

Modelación, Identificación y Control de Robots Móviles

Gabriela Andaluz[‡], Víctor H. Andaluz* y Andrés Rosales[‡]

[‡] Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional,
Quito-Ecuador

* Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial, Universidad Técnica de Ambato,
Ambato-Ecuador

Resumen—Este trabajo representa la modelación cinemática y dinámica de un robot móvil tipo unicycle no holonómico, el modelo propuesto recibe como entradas la velocidad lineal y a la velocidad angular. Para resolver el problema de movimiento de los robots móviles se propone tres algoritmos de control: control de posicionamiento, control de seguimiento de trayectoria y el control de seguimiento de caminos. El diseño de los algoritmos de control se basa en dos subsistemas, un controlador cinemático, el mismo que cumple con los objetivos de la tarea; y un controlador dinámico que compensa la dinámica del robot móvil, en cada uno de estos controladores se llevó a cabo el análisis de estabilidad mediante la aplicación de la teoría de Lyapunov, concluyendo que los errores de control convergen a cero asintóticamente en ausencia de incertidumbres en el modelo. Finalmente los resultados experimentales muestran que los controladores implementados tienen un buen desempeño y cumplen con los objetivos de control.

I. INTRODUCTION

La Robótica móvil es un área de investigación activa donde investigadores de todo el mundo encuentran nuevas tecnologías para mejorar la inteligencia de los robots móviles y las áreas de aplicación. Entre las distintas estructuras de robots, el tipo unicycle es el más utilizado en varias tareas debido a su buena movilidad y configuración simple. Esta estructura del robot se ha utilizado en varias aplicaciones como vigilancia, limpieza de pisos y el transporte de carga industrial que utiliza los vehículos autónomos guiados [1] [2].

Los Robots Móviles tipo unicycle, están constituidos básicamente por una estructura mecánica que consta de dos ruedas fijas convencionales sobre el mismo eje, controladas de manera independiente y una rueda local que le confiere estabilidad, permitiéndole navegar a través de un determinado ambiente de trabajo de forma autónoma. Dicha autonomía se refiere a la capacidad de percibir, planificar y actuar sin la intervención del operador humano para alcanzar determinados objetivos, tomando en cuenta que para ejecutar tareas que requieren altas velocidades o transporte de cargas, es fundamental considerar la dinámica del robot, además de su cinemática. Los robots móviles se utilizan en áreas que son demasiado peligrosas para los seres humanos o las misiones que con llevan demasiado tiempo. Esta inteligencia es suministrada por el sistema de control del vehículo.

En este trabajo se procede a la modelación matemática tanto de la cinemática como de la dinámica de un robot móvil tipo unicycle, partiendo del modelo dinámico obtenido se presenta la identificación y validación de los parámetros dinámicos del robot móvil no holonómico tipo unicycle. Además este artículo realiza el estudio e implementación de los algoritmos de control para resolver los problemas de control de movimiento de los robots móviles [3]: 1) *control de posición* el objetivo es ubicar al robot en un punto de referencia dado, con una orientación deseada; 2) *seguimiento de trayectoria* se requiere que el robot siga una referencia parametrizada en el tiempo (con y sin evasión de obstáculos por medio del control de impedancia); y 3) *seguimiento de caminos* se requiere que el robot converja y siga un camino, sin ninguna especificación temporal. Para resolver el problema de seguimiento de trayectoria se realizan algoritmos de control basados en los modelos cinemático y dinámico, con velocidades de referencia del robot móvil. Para cada uno de los algoritmos propuestos se efectuó el respectivo análisis de estabilidad aplicando la teoría de Lyapunov.

Este trabajo está dividido en cinco Secciones, incluyendo la introducción. La Sección II presenta el modelo cinemático y la modelación dinámica del robot tipo unicycle. La Sección III ilustra la identificación de los parámetros dinámicos y validación del modelo dinámico obtenido del robot móvil Pioneer P3-AT. La Sección IV muestra, el diseño y el análisis de estabilidad de los algoritmos de control para resolver los problemas de movimiento como: control de posición, control de seguimiento de trayectoria y el control de seguimiento de caminos, y finalmente las conclusiones del trabajo son presentadas en la Sección V.

II. MODELOS DEL ROBOT MÓVIL

El robot móvil tipo unicycle presenta las ventajas de alta movilidad, alta tracción con ruedas neumáticas y una simple configuración de las mismas, aunque el robot móvil sea el mismo, los modelos matemáticos que existen para

