

Teleoperación unilateral mediante un PD[◇]

Andrés Verduzco Lupián^a, Jorge Gudiño Lau^{a,1*}, Fidel Chávez Montejano^a, Saida Charre Ibarra^a, Janeth Alcalá Rodríguez^a, Miguel Durán Fonseca^a

^a Facultad de Ingeniería Electromecánica. Universidad de Colima, Campus El Naranjo, Km. 20.5 Carretera Manzanillo-Barra de Navidad, Colima, México.

Resumen

En este artículo se presenta la teleoperación unidireccional con dos dispositivos hápticos mediante un control lineal PD. En los últimos años, los investigadores del área de robótica están en caminados a manipular y controlar a distancia a robots. En la actualidad, las principales aportaciones de los sistemas de teleoperación abundan en las distintas áreas de aplicación como medicina, industria, construcción, tareas peligrosas, trabajos en ambientes inseguros o inestables, en lugares difíciles de alcanzar, tareas de alta complejidad, entre otros, ya que le permite al usuario protección, seguridad y no se arriesga su integridad física. En este artículo se describe los antecedentes, estado del arte, resultados experimentales lo que permite demostrar que el control funciona correctamente a pesar de tener el inconveniente del tiempo de retardo entre los dispositivos hápticos, ambos son de 3 grados de libertad, además, la descripción detallada del equipo experimental, la configuración de los softwares para seleccionar y calibrar los dispositivos hápticos. Por otro lado, la teleoperación entre los robots manipuladores es llevada a cabo en el software Matlab/Simulink®, donde se asignan las direcciones IP y se controla el tráfico de paquetes entre ambos dispositivos.

Palabras Clave: Teleoperación, control PD, dispositivo háptico, variable manipulada, comunicación, retroalimentación, protocolo UDP.

Introducción

Desde el principio de los tiempos los hombres han buscado maneras de poder aumentar su capacidad de actuación sobre el entorno. Al principio eran simples palos utilizados para llegar a lugares de otro modo inaccesible, a lo que siguieron otras herramientas como las pinzas de herrero para manejar materiales incandescentes o las tijeras para facilitar el corte de distintos elementos. Este desarrolló de herramientas que nos han permitido aumentar las acciones que podemos llevar a cabo, ha terminado desembocando en la teleoperación tal como hoy la conocemos. Está se puede definir como el manejo a distancia de un dispositivo que posibilita o facilita la realización de una actividad que de otro modo sería irrealizable o muy difícil para un ser humano (Chellali, 2010; Cerón, 2015; Nuño & Basañez, 2004) o incluso como el al conjunto de tecnologías que permiten la ampliación de la capacidad humana de detección y manipulación mediante el acoplamiento de sensores y actuadores remotos a través de canales de comunicación (Sheridan, 1989).

En la actualidad, El desarrollo de robots teleoperados se ha llegado a involucrar la electrónica, las comunicaciones, el control, la inteligencia artificial (IA), visión por computador y la realidad virtual (RV) (Cerón, 2015), por lo cual, han permitido aumentar el número de aplicaciones de la

teleoperación. Estas pueden encontrarse incluso en tareas tan cotidianas como pueden también en tareas que requieran de una aplicación especial. Sin embargo, se pueden presentar restricciones que bien pueden ser impuestas, o por la tarea misma, o por el entorno en el que la tarea debe ser ejecutada. En muchos casos las posibles configuraciones y exigencias de las tareas no puede ser completamente definidas y el manipulador deber ser diseñado para hacer frente a una variedad de situaciones imprevisibles. En ocasiones, estos manipuladores son dotados con grados adicionales de libertad (redundantes), así como también pueden estar equipados con actuadores y sensores especializados para ejecutar la tarea y/o soportar condiciones hostiles. Las tareas de perforación subterránea (Mendoza, 2017), de navegación terrestre (Duff, *et al.*, 2003), en las centrales nucleares y eléctricas (Guzmán *et al.*, 2014), las condiciones inhabitables del espacio y las zonas de alta presión en las profundidades del océano son sólo algunos ejemplos de estos entornos. La presencia humana en estos entornos es indeseable y ofrecer protección ante los posibles peligros puede llegar a ser demasiado costoso.

La teleoperación nació junto con la industria nuclear debido a la necesidad de manejar materiales altamente radioactivos, muy peligrosos para la salud simplemente con estar en su presencia. En 1947 Raymond Goertz del Argonne National Laboratory en Estados Unidos, comenzó las investigaciones en

[◇] Teleoperación unilateral mediante un PD.

* Jorge Gudiño Lau.

Correos electrónicos: jglau@ucol.mx, averduzco7@ucol.mx, fidel_chavez@ucol.mx, scharre@ucol.mx, janethalcala@ucol.mx, mdura@ucol.mx

URL: www.ucol.mx

este ámbito, con el objetivo de desarrollar un manipulador que un operador pudiera manejar a distancia. El primer fruto de esta investigación vino un año después y consistía en un sistema que hacía que un manipulador (esclavo) imitará los movimientos que un operador hacía con su brazo, que estaba unido al manipulador maestro.

