

Tele-Operación Bilateral de Manipuladores Móviles

Ortiz J.*; Morales J.**; Pérez M.***; Andaluz V.****

*Universidad Tecnológica Indoamérica, Facultad de Ingeniería en Sistemas, Ambato, Ecuador
e-mail: jessortizm@outlook.com

**Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, Riobamba, Ecuador
e-mail: j_morales@epoch.edu.ec

***Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería en Sistemas, Quito, Ecuador
e-mail: maria.espanya@gmail.com

****Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Energía y Electrónica, Ecuador
e-mail: vhandaluz1@espe.edu.ec

Resumen: Este trabajo propone una nueva estructura de control estable para la tele-operación bilateral de un robot manipulador móvil. Un manipulador móvil consiste en un robot manipulador (o brazo) ubicado sobre una plataforma móvil (con ruedas o patas). En la estructura de control propuesta la imagen y las fuerzas de interacción entre robot-medio son realimentadas al operador para tener un mejor desempeño en la realización de tareas remotas que requieren tanto la capacidad de locomoción como de manipulación. Además, la estabilidad del sistema es analizada. Se presentan los resultados obtenidos por experimentación, donde se muestra el buen desempeño del robot como fue previsto en el diseño teórico.

Palabras clave: Control coordinado, Compensación dinámica, Manipulador móvil, Tele-operación bilateral

Abstract: In this paper a new stable control structure for bilateral tele-operation of a mobile manipulator robot is proposed. A mobile manipulator is a manipulator robot (or arm) located on a moving platform (with wheels or feet). In the proposed control structure image and the interaction forces between robot-half are fed back to the operator to perform better in performing remote tasks that require both the ability of locomotion and manipulation. In addition, the system stability is analyzed. The results obtained by experimentation, where the good performance of the robot is shown as envisaged in the theoretical design are presented.

Keywords: Coordinated control, Dynamic compensation, Mobile manipulator, Bilateral Tele-operation

1. INTRODUCCION

La tele-operación de robots significa manejar un robot a distancia para realizar alguna tarea dada permitiendo de esta manera, que un operador humano pueda transportar su capacidad y destreza hacia ambientes de trabajos remotos y/o peligrosos, minimizando de esa manera los riesgos asociados, o más aún, alcanzar lugares inaccesibles por el hombre. Así, se puede extender la inteligencia y experiencia de expertos hacia aplicaciones a distancia [1]-[2]. Los sistemas de tele-operación permiten integrar métodos de automatización complejos y la capacidad del hombre con el fin de cubrir requerimientos actuales de tareas como son: reparaciones en reactores nucleares, reparaciones de satélites comandadas desde tierra, desactivación de artefactos explosivos, misiones de rescates, búsquedas submarinas, extinción de fuegos a distancia, inspección y monitoreo de ambientes peligrosos, o en donde se requiera q el ser humano no este expuesto a daños físicos e inaccesibles etc. [3]-[4]-[5]; y también trabajos futuros como podrían ser: una mayor cantidad de

aplicaciones en telemedicina, tele-manufactura, exploración (visitas) de lugares turísticos (por ejemplo museos) a través de Internet u otro medio de comunicación que permitan aumentar la concurrencia real y/o virtual a dichos lugares, una mayor cantidad de exploraciones espaciales, y también tareas cooperativas entre expertos y no-expertos situados en diferentes lugares para realizar tareas complejas, como por ejemplo la construcción y mantenimiento de bases espaciales. Los sistemas de tele-operación están constituidos por: una estación o sitio de trabajo local, donde se encuentra el operador humano que manipula un robot o un dispositivo generando comandos de control y además recibe información táctil de fuerza y/o visual de imagen; un lugar de trabajo o sitio remoto, donde un robot esclavo (manejado por el operador humano desde el sitio local) realiza una tarea determinada en interacción con un medio o entorno, como por ejemplo: ensamblar un conjunto de piezas mecánicas, navegar en pasillos con personas, etc.; y un canal de comunicación bidireccional, que vincula ambos sitios. La Fig. 1 muestra un diagrama en bloques general para tele-operación bilateral de un robot.

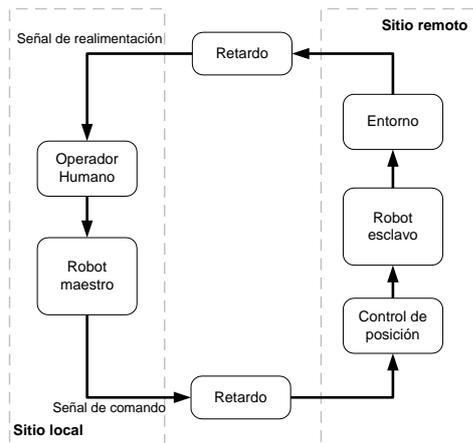


Figura 1. Diagrama de bloques general de un sistema de teleoperación bilateral de un robot

En la tele-robótica, el operador humano aplica una fuerza intencional al sistema local (por ejemplo, un joystick) generando una serie de movimientos sobre el robot remoto. Además, existen tareas en las que por su naturaleza, es muy importante, que el operador humano posea una sensación de presencia en el lugar remoto. Por ello, se incorpora en el lazo de control, tanto realimentación de fuerza como realimentación visual hacia el operador humano. El uso de realimentación de fuerza en robótica sirve para que el operador humano pueda sentir la fuerza de contacto entre el robot y algún objeto de su entorno, lo cual se manifiesta en un mayor sentido remoto del operador [6], como por ejemplo: noción del peso a manipular. Por otra parte, la imagen adquirida a partir de una cámara se realimenta hacia el operador humano, de forma que éste pueda ver el movimiento del robot desplazándose en el ambiente de trabajo remoto y genere comandos de control para ser enviados hacia el robot. Un sistema de teleoperación en el cual el operador humano envía comandos a través de un sistema local hacia un sistema de operación remota, y recibe simultáneamente información proveniente desde el sitio remoto (como por ejemplo, realimentación táctil de fuerza o realimentación visual), se denomina sistema de teleoperación bilateral debido a que la información fluye en forma bidireccional [7].