III. IDENTIFICACIÓN Y VALIDACIÓN

A. Identificación paramétrica

La identificación es un campo de la modelación matemática de sistemas a partir de datos experimentales. El modelo dinámico del robot móvil puede ser representado como una regresión lineal

$$T_{FT}\bar{\theta}^0 = Y_{FT} \quad (3)$$

Aplicando mínimos cuadrados obtenemos la estimación de los parámetros dinámicos $\hat{\theta} = (T_{FT}^T T_{FT})^{-1} T_{FT}^T Y_{FT}$, donde

$$T_F = \begin{bmatrix} \frac{s\lambda}{s+\lambda}u & 0 & \frac{\lambda}{s+\lambda}\omega^2 & \frac{\lambda}{s+\lambda}u & 0 & 0 \\ 0 & \frac{s\lambda}{s+\lambda}\omega & 0 & 0 & \frac{\lambda}{s+\lambda}u\omega & \frac{\lambda}{s+\lambda}\omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Y_F = \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{s+\lambda}u_{ref} \\ \frac{\lambda}{s+\lambda}\omega_{ref} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Las señales de excitación elegidas son:

$$u_{ref} = A_1 \text{sen}(\omega_1 t) + A_2 \text{sen}(\omega_2 t) + \dots + A_6 \text{sen}(\omega_6 t) \quad (6)$$

$$\omega_{ref} = A_2 \text{sen}(\omega_1 t) + A_2 \text{sen}(\omega_2 t) + \dots + A_2 \text{sen}(\omega_6 t) \quad (7)$$

donde A_j y ω_j con $j=1,2,\dots,6$ son constantes positivas. Las señales de entrada u_{ref} y ω_{ref} son iguales salvo por las ganancias. Esto es valioso en la experimentación debido a que el robot se moverá en una trayectoria circular de radio A_1/A_2 durante toda la identificación, con lo cual se conocerá a priori el espacio necesario para la identificación.

$$A_1 = 0.15; \quad A_2 = 0.15$$

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 0.7; & \omega_2 &= 0.6; & \omega_3 &= 0.5; \\ \omega_4 &= 0.4; & \omega_5 &= 0.3; & \omega_6 &= 0.2 \end{aligned} \quad (8)$$

La Fig. 3 muestra los resultados obtenidos en la identificación de parámetros del robot Pioneer 3AT, donde se ilustra las señales de entradas al robot

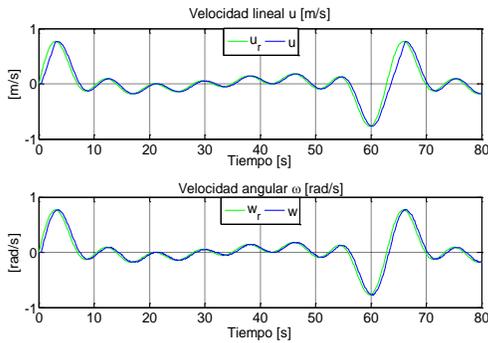


Fig. 3 Acciones de control para la identificación

B. Validación del modelo dinámico

Las señales de excitación elegidas para la validación son:

$$u_{ref} = \sqrt{0.1^2 + (0.1\pi \cos(0.2\pi t))^2} \quad (9)$$

$$\omega_{ref} = \frac{-0.15\pi^2 \text{sen}(0.2\pi t)}{1 + \pi^2 \cos^2(0.2\pi t)} \quad (10)$$

La validación del modelo dinámico del Pioneer P3 AT

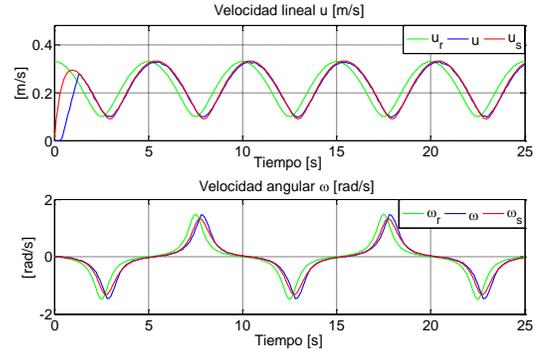


Fig. 4 Acciones de control para la validación del modelo

Finalmente se puede concluir que los modelos dinámicos obtenidos para el robot Pioneer 3-AT representa de buena forma la dinámica real existente en el robot; lo mismo que se puede observar (Fig. 3 y Fig. 4) en los resultados obtenidos, en donde los valores reales y simulados se aproximan entre sí.

IV. PROBLEMAS DE CONTROL DE MOVIMIENTO

A. Control de Posición

El objetivo del control de posición es ubicar al robot en un punto de referencia dado, con una orientación deseada. Se considera al vehículo posicionado a cualquier distancia distinta de cero del referencial destino y se considera como vector de variables de estado a $[\rho \ \alpha]^T$, el cual existe para cualquier $\rho > 0$, por lo que el sistema de ecuaciones que describe el movimiento del vehículo es:

$$\begin{aligned} \dot{\rho} &= -u \cos(\alpha) \\ \dot{\alpha} &= -\omega + u \frac{\text{sen}(\alpha)}{\rho} \end{aligned} \quad (11)$$

Se considera la siguiente función candidata de Lyapunov

$$V(p, \alpha) = V_1 + V_2 = \frac{1}{2} h_\rho \rho^2 + \frac{1}{2} \alpha^2 \quad \text{con } h_\rho > 0 \quad (12)$$

