

Teleoperación con Realimentación de Fuerza Aplicada a un Robot Móvil con Restricción No-Holonómica

Douglas D. Cárdenas, Paulo C. Leica, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito – Ecuador

Resumen – En este trabajo se realiza la teleoperación con realimentación de fuerza mediante un dispositivo háptico para maniobrar un robot móvil de tracción diferencial en un ambiente semiestructurado. La realimentación de fuerza se introducirá en las leyes de control para ayudar al usuario a la conducción del robot. Además, se incluirá una estrategia de evasión de obstáculos basado en impedancia mecánica para evitar colisiones en ambientes semiestructurados. El dispositivo háptico sirve, también, para interpretar la intención del usuario al momento de la teleoperación y se aplica una dinámica del sistema mediante la definición de impedancia mecánica para un manejo más intuitivo. Asimismo, se analiza la estabilidad de las leyes de control.

Índices–Robótica, interacción humano robot, evasión de obstáculos, realimentación de fuerza.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de los objetivos de la robótica es el desarrollo de máquinas que logren, de manera autónoma, moverse interactuando con su entorno. Sin embargo, en muchos casos es necesaria la interacción del humano, ya sea por necesidad o complejidad de la tarea a realizarse. Para esto es necesario que el robot interactúe de manera amigable y segura con el humano; de esta manera, se genera beneficios. Por ejemplo, la facilitación y simplificación de tareas, además de permitir en el robot una operación más segura y fiable en ambientes humano-robot.

Dicha idea es ampliamente utilizada en diferentes sectores; tales como: en la ayuda a personas con varios tipos de deficiencias, realización de tareas en ambientes de alto riesgo y simplificación del trabajo humano en la industria, entre otros. Por este motivo, es necesario el desarrollo de técnicas de este tipo. Esta interacción con los seres humanos se puede justificar por los siguientes objetivos: (1) el robot puede moverse de forma segura e independiente en un entorno humano-robot para realizar una tarea específica o (2) el robot interactúa con el ser humano de una manera segura y amistosa [10], sin o con contacto físico [9][11].

Asimismo, aplicaciones similares como: en [12], se muestra un control de robots pasivos para transportar objetos basados en el control de frenado para evitar obstáculos. En [13], un sistema portador de carga se propone con un brazo libre para reducir la fuerza humana. Robots con contacto en el área de apoyo físico y servicios personales han sido desarrollados en [14]. Un walker basado en la robótica pasiva para ayudar a los ancianos y las personas con discapacidad se propuso en [15]. La ayuda

personal para la movilidad y el sistema de seguimiento para proporcionar asistencia de movilidad se propuso en [16].

En este trabajo, se pretende presentar la teleoperación de un robot móvil de tracción diferencial en un ambiente semiestructurado, mediante un dispositivo háptico con realimentación de fuerza; realizándose pruebas experimentales las cuales muestran el desempeño de los algoritmos implementados.

II. TELEOPERACIÓN HÁPTICA Y ESQUEMA IMPLEMENTADO

La teleoperación consiste en el mando a distancia del robot móvil. Por otro lado, la háptica es el estudio o manejo del sentido del tacto que permite reconocer características, como peso, fuerza, textura, que no pueden ser percibidas por otros sentidos. De esta manera, la teleoperación háptica hace referencia al manejo a distancia con realimentación de fuerza; es decir, realizar la teleoperación considerando fuerzas resistentes que retornen al operador. Estas fuerzas pueden ser determinadas por diferentes condiciones, como: según el ambiente del robot móvil, para evitar generar una sobrecarga de las propiedades físicas del robot móvil o por una condición especial.

En este estudio la teleoperación háptica se la realiza mediante la utilización del dispositivo háptico “NovintFalcon”. No obstante, debido a que el robot móvil utilizado opera en un entorno bidimensional, solamente se hará uso del eje Z y eje X (Fig. 1) para controlar la velocidad lineal y la velocidad angular respectivamente del robot móvil. Por otro lado, la realimentación de fuerza en el dispositivo háptico representa las fuerzas generadas mediante el análisis del entorno en el cual se halla el robot móvil. Este análisis parte de la interpretación de las señales obtenidas del sensor laser propio del robot móvil (distancia frontal a cada obstáculo en un rango de 180°) y así generar la evasión de obstáculos. A continuación, se muestra el esquema de control con el dispositivo háptico y el esquema implementado.

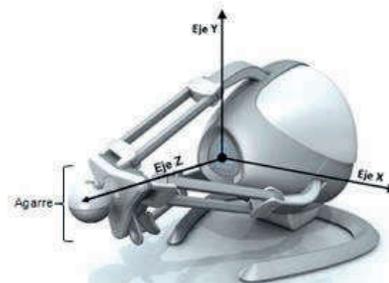


Fig. 1.(a) Dispositivo Háptico Novint Falcon

Los autores agradecen a los proyectos PJI-15-17 y PIMI-14-04 por el apoyo brindado a este trabajo.

