

Sistema de teleoperación unilateral kinestésica para un manipulador móvil

Vázquez-Nicolás J.M. * Zeron-Hernandez A.R. **
Ruiz-Alcantara R. ** Villarreal-Cervantes M.G. **
Portilla-Flores E.A. ** Luviano-Juárez A. ***

* Instituto Politécnico Nacional - CIC, México, D.F., México,
(e-mail: jvazquezn0800@alumno.ipn.mx)

** Instituto Politécnico Nacional - CIDETEC, México, D.F., México,
(e-mail: azeronh0800,rruiza0800,mvillarrealc,aportillaf@ipn.mx)

*** Instituto Politécnico Nacional - UPIITA, México, D.F., México
(e-mail: aluvianoj@ipn.mx)

Resumen: Para aquellos que no tienen experiencia, la operación de un manipulador móvil a través de una consola portátil no es una tarea fácil. Existe un largo proceso de aprendizaje para adquirir las habilidades para operar un manipulador móvil. En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de teleoperación unilateral kinestésica (STUK) de bajo costo para un manipulador móvil, en donde se facilita el proceso de aprendizaje debido a que el usuario lo puede operar a través del movimiento de su mano, por medio de un guante inercial, por lo cual podría utilizarse en robótica asistencial y de servicios. El guante inercial consiste de tres sensores de aceleración, los cuales se colocan en el brazo del usuario para detectar, por medio de la cinemática del brazo del usuario, el movimiento lineal y rotacional de la muñeca del usuario, además cuenta con un mando por interruptores y un dsPIC para procesar la información y transmitirla por medio de una comunicación inalámbrica Xbee. El movimiento lineal y rotacional de la muñeca corresponderá al movimiento del efector final del manipulador y el mando por interruptores corresponderá al movimiento del móvil. Resultados experimentales del STUK muestran su desempeño en un manipulador móvil desarrollado en el CIDETEC-IPN.

Keywords: Teleoperación, Kinestésica, Robótica, Control, Mecatrónica.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la tecnología y la robótica, paralelamente, han entrado en una constante tendencia de innovación, porque es común el uso de los robots tanto en la industria como en la vida cotidiana del ser humano. Esto ha llevado a buscar la mejora en la interacción humano-robot, es ahí donde entra el concepto de telerobótica el cual se puede definir como el área de la robótica destinada al control y operación de robots a distancia, su objetivo es reproducir en un entorno remoto, las capacidades sensitivas y de actuación del mismo operador. Se han presentado varios trabajos que abordan el tema de la teleoperación de robots como en [Slawiński et al. 2012] en donde se aborda la teleoperación de robots con retardos temporales, también tenemos en [Kofman et al. 2005] un sistema de teleoperación mediante vídeo lo cual permite movimientos naturales del ser humano para realizar la tarea de manipulación remota y en [Cho et al. 2010] se desarrolló todo un sistema basado en sensores ultrasónicos que brindan información de la cercanía de otros objetos al robot y envía dicha información al usuario para que pueda controlar al robot de una manera más suave.

Así mismo, se han desarrollado diferentes tipos de interfaces para la teleoperación de robots como lo hecho en [Jaju et al. 2013] donde se desarrolló una interfaz de

teleoperación que fue validada para diferentes modelos de operación. También existen interfaces basadas en realidad virtual como la presentada en [Monferrer and Bonyuet 2002] donde se realizó la teleoperación colaborativa de robots desde 2 lugares diferentes.

En los últimos años han surgido sistemas de teleoperación basados en la kinestesia la cual trata del estudio de los movimientos del cuerpo humano para la realización de tareas de teleoperación. De esta manera se puede definir un sistema de teleoperación kinestésico como aquel sistema en el cual el operador mediante los movimientos de su cuerpo, indica al robot la posición que debe de adoptar, algunos trabajos como en [Kim et al. 2009] y en [Rodríguez-Angeles et al. 2010] se hace uso de este principio de kinestesia y se diseñaron sistemas basados en sensores inerciales para la teleoperación de una retroexcavadora y un robot tipo delta, respectivamente.