La derivada de Lyapunov es:

$$\dot{V} = h_\rho \rho \dot{\rho} + \alpha \dot{\alpha}$$

$$\dot{V} = h_\rho \dot{\rho} \left(-u \cos(\alpha) \right) + \alpha \left(-\omega + u \frac{\sin(\alpha)}{\rho} \right) \quad (13)$$

En la ecuación (13) puede observarse que el primer término, correspondiente a \dot{V} , puede ser no positivo si se hace que la velocidad lineal u tenga la forma:

$$u = k_u \tanh(\rho) \cos(\alpha) \quad \text{con } k_u > 0 \quad (14)$$

donde el coeficiente $k_u = |u_{\max}|$. De acuerdo a la elección de u dada por la ecuación (14), \dot{V}_2 en la ecuación (13) es

$$\dot{V}_2 = \alpha \left(-\omega + k_u \frac{\tanh(\rho)}{\rho} \sin(\alpha) \cos(\alpha) \right) \quad (15)$$

por lo que:

$$\omega = k_\omega \alpha + k_u \frac{\tanh(\rho)}{\rho} \sin(\alpha) \cos(\alpha) \quad (16)$$

Finalmente se obtiene la expresión para la derivada temporal de la función de Lyapunov original V

$$\dot{V} = -h_\rho k_u \rho \tanh(\rho) \cos^2(\alpha) - k_\omega \alpha^2$$

con $\rho(t) \rightarrow 0$, $\alpha(t) \rightarrow 0$ cuando $t \rightarrow \infty$. Esto significa que $\rho(t)$ y $\alpha(t)$ convergen globalmente y asintóticamente a cero.

Evasión de Obstáculos

Un problema de control es la evasión de obstáculos, es decir que el robot pueda evitar la colisión con un objeto durante la ejecución de una acción de control.

La principal característica del problema de control es la relación entre el error de posición y la fuerza de interacción f actuando sobre el robot móvil. Para ello se ha recurrido al método del control de impedancia.

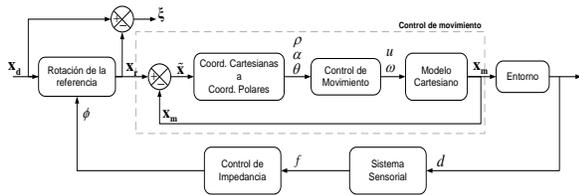


Fig.5 Esquema del control de Impedancia

Dicho control consiste en crear una fuerza ficticia cuando el sistema sensorial del robot identifique un obstáculo por medio de una distancia y así variar el sistema de referencia.

Resultado Experimental

El objetivo de control es alcanzar el punto de coordenadas x_d y y_d evitando los obstáculos presentes a lo largo del trayecto. Se considera la posición inicial del robot en

$x=0[m]$ y $y=0[m]$, mientras que la posición deseada es: $x_d = 5.8[m]$ y $y_d = 0[m]$. La Fig. 6, muestra el movimiento estroboscópico. La evolución de los errores de control son mostrados en la Fig. 7, donde se observa que el error tiende a cero asintóticamente cumpliendo así el objetivo de control. Las componentes (normal f_N y tangencial f_T) de la fuerza ficticia f se muestran en la Fig. 8 y por último en la Fig. 9 se muestran la velocidad de referencia del robot móvil, la misma que no sobrepasa sus valores máximos.

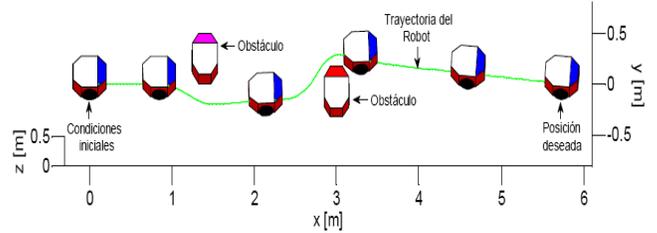


Fig.6 Movimiento Estroboscópico: Control de posición

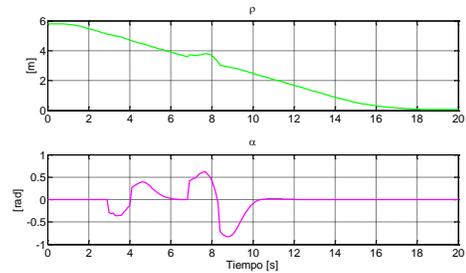


Fig. 7 Errores de control: $\rho(t)$ y $\alpha(t)$

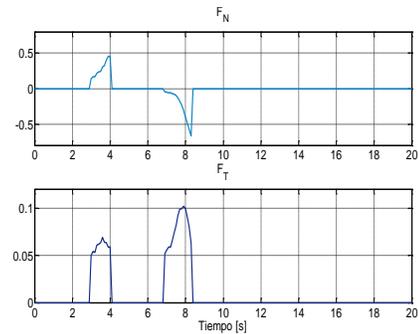


Fig. 8 Fuerzas ficticias: Normal y Tangencial.