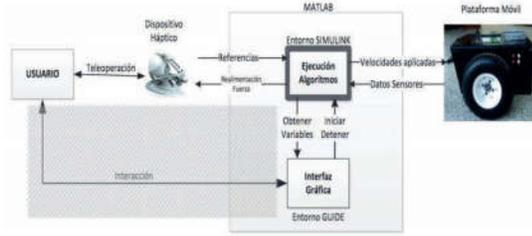


Fig. 1.(b) Diagrama del sistema implementado.

III. EVASIÓN DE OBSTÁCULOS

La evasión de obstáculos facilita y evita colisiones durante el manejo del robot móvil. Así, para realizar esta función, se planteó una zona de repulsión alrededor del robot móvil y una zona gaussiana dentro de esta zona de repulsión (Fig. 2), cuyo objetivo es priorizar el evitar los obstáculos que se hallen dentro de la dirección de movimiento del robot (enfrente) que aquellos ubicados a los costados (laterales). Esto permite, al momento de operar el robot móvil, una mayor facilidad para atravesar lugares estrechos como puertas y un manejo más fácil e intuitivo para el usuario. [1]

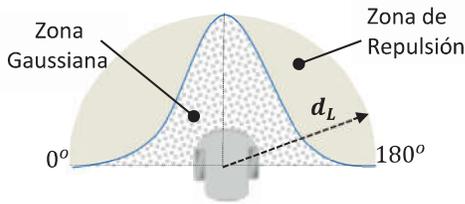


Fig. 2. Zonas para la detección de obstáculos [1].

Todo obstáculo que se encuentre dentro de la zona de repulsión del robot móvil genera una fuerza normal opuesta al movimiento y una fuerza tangencial perpendicular al robot, las cuales son proporcionales a la cercanía y ubicación de los obstáculos.

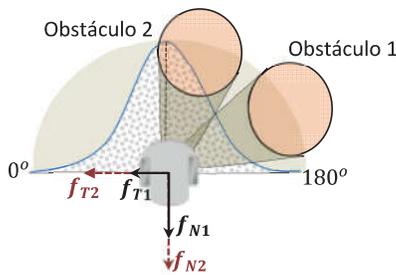


Fig. 3. Relación gráfica entre f_N y f_T para distintas posiciones de obstáculos [1].

La aplicación de la zona Gaussiana provoca que los obstáculos que se hallen frente al robot generen mayores fuerzas de evasión que los ubicados lateralmente (Fig. 3). Las fuerzas generadas son sentidas por el usuario a través del dispositivo háptico; a su vez, la acción de estas fuerzas genera, en el robot móvil, el cambio de dirección y velocidad para evitar colisiones.

IV. PROCESO DE MODELADO

Para una mejor comprensión del comportamiento del robot móvil ante los algoritmos de teleoperación, se establece el modelo cinemático y dinámico del robot móvil de tracción diferencial con restricción no-holonómica.

A. Modelo Cinemático

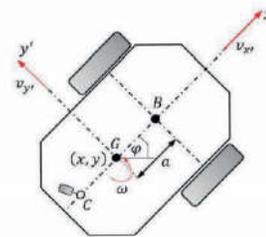


Fig. 4. Modelo cinemático [3].

La Fig. 4 muestra el modelo cinemático de un robot móvil con restricción no holonómica de tracción diferencial. Como se puede observar, el punto G la posición del centro de masa en el plano (x, y) que se halla a una distancia a , por detrás del centro del eje que une las ruedas B , la posición del punto G y φ , su orientación respecto al sistema de referencia [3].

De esta forma, el modelo cinemático del robot móvil de tracción diferencial puede ser representado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -a \sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & a \cos(\varphi) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dentro de la ecuación (1), el movimiento del robot móvil es representado por los estados $[x, y, \varphi]$ y las entradas al sistema son velocidad lineal y velocidad angular $[u, \omega]$.

B. Modelo Dinámico

Debido a que el modelo cinemático no contempla fuerzas que influyen en el movimiento del robot, como masas e inercias, se plantea un modelo dinámico que contemple las variables necesarias para una mejor simulación del sistema. El modelo dinámico [4] de un robot móvil de tracción diferencial está definido por:

$$M \dot{v} + \eta = v_D \quad (2)$$

En la ecuación (2) $v_D = [u_{ref} \ \omega_{ref}]^T$ es el vector de velocidades de referencia y $v = [u_R \ \omega_R]^T$ es el vector que contiene las velocidades reales del robot. Definido por:

$$M = \begin{bmatrix} \phi_1 & 0 \\ 0 & \phi_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3 \ \phi_4 \ \phi_5 \ \phi_6]^T \quad (4)$$

$$\eta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\omega_R^2 & u_R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & u_R \omega_R & \omega_R \end{bmatrix} \phi \quad (5)$$

Los parámetros $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5,$ y ϕ_6 contienen la mayoría de constantes necesarias para una buena representación del modelo dinámico, simplificando el

modelo sin considerar el vector de incertidumbres. Los parámetros son obtenidos mediante el proceso de identificación.

V. IDENTIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DINÁMICO

A. Identificación del Modelo Dinámico [5]

Para separar el vector ϕ , en el cual se encuentran las constantes que definen el modelo dinámico, se modifica la ecuación (2), dando como resultado la ecuación (6).

$$M \dot{v} + \eta = T\phi \quad (6)$$

Donde T representa:

$$T = \begin{bmatrix} \dot{u} & 0 & -\omega^2 u & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\omega} & 0 & 0 & u\omega & \omega \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, la representación del modelo dinámico queda definida por la ecuación (7).

$$T\phi = v_D \quad (7)$$

Se puede observar que la matriz T, la cual se conoce como matriz de regresión, está compuesta por valores conocidos, mientras que ϕ es el vector de parámetros desconocidos del modelo dinámico.

