

Interacción Bilateral Robot-Humano con Contacto Físico

Paulo César Leica Arteaga

Línea Temática: Ingenierías y Tecnologías

Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan.

Resumen— En este trabajo se presenta una estrategia de control para la interacción bilateral robot-hombre con contacto reconociendo la intención del humano para el control de movimiento de un robot móvil no-holonómico. La intención del humano se modela mediante impedancia mecánica, sensando la fuerza y orientación deseada por parte del humano para guiar al robot a través de ambientes no estructurados. Se toma en cuenta la dinámica del robot para mejorar el desempeño de la interacción. Se prueba la estabilidad de los controladores empleando la teoría de Lyapunov. Los experimentos reales de la interacción robot-humano muestran el correcto desempeño de los controladores propuestos.

OBJETIVO GENERAL:

Desarrollar algoritmos de control de interacción robot-humano con contacto que actúan en medios parcialmente estructurados, considerando la teoría de control así como la intervención del humano en el sistema.

1. INTRODUCCIÓN

Las investigaciones se han enfocado en dotar a los robots móviles de la capacidad de movilizarse e interactuar con un alto grado de autonomía en ambientes no estructurados. En las actuales aplicaciones de la robótica, estos ambientes no sólo involucran a objetos y a otros robots, sino que además surge la necesidad de que el robot interactúe con seres humanos. Esta interacción con el hombre puede justificarse desde dos objetivos: 1) que el robot pueda moverse de forma segura y autónoma en un ambiente robot-humano para cumplir una tarea específica, ó 2) que el robot interactúe de manera amigable y segura con el humano, con o sin contacto físico. Este último enfoque es de interés en el presente trabajo, específicamente en la interacción con contacto físico. Dentro de esta problemática el empleo de robots en ambientes próximos a los humanos para tareas de servicios, ayuda a los discapacitados y tareas del hogar, transporte de cargas, etc., [1] se ha intensificado en los últimos años y se prevé su generalización en un futuro. Por lo tanto hay una gran necesidad de desarrollar robots para ser utilizados en actividades cotidianas y entornos reales basados en la interacción física con los humanos, como por ejemplo reemplazar parcialmente a enfermeros para la creciente población de edad avanzada que sufren déficit en las funciones motoras o falta de fuerza muscular y/o potenciar actividades como el transporte de cargas mediante la interacción física entre el

humano y el robot. Sin embargo, para el uso práctico de los robots con interacción física, se debe considerar la seguridad de sus usuarios, y desarrollar herramientas que permitan una interacción segura con el robot, por lo cual es necesario desarrollar robots que ayuden o potencien las actividades diarias de las personas de forma segura. Desde un punto de vista de seguridad se analiza que si no se puede controlar adecuadamente a un robot activo (con servomotores) este se puede mover involuntariamente y puede ser peligroso para los seres humanos. Por lo cual las investigaciones han trabajado sobre robots pasivos los cuales se mueven en base a fuerzas o momentos externos sin utilizar motores. Así en [2] propone un sistema de transporte de carga para robots pasivos en cooperación con un humano el cual contempla evasión de obstáculos. De igual manera en [3] se muestra un control para robots pasivos, para transporte de objetos basado en un control de frenado para evasión de objetos. Se propone en [4] un sistema de transporte de cargas con una brazo libre para reducir la fuerza del humano. Robots con contacto en el área de apoyo físico y servicios personales se han desarrollado en [5]. La mayoría de los trabajos están enfocados en resolver estas problemáticas con robots pasivos por la seguridad que representan, sin embargo tareas como transporte de cargas, guiar al robot por caminos con pendientes, o robots con grandes inercias se vuelve una tarea que requiere un mayor esfuerzo físico, lo cual toma mayor relevancia si la interacción física es realizada por personas con discapacidades, ancianos o niños. Así trabajos como [6] muestran la cooperación de transporte de objetos mediante un robot móvil no holonómico sin considerar la fuerza del humano. El reconocimiento de la intención de caminar del humano toma relevancia en áreas de rehabilitación como andadores, guía de humanos con dificultad visual o transporte de cargas en ancianos o personas con problemas físicos. Así, el trabajo en [7] presenta un sistema que permite controlar el movimiento de un robot pasivo omnidireccional tomando en cuenta la intención del humano en base a la lectura de fuerza aplicada en la dirección del movimiento. Se puede encontrar en [8] la interacción física para guiar un robot a través de un entorno semi-estructurado aplicando una fuerza. Se presenta en [9] la interacción física robot-humano para guiar al robot y éste puede aprender el camino deseado. Por lo expuesto, en este trabajo se propone trabajar con robots no pasivos para potenciar la fuerza generada por el humano sobre el robot en tareas como transportar cargas, guía de personas o trasladar el propio robot a lo largo de cualquier ambiente de manera fácil y confortable. Desde el punto de vista del sistema de

