

Fusión de sensores mediante filtro de Kalman extendido para seguimiento de trayectorias de un robot móvil tipo rover

Jheison Duvier Diaz-Ortega¹, Ponciano Jorge Escamilla-Ambrosio²,
Octavio Gutiérrez-Frías¹, Alberto Luviano-Juárez¹,
José Alejandro Aguirre-Anaya¹

¹ Instituto Politécnico Nacional,
Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas,
México

² Instituto Politécnico Nacional,
Centro de Investigación en Computación,
México

{jheisondz, alberto.luviano,
alejandroaguirre1809}@gmail.com, ogutierrezf@ipn.mx,
pescamilla@cic.ipn.mx

Resumen. En este trabajo se presenta la propuesta de un sistema de fusión de sensores aplicado a un robot móvil tipo rover con la finalidad de utilizarse en tareas de seguimiento de trayectorias. El sistema involucra la ley de control, el modelo de transición de estados y tres modelos de medición de los sensores de posición y orientación. Por otro lado, la fusión de sensores se realiza entre los dispositivos que miden la posición en las coordenadas (x, y), y un sensor que mide la orientación, además se presenta el modelo cinemático en dos dimensiones del robot móvil. Finalmente, se muestran los resultados obtenidos mediante simulación numérica a través de los paquetes de Matlab-Simulink, mediante el seguimiento de dos trayectorias deseadas por parte del robot; una en forma circular y otra en forma de lemniscata, observando las ventajas que presenta el empleo de la fusión de sensores, tales como el filtrado del ruido de medición y la disminución del error de posición del robot.

Palabras clave: Fusión de sensores, filtro de Kalman extendido, robot rover, seguimiento de trayectorias, lemniscata.

Sensor Fusion Using an Extended Kalman Filter for Trajectory Tracking of a Rover-Type Mobile Robot

Abstract. This paper presents a proposed sensor fusion system applied to a rover-type mobile robot for path tracking tasks. The system involves the control law, the state transition model, and three measurement models for the position and orientation sensors. Sensor fusion is performed between devices that measure position in the (x, y) coordinates and a sensor that measures orientation. A two-dimensional kinematic model of the mobile robot is also presented. Finally, the

results obtained through numerical simulation using Matlab-Simulink packages are presented, following two desired trajectories by the robot: one circular and the other lemniscate. The advantages of using sensor fusion are observed, such as filtering measurement noise and reducing the robot's position error.

Keywords: Sensor fusion, extended Kalman filter, rover robot, path tracking, lemniscate.

1. Introducción

En los últimos años se ha incrementado el interés por el desarrollo de robots móviles que sean capaces de desplazarse con la mínima o nula intervención del ser humano, sobre terreno poco estructurado con la finalidad de realizar tareas que sean repetitivas, de asistencia o peligrosas.

Dentro de las aplicaciones destacadas de los robots móviles existen las tareas de asistencia al humano, como el apoyo en los quehaceres domésticos o las tareas de guía en un museo, las tareas como búsqueda y rescate en lugares peligrosos, carros autónomos y la exploración planetaria [1, 2].

Para realizar dichas tareas, se requiere de un algoritmo de seguimiento de trayectorias el cual, debe considerar la incertidumbre inherente a los dispositivos de percepción del entorno y la necesidad de explorar ambientes desconocidos de los que no se tiene a priori, mapas confiables y precisos [3]. Con el fin de tomar en cuenta estos factores, la técnica de fusión de datos de sensores es una alternativa, debido a que es el proceso de combinar piezas incompletas e imperfectas de información de sensores mutuamente complementarios, de tal manera que se logra una mejor comprensión de un fenómeno subyacente del mundo real; por lo general, los resultados de fusión exceden lo que se puede producir a partir de la salida de un solo sensor en precisión, confiabilidad o costo. La recopilación, el registro y la alineación adecuados, el filtrado estocástico, el análisis lógico, la integración espaciotemporal, la explotación de redundancias, la evaluación cuantitativa y la visualización adecuada son parte de las técnicas de fusión de sensores [4]. Así entonces, la fusión de sensores es una técnica importante para que múltiples sistemas de sensores realicen detección y monitoreo, y se usa ampliamente en muchos campos, como sistemas inteligentes, sistemas de seguridad o vehículos autónomos [5].