Para la identificación es necesario obtener las mediciones fundamentales en diferentes instantes de tiempo de la siguiente manera:

$$T_P = \begin{bmatrix} T_1(0) \\ \vdots \\ T_1(q) \\ T_2(0) \\ \vdots \\ T_2(q) \end{bmatrix} Y_P = \begin{bmatrix} v_{D_1}(0) \\ \vdots \\ v_{D_1}(q) \\ v_{D_2}(0) \\ \vdots \\ v_{D_2}(q) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Donde q es el último periodo de muestreo del experimento, $T_i(q)$ es un vector fila formado por la i -ésima fila de la matriz $T(q)$ (valor de la i -fila de la matriz T en el instante q) y $v_{D_i}(q)$ es el valor de la i -ésima fila del vector $v_D(q)$ (valor de la i -fila de la matriz v_D en el instante q). De este análisis se obtiene:

$$T_P \phi = Y_P \quad (9)$$

Para obtener los parámetros del modelo se utiliza el método de mínimos cuadrados, del cual resulta la siguiente ecuación:

$$T_P^T T_P \phi = T_P^T Y_P \quad (10)$$

Finalmente, el cálculo de los parámetros se lo obtiene con:

$$\hat{\theta} = (T_P^T T_P)^{-1} T_P^T Y_P \quad (11)$$

La calidad de la estima del vector ϕ dependerá de los niveles de excitación en la señal de entrada, para esto se consideró las siguientes señales de entrada:

$$\begin{aligned} u_{ref} &= A_1 \text{sen}(\omega_1 t) + A_1 \text{sen}(\omega_2 t) + \dots \\ &\quad + A_1 \text{sen}(\omega_6 t) \\ \omega_{ref} &= A_2 \text{sen}(\omega_1 t) + A_2 \text{sen}(\omega_2 t) + \dots \\ &\quad + A_2 \text{sen}(\omega_6 t) \end{aligned} \quad (12)$$

De la ecuación (12), buscando la mayor cantidad de frecuencias y amplitudes considerando las limitaciones físicas del robot móvil, se propone la utilización de los siguientes parámetros:

$$A_1 = 11; A_2 = 0.11$$

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

En la Fig. 5, se puede observar la aplicación de las señales de referencia y las señales de salida con los parámetros previamente establecidos.

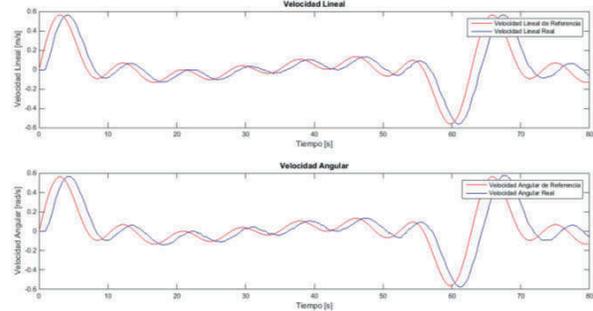


Fig. 5. Señal de entrada y salida para la identificación de parámetros del modelo Dinámico.

Del proceso de identificación se obtiene los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= 0.8284 & \phi_2 &= 1.0247 & \phi_3 &= -0.0125 \\ \phi_4 &= 0.8788 & \phi_5 &= 0.0323 & \phi_6 &= 0.8141 \end{aligned}$$

B. Validación del Modelo Dinámico

Se realiza la validación de la identificación de los parámetros del modelo dinámico mediante el uso de las señales presentadas a continuación:

$$\begin{aligned} u_{ref} &= \sqrt{(40 \cos(0.2\pi t))^2 + 10} \\ &\quad - 0.05\pi^2 \text{sen}(0.2\pi t) \\ \omega_{ref} &= \frac{1}{1 + (\pi \cos(0.2\pi t))^2} \end{aligned}$$

En la Fig. 6 se observa cómo inicialmente la señal de referencia de velocidad lineal supera a la señal simulada de velocidad lineal, ya que el robot móvil no puede vencer de manera inmediata su dinámica. Además, se observa el retraso entre la señal simulada y la señal real, resultado de los retardos en los canales de comunicación.

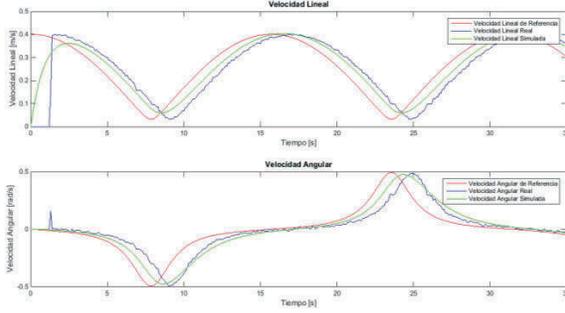


Fig. 6. Validación de los parámetros del modelo Dinámico del robot móvil.