control del robot, la intención del humano proporciona una trayectoria de referencia en tiempo real para el controlador de movimiento del robot y se puede obtener el rendimiento más satisfactorio en el control del robot. Por lo cual en este trabajo se ha desarrollado una estrategia de control para la interacción bilateral robot-hombre con contacto en base a la intención del humano para controlar el movimiento de un robot móvil no-holonómico, para lo cual se propone determinar u_{VIFH} que es la velocidad inducida por la fuerza del humano para el control del robot. La variable u_{VIFH} será modelada mediante el concepto de impedancia mecánica, tomando como entradas la fuerza y orientación deseada por el humano. El objetivo de desarrollar controladores tomando en cuenta la variable u_{VIFH} es que el robot pueda ser guiado por personas con dificultad visual a través de un entorno desconocido o ayude a una persona con deficiencia de fuerza, anciana o niños a transportar cargas pesadas con mínimo esfuerzo durante toda la interacción. Al modelar u_{VIFH} mediante impedancia mecánica la persona tiene una sensación de inercia generada por el robot durante toda la interacción y, conjuntamente a una estrategia de evasión de obstáculos que evite colisiones en ambientes congestionados con otros humanos u objetos, permite la interacción bilateral entre humano-robot. La estrategia de evasión de obstáculos permite que el humano pueda guiar al robot de manera fácil a través de puertas o lugares estrechos sin colisionar, esto es en especial útil en transporte de cargas y guía de personas con dificultades visuales. El trabajo se organiza de la siguiente manera: en la sección II se presenta la estructura del robot y el planteamiento de la problemática. En la sección III se modelan las fuerzas de interacción del humano y del medio. En la sección IV se presentan las diferentes leyes de control así como su análisis de estabilidad basado en la teoría de Lyapunov. En la sección V se presentan los resultados experimentales. Por último en la sección VI se exponen las conclusiones.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como se indicó en la sección I, este robot se pensó con la finalidad de ayudar a guiar personas con dificultades visuales y como ayuda a personas con deficiencia de fuerza, ancianos o niños para transporte de cargas. Para esto una de las tareas más importantes que deben ser realizadas por el robot es estimar correctamente la intención del usuario durante la interacción. Desde el punto de vista del sistema de control la intención del usuario proporciona una referencia para el controlador de

movimiento del robot. La estrategia de control propuesta permitirá guiar a una persona con capacidades visuales limitadas y para transporte de cargas de manera fiable y confortable tomando en cuenta esta intención del humano. Para lograr lo planteado se dispone de una estructura robótica como se muestra en la en la Fig.1, donde se muestra el esquema de la interacción humano-robot, implementado con un robot Pioneer 3AT con una barra acoplada sobre él. La barra será maniobrada por el humano para dar la referencia de velocidad y orientación durante el control del robot. La orientación deseada por el humano es sensada mediante un sensor/potenciómetro ubicado en la base de la barra como se muestra en la Fig. 1.

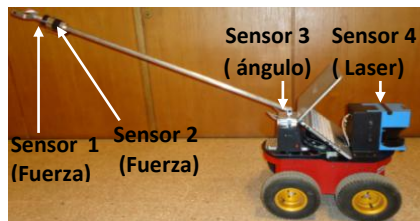


Fig. 1. Sistema Robótico desarrollado.

Como se mencionó anteriormente uno de los objetivos es poder maniobrar al robot con mínimo esfuerzo durante toda la interacción por lo cual es necesario sensar la fuerza que la persona ejerce sobre el robot. Así la barra tiene incorporados dos sensores de fuerza, uno para detectar la fuerza de empuje f_{He} y otro para la fuerza de retroceso f_{Hr} para controlar al robot hacia adelante o hacia atrás respectivamente, las mismas que generan una fuerza resultante $f_H = f_{He} - f_{Hr}$ (ver Fig. 2). También se dispone de un sensor de ángulo de la barra para detectar la dirección de la fuerza sobre el robot. Adicionalmente el sistema tiene incorporado un sensor láser (0-180°) con la finalidad de detectar y evitar obstáculos durante la interacción.

3. MODELADO DE LAS FUERZA DE INTERACCIÓN

3.1.- Modelado de la velocidad Inducida por la fuerza del Humano u_{VIFH}

El objetivo de modelar la fuerza del humano es que la persona se sienta confortable y le resulte fácil maniobrar el robot cuando lo guíe a través de cualquier ambiente. Además permitirá que la persona pueda sentir la dinámica del sistema cuando interactúe con el robot. Para ello se propone modelar la velocidad inducida por la fuerza del humano u_{VIFH} en la dirección deseada por la persona empleando un control de impedancia mecánica Z_h , emulando la dinámica del sistema con una masa M_h y amortiguamiento D_h . El modelo queda definido como una función de transferencia en función de la fuerza del humano f_H como entrada y entrega una

referencia de velocidad al robot u_{VIFH} en la dirección del movimiento del robot (ver Fig. 2).