El sistema propuesto en el presente trabajo, a diferencia de los anteriormente citados, es de bajo costo, ya que se utiliza únicamente acelerómetros como unidades de medición, en lugar de sistemas de medición inercial de mayor costo y a su vez busca ser intuitivo para el usuario operador ya que se necesita reproducir, de una forma natural, el movimiento del brazo humano por lo cual se encuentra conformado por un guante inercial como sistema maestro y un robot manipulador móvil omnidireccional como sistema

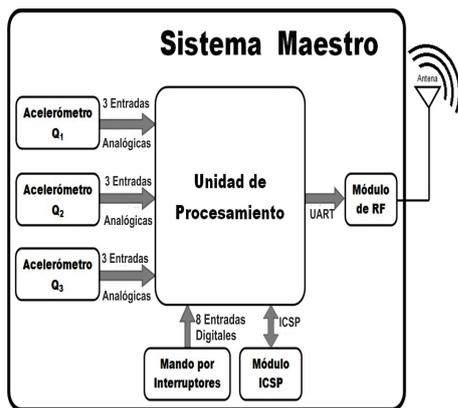


Figura 1. Diagrama esquemático del sistema maestro

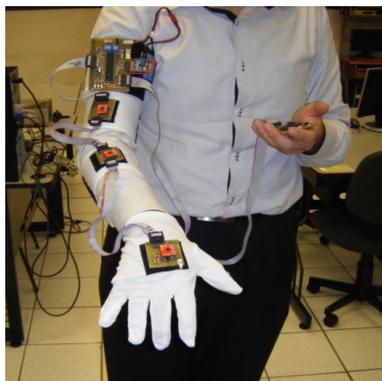


Figura 2. Guante inercial

esclavo, y que por sus características de fácil operabilidad puede ser usado en robótica asistencial o de servicios.

La organización del presente artículo es como sigue. En la sección 2 se detalla la forma en que esta conformado el sistema maestro y su principio de funcionamiento. La sección 3 se presenta al sistema esclavo que es un robot móvil omnidireccional y además se presentan las ecuaciones cinemáticas que rigen su funcionamiento. En la sección 4 se describe el funcionamiento general del sistema de teleoperación en conjunto. En la sección 5 se presentan los resultados experimentales. Finalmente en la sección 6 se dan las conclusiones.

2. GUANTE INERCIAL (SISTEMA MAESTRO)

El guante inercial está conformado por un guante y tres brazaletes. El guante y dos de los brazaletes cuentan con acelerómetros (ADXL335, Analog Devices), el brazaleta restante incluye a la unidad de procesamiento la cual es un microcontrolador (dsPIC30F4013, Microchip), los zócalos de conexión, el módulo de comunicación (XBee, Digi International) y la batería. Un esquema del sistema maestro se muestra en la Figura 1 y el modo de uso del guante inercial se muestra en la Figura 2.

Los acelerómetros se utilizaron para poder determinar la inclinación de cada una de las partes del brazo con base en un método geométrico que se genera a partir del vector de aceleración durante el movimiento del brazo del usuario.

Las características de los acelerómetros utilizados, de acuerdo al fabricante, son un rango de medición típico de

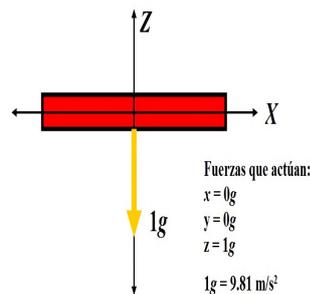


Figura 3. Diagrama de cuerpo libre del acelerómetro en una superficie plana horizontal

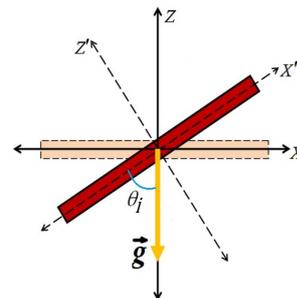


Figura 4. Diagrama de cuerpo libre del acelerómetro en una posición arbitraria

$\pm 3,5g$ y una sensibilidad radiométrica típica de $300mV/g$ (donde g es la aceleración gravitacional, $9,8m/s^2$).

Para el procedimiento geométrico, primero suponemos que el acelerómetro se encuentra en una superficie plana, como lo muestra el diagrama de cuerpo libre en la Figura 3.

Ahora, consideremos que el acelerómetro se inclina un ángulo θ_i , entonces el diagrama de cuerpo libre queda como el mostrado en la Figura 4.