En la literatura, existen algunos trabajos que emplean la técnica de fusión de sensores y que son cercanos a la presente propuesta, como serían: [6] presenta una estrategia de fusión de sensores aplicada a plataformas de tipo UAV (Unmanned Aerial Vehicles), donde se evalúa el rendimiento del sistema en situaciones reales sin considerar las simulaciones. En [7], se muestra la fusión de las lecturas de una cámara y los sensores LIDAR en vehículos autónomos con un método de optimización de redes neuronales llamado "poda knowledge-based pruning". Por otro lado, en [9] se desarrolla un sistema de localización autónomo capaz de entregar estimaciones de posición mucho más precisas que las entregadas por un sistema basado exclusivamente en odómetros.

Si bien el campo de aplicación para los robots rover es extenso, una cantidad importante de los robots desplegados en tareas autónomas dependen de algoritmos basados en sistemas de visión por computadora o sistemas de posicionamiento global (GPS) [10-13]. Este tipo de planteamientos, presentan inconvenientes cuando algún

Tabla 1. Principales características del rover Shrimp.

Características	Descripción
Dimensiones	50.5 * 75 * 60 (cm)
Peso	9.5 (kg)
Sistema de suspensión	Pasivo
Número de ruedas	6
Configuración geométrica de las ruedas	Dos ruedas en cada lado unidas por eslabones en forma de paralelogramo, una rueda adelante móvil unida al chasis mediante un mecanismo de cuatro barras y otra fija, las ruedas se distribuyen de tal manera que la carga sea equitativa.
Sistema de tracción	Cada rueda está actuada.
Sistema de dirección	Dirección independiente en las ruedas frontal y posterior, requiere de 2 actuadores. Capacidad de giro sobre su propio eje y radios de giro pequeños sin deslizamiento de las ruedas.
Capacidad para superar obstáculos	Puede superar obstáculos de alturas iguales al doble del diámetro de sus ruedas.

sistema falla por lo que se requiere de algoritmos de navegación capaces de integrar todos los sensores sobre el robot para la estimación, lectura o adquisición de las variables que le permiten percibir su entorno; adicionalmente, dichos sistemas deben ser lo suficientemente robustos ante eventos que afecten los sensores, como las condiciones de temperatura, iluminación, ruido electromagnético o cambios climáticos.

Con lo anteriormente expuesto, en el presente trabajo, se propone un sistema que utiliza las técnicas de fusión de sensores, de tal manera que involucra la ley de control, el modelo de transición de estados y tres modelos de medición de los sensores de posición y orientación, que son utilizadas para solucionar el problema de seguimiento de trayectorias de un robot móvil tipo rover, para dos diferentes trayectorias como son: la forma circular y la forma de lemniscata. Finalmente, se muestran los resultados obtenidos mediante simulación numérica, obteniendo un filtrado del ruido de medición y la disminución del error de posición del robot.

La estructura de este trabajo se presenta de la siguiente manera: La Sección 2 presenta el sistema robótico tipo rover, el modelado matemático y la estrategia de control utilizada. La Sección 3 describe la técnica de fusión de sensores empleada. En la Sección 4, se muestran los resultados de simulación numérica obtenidos. Y finalmente la última sección se dedica a las conclusiones del trabajo.

2. Sistema robótico tipo rover

El sistema robótico móvil tipo rover empleado como referencia para aplicar la técnica de fusión de sensores se muestra en la fig. 1, fue desarrollado en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de UPIITA-IPN, el cual tomó como base el robot móvil tipo Shrimp del Instituto Federal Suizo de Tecnología (EPFL) [14]. Las principales características se presentan en la Tabla 1.



Fig. 1. Robot rover Shrimp.

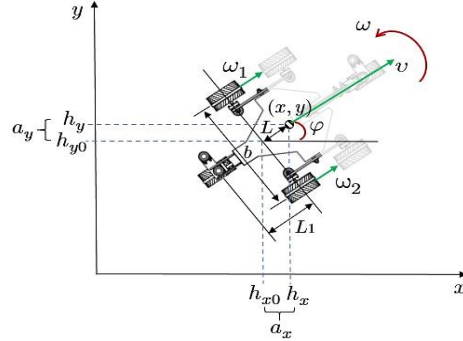


Fig. 2. Diagrama para el modelado cinemático del robot rover Shrimp.