En este trabajo se propone un nuevo esquema para la teleoperación bilateral de un robot manipulador móvil. El término manipulador móvil es utilizado para referirse a los robots construidos por un brazo robótico (robot manipulador) montado sobre una plataforma móvil (con ruedas o patas). Este sistema, que se caracteriza generalmente por tener un alto grado de redundancia, que combina la manipulación de un manipulador de base fija con la movilidad de una plataforma con ruedas o patas [8], [9]. Estos sistemas permiten realizar las misiones más habituales de los sistemas robóticos que requieren tanto la capacidad de locomoción como de manipulación [10], [11]. El esquema de teleoperación bilateral propuesto considera la compensación dinámica del manipulador móvil –lo que es común encontrar en la literatura- Además, a fin de tener una mayor flexibilidad

en el control del manipulador móvil, este trabajo combina los comandos emitidos por el operador humano con el control autónomo ubicado en el sitio remoto del sistema de teleoperación bilateral. Por último, dos objetivos secundarios son resueltos mediante el control de la redundancia del manipulador móvil; 1) la evasión de obstáculos, y 2) el control de la configuración de brazo robótico. Los dos objetivos secundarios son alcanzados sin la intervención del operador humano.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se describen los modelos cinemático y dinámico del manipulador móvil, que tienen como señales de control a las velocidades del robot. En la Sección 3 se presenta el esquema de teleoperación bilateral. Además, se desarrollan cada bloque de la arquitectura de teleoperación bilateral propuesta. Los resultados experimentales son presentados y discutidos en la Sección 4. Finalmente, las conclusiones y trabajos futuros se presentan en la Sección 5.

2. MODELOS DE MANIPULADOR MÓVIL

La configuración del manipulador móvil está definida por un vector \mathbf{q} de n coordenadas independientes, denominadas *coordenadas generalizadas del manipulador móvil*, donde $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T = [\mathbf{q}_p^T \ \mathbf{q}_a^T]^T$ donde \mathbf{q}_a representan las coordenadas generalizadas del brazo robótico, \mathbf{q}_p las coordenadas generalizadas de la plataforma móvil y $n = n_p + n_a$ siendo n_a y n_p las dimensiones asociadas al brazo robótico y a la plataforma móvil, respectivamente. La configuración \mathbf{q} es un elemento del *espacio de configuración* del manipulador móvil; denotado por \mathcal{N} . La ubicación del extremo operativo del manipulador móvil está dada por un vector de m dimensiones $\mathbf{h} = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_m]^T$, donde las m coordenadas son denominadas *coordenadas operacionales del manipulador móvil*, las cuales definen la posición y orientación del extremo operativo en \mathcal{R} . El conjunto de todas las ubicaciones posibles del extremo operativo constituyen el espacio operacional del manipulador móvil, denotado por \mathcal{M} .

La ubicación del extremo operativo del manipulador móvil puede ser definido de diferentes forma de acuerdo a la tarea, es decir, se puede considerar únicamente la posición del extremo operativo o su vez tanto su posición y orientación.

2.1 Modelo Cinemático

El modelo cinemático del manipulador móvil determina la ubicación del extremo operativo \mathbf{h} como una función de la configuración del brazo robótico y de la localización de la plataforma móvil.

$$f : \mathcal{N}_a \times \mathcal{M}_p \rightarrow \mathcal{M}$$

$$(\mathbf{q}_a, \mathbf{q}_p) \mapsto \mathbf{h} = f(\mathbf{q}_a, \mathbf{q}_p)$$

donde \mathcal{N}_a representa el espacio de configuración del brazo robótico y \mathcal{M}_p el espacio operacional de la plataforma móvil.

El modelo cinemático instantáneo del manipulador móvil determina la velocidad del extremo operativo como una función de las derivadas tanto de la configuración del brazo robótico y de la localización de la plataforma móvil,

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{q}}(q_a, q_p) \mathbf{v}(t)$$

donde, $\dot{\mathbf{h}}(t) = [\dot{h}_1 \ \dot{h}_2 \ \dots \ \dot{h}_m]^T$ es el vector de velocidad del extremo operativo, $\mathbf{v}(t) = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_{\delta_n}]^T = [v_p^T \ v_a^T]^T$ es el vector de velocidades del manipulador móvil. Además, la dimensión de $\mathbf{v}(t)$ es $\delta_n = \delta_{np} + \delta_{na}$, donde δ_{np} y δ_{na} representan las dimensiones del vector de velocidad del brazo robótico y de la plataforma móvil, respectivamente. Ahora, reemplazando $\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{q}}(q_a, q_p)$ en la ecuación anterior, se

tiene

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \mathbf{v}(t) \quad (1)$$

donde, $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ es la matriz Jacobiana matriz que define un mapeo lineal entre el vector de velocidades del manipulador móvil $\mathbf{v}(t)$ y el vector de velocidades del extremo operativo $\dot{\mathbf{h}}(t)$.