Dada la Figura 4 se puede determinar:

$$a_{x'} = 1g \cdot \sin \theta_i \quad (1)$$

$$a_{z'} = 1g \cdot \cos \theta_i \quad (2)$$

Además podemos relacionar a las ecuaciones anteriores a través de:

$$\frac{\sin \theta_i}{\cos \theta_i} = \frac{a_{x'}}{a_{z'}} \Rightarrow \theta_i = \arctan \frac{a_{x'}}{a_{z'}} \quad (3)$$

Dado que la función $\arctan \theta$ entrega mediciones que dependen del cuadrante en el cual se encuentre (lo que puede provocar errores en la implementación) se hace uso de la función $\arctan 2$ la cual entrega los valores correctos para cualquier cuadrante, por lo que la ecuación final es:

$$\theta_i = \arctan 2(a_{x'}, a_{z'}) \quad (4)$$

Una vez que se obtienen las inclinaciones de las partes del brazo del usuario, estas son enviadas al microcontrolador dsPIC30F4013, en donde se realiza un preprocesamiento de las señales por medio de un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 1 kHz para que posteriormente, por medio de la cinemática directa, se determine la posición cartesiana del brazo del usuario. Para tales efectos, se modeló al brazo humano como un brazo robótico de 3 grados de libertad, véase Figura 5. La medición de

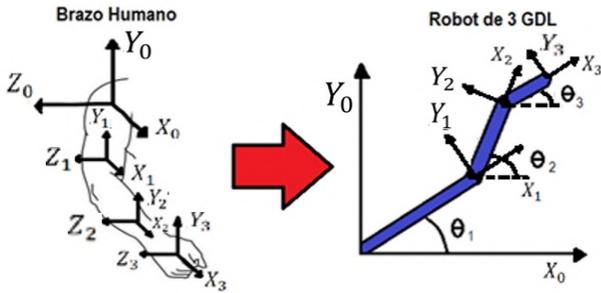


Figura 5. Integración del sistema maestro y el sistema esclavo

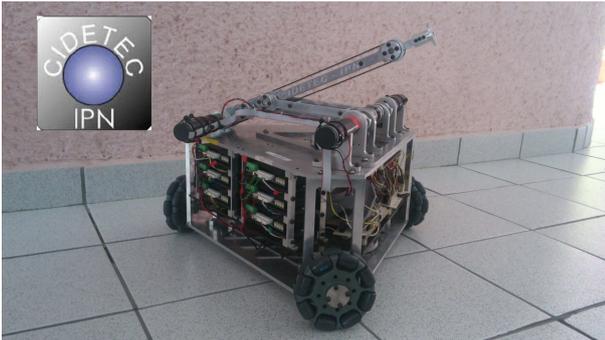


Figura 6. Robot manipulador móvil

la inclinación que se obtiene de los acelerómetros esta referenciada con respecto a la Tierra, las ecuaciones de la cinemática quedan determinadas por:

$$X_h = L1 \cos \theta_1 + L2 \cos \theta_2 + L3 \cos \theta_3 \quad (5)$$

$$Y_h = L1 \sin \theta_1 + L2 \sin \theta_2 + L3 \sin \theta_3 \quad (6)$$

$$\phi_h = \theta_3 \quad (7)$$

Donde $L1, L2$ y $L3$ son las longitudes del brazo, antebrazo y la mano del usuario respectivamente, mientras que X_h, Y_h y ϕ_h son las coordenadas espaciales y la orientación de la mano respectivamente.

Una vez que el microcontrolador determina X_h, Y_h y ϕ_h , se envía dicha información al sistema esclavo a través de un módulo de comunicación inalámbrica XBee Serie 1, que utiliza el protocolo de comunicación IEEE 802.15.4, y el cual se caracteriza por su bajo consumo energético ($<50\text{mA}$) y que se pueden comunicar 2 dispositivos a una distancia de hasta 100 metros sin la presencia de obstáculos.

La información se envía al sistema esclavo a una frecuencia de 200 Hz, lo cual es lo suficientemente rápido a comparación de la dinámica del sistema, lo que permite considerar al controlador como si fuera analógico.

3. MANIPULADOR MÓVIL (SISTEMA ESCLAVO)

3.1 Plataforma Experimental

Para poner a prueba el sistema de teleoperación propuesto, se hace uso de un robot manipulador móvil omnidireccional con 5 grados de libertad en su efector final, diseñado y construido en el CIDETEC-IPN el cual se muestra en la Figura 6.