2.1. Modelo cinemático

El modelo cinemático del sistema robótico propuesto se obtiene a partir de una vista superior como se muestra en la fig. 2 considerando un movimiento sobre el plano sin deslizamientos en las ruedas.

La simetría física del robot permite obtener el modelo para la mitad trasera del rover (sección destacada en la fig. 2) y duplicarla para la mitad frontal. El punto de control, es decir, el punto que debe seguir las trayectorias deseadas se sitúa en el centro de gravedad del rover, señalado con el punto de coordenadas (x, y) .

El modelo cinemático del rover Shrimp obtenido en función de las velocidades angulares de las ruedas laterales ω_1 y ω_2 que representan las entradas de control del robot, escrito en representación matricial de la forma $Ax + Bu$, se presenta en la ecuación (1), donde la matriz A que depende de los estados del sistema es nula, pues la cinemática del robot solo depende del vector de entradas de control. Así entonces el modelo presentado solo tiene la matriz B y el vector $u = [\omega_1 \ \omega_2]^T$:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R \cos \varphi}{2} + \frac{LR \sin \varphi}{b} & \frac{R \cos \varphi}{2} - \frac{LR \sin \varphi}{b} \\ \frac{R \sin \varphi}{2} - \frac{LR \cos \varphi}{b} & \frac{R \sin \varphi}{2} + \frac{LR \cos \varphi}{b} \\ -\frac{R}{b} & \frac{R}{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

donde:

- x : Posición del rover en el eje x
- y : Posición del rover en el eje y
- φ : Ángulo de orientación del rover respecto al eje x
- $\dot{x}$: Velocidad del rover en el eje x

- $\dot{y}$: Velocidad del rover en el eje y
- $\dot{\varphi}$: Velocidad de rotación u orientación del rover
- L : Distancia perpendicular desde la mitad del eje al centro de gravedad
- L_1 : Distancia perpendicular desde la mitad del eje a la rueda de dirección
- b : Vía del rover o distancia entre las ruedas laterales
- R : Radio de las ruedas

2.2. Estrategia de control

La estrategia de control utilizada es un controlador PI (Proporcional Integral) el cual se considera suficiente pues se requiere controlar la posición del robot a partir de su modelo cinemático, lo cual incluso es posible únicamente con el control proporcional. El control PI se describe como $\mathbf{u} = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_i \int_0^t \mathbf{e}(\tau) d\tau$, donde $\mathbf{e}(\tau)$ es el error entre la señal de salida deseada y la señal de salida real. Así entonces la ley de control planteada tiene la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -L \sin \varphi \\ \sin \varphi & L \cos \varphi \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} K_{px}(x^*(t) - x(t)) + K_{ix} \int_0^t (x^*(\tau) - x(\tau)) d\tau \\ K_{py}(y^*(t) - y(t)) + K_{iy} \int_0^t (y^*(\tau) - y(\tau)) d\tau \end{bmatrix}, \quad (2)$$

donde K_{px}, K_{ix}, K_{py} y K_{iy} son las constantes para sintonizar el controlador proporcional integral en cada coordenada, mientras que $x^*(t)$ y $y^*(t)$ son las coordenadas (x, y) de la trayectoria deseada.

Por otra parte, el control PI entrega los valores de la velocidad traslacional y la velocidad rotacional del rover, representados por el vector $\mathbf{u} = [u_1 \ u_2]^T$, sin embargo, la cinemática del rover Shrimp depende únicamente de la variación entre las velocidades angulares de las ruedas laterales ω_1 y ω_2 como se muestra en la fig. 2. Así entonces, las velocidades lineal y angular dadas por el controlador se obtienen a través de la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} & \frac{R}{2} \\ \frac{R}{b} & \frac{R}{b} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

en donde u_1 y u_2 son las salidas del controlador.