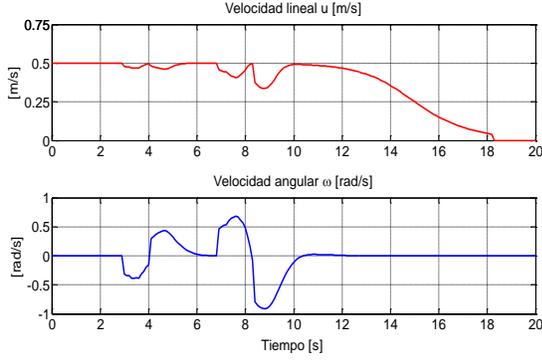


Fig. 9 Velocidades de referencia: velocidad lineal y velocidad angular

B. Seguimiento de Trayectoria

El objetivo del control de seguimiento de trayectoria es conseguir mediante una ley de control, que el robot móvil alcance y siga con error cero estados deseados variantes con el tiempo.

El control de trayectoria propuesto se basa dos subsistemas en cascada: 1) control cinemático es el encargado de cumplir el objetivo de la tarea; 2) control compensación dinámica es el encargado de compensar la dinámica del robot. La Fig. 10, muestra el esquema de control propuesto.

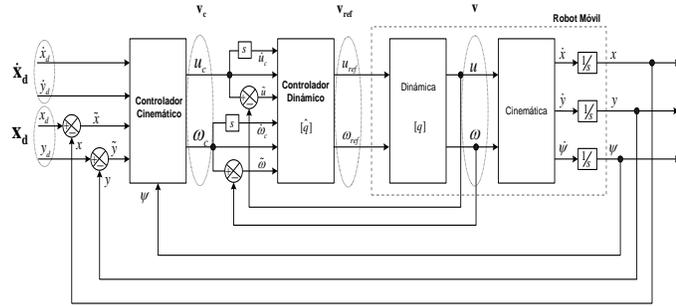


Fig. 10 Esquema de control: control cinemático con compensación dinámica

Control Cinemático

El sistema de ecuaciones que describe el movimiento del vehículo es:

$$\dot{x}_{cr} = x_d + K(\tilde{x})\tilde{x} \quad (17)$$

$$\tilde{x} = x_d - x_c \quad (18)$$

donde \dot{x}_{cr} se define como:

$$\dot{x}_{cr} = u_r \angle \psi_r$$

Siendo u_r la velocidad de referencia a seguir y ψ_r la orientación deseada. Se define una matriz definida positiva que sea función de \tilde{x}

$$K(\tilde{x}) = \text{diag} \left\{ \frac{k}{a + |\tilde{x}_i|} \right\}; \quad a > 0$$

donde k es una constante positiva. Para el análisis de estabilidad se asume -momentáneamente- seguimiento perfecto de velocidad $\dot{x}_c \equiv \dot{x}_{cr}$. Sustituyendo (2) en (1) se tiene,

$$\dot{\tilde{x}} + K(\tilde{x})\tilde{x} = 0 \quad (19)$$

Ahora, se considera una función candidata de Lyapunov igual a $V = \frac{1}{2} \tilde{x}^T \tilde{x}$, cuya derivada temporal es, $\dot{V} = \tilde{x}^T \dot{\tilde{x}}$ y remplazando (19) se tiene,

$$\dot{V} = \tilde{x}^T (-K(\tilde{x})\tilde{x}) = -\tilde{x}^T K(\tilde{x})\tilde{x} < 0$$

Se puede concluir que $\dot{V}(\tilde{x}) < 0$. O sea, que $\tilde{x}(t) \rightarrow 0$ con $t \rightarrow \infty$, Con lo que se cumpliría el objetivo de control. Finalmente se puede proponer la siguiente ley de control

$$u = u_r \cos \tilde{\psi}$$

$$\omega = \dot{\psi}_r + k_2 \tanh\left(\frac{\lambda_2}{k_2} \tilde{\psi}\right)$$

Compensación Dinámica

En los controladores propuestos anteriormente se consideró que $u \equiv u_c$ y $\omega \equiv \omega_c$ (seguimiento perfecto de velocidad). Sin embargo, esto no siempre es posible en contextos reales, por lo que, para el caso que no se tenga seguimiento perfecto de velocidad, el error de velocidad se define como, $\tilde{v} = v_c - v$ esto motiva a realizar un controlador de compensación dinámica basado en la dinámica inversa del robot móvil, para lo cual se considera que se conoce el modelo exacto del robot. Se propone la siguiente ley de control

$$v_{ref} = H(v_c + T(\tilde{v})) + Cv_c + Fv_c \quad (20)$$

donde, $v_{ref} = [u_{ref} \ \omega_{ref}]^T$ y la matriz $T(\tilde{v})$ es definida como

$$T(\tilde{v}) = \begin{bmatrix} l_u & 0 \\ 0 & l_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tanh\left(\frac{k_u}{l_u} \tilde{u}\right) \\ \tanh\left(\frac{k_\omega}{l_\omega} \tilde{\omega}\right) \end{bmatrix} \quad (21)$$

con $k_u > 0$ y $k_\omega > 0$ son ganancias constantes, $l_u \in \mathfrak{R}$ y $l_\omega \in \mathfrak{R}$ son constantes de saturación. El término $T(\tilde{v})$ provoca una saturación en los comandos enviados al robot estén para garantizar que estén dentro de los límites aceptados por el robot.