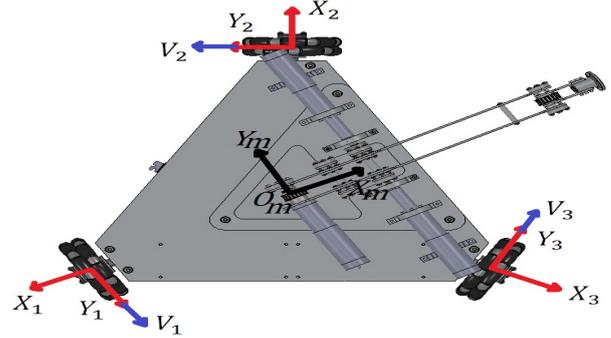


Figura 7. Base móvil y sus sistemas de coordenadas

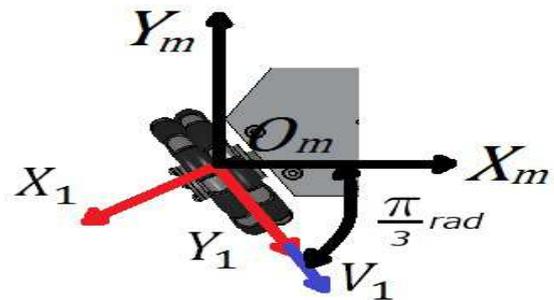


Figura 8. Sistema de referencia para la llanta 1.

El robot consta de un manipulador paralelo de 3 grados de libertad que se encuentra sobre una base móvil con ruedas del tipo omnidireccional. Dentro de las características técnicas el robot cuenta con su propia computadora con el sistema operativo Windows, una tarjeta de adquisición de datos de la marca Sensoray y 6 motores de C.D., 3 para la base móvil y 3 restantes para el manipulador y con un módulo Xbee, para su comunicación con otros dispositivos.

El sistema esclavo, recibe la información de la dirección en la que se debe mover la base móvil y también de la posición en el espacio a la cual debe de acceder el manipulador (se dan detalles en la siguiente sección), por lo cual es necesario conocer la cinemática del móvil y la cinemática inversa del manipulador.

3.2 Cinemática de la base móvil

En lo que respecta a la base móvil, partimos de la Figura 7 en la que se presenta una imagen de la vista superior del robot.

Como objetivo de control, las variables a regular son las velocidades V_1, V_2 y V_3 que son las velocidades lineales de cada una de las llantas del móvil, entonces lo que se busca es encontrar la relación que existe entre dichas velocidades con el sistema de referencia asociado al centro del móvil.

Trasladamos el sistema $O_m X_m Y_m$ al sistema de referencia de las llantas, en este caso a la llanta 1, como se muestra en la Figura 8.

Mediante geometría y el análisis realizado en [Villarreal-Cervantes et al. 2012], se pudieron obtener las ecuaciones (8), (9) y (10) que rigen el movimiento del móvil.

$$\dot{\theta}_1 r = \frac{1}{2} \dot{X}_m - \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{Y}_m + L \dot{\phi}_m \quad (8)$$

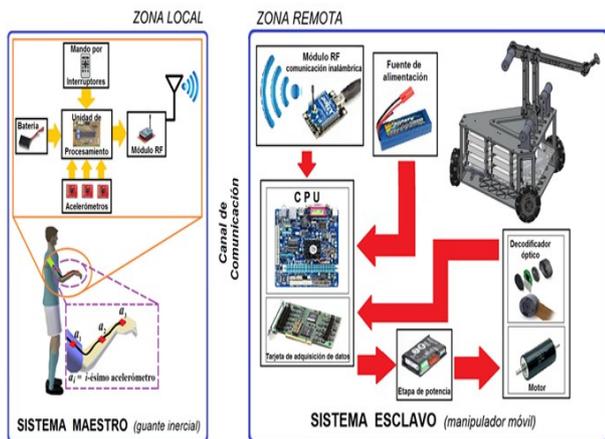


Figura 10. Sistema de teleoperación unilateral kinestésica

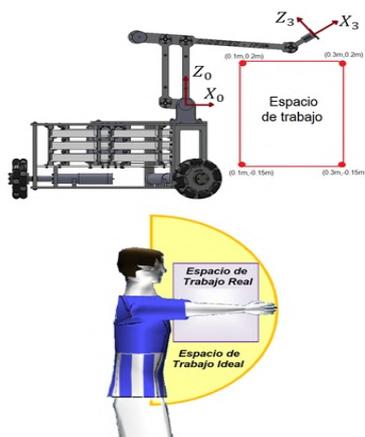


Figura 11. Espacio de trabajo del robot manipulador y el usuario

recibe hace el cálculo de la cinemática inversa y posiciona el manipulador. Si el usuario desea controlar la base móvil utiliza el mando por interruptores en el cual se tienen botones para cada una de las trayectorias programadas.