3. Fusión de sensores

En esta sección se presenta la fusión de sensores utilizando el filtro de Kalman extendido, útil debido a la no linealidad presentada por el modelo cinemático del rover. El esquema general de la propuesta se presenta en la fig. 3; donde las variables

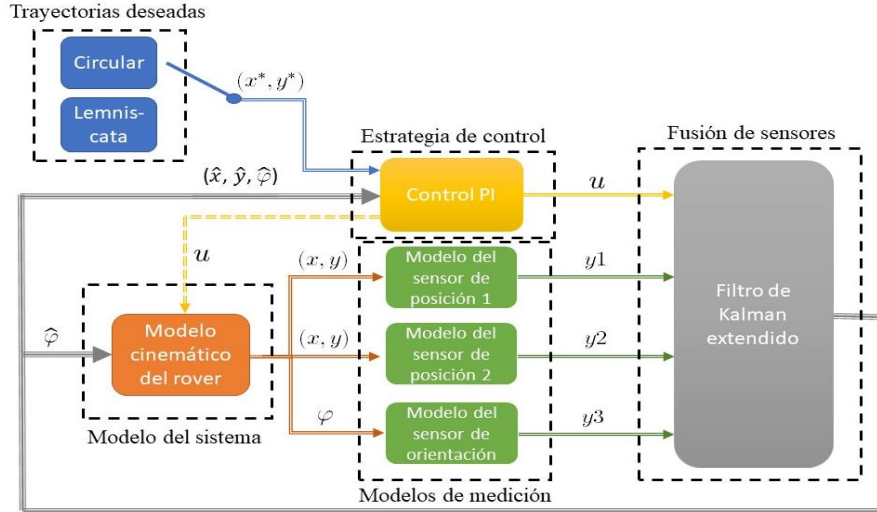


Fig. 3. Esquema general de fusión de sensores.

y_1, y_2, y_3 representan las mediciones de cada sensor; y_1 y y_2 entregan cada una la posición del rover en (x, y) ; mientras que y_3 representa el ángulo de orientación del rover. Las demás variables en el esquema corresponden con las ecuaciones del modelo y la estrategia de control.

Las ecuaciones requeridas por el bloque del filtro de Kalman extendido se presentan en (4) y (5); en las cuales f es la función del modelo discretizado del rover, y g la función de los diferentes modelos de medición implicados en la fusión; w_k y v_k son respectivamente las matrices que representan el ruido del proceso y de medición:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_k) + w_k, \quad (4)$$

$$y_k = g(x_k) + v_k. \quad (5)$$

El sistema completo se desarrolla mediante los paquetes de Matlab-Simulink que aportan las librerías para la simulación de distintas configuraciones del filtro de Kalman, además permite agregar los jacobianos de las anteriores ecuaciones, que en el caso del rover Shrimp, son nulos debido a que la matriz A del modelo presentado es cero. La estimación de la posición y orientación del robot ante dos trayectorias deseadas diferentes se realiza utilizando tres sensores, uno mide la orientación angular, y los otros dos la posición respecto de los ejes x, y ; cada uno de ellos tiene una precisión diferente permitiendo que el filtro haga una estimación adecuada para realimentar el algoritmo de control, y conseguir que el robot realice el seguimiento de trayectorias, que en este caso es una forma circular y otra en forma de lemniscata.

La fig. 4 muestra los tres bloques en el entorno de Simulink que contienen las funciones de medición de los 3 sensores, las cuales se encargan de agregar el ruido de medición a cada variable real, como se presenta en la fig. 5.

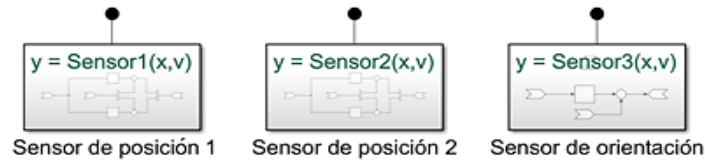


Fig. 4. Funciones de Simulink para los modelos de medición.

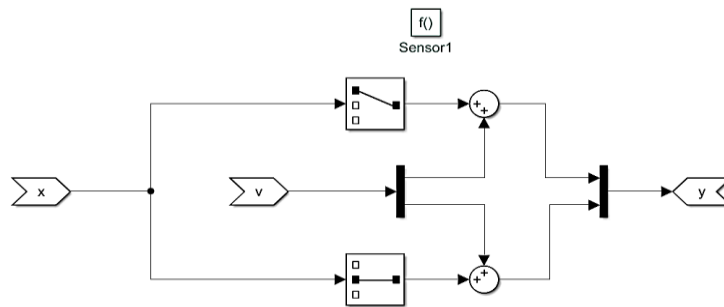


Fig. 5. Bloques del modelo de medición del sensor 1 de posición. x corresponde a la variable real de posición; v es el vector de ruido de medición; la variable y , es la medición de del sensor incluyendo el ruido.