$$F = Z_h V = \frac{M_h s^2 + D_h s + K_h}{s} V$$

Asociando la impedancia mecánica al u_{VIFH} se plantea $f_H \cos \tilde{\theta} = (M_h s + D_h) u_{VIFH}$ con $K_h = 0$, tal que:

$$u_{VIFH} = \frac{1}{(M_h s + D_h)} f_H \cos \tilde{\theta} \quad (1)$$

donde $\tilde{\theta}$ es el ángulo de error entre la orientación del robot y la orientación deseada por el humano como se muestra en la Fig. 2. Además se deduce que cuando el humano cambia la referencia de orientación $\tilde{\theta}$ genera una velocidad angular sobre la barra ω_B la cual es estimada y es requerida en el control lo que se detallará en la sección IV. En la Fig. 3 se muestra la evolución de u_{VIFH} ante variaciones de M_h y D_h con una f_H constante. Se observa que cuando M_h disminuye, el tiempo de convergencia de u_{VIFH} también disminuye.

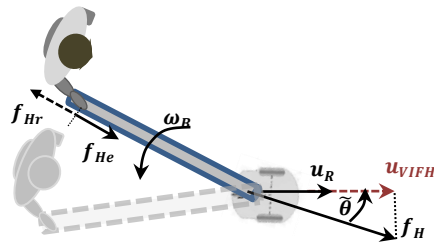


Fig. 2. Esquema de la interacción humano-robot

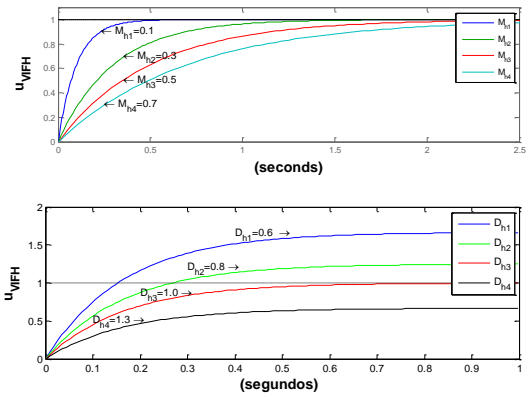


Fig. 3. Evolución de u_{VIFH} para distintos M_h y D_h

Esto se explica porque el sistema se modela con menor masa y presenta menor inercia cuando hay un cambio de referencia de fuerza. Si $D_h < 1$ genera una ganancia de la fuerza aplicada lo que implica un menor esfuerzo al trasladar la carga una vez vencida la inercia. Los parámetros M_h y D_h se determinaron experimentalmente y se tomó en cuenta el confort del humano y la evolución de los errores de control como se mostrará en la sección V.

3.2.- Modelado de la fuerza de interacción del medio

Como la interacción humano-robot se realizará en un ambiente no estructurado, es necesario implementar una estrategia de evasión de obstáculos. La misma está orientada a generar una zona de repulsión alrededor del robot (Fig. 4), con lo cual el

tamaño o forma del objeto no son relevantes para esta estrategia, situación deseada especialmente cuando el robot interactúe en ambientes complejos y/o con humanos. Dentro de la zona de repulsión se crea una zona Gaussiana cuyo objetivo es ponderar más a los obstáculos ubicados en dirección del movimiento del robot que aquellos ubicados a los costados del mismo. Esto con el objetivo que la persona pueda guiar al robot a través de puertas, objetos estrechos o ambientes congestionados por otras personas. Cuando los obstáculos se encuentran dentro de la zona de repulsión limitada por la distancia d_L , se genera una fuerza normal f_N opuesta al movimiento del robot y una fuerza tangencial f_T que se emplea para generar una nueva referencia de orientación que permita evadir el obstáculo. En la Fig.5 se observa que f_N y f_T del medio son ponderados mayormente cuando el obstáculo se encuentra frente al robot que cuando se ubica al costado del mismo.

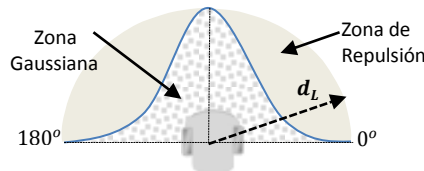


Fig. 4. Zonas para la detección de obstáculos

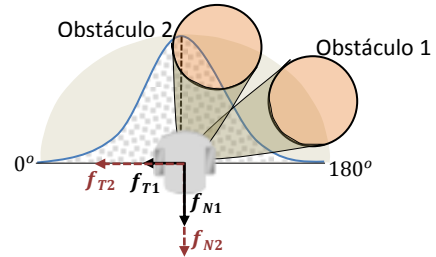


Fig. 5. Relación gráfica entre f_N y f_T para distintas posiciones de obstáculos.