Cabe indicar que el modelo dinámico encontrado en la Sección II fue considerando en (21) y (20), la ecuación de lazo cerrado es:

$$H\dot{\tilde{v}} = -HT(\tilde{v}) - C\tilde{v} - F\tilde{v}$$

Para el análisis de estabilidad se considera la candidata de Lyapunov $V(\tilde{v}) = \frac{1}{2} \tilde{v}^T H \tilde{v}$. Su primera derivada temporal es

$$\dot{V}(\tilde{v}) = \tilde{v}^T H \dot{\tilde{v}}, \text{ que puede ser escrita como,}$$

$$\dot{V}(\tilde{v}) = -\tilde{v}^T HT(\tilde{v}) - \tilde{v}^T C\tilde{v} - \tilde{v}^T F\tilde{v}$$

Considerando la *Propiedad 4* de anti-simetría de la matriz C y las *Propiedades 1 y 3* que garantizan que H y F son matrices simétricas y definidas positivas, se puede concluir que $\dot{V}(\tilde{v}) < 0$. O sea, que $\tilde{v} \rightarrow 0$ con $t \rightarrow \infty$, Con lo que se cumpliría el objetivo de control.

Resultado Experimental

La prueba se realizó en el Pioneer P3-AT, que sigue una trayectoria senoidal y evade un obstáculo. El resultado experimental muestra la trayectoria descrita por el robot (Fig. 11) son errores de control se muestran en la Fig.12, donde se puede observar que los errores tienden asintóticamente a cero. En la Fig. 13 muestra los resultados obtenidos del movimiento estroboscópico y la trayectoria descrita por el robot móvil. La velocidad deseada $c(t)$ a lo largo del camino y la velocidad del robot se muestra en la Fig. 13.

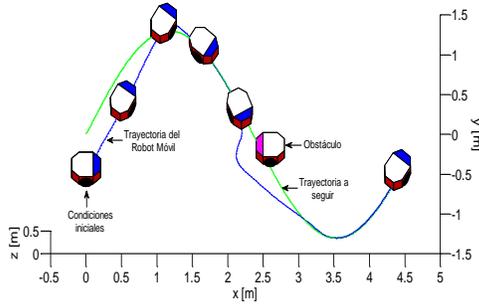


Fig.11 Movimiento Estroboscópico del Robot Móvil

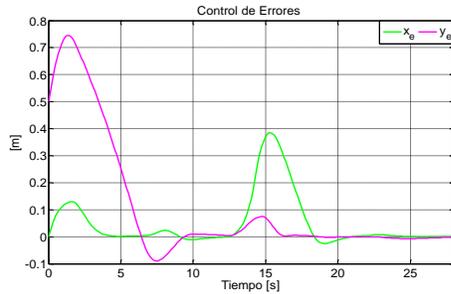


Fig.12 Errores de control x y y .

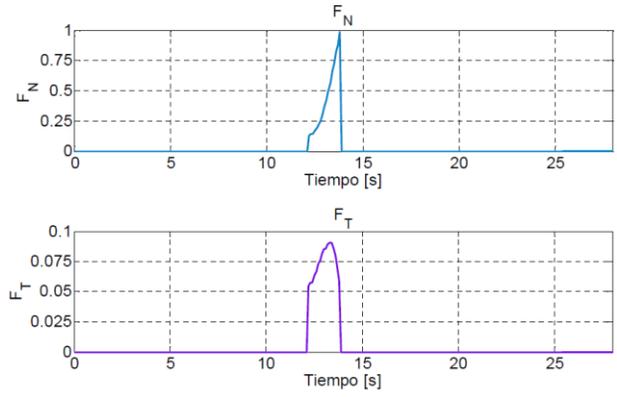


Fig. 13 fictitious forces: normal and tangential.

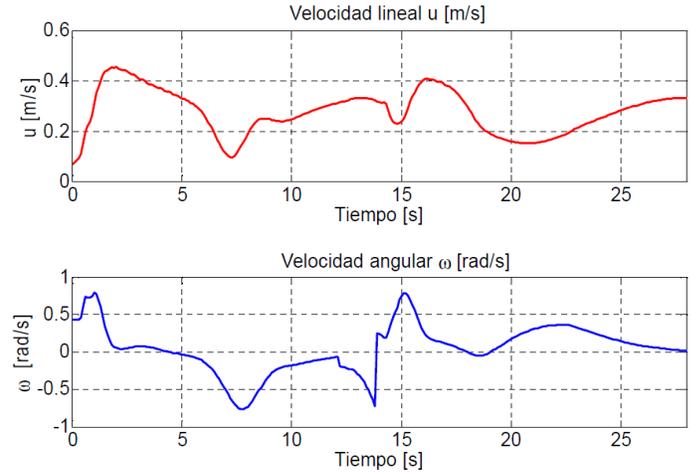


Fig. 14 reference speeds: linear velocity and angular velocity.