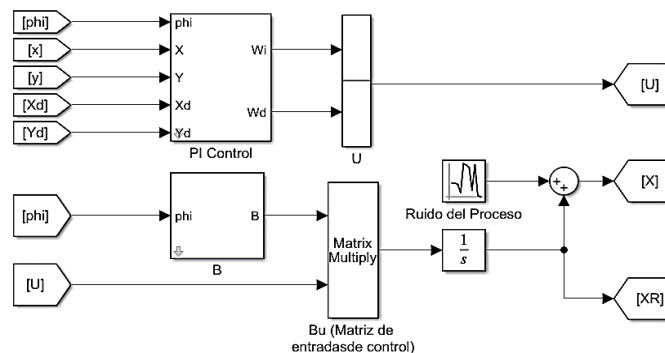


Fig. 6. Bloques del modelo cinemático, representado por la matriz del subsistema “B”, y la ley de control de posición del rover, localizada en el bloque “PI Control”.

Por otra parte, el modelo del sistema y la ley de control son mostrados en la fig. 6, donde las matrices B del modelo cinemático y el subsistema PI contienen las ecuaciones (1 y 2), respectivamente.

Finalmente, el subsistema más relevante dentro del sistema de fusión de sensores se presenta en la fig. 7, denominado “Filtro de Kalman Extendido”, el cual contiene toda la lógica necesaria para simular el filtro propuesto bajo las condiciones dadas. Se puede ver entonces que el filtro utiliza las señales de los tres sensores y de la entrada de control; y entrega una estimación del vector de estados de posición y orientación del robot.

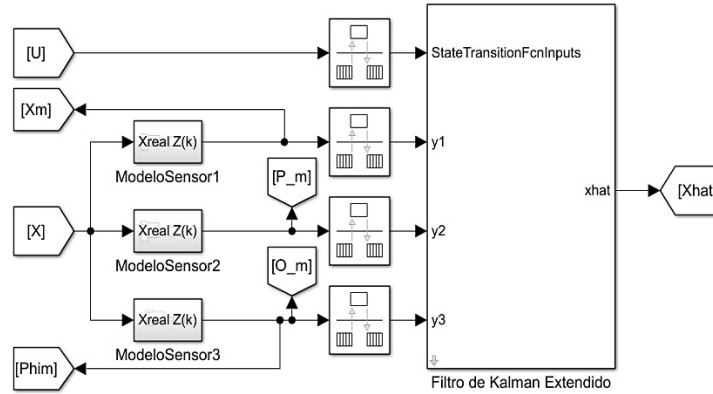


Fig. 7. Fusión de sensores mediante filtro de Kalman extendido.

```
function x = TransicionEstadosRoverShrimp(x,u)

R = 0.062;
L = 0.105;
b = 0.425;

dt = 0.001;
x = x + cumtrapz([ (R/2)*cos(x(3))+(L*R/b)*sin(x(3)) (R/2)*cos(x(3))-(L*R/b)*sin(x(3));
(R/2)*sin(x(3))-(L*R/b)*cos(x(3)) (R/2)*sin(x(3))+(L*R/b)*cos(x(3));
-R/b R/b ]*u)*dt;

end
```

Fig. 8. Función de transición de estados, incluye los valores (R , L , b) reales del robot en metros.

El subsistema del filtro de Kalman extendido requiere de la función de transición de estados, la cual es insertada en el sistema mediante su declaración en un script de Matlab como se muestra en la fig. 8.