El cálculo de f_N y f_T se hace en base a (2) y (3) respectivamente.

$$f_N = \frac{1}{f_{Nmax}} \sum_{i=0}^{n=180} f_o(i) * \sin(i) \quad (2)$$

$$f_T = \frac{1}{f_{Tmax}} \sum_{i=0}^{n=180} f_o(i) * \cos(i) \quad (3)$$

$$u_{obj} = D_N^{-1} f_N \quad \omega_{obj} = k_\psi * \tanh(f_T)$$

Donde ω_{obj} es la velocidad angular de referencia que se genera para que el robot evada el obstáculo, k_ψ constante positiva para acoplar las unidades de fuerza a velocidad angular, u_{obj} es la velocidad lineal opuesta al movimiento del robot que se genera para que el robot no choque con un obstáculo, D_N es una constante positiva de amortiguamiento para modelar u_{obj} con entrada f_N ($M_N = K_N = 0$). La f_o es la fuerza del medio ponderada y viene dada por:

$$f_o(i) = y_g(i) * f_m(i) \quad 0^\circ \leq i \leq 180^\circ \quad (4)$$

Donde y_g es la función gaussiana expresada según (5) siendo x_m la media angular de los rayos del láser, en este caso 90° , σ es la desviación de la distribución gaussiana

que permite calibrar el ancho de la zona gaussiana y $x(i)$ el ángulo de cada línea del láser (0° a 180°).):

$$y_g(i) = e^{-\left(\frac{x(i)-x_m}{\sigma}\right)^2} \quad (5)$$

$f_m(i)$ es la fuerza ejercida por el medio. El diseño de la dinámica del medio sobre el robot se realiza mediante la impedancia mecánica Z_m según (6):

$$f_m(i) = (M_m s^2 + D_m s + K_m) \tilde{x}(i) \quad (6)$$

Donde $\tilde{x}(i) = (d_{obj}(i) - d_L)$; M_m , D_m y K_m son los parámetros de masa, amortiguamiento y elasticidad respectivamente, $d_{obj}(i)$ es la distancia de los objetos al robot para cada línea del láser dentro de la zona de repulsión. Una vez detallado el problema y modelado las fuerzas de interacción, se diseñan los controladores.

4. CONTROLADORES

4.1.- Controlador Cinemático

Como se mencionó anteriormente el objetivo de control es que el humano guíe el robot con una velocidad y dirección deseados, y el robot reaccione en función de la intención del humano y la presencia de obstáculos.

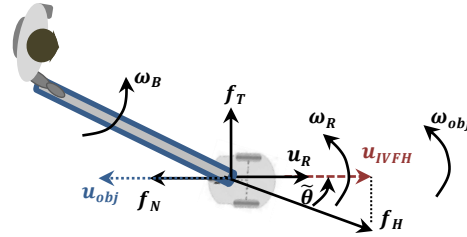


Fig. 6. Variables del sistema humano-robot implementado

En la Fig. 6 se muestra el sistema de interacción bilateral de la cual se puede deducir la siguiente cinemática:

$$\tilde{u} = u_{VIFH} - u_R - u_{obj} \quad (7)$$

$$\dot{\tilde{\theta}} = \omega_B - \omega_R - \omega_{obj} \quad (8)$$

Donde: \tilde{u} es el error de velocidad, $\dot{\tilde{\theta}}$ es la derivada temporal estimada del error de orientación del robot, u_R y ω_R son las velocidades lineales y angulares del robot respectivamente, u_{obj} y ω_{obj} velocidades lineales y angulares generadas para evadir obstáculos. Ahora se puede expresar \tilde{u} como: $\tilde{u} = d\tilde{\rho}/dt = \dot{\tilde{\rho}}$, donde $\tilde{\rho}$ es una variable auxiliar con lo cual el problema cinemático se puede expresar como:

$$\dot{\tilde{\rho}} = u_{VIFH} - u_R - u_{obj} \quad (9)$$

$$\dot{\tilde{\theta}} = \omega_B - \omega_R - \omega_{obj} \quad (10)$$

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

$$\begin{aligned} V(\tilde{\theta}, \tilde{\rho}) &= \tilde{\rho}^2/2 + \tilde{\theta}^2/2 \rightarrow \dot{V}(\tilde{\theta}, \tilde{\rho}) = \tilde{\rho} \dot{\tilde{\rho}} + \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} \\ \dot{V}(\tilde{\theta}, \tilde{\rho}) &= \tilde{\rho} (u_{VIFH} - u_R - u_{obj}) + \tilde{\theta} (\omega_B - \omega_R - \omega_{obj}) \end{aligned}$$

La ley de control cinemática es definida como:

$$u_{RC} = u_{VIFH} + q_\rho \tanh\left(\frac{k_\rho \tilde{\rho}}{q_\rho}\right) - u_{obj} \quad (11)$$

$$\omega_{RC} = \omega_B + q_\omega \tanh\left(\frac{k_\omega \tilde{\theta}}{q_\omega}\right) - \omega_{obj} \quad (12)$$

Por lo tanto, la derivada temporal en las trayectorias del sistema de la candidata de Lyapunov queda:

$$\dot{V}(\tilde{\theta}, \tilde{\rho}) = -\tilde{\rho} q_\rho \tanh\left(\frac{k_\rho \tilde{\rho}}{q_\rho}\right) - \tilde{\theta} q_\omega \tanh\left(\frac{k_\omega \tilde{\theta}}{q_\omega}\right)$$