C. Seguimiento de Caminos

El seguimiento de caminos significa que el robot converja a un camino deseado sin parametrización del tiempo.

Considera dos casos: 1) una vez que el robot móvil está en el camino, debe seguir una velocidad deseada; 2) en todo instante el robot móvil debe mantener la velocidad deseada.

Caso 1:

Ley de control que gobierna está dada por:

$$\mathbf{v}_c = \begin{bmatrix} u_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sen \psi \\ -\frac{1}{a} \sen \psi & \frac{1}{a} \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \cos \psi_d + l_x \tanh\left(\frac{k_x}{l_x} \tilde{x}\right) \\ v \sen \psi_d + l_y \tanh\left(\frac{k_y}{l_y} \tilde{y}\right) \end{bmatrix} \quad (22)$$

donde, $\tilde{x} = x_d - x$ y $\tilde{y} = y_d - y$ definen el error de posición

del robot $\tilde{\mathbf{h}} = \begin{bmatrix} \tilde{x} & \tilde{y} \end{bmatrix}^T$ respecto al camino, ψ_d es el ángulo

deseado formado entre el eje x y la tangente a P en el punto P_d , l_x , l_y , k_x y k_y son contantes positivas en ganancia módulo de la velocidad deseada sobre el camino. Las

funciones $\tanh(\cdot)$ incorporadas para limitar las velocidades de referencia, evitando así la saturación de las velocidades del vehículo.

Caso 2:

Ley de control dada por:

$$v_c = \begin{bmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \\ -\frac{v}{a} \sin(\psi) - \frac{l_x}{a} \sin(\psi) \tanh\left(\frac{k_x}{l_x} x\right) - \frac{l_y}{a} \cos(\psi) \tanh\left(\frac{k_y}{l_y} y\right) \end{bmatrix} \quad (23)$$

ω_c Es la misma acción de control para los dos casos.

Resultado Experimental

Los controladores propuestos fueron implementados en el robot móvil PIONEER P3-AT, el cual admite como señales de referencia las velocidades lineal y angular.

La Fig. 13 muestra las acciones de control del robot móvil. La velocidad deseada $v(t)$ a lo largo del camino y la velocidad del robot se muestra en la Fig. 14.

Condición inicial: $\psi_c = 0[rad]$ $x = 1[m]$ $y = 1[m]$

Velocidad deseada en el camino: $v(t) = \frac{0.4}{1 + k_v \rho} [m/s]$

Camino deseado: recta

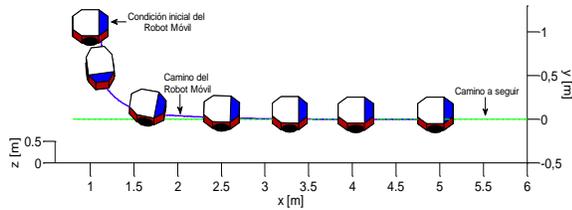


Fig. 15 Movimiento estroboscópico de Robot Móvil.

Se observa los resultados obtenidos experimentalmente indican lo siguiente: la Fig. 15 muestra el movimiento estroboscópico y la trayectoria descrita por el robot móvil. La Fig. 16 muestra la velocidad deseada $v(t)$ a lo largo del camino y la velocidad del robot $u(t)$. La Fig. 17 muestra el movimiento astroboscópico y la trayectoria del robot móvil. El error tiende a cero asintóticamente como se muestra en la Fig. 18. La Fig. 19 muestra la velocidad deseada $v(t)$ a lo largo del camino y la velocidad del robot $u(t)$. Los errores de velocidad se muestra en la Fig. 20. La Fig. 21 indica las acciones de control del robot móvil.

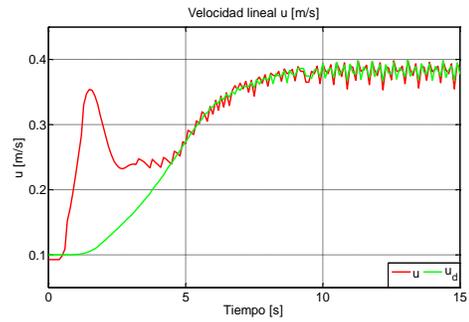


Fig. 16 Velocidad lineal.

Se muestra la velocidad deseada $v(t)$ a lo largo del camino y la velocidad del robot $w(t)$ (Fig. 16).

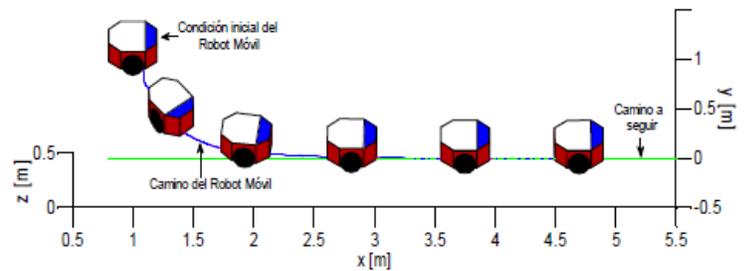


Fig. 17 Movimiento estroboscópico.