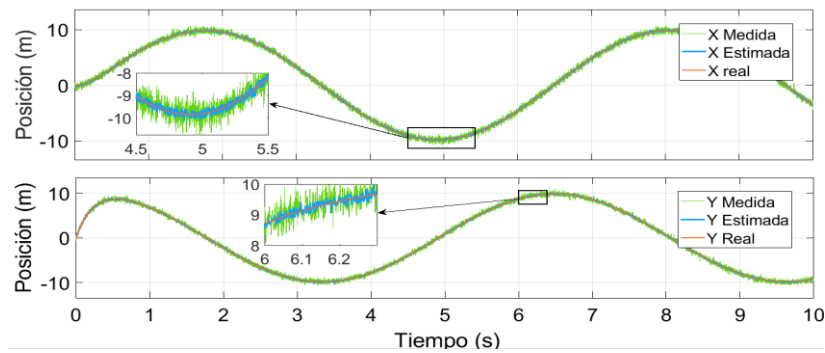
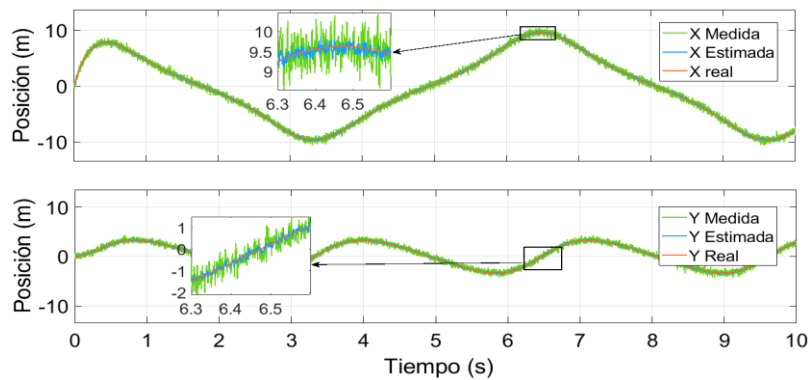
4. Resultados

En esta sección se presentan algunas simulaciones numéricas mediante las cuales se revisa el comportamiento de la estrategia; las simulaciones se realizan mediante Matlab-Simulink con un tiempo de muestreo de 0.01 s; las soluciones se realizan durante 10 s; las trayectorias deseadas propuestas de forma circular y de forma de lemniscata tienen un radio de 10 m; las condiciones iniciales son 0 y la covarianza inicial es 1. Los parámetros del modelo, las constantes del controlador PI y las matrices de covarianza propuestas para la simulación del filtro de Kalman extendido, se presentan en la Tabla 2, cuyas matrices de covarianza representan la precisión propuesta de cada sensor y del modelo cinemático presentado.

Las figs. 9 y 10 muestran la posición en cada eje para las tres señales del sistema (real, medida y estimada) de la trayectoria circular y de lemniscata, respectivamente; de la misma manera en las figs. 11 y 12 se presentan las señales de la orientación del

Tabla 2. Parámetros de simulación.

Parámetros	Valor
R	0.062 m
L	0.105 m
b	0.425
k_{px}, k_{ix}	5, 5
k_{py}, k_{iy}	0.1, 0.1
Covarianza del ruido en el proceso	$[0.012 \ 0 \ 0; 0 \ 0.012 \ 0; 0 \ 0 \ 0.012]$
Covarianza de la medición sensor 1	$[0.1 \ 0; 0 \ 0.1]$
Covarianza de la medición sensor 2	$[0.005 \ 0; 0 \ 0.005]$
Covarianza de la medición sensor 3	0.175

**Fig. 9.** Comparación de la posición en la trayectoria circular.**Fig. 10.** Comparación de la posición en la trayectoria de lemniscata.

robot, obteniendo un error cuadrático medio entre la estimación del filtro y la medición real, de 0.0928 para el círculo y de 0.1152 para la lemniscata.

Finalmente, las trayectorias realizadas por el robot se presentan en la fig. 13; las cuales toman como punto de referencia el centro de gravedad del robot, designado como punto de control en el modelo cinemático del rover para seguir las trayectorias deseadas.

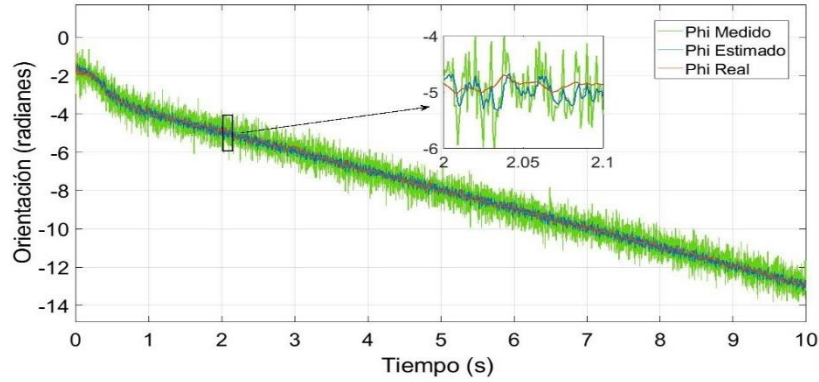


Fig. 11. Comparación de la orientación en la trayectoria circular.