Como q_ρ y q_ω son constantes positivas, y como la función $\tanh(\tilde{x})$ es 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 $\tilde{\rho} \rightarrow 0$ y $\tilde{\theta} \rightarrow 0$ asintóticamente. Ahora, se conoce que $\tilde{u} = u_{VIFH} - u_R - u_{obj}$, remplazando la acción de control se tiene $\tilde{u} = -q_\rho \tanh(k_\rho \tilde{\rho}/q_\rho)$, y como se demostró que $\tilde{\rho} \rightarrow 0$ con $t \rightarrow \infty$, por lo tanto $\tilde{u} \rightarrow 0$ asintóticamente. Ahora, en el análisis anterior se consideró seguimiento perfecto de velocidad $v(t) - v_c(t) = 0$, donde $v_c = [u_c \ \omega_c]^T$ y $v = [u_R \ \omega_R]^T$, sin embargo en una situación real esto no ocurre ya que la velocidad del robot no coincide exactamente con la velocidad de referencia $v(t) - v_c(t) = \delta(t)$. Entonces considerando el error de velocidad $\delta_\rho(t)$ y $\delta_\omega(t)$ el sistema en lazo cerrado queda:

$$\dot{\tilde{\rho}} = -q_\rho \tanh\left(\frac{k_\rho \tilde{\rho}}{q_\rho}\right) + \delta_u(t) \quad (13)$$

$$\dot{\tilde{\theta}} = -q_\omega \tanh\left(\frac{k_\omega \tilde{\theta}}{q_\omega}\right) + \delta_\omega(t) \quad (14)$$

Tomando la siguiente función candidata de Lyapunov y su derivada temporal en las trayectorias del sistema, donde:

$$V_1 + V_2 = \frac{\tilde{\rho}^2}{2} + \frac{\tilde{\theta}^2}{2} \quad \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = \tilde{\rho} \dot{\tilde{\rho}} + \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}}$$

$$\dot{V}_1 = -\tilde{\rho} q_\rho \tanh\left(\frac{k_\rho \tilde{\rho}}{q_\rho}\right) + \tilde{\rho} \delta_\rho(t) \quad (15)$$

$$\dot{V}_2 = -\tilde{\theta} q_\omega \tanh\left(\frac{k_\omega \tilde{\theta}}{q_\omega}\right) + \tilde{\theta} \delta_\omega(t) \quad (16)$$

Analizando \dot{V}_1 la condición suficiente para que $\dot{V}_1 < 0$ es:

$$\left\| \tilde{\rho} q_\rho \tanh\left(\frac{k_\rho \tilde{\rho}}{q_\rho}\right) \right\| > \left\| \tilde{\rho} \delta_\rho(t) \right\| \quad (17)$$

Para valores grandes del error se puede reforzarse la condición (17) como (Fig.7):

$$\|\tilde{\rho} q_{\rho L}\| > \|\delta_{\rho}(t)\|\|\tilde{\rho}\| \quad (18)$$

Donde $q_{\rho L} > q_{\rho}$, tal que $q_{\rho L} = q_{\rho} \tanh(k_{N\rho})$; $k_{N\rho}$ una constante positiva adecuada, entonces $\dot{V}(\tilde{\rho}) < 0$, si cumple:

$$\|\tilde{\rho} q_{\rho} \tanh(k_{N\rho})\| > \|\delta_{\rho}(t)\|\|\tilde{\rho}\| \quad (19)$$

Para errores grandes $\tilde{\rho} > \tilde{\rho}_{\rho L}$ la condición para que $\dot{V}(\tilde{\rho}) < 0$ queda definida por:

$$\|q_{\rho}\| > \frac{\|\delta_{\rho}(t)\|}{\tanh(k_{N\rho})} \quad (20)$$

Siendo $\tilde{\rho}_{\rho L} = q_{\rho} k_{N\rho}/k_{\rho}$ y de la Fig. 7 se tiene:

$$\|f(\tilde{\rho})\| > \frac{\|q_{\rho L}\|}{\|\tilde{\rho}_{\rho L}\|}\|\tilde{\rho}\| \quad (21)$$

A continuación se muestra la cota inferior para reforzar la condición (17):

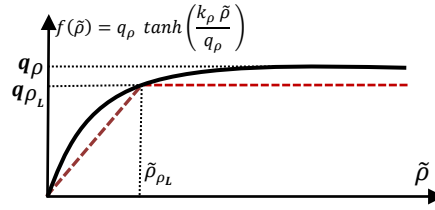


Fig. 7. Esquema de la cota inferior para la función de saturación.