2.2 Modelo Dinámico

El modelo matemático que representa la dinámica de un manipulador móvil puede ser obtenido de las ecuaciones dinámicas de Lagrange, que se basan en la diferencia entre la energía cinética y potencial de cada una de las articulaciones del robot (balance energético) [12], [13].

La mayoría de los robots disponibles en el mercado tienen controladores PID de bajo nivel, a fin de seguir las entradas de referencia de velocidad, por lo que no permite el control de los voltajes de los motores directamente. Por lo tanto, es útil expresar el modelo dinámico del manipulador móvil de una forma más adecuada, tomando las velocidades de rotación y longitudinales como las señales de entrada. Para ello, los controladores de velocidad se incluyen en el modelo. Por lo tanto, el modelo dinámico del manipulador móvil teniendo como señales de entrada las velocidades de referencia del robot, puede ser representado como:

$$\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{v}} + \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \mathbf{v}) \mathbf{v} + \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) + \bar{\mathbf{d}} = \mathbf{v}_{\text{ref}} \quad (2)$$

donde, $\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) = \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{M} + \mathbf{D})$, $\bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \mathbf{v}) = \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{C} + \mathbf{P})$, $\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{G}(\mathbf{q})$, $\bar{\mathbf{d}} = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{d}$ y $\mathbf{v}_{\text{ref}} = [v_{1\text{ref}} \ v_{2\text{ref}} \ \dots \ v_{\delta_n\text{ref}}]^T$. $\mathbf{M} \in \mathfrak{R}^{\delta_n \times \delta_n}$ representa la inercia del manipulador móvil, $\mathbf{C} \in \mathfrak{R}^{\delta_n \times \delta_n}$ representa las componentes de las fuerzas centrípetas y de Coriolis, $\mathbf{G} \in \mathfrak{R}^{\delta_n}$ es el vector gravitacional, $\mathbf{d} \in \mathfrak{R}^{\delta_n}$ denota las perturbaciones desconocidas incluyendo los errores en el modelo, $\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \in \mathfrak{R}^{\delta_n \times \delta_n}$ es una matriz

definida positiva, $\bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \mathbf{v}) \in \mathfrak{R}^{\delta_n}$, $\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) \in \mathfrak{R}^{\delta_n}$, $\bar{\mathbf{d}} \in \mathfrak{R}^{\delta_n}$, y $\mathbf{v}_{\text{ref}} \in \mathfrak{R}^{\delta_n}$ es el vector que contiene las señales de velocidades de control, $\mathbf{H} \in \mathfrak{R}^{\delta_n \times \delta_n}$, $\mathbf{D} \in \mathfrak{R}^{\delta_n \times \delta_n}$ y $\mathbf{P} \in \mathfrak{R}^{\delta_n \times \delta_n}$ son matrices constantes, definidas positivas que contienen: los parámetros físicos del manipulador móvil, los parámetros de los motores, los controladores de bajo nivel de velocidad tanto de la plataforma móvil y del brazo robótico.

Propiedad 1. La matriz $\bar{\mathbf{M}}$ es definida positiva, además se conoce que,

$$\|\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\| < k_M$$

Propiedad 2. Se verifica la siguiente inecuación,

$$\|\bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \mathbf{v})\| < k_c \|\mathbf{v}\|$$

Propiedad 3. La matriz $\bar{\mathbf{G}}$ es acotada

$$\|\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q})\| < k_G$$

donde, k_c , k_M y k_G denotan algunas constantes positivas. Más detalles del modelo pueden consultarse en [8].

El modelo matemático completo del movimiento del robot manipulador móvil, está representado por las expresiones: (1) modelo cinemático y (2) modelo dinámico teniendo como señales de control a las velocidades de referencia del robot.

3. ESQUEMA DE TELEOPERACIÓN BILATERAL

En la presente sección se describe el esquema de control propuesto para la teleoperación bilateral de manipuladores móviles en ambientes parcialmente estructurados. Este esquema incorpora controladores en el sitio remoto para disminuir los efectos producidos por el retardo tanto en el envío de los comandos de control como en la realimentación de los estados y fuerza.

La arquitectura de teleoperación propuesta se centra especialmente en el lado remoto. Se plantea una combinación de técnicas para el control de movimiento del manipulador móvil con el propósito de ayudar al operador humano, del sitio local, a controlar el robot; se considera que el robot debe trabajar en ambientes parcialmente estructurados.

El diseño del controlador autónomo se basa en dos subsistemas en casadas:

- 1) Control cinemático se encarga de generar las velocidades deseada para el desplazamiento de la plataforma móvil y del brazo robótico. Además, realiza el control de redundancia del manipulador móvil para cumplir dos objetivos secundarios; el control de la configuración deseada del brazo robótico y la evasión de obstáculos por medio de la plataforma móvil.
- 2) Compensación dinámica, el objetivo principal del controlador de compensación de dinámica es compensar la dinámica del robot manipulador móvil para reducir el error de seguimiento de velocidad. Este controlador recibe como entradas las velocidades deseadas calculas por el control cinemático y genera velocidades de referencia para el manipulador móvil.