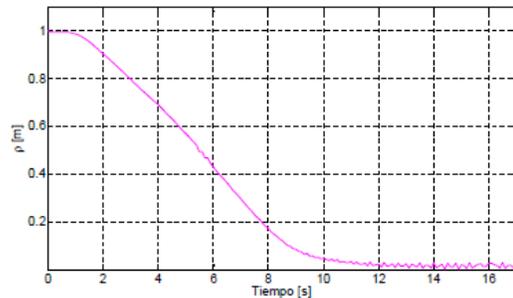


Fig. 18 Distancia al punto más cercano

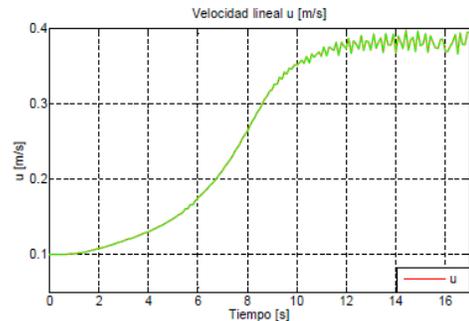


Fig. 19 Velocidad lineal.

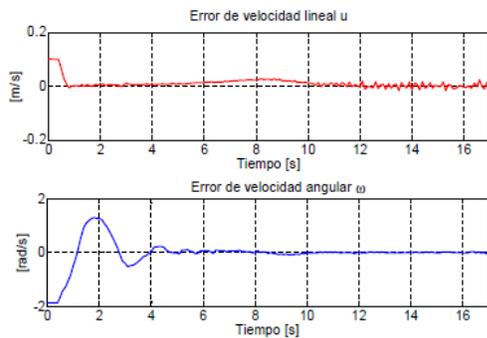


Fig. 20 Errores de velocidad: lineal y angular

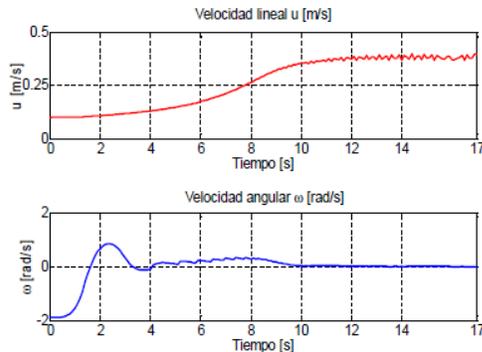


Fig. 21 Velocidad de lineal y angular.

V. CONCLUSION

Se realizó el diseño, la identificación y validación del modelo dinámico del robot móvil Pioneer P3-AT, el mismo que fue utilizado en los algoritmos de control propuestos. Además se desarrolló algoritmos de control para resolver los problemas de movimiento de un robot móvil, tales como: control de posicionamiento, seguimiento de trayectoria y seguimiento de caminos. El diseño de los algoritmos de control se basa en dos subsistemas, un controlador cinemático, el mismo que cumple con los objetivos de la tarea; y un controlador dinámico que compensa la dinámica del robot móvil. Además se probó la estabilidad del sistema de control propuesto basado en la Teoría de Lyapunov, concluyendo que los errores de control convergen a cero asintóticamente en ausencia de incertidumbres en el modelo. Finalmente los resultados experimentales muestran que los controladores implementados tienen un buen desempeño y se llega al cumplimiento de los objetivos de control.

REFERENCES

- [1] González Javier, Ollero Aníbal, "Estimación de la posición de un robot móvil", Informática y Automática, España Abril 1996.
- [2] Monografías, "Robótica", <http://www.monografias.com/trabajos31/robotica/robotica.shtml>
- [3] Wikipedia, "Robótica", http://es.wikipedia.org/wiki/Rob%C3%B3tica#cite_note-0
- [4] Enciclopedia libre Universal en Español. "Tres Leyes de la Robótica", http://enciclopedia.us.es/index.php/Tres_leyes_de_la_rob%C3%B3tica
- [5] [32] Robótica en Mendoza, "Robótica",