VI. LEYES DE CONTROL

A. Ley de control cinemática

Para el cálculo de errores se plantea:

$$\tilde{u} = u_I - u_R \quad (13)$$

$$\dot{\tilde{\theta}} = \omega_I - \omega_R \quad (14)$$

En las ecuaciones anteriores, \tilde{u} es el error de velocidad y $\tilde{\theta}$ es la derivada temporal del error de posición angular del robot móvil. Además, se puede expresar \tilde{u} como: $\tilde{u} = d\tilde{p}/dt = \dot{\tilde{p}}$, siendo \tilde{p} una variable auxiliar; de esta manera, el problema cinemático se puede expresar como:

$$\dot{\tilde{p}} = u_I - u_R \quad (15)$$

Se propone la siguiente ley de control cinemática:

$$u_c = u_I + q_\rho \tanh\left(\frac{k_\rho \tilde{p}}{q_\rho}\right) \quad (16)$$

$$\omega_c = \omega_I + q_\omega \tanh\left(\frac{k_\omega \tilde{\theta}}{q_\omega}\right) \quad (17)$$

Siendo, en estas ecuaciones, k_ρ , k_ω , q_ρ y q_ω constantes positivas. Asimismo, para el análisis de estabilidad, se considera la siguiente función candidata de Lyapunov y su derivada temporal en las trayectorias del sistema:

$$V(\tilde{\theta}, \tilde{p}) = \tilde{p}^2/2 + \tilde{\theta}^2/2 \quad (18)$$

$$\dot{V}(\tilde{\theta}, \tilde{p}) = \tilde{p}\dot{\tilde{p}} + \tilde{\theta}\dot{\tilde{\theta}} \quad (19)$$

Remplazando (14) y (15) en (19) se obtiene:

$$\dot{V}(\tilde{\theta}, \tilde{p}) = \tilde{p}(u_I - u_R) + \tilde{\theta}(\omega_I - \omega_R) \quad (20)$$

Remplazando (16) y (17) en (20) y asumiendo un seguimiento perfecto de velocidad donde $u_R = u_c$ y $\omega_R = \omega_c$, se obtiene:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{\theta}, \tilde{p}) = & -\tilde{p}q_\rho \tanh\left(\frac{k_\rho \tilde{p}}{q_\rho}\right) \\ & - \tilde{\theta}q_\omega \tanh\left(\frac{k_\omega \tilde{\theta}}{q_\omega}\right) \end{aligned} \quad (21)$$

Al ser q_ρ y q_ω constantes positivas y la función $\tanh(\tilde{x})$ una función de saturación continua y acotada aplicada al error, tal que $\tilde{x}\tanh(\tilde{x}) > 0$; entonces $\dot{V} < 0$, con lo cual se concluye que $\tilde{p} \rightarrow 0$ y $\tilde{\theta} \rightarrow 0$ asintóticamente. Ahora, se conoce que

$\tilde{u} = u_I - u_R$, remplazando la acción de control se tiene $\tilde{u} = -q_\rho \tanh(k_\rho \tilde{p}/q_\rho)$, y como se demostró que $\tilde{p} \rightarrow 0 \text{ cont} \rightarrow \infty$, por lo tanto $\tilde{u} \rightarrow 0$ asintóticamente.

B. Ley de control dinámica

Se define la ley de control dinámica [6] como:

$$u_{Dc} = M \sigma + \eta \quad (22)$$

Donde:

$$\sigma = \dot{v}_c + Q_D \tanh(Q_D^{-1} K_D \tilde{v}) \quad (23)$$

Siendo Q_D y K_D matrices simétricas definidas positivas y el error de velocidad definido por $\tilde{v} = v_c - v$. El sistema en lazo cerrado queda definido por (24) donde $\dot{\tilde{v}} = v_c - \dot{v}$.

$$\dot{\tilde{v}} + Q_D \tanh(Q_D^{-1} K_D \tilde{v}) = 0 \quad (24)$$

Para el análisis de estabilidad, se considera la siguiente función candidata de Lyapunov y su derivada temporal en las trayectorias del sistema.

$$V(\tilde{v}) = \frac{1}{2} \tilde{v}^T \tilde{v} \quad (25)$$

Derivando:

$$\dot{V}(\tilde{v}) = \tilde{v}^T \dot{\tilde{v}} \quad (26)$$

Reemplazando (24) en (26) se obtiene:

$$\dot{V}(\tilde{v}) = -\tilde{v}^T [Q_D \tanh(Q_D^{-1} K_D \tilde{v})] \quad (27)$$

Al ser Q_D y K_D matrices simétricas definidas positivas y $\tanh(\tilde{v})$ una función de saturación continua y acotada aplicada al error de velocidad, tal que $\tilde{v}^T \tanh(\tilde{v}) > 0$; entonces $\dot{V} < 0$. De esta manera, se concluye que $\tilde{v} \rightarrow 0$ asintóticamente.

VII. PRUEBAS Y RESULTADOS

A continuación, se exponen las pruebas realizadas que permitieron evidenciar el apropiado funcionamiento de los algoritmos diseñados.