La implementación de los controladores en el lado remoto es, primero, disminuir el efecto del retardo, garantizar un

movimiento continuo y libre de colisión, y realizar un control de la configuración del brazo robótico para, mantener un comportamiento estable del sistema teleoperador. La Fig. 2 muestra el diagrama de bloques de la arquitectura propuesta. A continuación se describe en detalle cada bloque

de la arquitectura de tele-operación bilateral propuesta. Cabe aclarar, que el orden de la descripción de los bloques se realizó de forma que facilite la comprensión del lector

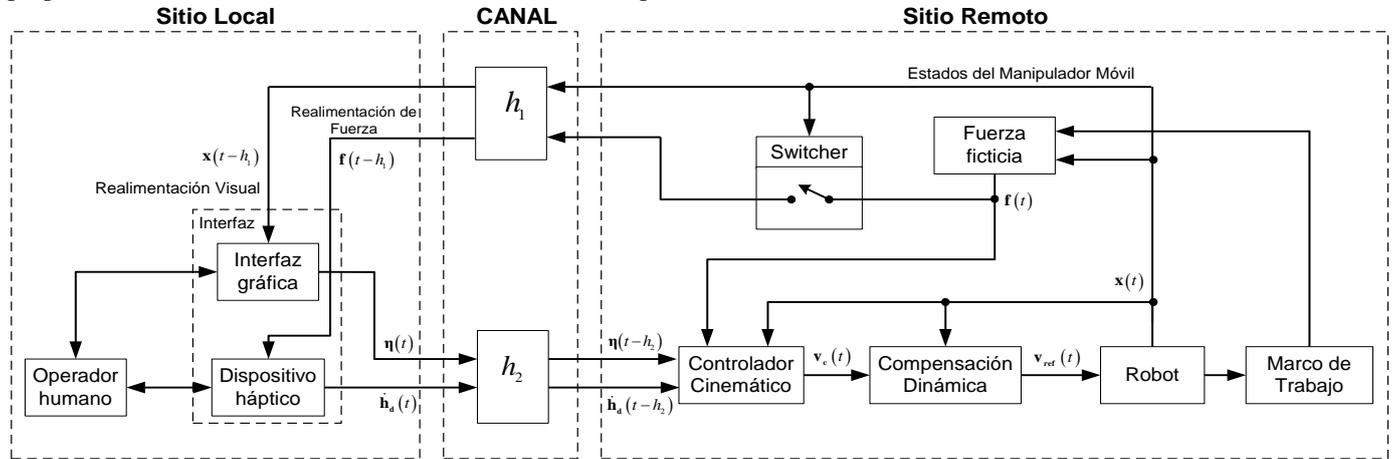


Figura 2. Esquema de control propuesto para teleoperación bilateral de manipuladores móviles

b) Robots móviles

A. Operador Humano

El operador humano es uno de los elementos más importantes en un sistema de teleoperación. Este dirige el comportamiento de todo el sistema de acuerdo a la tarea que quiere realizar. Si bien algunos autores han tratado de aproximar modelos del operador humano para cerrar el lazo de control [14], estos modelos se limitan a la reacción física del humano ante estímulos externos. Desafortunadamente, la complejidad en el procesamiento de la información en el cerebro humano y las complejas reglas de toma de decisión y comportamiento, así como el complicado proceso de raciocinio, hacen casi imposible la obtención de un modelo confiable, que permita cerrar el lazo correctamente. Por estas razones, se considera normalmente al operador como un elemento supervisor del sistema de teleoperación y se representa como una caja negra dentro del diagrama de bloques.

B. Interfaz

La interfaz es el conjunto de dispositivos que permiten la interacción del operador humano con el sistema de teleoperación. Las interfaces hoy en día cobran un papel muy

importante en el campo de la teleoperación, debido a que la interfaz es el contacto indirecto del hombre con los robots (máquinas); ya que las interfaces dan toda la información necesaria para que el operador sienta el máximo de telepresencia en el sitio remoto, se utiliza dispositivos hápticos con realimentación de fuerza y torque, dispositivos de realidad virtual, como guantes, lentes, trackers, y todo lo que pueda servir para que exista el grado máximo de telepresencia, ver Fig. 3.

La Fig. 4 ilustra una concepción del supervisor, desde el punto de vista de conversión de señales. Aquí se muestra explícitamente la conversión de la información del sitio remoto en información visual o táctil, la cual genera estímulos sensoriales que el operador interpreta y analiza para tomar una decisión, un usuario capaz de tocar, sentir, manipular, crear, y cambiar objetos tridimensionales simulados dentro de un ambiente virtual. Un dispositivo háptico es el que implica el contacto físico entre la computadora y el usuario, por lo general mediante un dispositivo de entrada / salida, como una palanca de mando o guantes, que permiten transmitir los movimientos del cuerpo. En este trabajo la interfaz para el operador está conformada por una interfaz gráfica y un dispositivo háptico. La interfaz gráfica interactúa con el operador ya que muestra la información visual acerca del entorno con el fin de mejorar la sensación de presencia, y recibe la información de la configuración deseada para el brazo robótico $\eta = [\dot{\theta}_{d1} \ \dot{\theta}_{d2} \ \dots \ \dot{\theta}_{dna}]^T$. De igual forma, el dispositivo háptico interactúa de forma directa con el operador ya que realimenta la fuerza enviada por el sitio remoto y recibe los comandos de velocidad deseada del extremo operativo del manipulador $\dot{h}_a = [\dot{x}_{dee} \ \dot{y}_{dee} \ \dot{z}_{dee}]^T$. La Fig. 5 muestra el dispositivo háptico Falcon-Novint utilizado en este trabajo.