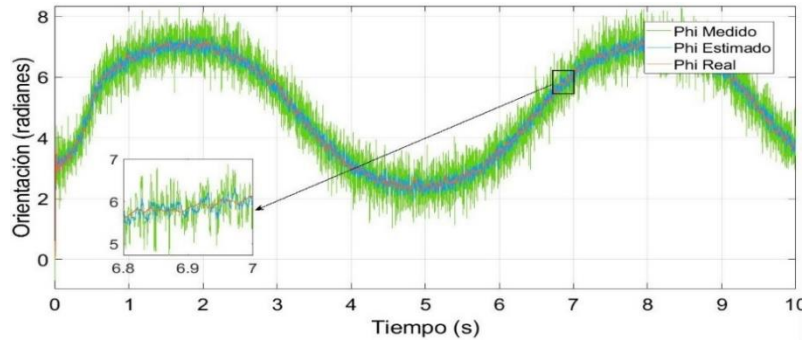


Fig. 12. Comparación de la orientación en la trayectoria de lemniscata.

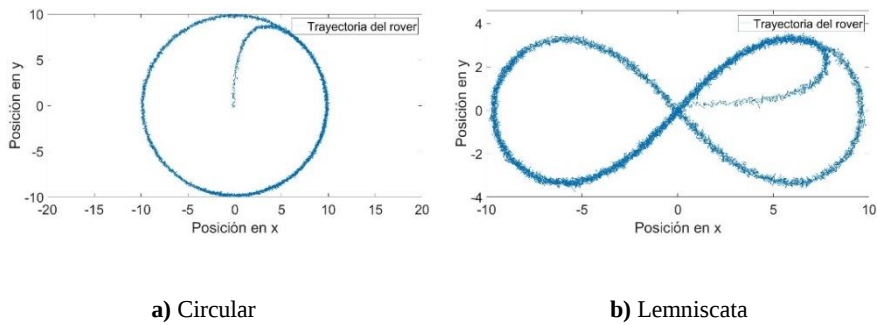


Fig. 13. Trayectoria trazada por el robot rover en el seguimiento de trayectorias.

Los resultados obtenidos exponen rendimientos importantes en cuanto al posicionamiento y el desempeño del controlador. El error cuadrático medio de posición obtenido sin la fusión es de 2.082 para la trayectoria circular, y de 1.616 para la trayectoria de lemniscata considerando las mediciones más precisas.

Por otra parte, si se realimenta el controlador con la señal estimada proveniente de la fusión, se consigue una mejora en el error de posición del 30.31% para el círculo, y del 24.26% para la lemniscata, pues el error cuadrático medio de posición resultante es de 1.451 y 1.224 para cada trayectoria respectivamente; lo cual evidencia un recorrido más preciso al utilizar el esquema de fusión de sensores.

Por otra parte, es importante mencionar que los resultados de la estimación de la orientación del robot dependen en gran parte de la precisión del sensor; esto se debe principalmente a que el sistema planteado utiliza un solo sensor para medir ese estado, adicionándole que el ángulo de orientación es completamente independiente de los otros dos estados y depende únicamente de las entradas de control, consecuencia de que en el modelo presentado la matriz A sea nula.

5. Conclusiones

El sistema de fusión de sensores planteado representa una alternativa para la implementación de algoritmos de seguimiento de trayectorias confiable, y que mejora entre otras cosas la precisión en comparación con algoritmos basados en un solo dispositivo de medición. En este caso se obtiene una mejora en el error cuadrático medio en el vector de estados del robot al usar las señales de estimación, permitiendo tener un error de posicionamiento del robot menor al utilizar la fusión de sensores.

