Guiado de un robot móvil con cinemática de triciclo

Joaquim A. Batlle[(1)], Josep Maria Font[(1)], Josep Escoda[(2)]

[(1)]Departamento de Ingeniería Mecánica, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Avda. Diagonal 647, planta 0, pabellón D. 08028 Barcelona
Teléfono: 93 401 67 17. FAX: 93 401 58 13. E-mail: agullo.batlle@upc.es

[(2)]Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). C. Pau Gargallo 5. 08028 Barcelona

Resumen
El guiado –o seguimiento de trayectorias– es un tema clave en la navegación de robots móviles. En este trabajo se presenta un método de guiado, para un robot móvil con cinemática de triciclo, que a partir de los errores de posición y de orientación del robot controla de forma asintóticamente estable la trayectoria de uno de sus puntos. La estabilidad de la ley de control se ha comprobado experimentalmente mediante un prototipo real.

Palabras Clave: Robot móvil, cinemática, navegación de robots, guiado.

Abstract
Guidance –or path tracking– is a fundamental problem in mobile robot navigation. In this paper, a guidance method for a mobile robot with a tricycle kinematics is presented. This method controls the trajectory of one point of the robot in terms of the two measurable position and orientation errors. The stability of the control law has been experimentally tested on a real mobile robot prototype.

Keywords: Mobile robot, kinematics, robot navigation, guidance, path tracking.

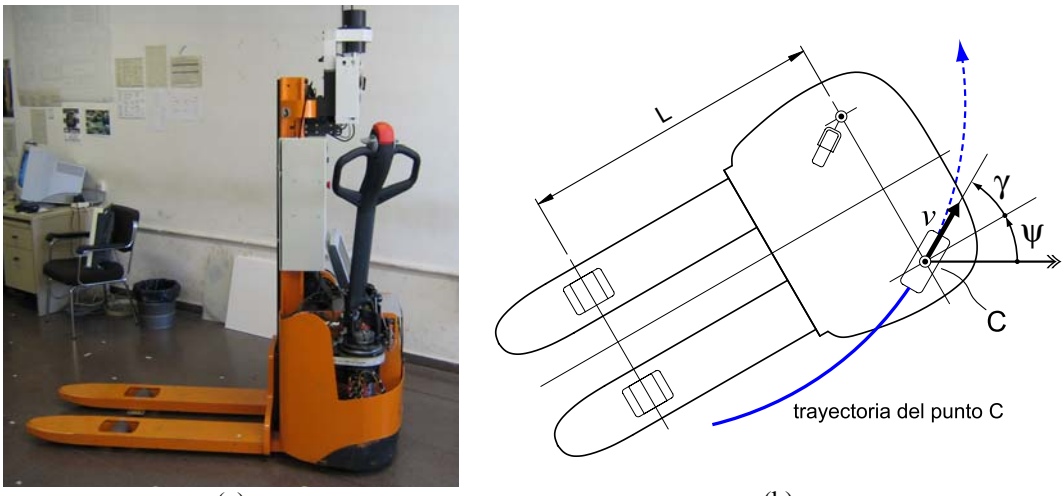
1. Introducción

Los robots móviles son vehículos autónomos capaces de seguir una trayectoria prevista dentro de un espacio de trabajo conocido. Esta trayectoria se define para un punto característico del vehículo, el cual puede variar según la maniobra que se realice.

En este trabajo se presenta un método de guiado para un robot móvil con cinemática de triciclo que, a partir de los errores de posición y de orientación del robot, controla de forma asintóticamente estable la trayectoria de uno de sus puntos. En vehículos de tipo triciclo, el guiado se realiza mediante la dirección de la rueda directriz [1,2]. La estabilidad de la ley de guiado propuesta se ha comprobado experimentalmente mediante un prototipo real. En el apartado 4 se muestran los resultados de la experimentación.

2. Cinemática del vehiculo

El robot móvil utilizado en este trabajo es un transpalet con cinemática de triciclo (Figura 1.a). El vehículo consta de dos ruedas coaxiales situadas en la horquilla, una rueda auto-orientable, y la rueda motriz y directriz (Figura 1.b). Se pretende controlar la trayectoria del centro de su rueda motriz y directriz (punto C) en la modalidad de marcha usual para largos recorridos, para la cual $v > 0$ y $-90º < \gamma < 90º$.