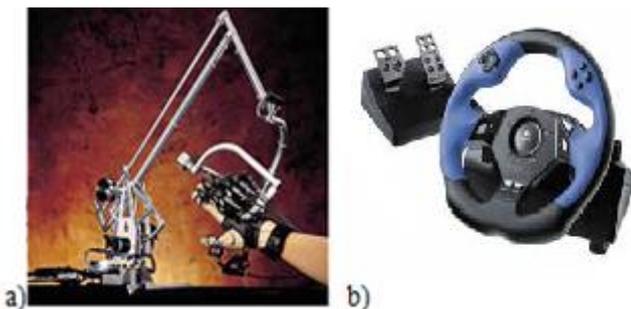


Figura 3. Dispositivos hápticos para: a) Robot manipuladores. b) Robots móviles.

Este dispositivo posee tres grados de libertad en los ejes X-Y-Z, y además tiene realimentación de fuerza en sus tres ejes.

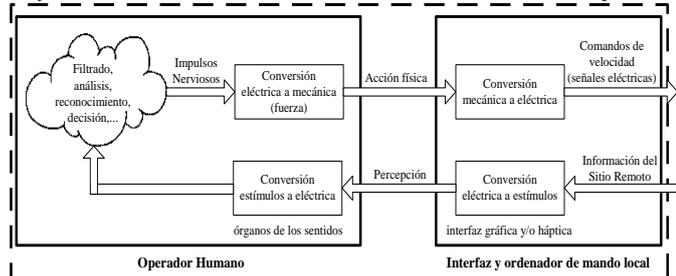


Figura 4. Concepción del supervisor en términos de conversión de señales.

C. Canal

El canal de comunicación es un medio utilizado para transportar la información desde el emisor hasta el receptor con un conjunto de dispositivos que modulan, y adaptan el conjunto de señales que se transmiten entre el sitio local y el remoto. Es decir, que estarán vinculados por un canal de comunicación, a través del cual, fluye información bidireccional, cerrando el lazo de control, como lo ilustra la Fig. 2, donde $h_1(t)$ representa el retardo de tiempo que existe debido a la transmisión de datos desde el sitio remoto hacia el sitio local del sistema de tele-operación, y $h_2(t)$ es el retardo de tiempo que existe debido a la transmisión de datos desde el sitio local al sitio remoto. En este trabajo el canal de comunicación es una red LAN usando el protocolo UDP/IP, en este caso los retardos existentes $h_1(t)$ y $h_2(t)$ son muy pequeños por lo son despreciados.

D. Robot

Se considera un robot manipulador móvil no holonómico como se muestra en la Figura. 6. El manipulador móvil está compuesto por el robot móvil PIONEER 3AT, un sensor láser montado sobre el robot móvil, un brazo robótico CYTON Alpha 7DOF y un sensor visual CMOS JK-805 ubicada en el extremo operativo del brazo robótico. Según la configuración de las ruedas del robot podremos obtener distintas ecuaciones cinemáticas, pero en todos los casos la restricción o restricciones no holonómicas tienen el mismo carácter: el movimiento de cada rueda del robot solo puede hacerse en la dirección perpendicular al eje de giro de la misma en cada instante. Para ilustrar este caso, consideremos un disco plano que rueda sobre una superficie



Figura 6. Sistema Experimental, manipulador móvil

E. Fuerza Ficticia

Se propone un método para calcular la fuerza de repulsión ficticia existente entre robot-obstáculo, como se muestra en la Fig. 7. La magnitud de la fuerza ficticia generada por un obstáculo se puede definir como:

$$F = k_f (r - d) (\pi/2 - |\alpha|) \quad (3)$$

donde, α es el ángulo con el cual la plataforma móvil incide al obstáculo, d distancia entre el robot y el obstáculo, r es el radio que determina la distancia a la cual se comienza a evitar el obstáculo, y k_f es una ganancia positiva de ajuste.

La magnitud de la fuerza calculada de esta manera se encuentra confinada al intervalo $[0, 1]$, de manera que su valor es escalado por la constante de ajuste k_f . Por otro lado, el ángulo de la fuerza ficticia α está definido entre $[-\pi/2, \pi/2]$.

La fuerza tangencial y la fuerza normal son calculadas como $f_T = f \cos(\alpha)$ y $f_N = f \sin(\alpha)$, respectivamente. La componente tangencial tiene la misma dirección que el movimiento del robot y la componente normal es perpendicular a la misma.