<http://www.roboticajoven.mendoza.edu.ar/>

- [6] Barrientos A, Peñin L, *et al*, "Fundamentos de Robótica", Segunda Edición. McGraw-Hill, España 2007.
- [7] Arranz Álvaro, Balañas Jorge *et al*, "Aplicaciones de robots móviles", Universidad de Alcalá, Archivo PDF, Noviembre 2006
- [8] González Víctor, López Antonio, Control y Robótica - Curso en línea "Robots Móviles", http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/archivos/15/Tema_5.5.htm
- [9] Lozano Tomás, "Foreword: Mobile Robot and Robotics". Autonomous Robot Vehicles. Editores I.J. Cox y G.T. Wilfong. Springer-Verlag, 1990
- [10] Secchi Humberto, "Una Introducción a los Robots Móviles", Universidad Nacional de San Juan, Archivo PDF, 2008
- [11] Silva R., Barrientos V., *et al*, "Una Panorámica De Los Robots Móviles", Universidad Rafael Belloso Chasin, Archivo PDF, 2007
- [12] Khalil H., "Nonlinear Systems", Second Edition, Prentice-Hall. 1996.
- [13] Carrelli Ricardo "Análisis y control de sistemas no lineales", Universidad Nacional de San Juan, 2004.
- [14] Slotine J., and Lie W., "Applied Nonlinear Control", Prentice-Hall, 1991.
- [15] Ollero Aníbal Robótica; "Manipuladores y Robots Móviles" Primera Edición, Editorial Alfaomega-Marcombo, España 2001.
- [16] Zhang Y., Kim J., *et al*, "Dynamic Model Based Robust Tracking Control of a Differentially Steered Wheeled Mobile Robot" Proceedings of the American Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 850-85, 1998.
- [17] Reyes F. y Kelly R., "On Parameter Identification of Robot Manipulator", IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, pp.1910-1915, 1997.
- [18] Muñoz P, "Modelado e Identificación de un Manipulador Industrial de Dos Grados de Libertad", Universidad de San Juan, 2000.
- [19] Åström K., y Wittenmark B., "Adaptive Control", Addison-Wesley, 1995.
- [20] Åström K., y Wittenmark B., "Adaptive Control", Addison-Wesley, 1995.
- [21] Soetanto D., Lapierre L. and Pascoal A., "Adaptive, Non singular Pathfollowing Control of Dynamic Wheeled Robots", Conference Decision and Control 42nd IEEE, Hawaii., December 2003.
- [22] Brockett R., "Asymptotic stability and feedback stabilization", in R. W. Brockett, R.S. Millman and H.J. Sussmann, Ed., Differential Geometric Control Theory, Boston; Birkhauser, 1983.
- [23] Aicardi M., Casalino G., *et al*, "Closed Loop Steering of Unicycle-like Vehicles via Lyapunov Techniques", IEEE Robotics & Automation Magazine, pp. 27-35 March 1995.
- [24] Feng X., and Velinsky S., "Development of Distributed Multiple Mobil Robot Control System for Automatic Highway" Muñoz P, "Modelado e Identificación de un Manipulador Industrial de Dos Grados de Libertad", Universidad de San Juan, 2000. Maintenance and Construction", IEEE 40th Midwest Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Banff, Alberta, Canada, 1997.
- [25] <http://www.mobilerobots.com>
- [26] Kuo Benjamin, "Sistemas de Control Automático", séptima edición, Prentice-Hall, 1996.

BIOGRAFÍA



La Ing. Gabriela Andaluz Ortiz nació el 8 de julio de 1985 en la ciudad de Ambato, Ecuador. Realizó sus estudios superiores en la *Escuela Politécnica Nacional* (EPN) donde obtuvo el título de Ingeniera en Electrónica y Control.

Realizó una estadía práctica en la *Universidad Nacional de San Juan*, Argentina.

Actualmente se desempeña como *Jefe de Servicios* de la empresa INTCOMEX. Sus interés son robótica, automatización, control industrial.

El Dr.-Ing. Víctor Hugo Andaluz nació el 3 de enero de 1984 en la ciudad de Ambato, Ecuador. Realizó sus estudios superiores en la *Escuela Politécnica Nacional* (EPN), donde se graduó de Ingeniero en Electrónica y Control. Su Doctorado, en Ingeniería en Sistemas de Control, lo obtuvo en el 2011 luego de cursar sus estudios en el *Instituto de*



Automática (INAUT) de la *Universidad Nacional de San Juan*, Argentina; además realizó una estadía investigativa en el *Instituto de Sistemas en Tiempo Real* (RTS) de la *Universidad Leibniz de Hannover*, Alemania, como becario del DAAD (*Instituto Alemán de Intercambio*

Académico). Ha trabajado como Instructor de Laboratorio en la Facultad de Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional. Actualmente, ocupa el cargo de Docente e Investigador a tiempo completo en la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato y de Docente a medio tiempo en la Facultad de Informática y Electrónica de la Escuela Politécnica de Chimborazo. Sus áreas de interés son: Robótica Aplicada, Control Cooperativo, Control Industrial, entre otros.



El Dr.-Ing. Andrés Rosales Acosta nació el 28 de abril de 1977 en la ciudad de Quito, Ecuador. Realizó sus estudios superiores en la *Escuela Politécnica Nacional* (EPN), donde se graduó de Ingeniero en Electrónica y Control. Su Doctorado en Ingeniería en Sistemas de Control lo obtuvo en el *Instituto de*

Automática (INAUT) de la *Universidad Nacional de San Juan*, Argentina. realizó una estadía investigativa en el *Instituto de Sistemas en Tiempo Real* (RTS) de la *Universidad de Hannover*, Alemania, como becario del DAAD (*Instituto Alemán de Intercambio Académico*).

Actualmente se desempeña como profesor principal e investigador de la Escuela Politécnica Nacional.