(a) (b)

Figura 1. a) *Robot móvil dentro del laboratorio de experimentación.* ***b)*** *Trayectoria del centro de la rueda motriz y parámetros cinemáticos del robot.*

En la Figura 1.b las variables v y γ son la velocidad de C y la orientación de la rueda respecto al bastidor respectivamente. Estas variables se pueden medir a partir de los encoders de tracción y de dirección instalados en el vehículo. La variable ψ indica la orientación absoluta del vehículo, cuya evolución está regida por la ecuación (1).

$$\dot{\psi} = \frac{v}{L}\sin\gamma\,, \tag{1}$$

siendo L la distancia entre ejes del robot. Se han considerado dos tipos de trayectorias para C: recta y arco de circunferencia. Las siguientes ecuaciones son las del guiado nominal sin errores para recta y arco de circunferencia de radio R respectivamente:

$$\dot{\gamma}_N\big|_r = -\frac{v}{L}\sin\gamma \tag{2}$$

$$\dot{\gamma}_N\big|_c = v\left[\frac{1}{R} - \frac{\sin\gamma}{L}\right] \tag{3}$$

El radio R de la trayectoria circular es positivo cuando el arco queda a izquierdas en el sentido de la marcha y negativo en caso contrario.

3. Ley de guiado

En la realidad el guiado nominal no es suficiente para garantizar el seguimiento de trayectorias. Es necesario añadir al término de guiado nominal $\dot{\gamma}_N$ una componente de corrección $\dot{\gamma}_C$ que tienda a eliminar de forma asintóticamente estable los errores de posición y orientación. Así, la ley de guiado general incluye los dos términos:

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_N + \dot{\gamma}_C \tag{4}$$

La Figura 2 muestra los parámetros de error considerados para el guiado del triciclo a partir de la trayectoria prevista para el centro de la rueda motriz y directriz.

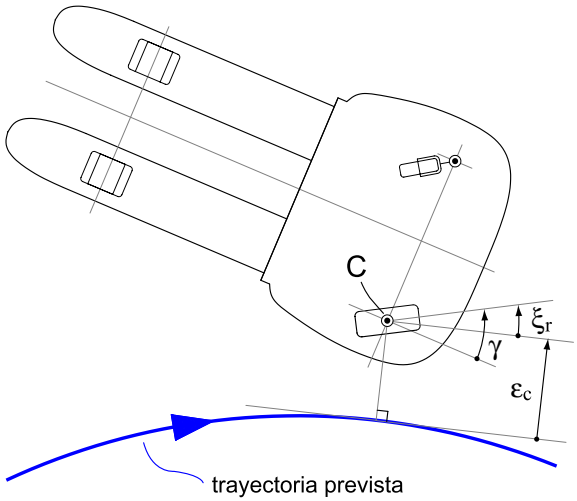


Figura 2. *Trayectoria prevista para C y parámetros de error considerados.*

En la Figura 2, el error ε_c indica la desviación lateral de C y ξ_r es el error de orientación de la rueda motriz. Los errores ε_c y ξ_r se determinan a partir de la posición y la orientación reales del vehículo en cada instante, calculadas mediante un sistema de posicionamiento dinámico basado en láser [3], y del valor del ángulo de guiado γ. Analizando la cinemática del robot, se llega a las siguientes ecuaciones de evolución de los errores ε_c y ξ_r:

$$\dot{\varepsilon}_c = v \sin\xi_r \simeq v\,\xi_r \tag{5}$$

$$\dot{\xi}_r = \dot{\gamma} - \dot{\gamma}_N = \dot{\gamma}_C \tag{6}$$

Considerando que la velocidad v es constante, se tiene que:

$$\ddot{\varepsilon}_c = v\dot{\xi}_r = v\dot{\gamma}_C \tag{7}$$

Para que el error ε_c se extinga de forma asintóticamente estable, al ser su ecuación de evolución de segundo orden, ésta debe tener los tres términos positivos. Para ello se propone el siguiente término de corrección en la ley de guiado, forma lineal de los errores determinados ε_c y ξ_r:

$$\dot{\gamma}_C = -a\varepsilon_c - b\xi_r \simeq -a\varepsilon_c - \left(b/v\right)\dot{\varepsilon}_c, \tag{8}$$

con a y b > 0. La ecuación de evolución del error ε_c para ambos tipos de trayectoria resulta:

$$\ddot{\varepsilon}_c + b\dot{\varepsilon}_c + av\varepsilon_c = 0 \tag{9}$$

El estudio de la evolución del error de orientación ξ_r conduce a una ecuación análoga. Escogiendo adecuadamente los dos parámetros de realimentación a y b (a, b > 0) se consigue una evolución asintóticamente estable de ambos errores. Así pues, las ecuaciones de guiado generales dependientes de ε_c y ξ_r son:

$$\dot{\gamma}\big|_r = -a\varepsilon_c - b\xi_r - \left(v/L\right)\sin\gamma \tag{10}$$

$$\dot{\gamma}\big|_c = -a\varepsilon_c - b\xi_r + v\left[\frac{1}{R} - \frac{\sin\gamma}{L}\right] \tag{11}$$

4. Validación experimental del método

El método se ha validado mediante un prototipo real (Figura 1.a). Los errores ε_c y ξ_r se determinan a partir del posicionamiento real del robot –calculado mediante un sistema de posicionamiento láser [3]– y del valor del ángulo de guiado γ. Determinados los errores, el sistema de control genera la consigna de control a partir de las ecuaciones de guiado (10) y (11). El sistema de control está montado sobre una plataforma PC104 (Pentium III Celeron a 400 MHz) que funciona con un sistema operativo en tiempo real RT-Linux 3.2. La Figura 3 muestra el diagrama de bloques del control en lazo cerrado del robot.

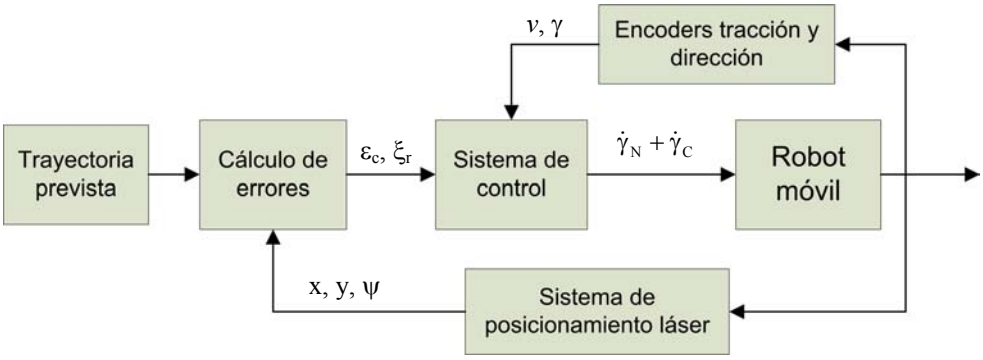
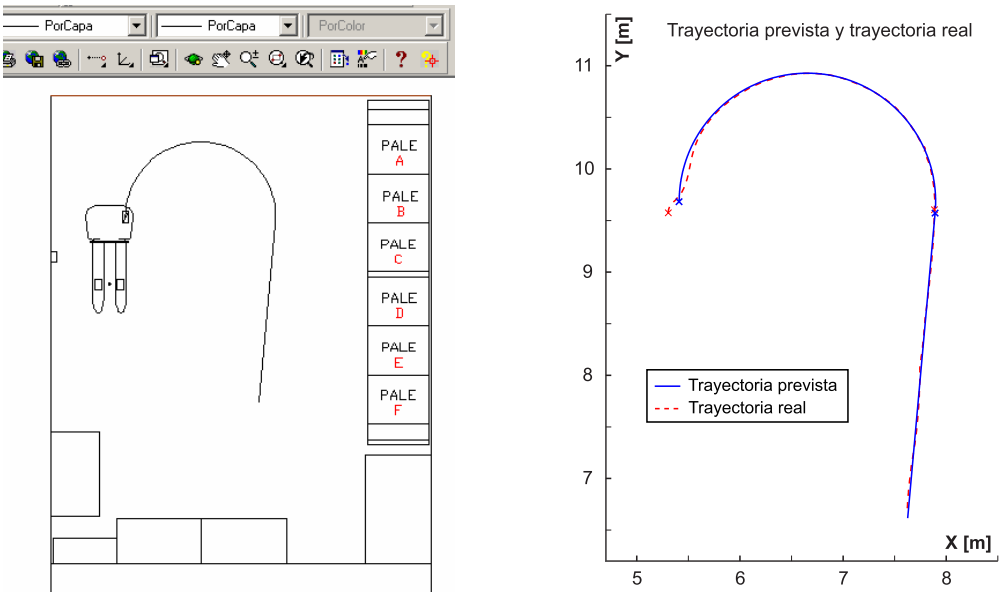