F. Controlador Cinemático

El diseño del controlador cinemático se basan en el modelo cineámico del robot manipulador móvil (1)

$$\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{J}\mathbf{v} \quad (3)$$

donde \mathbf{v} puede ser expresado en términos de $\dot{\mathbf{h}}$ usando la pseudo-inversa de la matriz Jacobiana \mathbf{J}

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}^\# \dot{\mathbf{h}}$$

donde $\mathbf{J}^\# = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T)^{-1}$ siendo \mathbf{W} una matriz simétrica definida positiva, que pesa las acciones de control del sistema. O sea,

$$\mathbf{v} = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T)^{-1} \dot{\mathbf{h}}$$

Se propone la siguiente ley de control que se basa en una solución de mínima norma; es decir que en cada instante el manipulador móvil cumplirá sus objetivos de navegación con el menor número de movimientos posibles.

$$\mathbf{v}_c = \mathbf{J}^\# \left(\dot{\mathbf{h}}_d + \mathbf{L}_K \tanh(\mathbf{L}_K^{-1} \mathbf{K} \tilde{\mathbf{h}}) \right) + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^\# \mathbf{J}) \mathbf{L}_D \tanh(\mathbf{L}_D^{-1} \mathbf{D} \Lambda) \quad (4)$$

donde, $\dot{\mathbf{h}}_d = [\dot{x}_{dee} \ \dot{y}_{dee} \ \dot{z}_{dee}]^T$ es el vector de velocidades deseadas en el extremo operativo \mathbf{h} , $\tilde{\mathbf{h}} = [\tilde{x}_{ee} \ \tilde{y}_{ee} \ \tilde{z}_{ee}]^T$ es el vector de errores de control definido como: $\tilde{x}_{ee} = x_{dee} - x_{ee}$, $\tilde{y}_{ee} = y_{dee} - y_{ee}$, $\tilde{z}_{ee} = z_{dee} - z_{ee}$, \mathbf{K} , \mathbf{D} , \mathbf{L}_K y \mathbf{L}_D son matrices diagonales definidas positivas que pesan los errores de $\tilde{\mathbf{h}}$ y del vector Λ .

El segundo término de (4) representa la proyección sobre el espacio nulo de la matriz Jacobiana, donde Λ es un vector arbitrario que contiene las velocidades asociadas al manipulador móvil. Por lo que cualquier valor que tome Λ tendrá efectos únicamente en la estructura interna del manipulador móvil sin afectar en absoluto el control final sobre el extremo operativo \mathbf{h} . Mediante este término se

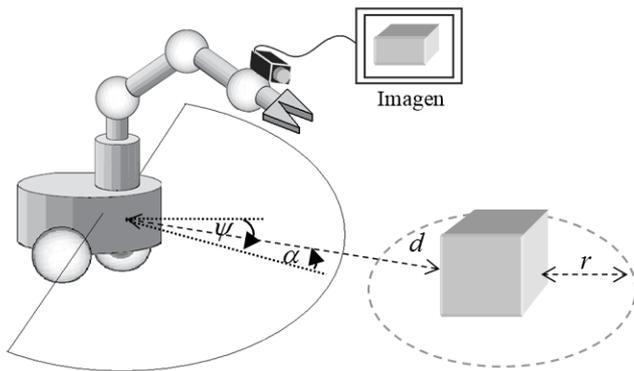


Figura 7. Esquema de evasión de obstáculos

puede cumplir con otros objetivos paralelamente, que en este trabajo serán: control de la configuración del brazo robótico y la evasión de obstáculos.

Para evitar la saturación de las velocidades del sistema manipulador móvil, se introduce la función $\tanh(\cdot)$ que limita el error de $\tilde{\mathbf{h}}$ y del vector Λ , donde, $\tanh(\mathbf{L}_K^{-1} \mathbf{K} \tilde{\mathbf{h}})$ y $\tanh(\mathbf{L}_D^{-1} \mathbf{D} \Lambda)$ denota una operación componente a componente.

Resolución de la redundancia del espacio nulo: En este trabajo, además, del objetivo principal que es la teleoperación bilateral para el monitoreo y navegación del manipulador móvil, se plantean dos objetivos secundarios. Uno de ellos es la evasión de obstáculos, para lo que se considera que el obstáculo no interfiere con el espacio de trabajo del brazo robótico, de modo que éste pueda seguir la trayectoria deseada por el operador incluso cuando la base móvil está evitando el obstáculo. El segundo objetivo secundario es el control de la configuración deseada del brazo robótico a lo largo de la ejecución de la tarea.

Evasión de obstáculos: se propone un método en el cual la velocidad angular y la velocidad lineal de la plataforma móvil se verán afectadas por las fuerzas normal y tangencial de la fuerza de repulsión ficticia, respectivamente. Por lo que, $\omega_{obs} = k_{obs} f_N$ y $u_{obs} = k_{uobs} f_T$ (5) donde k_{obs} y k_{uobs} son ganancias positivas de ajustes.

Considerando la evasión de obstáculos (5) y un controlador PD para la configuración deseada del brazo robótico, el vector Λ queda definido de la siguiente manera,

$$\Lambda = [-u_{obs} \ \omega_{obs} \ \theta_{d1} - \theta_1 \ \theta_{d2} - \theta_2 \ \dots \ \theta_{dna} - \theta_{na}]^T$$

donde, $\theta_{id} - \theta_i$ ($i = 1, 2, \dots, na$) representa el error de configuración interna del brazo robótico, por lo que al minimizar este índice se están llevando las articulaciones a los valores de θ_{id} deseados.