Para errores pequeños $\tilde{\rho} \leq \tilde{\rho}_{\rho L}$ de la Fig. 7 y de la condición (19) y (21) se tiene:

$$\|\tilde{\rho}\| > \frac{\|\delta_{\rho}(t)\| k_{N\rho}}{k_{\rho} \|\tanh(k_{N\rho})\|} \quad (22)$$

Se debe cumplir la condición (22) para que $\dot{V}(\tilde{\rho}) < 0$, por lo tanto el error de velocidad estará finalmente acotado por:

$$\|\tilde{\rho}\| \leq \frac{\|\delta_{\rho}(t)\| k_{N\rho}}{\xi k_{\rho} \|\tanh(k_{N\rho})\|} \quad (23)$$

donde $0 < \xi < 1$. Ahora, se conoce que $\tilde{u} = u_{DFH} - u_R - u_{obj} - \delta_{\rho}$ reemplazando la acción de control se tiene $\tilde{u} = -q_{\rho} \tanh(k_{\rho} \tilde{\rho} / q_{\rho}) + \delta_{\rho}$, entonces \tilde{u} estará finalmente acotado por:

$$\|\tilde{u}\| \leq \left\| -q_{\rho} \tanh\left(\frac{k_{N\rho} \|\delta_{\rho}\|}{\xi q_{\rho} \tanh(k_{N\rho})}\right) + \delta_{\rho} \right\| \quad (24)$$

realizando el mismo análisis anterior para $\dot{V}_2 < 0$ el error de orientación estará finalmente acotado por:

$$\|\tilde{\theta}\| \leq \frac{k_{N\omega} \|\delta_{\omega}\|}{\xi k_{\omega} \tanh(k_{N\omega})} \quad (25)$$

donde $0 < \xi < 1$. Sin embargo de las leyes de control se probó anteriormente que $u_R \rightarrow u_c$ y $\omega_R \rightarrow \omega_c$ con $t \rightarrow \infty$, entonces $\delta_\rho(t) \rightarrow 0$ y $\delta_\omega(t) \rightarrow 0$ con $t \rightarrow \infty$, y se puede concluir que $\tilde{u} \rightarrow 0$ y $\tilde{\theta} \rightarrow 0$ asintóticamente.

4.2.- Controlador Dinámico

Como se mencionó anteriormente la ley de control cinemática implementada en una situación real no coincide exactamente con las velocidades del robot, esto se debe a la dinámica propia del robot, lo cual motivó el diseño de un controlador dinámico para el error de velocidad $v_c - v = \tilde{v}$, donde $v_c = [u_c \ \omega_c]^T$ y $v = [u_R \ \omega_R]^T$. Este controlador tiene como objetivo compensar la dinámica del robot, esto se lo hace con un bloque en cascada para generar nuevas velocidades de referencia al robot $v_D = [u_D \ \omega_D]^T$ en base a las velocidades del controlador cinemático v_c como se muestra en la Fig. 8.

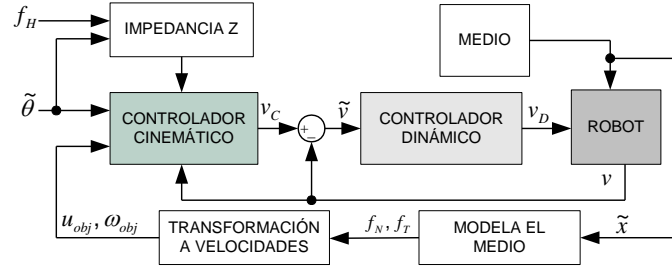


Fig. 8. Diagrama de bloques del sistema

El modelo dinámico del robot está definido por:

$$M \dot{v} + \eta = v_D \quad (25)$$

$$M = \begin{bmatrix} \phi_1 & 0 \\ 0 & \phi_2 \end{bmatrix} \quad \eta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\omega_R^2 & u_R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & u_R \omega_R & \omega_R \end{bmatrix} \phi$$

Donde $\phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3 \ \phi_4 \ \phi_5 \ \phi_6]^T$. Los parámetros identificados para el robot Pioneer 3AT son: $\phi_1 = 0.4072$, $\phi_2 = 0.2937$, $\phi_3 = -0.0287$, $\phi_4 = 0.9979$, $\phi_5 = -0.0004$ y $\phi_6 = 0.9865$. La ley de control dinámica está definida como:

$$v_D = M \sigma + \eta \quad (26)$$

$$\sigma = \dot{v}_c + Q_D \tanh(K_D \tilde{v}/Q_D) \quad (27)$$

Tal que Q_D y K_D son matrices simétricas definidas positivas. El sistema en lazo cerrado queda definido por $\dot{\tilde{v}} + Q_D \tanh(K_D \tilde{v}/Q_D) = 0$, donde $\dot{\tilde{v}} = \dot{v}_c - \dot{v}$. La candidata de Lyapunov y sus derivadas temporales:

$$V(\tilde{v}) = \frac{1}{2} \tilde{v}^T \tilde{v} \quad (28)$$

$$\dot{V}(\tilde{v}) = \tilde{v}^T \dot{\tilde{v}} \rightarrow \dot{V}(\tilde{v}) = -\tilde{v}^T [Q_v \tanh(K_v \tilde{v}/Q_v)] \quad (29)$$

Como Q_v y K_D son matrices simétricas definidas positivas, y como $\tilde{v}^T \tanh(\tilde{v}) > 0$; entonces $\dot{V} < 0$, con lo cual se concluye que $\tilde{v} \rightarrow 0$ asintóticamente.