A. Experimento I: OBSTACULO FRONTAL

Para este experimento se utiliza un alcance de la zona de repulsión de 100 cm. Además, el experimento planteado, mostrado en la Fig. 7, consiste en teleoperar al robot móvil para que se acerque a un obstáculo, que se encuentre enfrente, con una trayectoria recta y que, consecuentemente, retroceda de igual manera. Esto se debe a que el obstáculo genera una fuerza de evasión cuando se halla dentro de la zona de repulsión; la misma que crece mientras más próximo se halla el robot móvil al obstáculo. Así, la fuerza generada es sentida por el usuario y causa el cambio en la referencia dada, generando el retroceso del robot móvil.

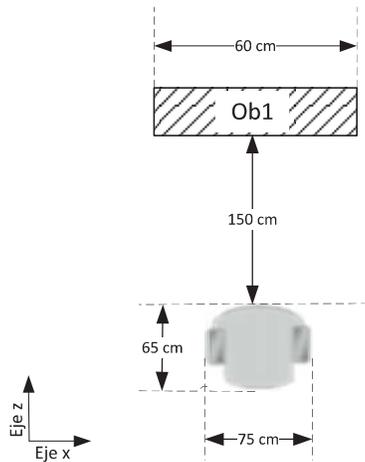


Fig. 7. Experimento1: Obstáculo Frontal.

En adición, el robot móvil solo se desplaza en una dirección, en este caso el eje Z. De esta manera, la trayectoria se grafica en la Fig. 8, la cual corresponde a la posición del robot móvil en el eje Z vs el tiempo y la posición del obstáculo en el eje Z. Así, se observa que el robot móvil en, $t = 0$ seg, se halla inicialmente a una distancia de 150 centímetros. Para facilidad de análisis, se grafica la fuerza normal generada bajo la gráfica de la trayectoria.

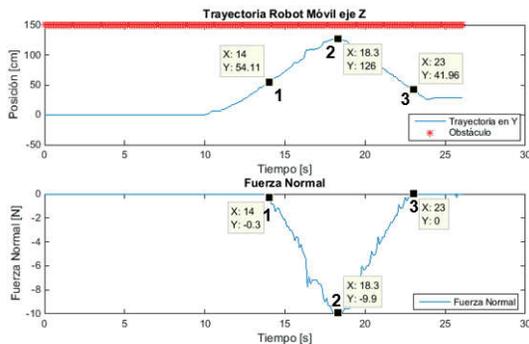


Fig. 8. Experimento1: Trayectoria y fuerza normal.

Analizando la Fig. 8:

- Antes de 1 ($t = 14$ seg): Se observa que el robot móvil avanza hacia el obstáculo, mas ninguna fuerza normal es generada; ya que el obstáculo se halla fuera de la distancia de la zona de repulsión (mayor a 100 centímetros).
- En 1 ($t = 14$ seg): El obstáculo entra a la zona de repulsión y se empieza a generar una fuerza normal opuesta a la trayectoria del robot móvil.
- Entre 1 ($t = 14$ seg) y 2 ($t = 17$ seg): El robot móvil mantiene la trayectoria acercándose al obstáculo y la fuerza normal crece hasta su valor máximo de -10 newtons.
- En 2 ($t = 17$ seg): El robot móvil se halla a aproximadamente a 25 centímetros del obstáculo y la acción de la fuerza normal, estando en su valor máximo, es sentida por el usuario. De esta manera, se genera el cambio de dirección del robot móvil mediante el cambio de velocidad lineal, para que retroceda y evite la colisión con el obstáculo.
- Entre 2 ($t = 17$ seg) y 3 ($t = 23$ seg): El robot móvil

se aleja del obstáculo retrocediendo y la fuerza normal decrece en magnitud.

- Durante 3 ($t = 23$ seg): El obstáculo sale de la zona de repulsión, por lo cual el valor de la fuerza normal es cero.

La fuerza tangencial generada durante el experimento 1 es despreciable. Además, los picos obtenidos no superan los ± 0.6 newtons y son producto del ambiente en el cual se ejecuta el experimento.

Se observa en la Fig. 9, la gráfica correspondiente al seguimiento de la velocidad lineal (velocidad inducida o de referencia para los controladores y la velocidad lineal real del robot móvil) y el error generado por el seguimiento de esta señal.

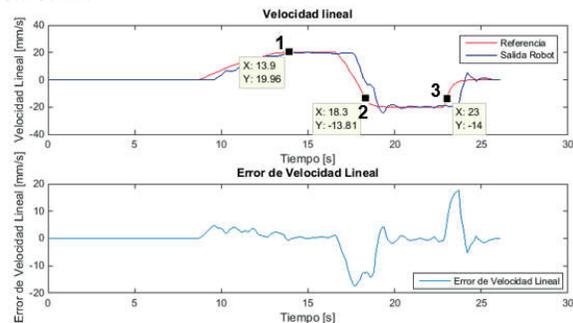


Fig. 9. Experimento1: Seguimiento Velocidad Lineal.

