Figura 3.b muestra el entorno de trabajo para la experimentación y la localización de los reflectores utilizados. Sus posiciones se han medido topográficamente para disminuir las incertidumbres del método.

5. Resultados experimentales

El método se ha validado mediante fotometría. Esta técnica utiliza un trazador que marca un punto de la trayectoria sobre el suelo cada segundo. Se realizan varias fotografías de la trayectoria mediante una cámara de alta resolución que deben incluir al menos dos puntos de referencia medidos previamente con una precisión sub-milímetro. A partir de estas fotografías, se determina la trayectoria real seguida por un punto del vehículo. La Figura 4 muestra la trayectoria calculada mediante el método propuesto (posicionamiento láser) y la trayectoria determinada por fotometría.

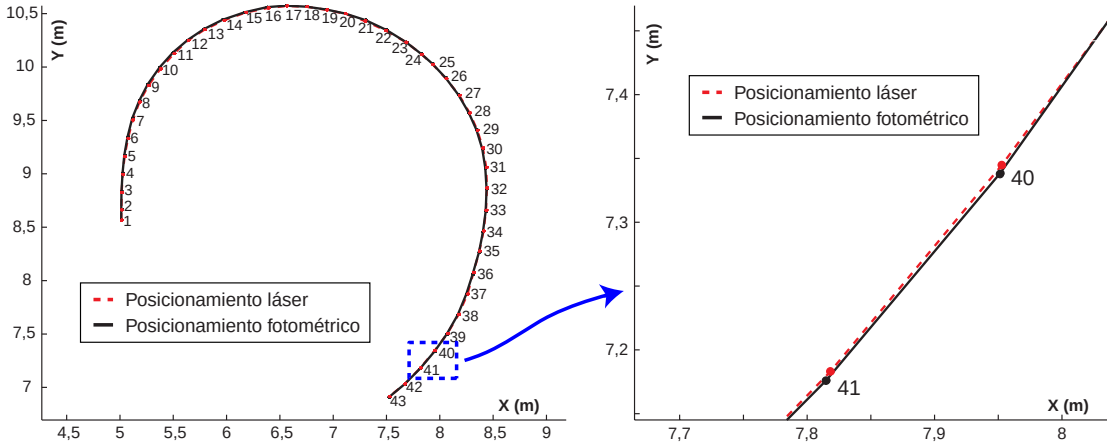


Figura 4. *Trayectoria para la validación del método. A la derecha, un detalle de la trayectoria.*

Existe un error longitudinal y un error lateral entre los puntos calculados y los determinados por fotometría (Figura 5). El error longitudinal está asociado a un retardo entre el punto calculado y el que traza el marcador, por lo que se toma el error lateral e_{lat} como medida de la precisión del método. En la misma figura se muestra el histograma de esta variable durante la trayectoria experimental. Se observa como el error lateral es siempre inferior a 23 mm. La media del error lateral en valor absoluto es de 9,7 mm y su desviación estándar 6,6 mm.

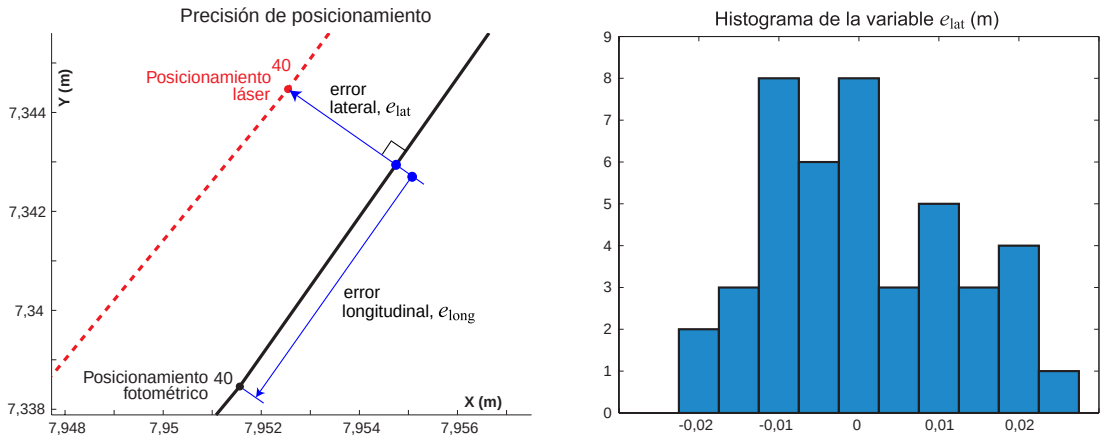


Figura 5. *Detalle del error del método. A la derecha, histograma de la variable* e_{lat}.

6. Conclusiones

El método de posicionamiento presentado constituye una eficaz alternativa al método de posicionamiento basado en ángulos relativos. Su precisión se ha experimentado en un robot móvil equipado con un goniómetro láser, sensores odométricos y el hardware necesario. Se ha utilizado fotometría para estimar la posición real del vehículo. El error lateral máximo, entre trayectoria real y calculada, ha sido de 23 mm. En el futuro se prevé utilizar simultáneamente este método y el basado en ángulos relativos, alternándolos según el error asociado a la discretización del goniómetro.

7. Referencias

1. J. Borenstein, H. R. Everett, L. Feng, D. Wehe, *Journal of Robotic Systems*, Mobile Robot Positioning – Sensors and Techniques, **Vol. 14** (4) (1997), p. 231–249.

2. J. A. Batlle, J. M. Font, J. Escoda, *Proc. IFAC Symp. on Int. Aut. Vehicles*, Dynamic Positioning of a Mobile Robot Using a Laser-based Goniometer, Lisboa, (2004).

3. C. D. McGillem, T. S. Rappaport, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, A Beacon Navigation Method for Autonomous Vehicles, **Vol. 38** (3) (1989), p. 132–139.

4. M. Betke, L. Gurvits, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Mobile Robot Localization Using Landmarks, **Vol. 13** (2) (1997), p. 251–263.

8. Agradecimientos

Este trabajo se inscribe en el proyecto “Sistema de posicionamiento y guiado láser para robots móviles” del CeRTAP, Generalitat de Catalunya.