5. EXPERIMENTACIÓN

El algoritmo de control propuesto fue implementado en el sistema robótico mostrado en la Fig. 1. La capacidad de los sensores de fuerza son de 100N, las variables sensadas de fuerza y $\tilde{\theta}$ son filtradas por un filtro $\alpha\beta\gamma$ y con este mismo filtro se obtiene la estima de $\dot{\tilde{\theta}}$ para el cálculo de ω_B . En el experimento la persona guía el robot por un pasillo con dos obstáculos hasta llegar y atravesar una puerta. Los parámetros de impedancia del medio son: $M_m = 0.01$, $D_m = 0.1$ y $K_m = 1$. Para el modelado de u_{VIFH} de la persona se tomó $M_h = 0.1$, $D_h = 1$. El valor de M_h y D_h se encontró experimentalmente tomando en cuenta el confort de la persona para transportar el robot. En la Fig. 9 se muestra el entorno y la secuencia del experimento.

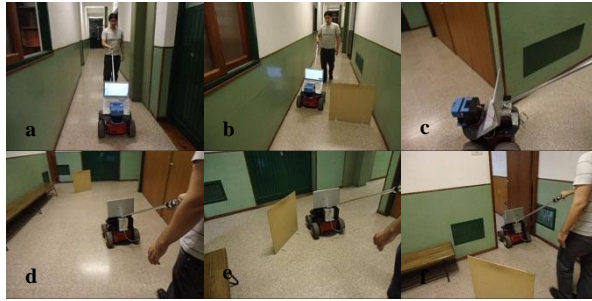


Fig. 9. Entorno y secuencia del experimento

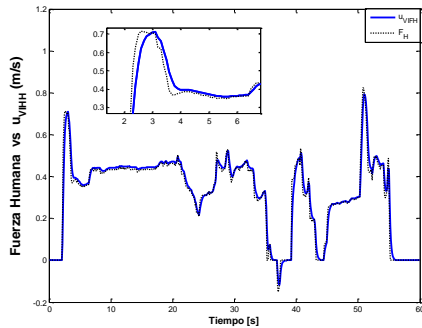


Fig. 10. Evolución de u_{VIFH} y f_H

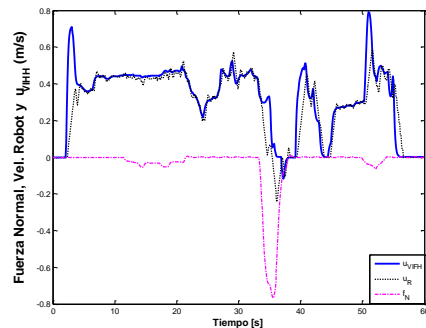


Fig. 11. Evolución de u_{VIFH} y u_R

En la Fig. 10 se observa la evolución de u_{VIFH} (línea continua) y f_H (línea de puntos) esta última normalizada a la velocidad máxima del robot. Se puede observar en el cuadro ampliado de la Fig. 10 que debido a la M_h modelada de la fuerza, existe diferencia entre u_{VIFH} y f_H cuando hay un cambio de referencia, mientras que una vez que vence la inercia inicial $u_{VIFH} \rightarrow f_H$ debido a que $D_h = 1$. Los valores de M_h y D_h pueden calcularse para mayor confort del humano, sin embargo un mayor confort del humano es decir M_h y D_h pequeños, incrementan el error en el sistema de control, por lo cual existe un compromiso entre estos dos aspectos. En la Fig. 11 se observa la evolución de u_{VIFH} (línea continua), u_R (línea de puntos) y f_N (línea a

trazos) esta última normalizada a la velocidad máxima del robot. Cuando el hombre ejerce una f_H al robot en $t = 3s$, el robot rompe su inercia y alcanza la referencia $u_R \rightarrow u_{VIFH}$, la diferencia al cambio de referencia se debe a la inercia propia del robot, al compensar la dinámica del robot la curva de subida a la referencia tiene un mejor desempeño, generando una respuesta más rápida que sin contemplar la dinámica. En $t = 11s$ aparece una f_N hasta $t = 22s$ debido a la presencia del primer obstáculo. Como el humano pasa a un costado del obstáculo la f_N generada es pequeña debido a las características de la estrategia de obstáculos según la curva de gauss. En $t = 32s$ hasta $t = 38s$ el hombre intenta chocar intencionalmente con el segundo obstáculo con lo cual se observa que se presenta una f_N que se opone al movimiento del robot y u_R no puede converger a u_{VIFH} como se esperaba. De igual forma sucede cuando el hombre ingresa por la puerta en $t = 50s$ hasta $t = 54s$. En la Fig. 12 y Fig. 13 se muestran los errores de control \tilde{u} y $\tilde{\theta}$ respectivamente. Se observa que el error de \tilde{u} crece cuando existe un obstáculo o la referencia de fuerza cambia bruscamente. En la Fig. 13 el incremento del error de $\tilde{\theta}$ en $t = 21s$ hasta $t = 28s$ se debe a que existe una curva en el pasillo Fig. 9c. Mientras que el incremento de error de $t = 38s$ hasta $t = 50s$ es debido a que el hombre esquiva el segundo obstáculo y trata de atravesar la puerta. Del experimento se puede apreciar el buen desempeño del algoritmo de control propuesto, los errores de control están acotados y en valores esperados.