De la Fig. 9. se observa:

- En 1 ($t = 13$ seg): Se observa como la velocidad lineal de magnitud positiva causa el acercamiento frontal del robot móvil hacia el obstáculo.
- En 2 ($t = 17$ seg): La acción de la fuerza normal provocada por la cercanía del obstáculo es sentida en el dispositivo háptico, lo cual genera el cambio brusco de velocidad lineal y se obtiene un valor negativo. Esto causa que el robot móvil se mueva en sentido contrario; es decir, retroceda.
- En 3 ($t = 23$ seg): Debido a que el obstáculo sale de la zona de repulsión, la fuerza normal es de valor nulo; por lo tanto, el robot móvil puede dejar de retroceder (velocidad lineal negativa) y se marca otro valor de referencia, en este caso cero.

La gráfica de error de velocidad lineal muestra el error producido durante el seguimiento de la señal. Durante los cambios bruscos de referencia, el error se ve agravado por el propio cambio y los retardos en los tiempos de comunicación; sin embargo, el error se estabiliza con el tiempo.

Como se menciona anteriormente, el robot móvil solo se desplaza en una dirección, por lo cual no existe cambio en la velocidad angular y no existe error de velocidad angular.

B. Experimento II: PASILLO – PUERTA

Se utiliza 100cm como valor del alcance de la zona de repulsión. En la realización de este experimento, se busca observar cómo la evasión de obstáculos permite que el robot móvil se desplace en ambientes estrechos, permitiéndole orientarse de manera correcta y no colisionar durante la teleoperación. Se realiza la teleoperación del robot móvil, como se muestra en la Fig. 10. El robot móvil, inicialmente, evita la colisión frontal con el obstáculo 1, para ingresar al

pasillo evitando colisionar con la pared (obstáculos 2), dirigirse hacia el lado contrario del pasillo y evitar la colisión con el obstáculo 3. Finalmente, el robot móvil toma dirección hacia la puerta, se orientade manera correcta y la atraviesa.

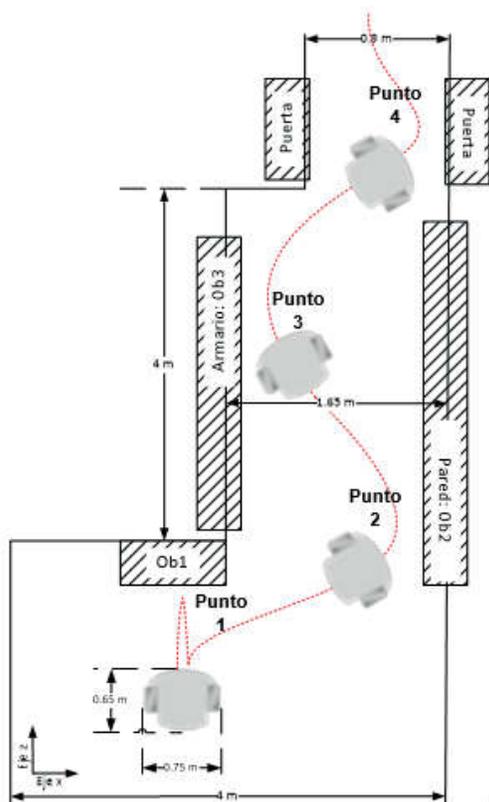


Fig. 10. Experimento 2: Pasillo – Puerta.

En la Fig. 11. se muestra la fuerza tangencial y la fuerza normal, que se generan durante la realización del experimento.

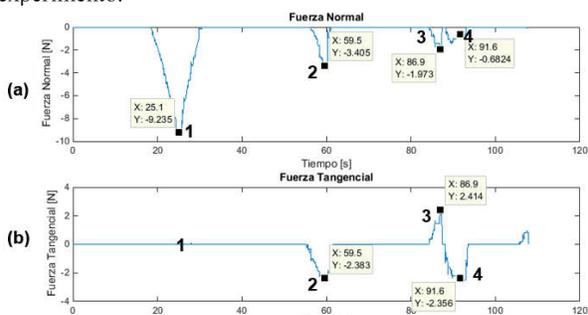


Fig. 11. Experimento2: Fuerzas.

- Se analiza en la Fig. 11:
- En 1 ($t = 25 \text{ seg}$): De manera similar al experimento anterior, al acercarse el robot móvil de manera frontal al obstáculo 1, solo se genera una fuerza normal que evita la colisión frontal mediante el retroceso del robot (Fig. 11a), para que, posteriormente, el usuario dirija el robot móvil al punto 2.
- En 2 ($t = 59 \text{ seg}$): En este caso, debido a que el robot móvil se acerca al obstáculo 2 ya no de manera frontal si no como se muestra en la Fig. 10 (punto 2), se genera

una fuerza normal para que el robot móvil disminuya su velocidad lineal y, mediante la fuerza tangencial de magnitud negativa, se genere la velocidad angular necesaria para el cambio de orientación hacia el lado izquierdo, evitando la colisión frontal y lateral del robot móvil.

- En 3 ($t = 87 \text{ seg}$): Para este caso, el robot móvil se acerca al obstáculo 3 a manera de espejo del punto anterior, como muestra la Fig. 9 (punto 3), de tal manera que se genera una fuerza normal para disminuir la velocidad lineal y una fuerza tangencial de valor positivo para el cambio de velocidad angular buscando orientar hacia el lado derecho el robot móvil.
- En 4 ($t = 92 \text{ seg}$): Finalmente, el robot ingresa a la puerta, donde, para lograr atravesarla sin colisionar, debe cambiar su orientación hacia la izquierda. Por lo tanto, se genera una fuerza tangencial de magnitud positiva que afecta a la velocidad angular buscando corregir la orientación del robot móvil. Asimismo, la fuerza normal genera en este es de magnitud muy pequeña para considerarse.