Un aspecto importante a resaltar es que se definió un espacio de trabajo tanto para el manipulador como para el usuario, ya que las dimensiones del manipulador difieren a las del ser humano, por lo que se determinó una relación de 1:2, es decir por cada centímetro en el espacio de trabajo del robot se tienen 2 centímetros en el espacio de trabajo del usuario, ambos espacios se presentan en la Figura 11.

En la Figura 12 se puede ver un ejemplo de uso por parte del usuario que se encuentra portando el guante inercial y con ello controlando los movimientos del manipulador.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para efectos de control, cada uno de los movimientos hechos por el usuario se discretizan de tal forma que en cada intervalo de tiempo se considera que la velocidad inicial y final es igual a cero, por lo cual se abordó el problema como un caso de regulación para cada uno de esos intervalos.

Las rutinas de los controladores para cada una de las articulaciones del manipulador y para las llantas del móvil,



Figura 12. Usuario controlando al manipulador móvil mediante el STUK

fueron programadas en lenguaje C, lo que permitió un mejor manejo de los recursos de la computadora del robot y no tener que necesitar de software adicional de terceros.

Para la sintonización de las ganancias de los controladores PID y PI, se hizo uso del método del prueba y error el cual consiste en ir variando las ganancias del controlador e ir observando las curvas de respuesta del sistema hasta que dichas curvas cumplan las especificaciones de control deseadas. Las ganancias determinadas con el método descrito, son presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Ganancias de los controladores

	Manipulador	Base Móvil
K_p	120	1.1
K_i	10	6
K_d	2	0

El siguiente paso fue que el usuario se colocara el guante inercial e hiciera movimientos arbitrarios en su mano, brazo y antebrazo, para así poder medir determinar los ángulos reales y poder compararlos con los deseados, como lo muestra la Figura 13. Cabe recordar que el brazo del robot imitará la posición que adopte el brazo humano, a través de su cinemática inversa.

Para probar el desempeño del sistema de control de la base móvil, el cual es de velocidad, se encendió el robot y a través del mando por interruptores se enviaron secuencias de activación y desactivación de los motores para comprobar su funcionamiento, lo cual se observa en la Figura 14, en donde se puede ver que existen oscilaciones alrededor de los valores constantes de velocidad, lo cual se debe principalmente, al efecto de la derivada de la posición angular, la cual se realiza de forma discreta. A pesar de este efecto es posible notar que el valor medio en dichas secciones es el de la velocidad deseada.

La última prueba fue la del posicionamiento en el espacio cartesiano X-Y que es mostrada en la Figura 15, donde el usuario portador del guante inercial realizó movimientos de tipo circular y rectangular en su espacio de trabajo y el manipulador los reprodujo en el suyo por medio de las rutinas de control programadas.

Se puede observar que la forma de las gráficas que se muestran en la Figura 15 sigue el patrón deseado, existiendo variaciones atribuidas a la imprecisión propia del movimiento humano ya que los sensores utilizados son sensibles ante pequeños movimientos involuntarios del usuario.