El error del control $\tilde{\mathbf{h}}$ se analiza asumiendo –por el momento– seguimiento perfecto de velocidad $\mathbf{v} \equiv \mathbf{v}_c$, $\mathbf{v}_c = [u_c \ \omega_c \ \dot{\theta}_{1c} \ \dot{\theta}_{2c} \ \dots \ \dot{\theta}_{nac}]^T$. Ahora, reemplazando (4) en (3), se tiene

$$\dot{\tilde{\mathbf{h}}} + \mathbf{L}_K \tanh(\mathbf{L}_K^{-1} \mathbf{K} \tilde{\mathbf{h}}) = \mathbf{0} \quad (6)$$

para el análisis de estabilidad se considera la siguiente función candidata de Lyapunov

$$V(\tilde{\mathbf{h}}) = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{h}}^T \tilde{\mathbf{h}}$$

donde su derivada temporal en las trayectorias del sistema es, $\dot{V}(\tilde{\mathbf{h}}) = -\tilde{\mathbf{h}}^T \mathbf{L}_K \tanh(\mathbf{L}_K^{-1} \mathbf{K} \tilde{\mathbf{h}}) < 0$

lo que implica que el equilibrio del sistema de lazo cerrado (6) es asintóticamente estable por lo que el error de posición del extremo operativo $\tilde{\mathbf{h}}(t) \rightarrow \mathbf{0}$ asintóticamente con $t \rightarrow \infty$. perpendicular a la misma.

G. Compensación Dinámica

Si no existe seguimiento perfecto de velocidad, el error de velocidad es,

$$\tilde{\mathbf{v}} = \mathbf{v}_c - \mathbf{v} \quad (7)$$

por lo que se propone realizar un controlador de compensación dinámica basado en la dinámica inversa, para lo cual se considera que se conoce el modelo exacto del manipulador móvil. Se propone la siguiente ley de control

$$\mathbf{v}_{ref} = \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \boldsymbol{\sigma} + \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \mathbf{v}) \mathbf{v} + \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) \quad (8)$$

donde, $\mathbf{v}_{ref} = [u_{ref} \ \omega_{ref} \ \dot{\theta}_{1ref} \ \dot{\theta}_{2ref} \ \dots \ \dot{\theta}_{naref}]^T$ y

$$\boldsymbol{\sigma} = \dot{\mathbf{v}}_c + \mathbf{L}_v \tanh(\mathbf{L}_v^{-1} \mathbf{K}_v \tilde{\mathbf{v}})$$

Ahora, reemplazando (8) en (2) se tiene

$$\mathbf{0} = \dot{\tilde{\mathbf{v}}} + \mathbf{L}_v \tanh(\mathbf{L}_v^{-1} \mathbf{K}_v \tilde{\mathbf{v}}) \quad (9)$$

de forma similar que en (6), se puede concluir que el vector de error $\tilde{\mathbf{v}}(t) \rightarrow \mathbf{0}$ asintóticamente, siempre que \mathbf{K}_v y \mathbf{L}_v sean matrices simétricas definidas positivas.

H. Switcher

El Modo Switcher es el encargado de habilitar o deshabilitar la realimentación de la fuerza ficticia, robot-obstáculo, hacia el sitio local. La conmutación de la realimentación de la fuerza ficticia se considera en función de la posibilidad de que el manipulador móvil pueda evadir un obstáculo de forma autónoma sin la necesidad de que el operador humano intervenga. La conmutación se lo realiza considerando una

cota mínima de la medida de manipulabilidad del manipulador móvil.

Manipulabilidad.- es la capacidad de mover de forma arbitraria el extremo operativo del manipulador móvil en cualquier dirección. Se determina a $w = \sqrt{\det(\mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{J}^T(\mathbf{q}))}$ como la medida de la manipulabilidad [14], [15].

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación, se muestra los resultados obtenidos aplicando el sistema desarrollado para teleoperación bilateral de un robot manipulador móvil. La experiencia de teleoperación fue realizada vía una red LAN inalámbrica. Los dispositivos utilizados para las pruebas experimentales son los que se detallan en la Sección III. Destacando que sólo se utilizó tres grados de libertad del brazo robótico en la experimentación. La experiencia realizada consistió en el monitoreo de un ambiente parcialmente estructurado donde se colocó obstáculos fijos para que sean evitados por el manipulador móvil.

La Fig.7, muestra los comandos de velocidad en los ejes X-Y-Z del operador humano desde el sitio local y las velocidades reales del extremo operativo del manipulador móvil. Se puede observar el buen desempeño del sistema de control propuesto. La Fig. 8 muestra las acciones de control para el robot móvil: velocidad lineal y velocidad angular; mientras que los comando de velocidad para el brazo robótico se muestran en la Fig. 9.