Se observa en la Fig. 12 la gráfica correspondiente a las velocidades lineales (velocidad inducida y la velocidad real del robot móvil) y el error generado por el seguimiento de esta señal.

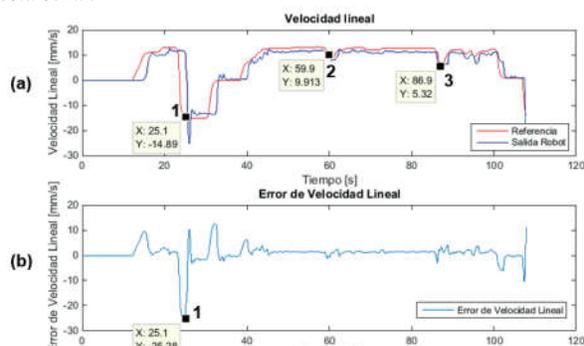


Fig. 12. Experimento2: Seguimiento Velocidad Lineal

De la Fig. 12 se analiza:

- En 1 ($t = 25 \text{ seg}$): Se observa la disminución de velocidad lineal hasta un valor de magnitud negativa, causado por la fuerza normal generada en 1. Además, se observa un fuerte error en el seguimiento de la señal de velocidad lineal y posteriormente sigue la referencia.
- En 2 ($t = 60 \text{ seg}$) y 3 ($t = 87 \text{ seg}$): Se observa la ligera disminución de velocidad lineal, causada por la fuerza norma generada por los obstáculos 2 y 3 para permitir un mejor cambio de orientación del robot móvil.
- Debido al pequeño valor de la fuerza normal generada en el punto 4, no se presenta una disminución considerable de la velocidad lineal; es decir, el cambio de orientación se realiza a una distancia suficiente del obstáculo.

Se observa en la Fig. 13, la gráfica correspondiente a las velocidades angulares (velocidad inducida y la velocidad real del robot móvil) y el error de posición angular del robot móvil.

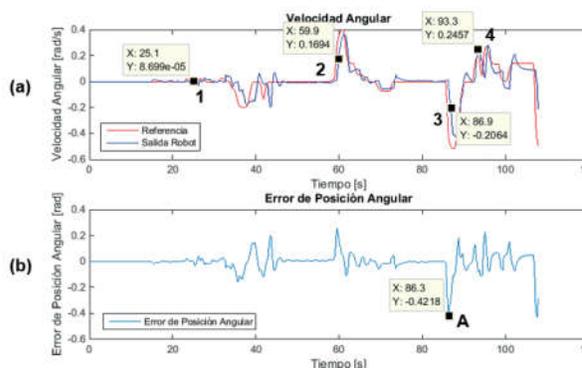


Fig. 13. Experimento2: Seguimiento Velocidad Angular

De la Fig. 13 se analiza:

- En 1 ($t = 25 \text{ seg}$): Debido a que el obstáculo 1 se halla enfrente del robot móvil, no se generan fuerzas tangenciales, por lo cual no existe cambio en la velocidad angular del robot móvil.
- Entre 1 ($t = 25 \text{ seg}$) y 2 ($t = 60 \text{ seg}$): Se observa la velocidad angular de referencia dada por el usuario, para orientar el robot móvil hacia el ingreso al pasillo.
- En 2 ($t = 60 \text{ seg}$): Se observa la velocidad angular de magnitud positiva generada por la acción de la fuerza tangencial descrita anteriormente, la cual provoca el cambio de orientación del robot móvil hacia la izquierda para evitar la colisión.
- En 3 ($t = 87 \text{ seg}$): Nuevamente, a causa de la acción de la fuerza tangencial, se genera una velocidad angular de magnitud negativa para cambiar la orientación del robot móvil hacia el lado derecho, evitar la colisión y dirigir el mismo hacia la puerta.
- En 4 ($t = 93 \text{ seg}$): Finalmente, la acción de la fuerza tangencial permite generar la velocidad angular necesaria para que el robot móvil logre adquirir la orientación necesaria para atravesar la puerta.
- Se observa que los errores de posición angular (Fig. 12b) se mantienen en un rango de magnitud baja, teniendo un pico en A (Fig. 13b) de -0.42 radianes o 23 grados lo cual no representa mayor inconveniente al momento de realizar la teleoperación.

VIII. CONCLUSIONES

- De las pruebas realizadas, se puede concluir que los algoritmos diseñados cumplen la función de teleoperar un robot móvil en ambientes semiestructurados evadiendo obstáculos estáticos.
- Se seleccionó y analizó el modelo cinemático del robot móvil de tracción diferencial.
- Se seleccionó y analizó el modelo dinámico general para el robot móvil, del cual se identificaron los parámetros de la estructura del modelo dinámico. Así, el modelo final fue validado para el robot móvil utilizado.
- Se implementaron algoritmos de control para la teleoperación del robot móvil, además de leyes de control cinemático y dinámico que permiten el seguimiento de velocidad lineal y velocidad angular.
- Se demostró la estabilidad de las leyes de control mediante la teoría de Lyapunov.