Figura 3. *Diagrama de bloques del control en lazo cerrado.*

Mediante un programa CAD se ha definido la trayectoria prevista para C dentro del laboratorio (Figura 4.a). La Figura 4.b muestra la trayectoria real seguida por el robot, compuesta por un arco de circunferencia de radio 1,24 m y un tramo recto de 3 m. La velocidad nominal del centro de la rueda motriz durante la prueba ha sido de 0,2 ms^{-1}.



(a) (b)

Figura 4. a) *Trayectoria prevista dentro del laboratorio.* ***b)*** *Trayectoria real durante la prueba.*

En la Figura 5 se muestra la evolución del error lateral ε_c y del error de orientación ξ_r durante la trayectoria de validación. Se observa como el sistema de control corrige la desviación lateral inicial de 110 mm. Una vez corregida esta desviación lateral inicial, el error lateral máximo observado es de 16,5 mm. El error de orientación de la rueda también es elevado en el transitorio de corrección del error lateral inicial, ya que la ley de guiado de corrección actúa sobre la orientación de la rueda. Finalizado este transitorio, este error se mantiene inferior a 3,8º oscilando alrededor de cero.

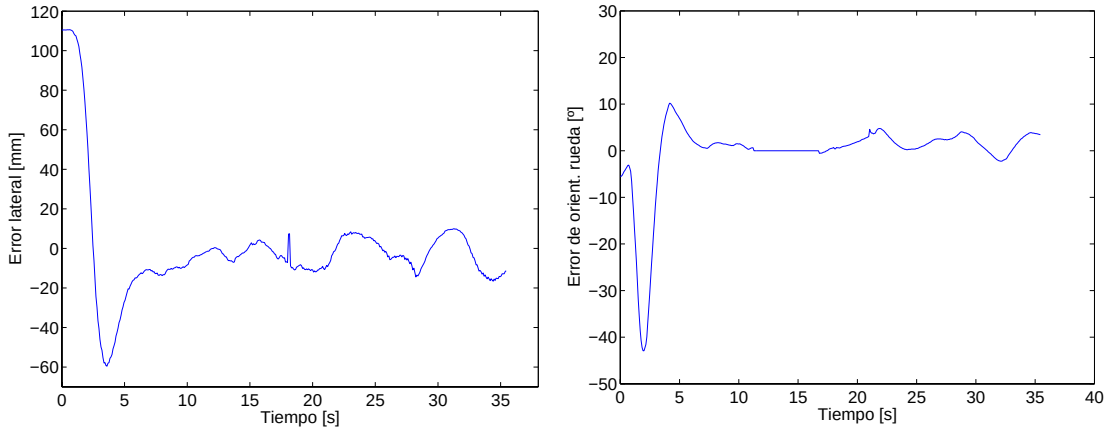


Figura 5. *Evolución temporal del error lateral* ε_c *y del error de orientación* ξ_r.

5. Conclusiones

El método de guiado presentado controla de forma asintóticamente estable la marcha de crucero –la rueda motriz va por delante del eje de ruedas coaxiales– de un robot móvil mediante una realimentación que depende tan sólo de dos parámetros. La estabilidad de la ley de guiado se ha comprobado experimentalmente mediante un robot móvil equipado con un sistema de posicionamiento dinámico basado en láser, sensores odométricos y un sistema de control adecuado. En el futuro, el método puede completarse con las leyes de guiado para las maniobras de carga y descarga de palets, que incluyen movimientos "hacia delante" y "hacia atrás", y en las que la trayectoria se definiría para el punto que se encuentra entre las dos ruedas coaxiales de la horquilla.

6. Referencias

1. A. Hemami, *Int. Journal of Control*, Steering Control Problem Formulation of Low-Speed Tricycle-Model Vehicles, **Vol. 61** (4) (1995), p. 783–790.

2. I. J. Cox, *IEEE Trans. Robotics & Automation*, Blanche–An Experiment in Guidance and Navigation of an Autonomous Robot Vehicle, **Vol. 7** (2) (1991), p. 193–203.

3. 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).

7. Agradecimientos

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