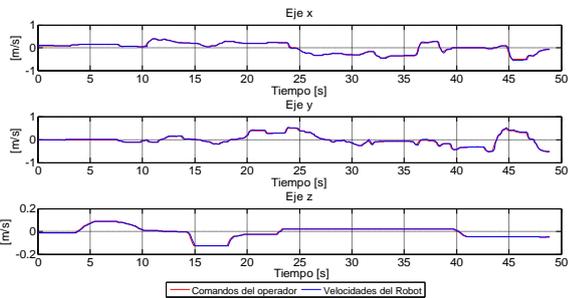


Fig. 7. Velocidades del extremo operativo del Manipulador Móvil

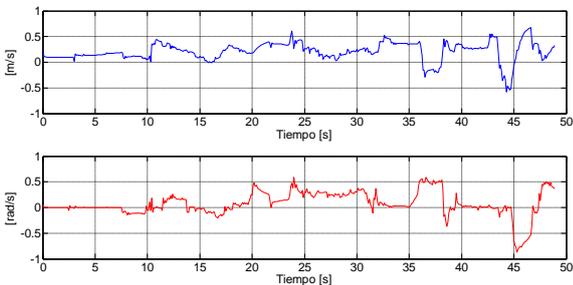


Figura. 8. Comandos de velocidad del robot móvil

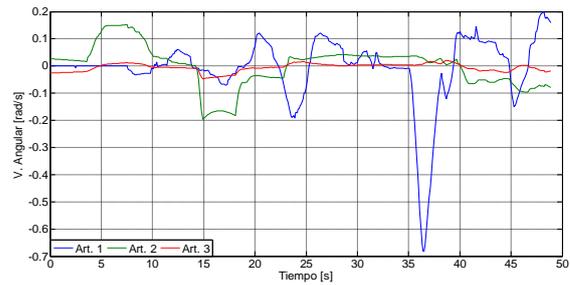


Figura. 9. Comandos de velocidad del brazo robótico

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño y desarrollo de un sistema de teleoperación bilateral para manipuladores móviles a través de una red LAN inalámbrica. La estructura de control presentada consta de dos subsistemas en cascada ubicados en el sitio remoto; 1) un controlador cinemático de mínima norma para el control de movimiento del manipulador móvil, y 2) un compensador de dinámica para disminuir los errores de seguimiento de velocidad. Los objetivos secundarios como: la evasión de obstáculos y el control de la configuración del brazo robótico son alcanzados por medio del control de redundancia del manipulador móvil. La estabilidad y el desempeño del sistema se han demostrado analíticamente. Los resultados, que fueron obtenidos mediante la experimentación, muestran el buen desempeño del sistema de teleoperación bilateral propuesto. Las líneas de investigación en el tema presentado estarán dirigidas a la compensación del retardo para control de manipuladores móviles mediante Internet.

REFERENCIAS

- [1] Emanuel Slawiński, Francisco Postigo y Vicente Mut, “Experiencia en Teleoperación Bilateral de Robot”*Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, Vol. 3, Núm 1, Enero 2010, pp. 29-38
- [2] Patricio Burbano, Andres Rosales, Nelson Parra, “Design and Automatic System Control Implementation for an Imitator Robot in a Humanoid Platform through Image and Video Acquiring and Processing”, *Revista Politécnica*, Vol. 32, Núm 2, Julio 2013, pp. 87 - 95
- [3] S. H. Jeong and S. Jung, “Bilateral Teleoperation Control of a Quadrotor System with a Haptic Device: Experimental Studies”, *IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA)*, pp. 543 – 548, (2014).
- [4] Spyros V. Velanas, and Costas S. Tzafestas, “Human Telehaptic Perception of Stiffness using an Adaptive Impedance Reflection Bilateral Teleoperation Control Scheme”, *19th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 21 – 26 (2010)
- [5] Zahra Boroujeni, Mostafa Mohammadi, Aliakbar Jalali, “Stable Adaptive Time-Variable Delayed Bilateral Teleoperation for a Surgery Robot”, *Proceeding of the 2013 RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics*, pp. 13-15,(2013)

- [6] Bi-qiang Yao, Guang Wen, “Research on the Tele-Operation Robot System with TelePresence”, Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 2308 – 2311 (2011)
- [7] Yasunori Kawai, Toru Namerikawa and Masayuki Fujita, “Bilateral Teleoperation of Wheeled Mobile Robot with Time Delay using Virtual Image Robot”, 2010 IEEE International Conference on Control Applications Part of 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, pp. 77 – 82
- [8] X. Li and C. C. Cheah, “Dynamic Region Control for Robot-Assisted Cell Manipulation Using Optical Tweezers”, 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1057 – 1062 (2012)
- [9] Sebastian Erhart, Dominik Sieber and Sandra Hirche, “An impedance-based control architecture for multi-robot cooperative dual-arm mobile manipulation”, 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 315 – 322 (2013)
- [10] Adrian Burlacu, Cosmin Copot, Enric Cervera and Comeliu Lazar, “Real-Time Visual Predictive Control of Manipulation Systems”, The 15th International Conference on Advanced Robotics, pp. 383 – 388 (2011)
- [11] H. SAAFI, M. A. LARIBI, S. ZEGHLOUL, M. Y. Ibrahim, “Development of a Spherical Parallel Manipulator as a Haptic Device for a Tele-operation System: Application to Robotic Surgery”, Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, pp. 4097 – 4102 (2013)
- [12] YiAn Lei, ZhongYi Chu, ShanYong Ren, Dan li, “Dynamic Modeling and Robust Adaptive Control of a Deployable Manipulator”, 2012 12th International Conference on Control, Automation, Robotics & Vision, pp. 512 – 517
- [13] N. Kammerer, and P. Garrec, “Dry friction modeling in dynamic identification for robot manipulators: theory and experiments”, Mechatronics (ICM), 2013 IEEE International Conference, pp. 422 – 429 (2013)
- [14] Sandra Hirche, Senior Member IEEE, and Martin Buss, “Human-Oriented Control for Haptic Teleoperation”, Proceedings of the IEEE, pp. 623 – 647 (2012).