Por otro lado, si bien el modelado del robot desprecia una cantidad importante de aspectos referentes al entorno de trabajo, queda claro que, bajo condiciones controladas, la propuesta presentada aquí es completamente aplicable, e incluso es posible adaptarla para robots rover con otro tipo de configuraciones.

Aunque la precisión del robot no tiene una dependencia directa con la ley de control, el planteamiento futuro de estrategias diferentes al PI; entregarían un punto importante de comparación y una mayor claridad de la relación de los resultados con el controlador utilizado.

El planteamiento de un modelo completo que incluya la cinemática o dinámica de las articulaciones en la suspensión del rover, los deslizamientos de las ruedas y condiciones variables en la inclinación del terreno; conllevaría a una generalización del método presentado aquí y, por ende, a resultados mucho más cercanos a aplicaciones en ambientes diversos, que quedan fuera de los alcances de este trabajo.

Agradecimientos. Este trabajo está financiado por la SIP-IPN, con número de registro 20210268. Jheison Duvier Díaz Ortega agradece a CONACYT; y el apoyo otorgado en la convocatoria de proyectos de desarrollo tecnológico o innovación para estudiantes del IPN 2021.

Referencias

1. Baturone Ollero, A.: Robótica manipuladores y robots móviles, Sevilla. Marcombo (2005)

2. Calle Flores, I.A.: Navegación autónoma de un robot móvil usando técnicas probabilísticas de localización y mapeo basadas en métodos Monte Carlo secuenciales (2014)
3. Acosta, G., Gallardo, J., Pérez, R.: Arquitectura de control reactiva para la navegación autónoma de robots móviles, *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 24(1), pp. 173–181 (2016) doi: 10.4067/S0718-33052016000100016.
4. Wolfgang, K.: *Tracking and Sensor Data Fusion: Methodological Framework and Selected Applications*, Berlin. Heidelberg: Springer (2014)
5. Zhu, H., Zou, K., Li, Y.: Robust Sensor Fusion with Heavy-Tailed Noises. *Signal Processing*, 175, 107659 (2020) doi: 10.1016/j.sigpro.2020.107659.
6. García, J., Molina, J.M., Trincado, J.: Real Evaluation for Designing Sensor Fusion in UAV Platforms. *Information Fusion*, 63, pp. 136–152 (2020) doi: 10.1016/j.inffus.2020.06.003.
7. Balemans, D., Casteels, W., Vanneste, S.: Resource Efficient Sensor Fusion by Knowledge-Based Network Pruning. *Internet of Things*, 11, 100231 (2020) doi: 10.1016/j.iot.2020.100231.
8. Bazo, R., Reis, E., Seewald L.A.: Baptizo: A Sensor Fusion Based Model for Tracking the Identity of Human Poses. *Information Fusion*, 62, pp. 1–13 (2020) doi: 10.1016/j.inffus.2020.03.011.
9. Olivares Ávila, M.A., Gallardo Arancibia, J.A.: Sistema de localización autónoma para robots móviles basado en fusión de sensores propioceptivos. *Revista Politécnica*, 11(21), pp. 75–84 (2015)
10. Al Arabi, A., Ul Sakib, H., Sarkar, P.: Autonomous Rover Navigation Using GPS Based Path Planning. In: 2017 Asia Modelling Symposium, pp. 89–94 (2017) doi: 10.1109/AMS.2017.22.
11. Hewitt, R., Ellery, A., Ruiter, A.: Training a Terrain Traversability Classifier for a Planetary Rover Through Simulation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 14(5) (2017) doi: 10.1177/1729881417735401.
12. Schuster, M.J., Brunner, S.G., Bussmann, K., Büttne, S.: Towards Autonomous Planetary Exploration. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 93(3) pp. 461–494 (2019)
13. Graven, O., Srisuphab, A., Silapachote, P.: An Autonomous Indoor Exploration Robot Rover and 3D Modeling with Photogrammetry. In: 2018 International ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering, pp. 44–47 (2018) doi: 10.1109/ECTI-NCON.2018.8378279.
14. Aguirre Anaya, J.A.: Diseño y construcción de un móvil tipo Rover de arquitectura abierta. (2016) <https://cloud.upiita.ipn.mx/s/bRRCGpjFXawpznN>. Tesis Maestría en Tecnología Avanzada / file 85.