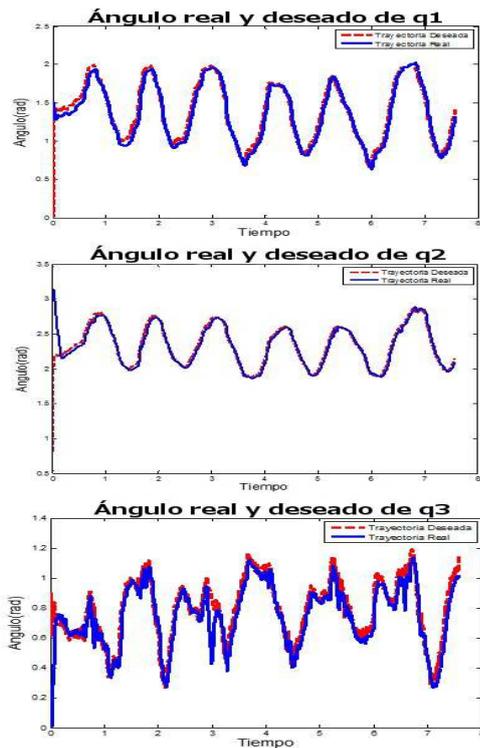


Figura 13. Desempeño de los controlador del manipulador

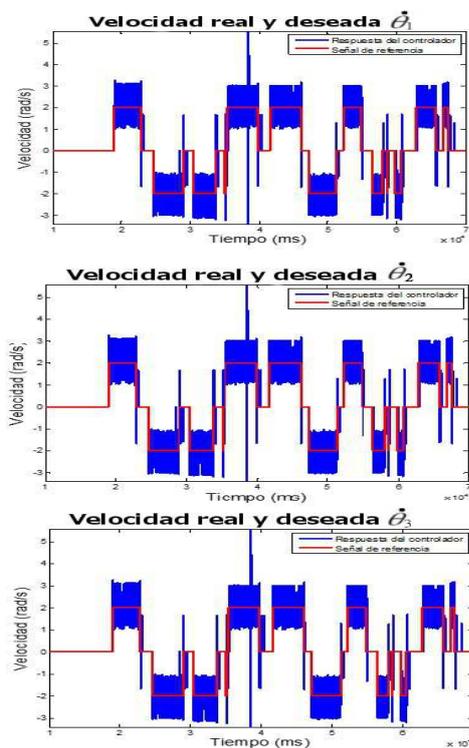


Figura 14. Desempeño de los controlador de la base móvil

6. CONCLUSIÓN

El desarrollo de este trabajo consta de un sistema maestro-esclavo que basa su funcionamiento en la kinestesia del usuario-operador, a partir de la detección de la posición de su brazo y su movimiento, de tal manera que le permita el

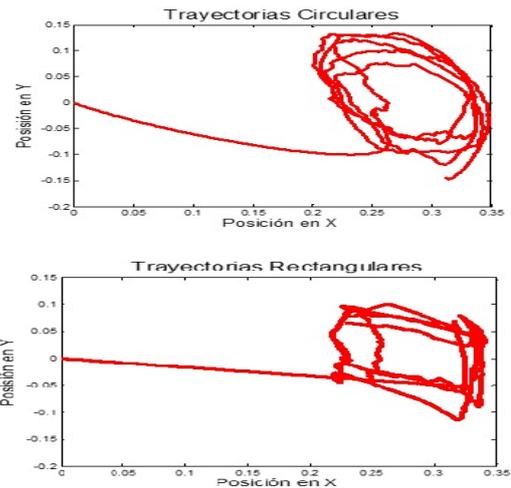


Figura 15. Trayectorias en el espacio cartesiano X-Y

control sobre el robot. Con dicho sistema telerobótico, el usuario tiene la capacidad de tomar decisiones y ejecutar acciones a distancia por medio de un guante inercial de bajo costo, de una manera natural e intuitiva lo cual busca favorecer el desarrollo de sistemas que puedan ser utilizados en el área de robótica asistencial y de servicios.

REFERENCIAS

- Cho, S.K., Jin, H.Z., Lee, J., and Yao, B. (2010). Teleoperation of a mobile robot using a force-reflection joystick with sensing mechanism of rotating magnetic field. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 15(1), 17–26.
- Jaju, A., Banerji, A., and Pal, P. (2013). Development and evaluation of a telepresence interface for teleoperation of a robot manipulator. In *Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2013 10th International Conference on*, 90–95.
- Kim, D., Kim, J., Lee, K., Park, C., Song, J., and Kang, D. (2009). Excavator tele-operation system using a human arm. *Automation in Construction*, 18(2), 173 – 182.
- Kofman, J., Wu, X., Luu, T., and Verma, S. (2005). Teleoperation of a robot manipulator using a vision-based human-robot interface. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 52(5), 1206–1219.
- Monferrer, A. and Bonyuet, D. (2002). Cooperative robot teleoperation through virtual reality interfaces. In *Information Visualisation, 2002. Proceedings. Sixth International Conference on*, 243–248.
- Rodríguez-Angeles, A., Guzman-Gutierrez, J.L., and Cruz-Villar, C. (2010). User wearable interface based on inertial sensors for unilateral master-slave robot teleoperation. In *Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE), 2010 7th International Conference on*, 458–463.
- Slawiński, E., Mut, V., Salinas, L., and García, S. (2012). Teleoperation of a mobile robot with time-varying delay and force feedback. *Robotica*, 30, 67–77.
- Villarreal-Cervantes, M., Cruz-Villar, C., Saldívar-Bárceñas, S., and García-Sosa, L. (2012). Dynamic coupling between a parallel manipulator and an omnidirectional mobile platform. In *Congreso Latinoamericano de Control Automático (CLCA)*.