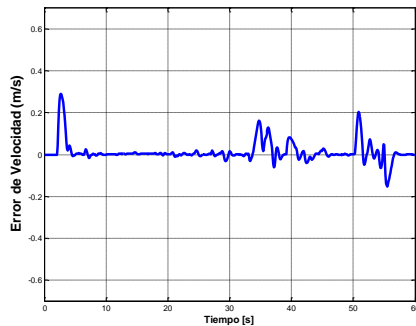


Fig. 12. Evolución del error de velocidad \tilde{u}

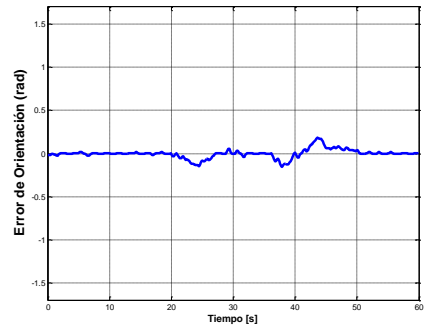


Fig. 13. Evolución del error de Orientación $\tilde{\theta}$

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado un sistema robótico para potenciar la fuerza generada por el humano sobre el robot en tareas como transportar cargas, guía de personas o trasladar el propio robot a lo largo de cualquier ambiente de manera fácil y confortable. Se estudió el control de movimiento de este robot basado en la intención del humano para guiar al robot. La principal aportación de este trabajo ha

sido presentar un algoritmo de control del robot basado en la intención del humano en una interacción bilateral, orientado a ayudar a transportar cargas y guía de personas con deficiencias visuales. Se realizó el análisis formal de estabilidad de los controladores basada en la teoría de Lyapunov, mostrando la convergencia a cero de los errores de control en ausencia de incertidumbre en las variables medidas. Se probó la eficacia de los algoritmos propuestos en base a pruebas experimentales. Como trabajo futuro se espera analizar la robustez del algoritmo ante errores de estima, también la implementación de un control adaptable para cargas significativas en relación a la masa del robot.

REFERENCIAS

- [1] Y. Hirata, A. Hara, and K. Kosuge, "Motion control of passive intelligent walker using servo brakes," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 23, no. 5, pp. 981–990, Oct. 2007.
- [2] Y. Hirata, Y. Ojima y K. Kosuge, "Variable Motion Characteristics Control of an Object by Multiple Passive Mobile Robots in Cooperation with a Human", *IEEE Inter. Confer. on Robotics and Automation, Pasadena USA*, may. 2008.
- [3] Z. Wang, K. Fukaya, Y. Hirata, and K. Kosuge, "Control of passive mobile robots for object transportation - braking torque analysis and motion control," in *Robotics and Automation, IEEE International Conference on*, pp. 2874–2879, April 2007.
- [4] Y. Hirata, H. Song, Z. Wang, K. Kosuge, "Control of Passive Object Handling Robot with Free Joint for Reducing Human Assistive Force", *Proceedings of IEEE Inter. Conference on Intelligent Robots and Systems*, to appear, 2007.
- [5] J. Hostalet, H. Wandosell, and B. Graf, "Non-holonomic navigation system of a walking-aid robot," in *Proc. IEEE Workshop Robot Human Interactive Commun*, pp. 518–523, 2002.
- [6] F. Garcia, F. Bartolini y R. Frizera, "Object Transportation Task by a Human and a Mobile Robot", *IEEE International Conference on Industrial Technology*, pag. 1445-1450. 2010.
- [7] W. Wakita, J. Huang, P. Di, K. Sekiyama y T. Fukuda, "Human-Walking-Intention-Based Motion Control of an Omnidirectional-Type Cane Robot, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*", Vol. 18, No. 1, Feb. 2013.
- [8] F. Ferland, A. Aumont, D. Létourneau y F. Michaud, "Taking Your Robot For a Walk: Force-Guiding a Mobile Robot Using Compliant Arms", *ASM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pag. 309-316. Mar. 2013.
- [9] U. Nagarajan, G. Kantor y R. Hollis, "Human-Robot Physical Interaction with Dynamically Stable Mobile Robots", *4th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pag. 281-282, California, mar. 2009.