- El uso de la realimentación de fuerza al dispositivo háptico actúa asistiendo al usuario en la teleoperación para generar la evasión de obstáculos, considerando que la magnitud de las fuerzas generadas que asisten al usuario dependen de la ubicación del obstáculo. De esta manera, se exige al usuario un cambio de referencias para evitar la colisión del robot móvil.
- Los errores obtenidos de velocidad lineal y posición angular no generan dificultades al momento de realizar la teleoperación, logrando que el robot actúe según la intención del usuario.

IX. REFERENCIAS

- [1] Novint Falcon User Manual, Novint Technologies, Inc., 2007.
- [2] Simple Organization, "Tipos de Robots". [Online]. Disponible: <http://www.tiposde.org/general/460-tipos-de-robots/>
- [3] A. Rosales, G. Scaglia, V. Mut, F. Di Sciascio. (2009, Abril) Navegación de Robots Móviles en Entornos no Estructurados utilizando Álgebra Lineal, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, ISSN: 1697-7912, Vol. 6, Núm. 2, Abril 2009, pp.79-88.
- [4] P. Leica, "Control de Interacción entre humanos y robots", Ph.D. dissertation, Universidad de San Juan, 2015, Capítulo 2.
- [5] G. Andaluz, "Modelación, identificación y control de robots móviles", Tesis facultad de ingeniería eléctrica y electrónica. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2011.
- [6] P. Leica, "Control de Interacción entre humanos y robots", Ph.D. dissertation, Universidad de San Juan, 2015, Capítulo 5.
- [7] P. Leica, J. M. Toibero, F. Roberti and R. Carelli, "Switched control algorithms to robot-human bilateral interaction without contact," 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Montevideo, pp. 1-8, 2013.
- [8] P. Leica, J. M. Toibero, F. Roberti and R. Carelli, "Bilateral human-robot interaction with physical contact," 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Montevideo, pp. 1-6, 2013.
- [9] P. Leica, F. Roberti, M. Monllor, J. M. Toibero and R. Carelli, Control of bidirectional physical human-robot interaction based on the human intention, Intel Serv Robotics, Volume 10, Issue 1, pp 31-40, 2017.
- [10] C. Lam, C. Chou, K. Chiang, L. Fu, Human-centered robot navigation—towards a harmoniously human-robot coexisting environment. IEEE Trans Robots 27(1):99-112, 2010.
- [11] C. Tsai, X. Dutoit, K. Song, H. VanBrussel and M. Nuttin, Robust face tracking control of a mobile robot using self-tuning Kalman filter and echo state network. Asian J Control 12(4):488-509, 2010.
- [12] Z. Wang, K. Fukaya, Y. Hirata, K. Kosuge, Control of passive mobile robots for object transportation—braking torque analysis and motion control. In: Proceedings of IEEE international conference on robotics and automation, pp 2874-2879, Roma, Italy, 2007.
- [13] Y. Hirata, H. Song, Z. Wang, K. Kosuge, Control of passive object handling robot with free joint for reducing human assistive force. In: Proceedings of IEEE/RSL international conference on intelligent robots and systems, pp 1154-1159, San Diego CA, USA, 2007.
- [14] J. Manuel, H. Wandosell, Non-holonomic navigation system of a walking-aid robot. In: Proceedings of IEEE international workshop on robot and human interactive communication, pp 518-523, Berlin, Germany, 2002.
- [15] Y. Hirata, A. Hara, K. Kosuge, Motion control of passive intelligent walker using servo brakes. IEEE Trans Robot 23(5):981-990, 2007.
- [16] H. Yu, M. Spenko, S. Dubowsky, An adaptive shared control system for an intelligent mobility aid for the elderly. Auton Robots 15(1):53-66, 2003.
- [17] N. Roy, G. Baltus, D. Fox, F. Gemperle, J. Goetz, T. Hirsch, Towards personal service robots for the elderly. In: Proceedings of workshop interactive robotics and entertainment, Pittsburgh PA, USA, 2000.

X. BIOGRAFÍAS



Douglas D. Cárdenas, Nació el 13 de diciembre de 1991, sus estudios secundarios los realizó en el Colegio Municipal Experimental Sebastián de Benalcázar de la ciudad de Quito, los estudios universitarios los cursó en la Escuela Politécnica Nacional (EPN) en la carrera de Ingeniería Electrónica y Control. Áreas de interés: robótica móvil, domótica, automatización, control industrial y redes neuronales. (douglascadss@hotmail.com)



Paulo César Leica Arteaga, Nació en Quito-Ecuador. Se graduó en Ingeniería en Electrónica y Control y obtuvo el grado de master en Sistemas de Control en la Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. Recibió del grado de PhD en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan, Argentina. Actualmente es profesor a tiempo completo en la Escuela Politécnica Nacional. Es coordinador de la carrera de ingeniería en Electrónica y Control de la misma universidad. Sus intereses son la robótica, sistemas de control e inteligencia artificial aplicada al control automático. (paulo.leica@epn.edu.ec)