Este primer sistema de teleoperación se denominó “M1”, fue completamente mecánico, de tal manera que los movimientos realizados en el maestro se transmitían eje a eje al manipulador esclavo.

En los cincuenta, Goertz siguió con sus investigaciones para pasar de un sistema mecánico a otro accionado por motores. En 1954 creó el “E1”, el primer sistema de teleoperación maestro-esclavo accionado por electricidad y con servo controles en ambos manipuladores (Nuño & Basañez, 2004).

El concepto de telemanipulación de productos radioactivos fue rápidamente retomado y desarrollado en los años sucesivos en la CEA (Commissariat à l’Energie Atomique) por Jean Vertut. No fue hasta los comienzos de la década de los sesentas cuando se probó el primer vehículo submarino teleoperado, conocido con el nombre de *Cable-Controlled Undersea Recovery Vehicle* (CURV). Fue desarrollado por la Naval Ordnance Test Station, uno de los laboratorios que dieron lugar a la actual empresa *SSC San Diego Robotics*. El CURV fue diseñado para recuperar unos cañones perdidos en un naufragio que sucedió en las cercanías de la isla San Clemente a una profundidad de aproximadamente 700 m. Así mismo entre otros desarrollos de la teleoperación en el sector nuclear, vehículos submarinos y sector espacial.

El área de la teleoperación tiene un gran atractivo en aplicaciones militares, debido a que puede llevar a cabo operaciones exitosas sin poner en peligro vidas humanas. Un ejemplo con uso militar son los UAV (Vehículos Aéreos no Tripulados) que se manejan a distancia. Estos sistemas se utilizan para vigilancia, adquisición de objetivos, reconocimiento de zonas peligrosas e incluso capaces de llevar a cabo ataques. Los avances militares han permitido nuevos usos en aplicaciones como cartografía, lucha contra incendios, agricultura, drones, etc.

En los últimos años la teleoperación está teniendo un gran impacto en la medicina, sobre todo en el campo de la telecirugía. Esta permite realizar operaciones, aunque existan kilómetros de distancia entre el médico y el paciente. Esto se consigue mediante robots cirujanos que reproducen las órdenes que el cirujano le está dando remotamente. Actualmente el robot cirujano más avanzado es el denominado Sistema Quirúrgico Da Vinci, está capacitado para realizar cualquier operación que pueda ser realizada por laparoscopia (Alfaro, 2012).

En lo que corresponde a el manejo de robots humanoides e incluso robots manipuladores como lo es el Sistema Quirúrgico Da Vinci, se encuentran muchos ejemplos del uso de la teleoperación en ellos como lo es el Telesar V (TELEXistence Surrogate Anthropomorphic Robot). Es un robot humanoide capaz de hacer que la persona que lo está controlando sea capaz de sentir, ver y oír lo mismo que si se encontrará en el lugar del

robot. Para ello, el operador se tiene que colocar un casco y una serie de sensores que captan el movimiento de su cuerpo. El casco dispone de auriculares y de dos pantallas frente a los ojos, que retransmiten lo que el robot está captando por sus dos cámaras, y permiten que el operador capte la profundidad del entorno.

Entre otras aplicaciones se encuentra la teleoperación de un humanoide que es manipulado mediante un traje de captura de movimiento del ser humano (Koenemann, et al., 2014).

Existen varias investigaciones enfocadas a las estrategias de control no lineal que se utilizan en los diferentes sistemas de teleoperación con movimiento libre o restringido, se tienen actualmente muchos problemas que resolver en la teleoperación como es el problema de las comunicaciones y los retardos de tiempo entre ambas señales. Se tienen varias investigaciones que están encaminada a resolver problemas de algoritmos de control no lineal bilateral (Raju et al., 1989; Yokokohji and Yoshikawa, 1992).

Actualmente los sistemas de teleoperación robóticos son usados principalmente para realizar tareas en ambientes que pueden ser peligrosos y difíciles de llegar para el ser humano ya que son manipulados remotamente, algunos ejemplos de aplicaciones son la industria eléctrica, aeroespacial, militar, química, petrolera, nuclear, submarina, médica, entre otras. Un sistema de teleoperación robótico está compuesto de un operador humano, manipulador local (maestro), un manipulador remoto (esclavo) y una interfaz de comunicación. Existen dos tipos de sistemas de teleoperación robóticos unilateral es aquel en el que solo el robot maestro(local) envía información de posición y fuerza al robot esclavo(remoto); y el sistema bilateral es cuando se tiene comunicación en ambos sentidos de los robots manipuladores, es decir se tiene intercambio de posición y fuerza.

En la sección Introducción se describe el estado del arte de la teleoperación y sus aplicaciones, en la sección I se describe la cinemática directa y el modelo dinámico del dispositivo háptico Geomagic Touch Omni Phantom. El equipo experimental utilizado para realizar la práctica es descrito a detalle en la sección 2, la comunicación entre ambos dispositivos hápticos, así como la configuración son descritos en la sección 3, los resultados experimentales y descripción del controlador se encuentran en la sección 4 y por último en la sección 5 se muestra las conclusiones del trabajo.

1. Modelo matemático

El dispositivo háptico Geomagic Touch Omni Phantom es modelado como un brazo robot de cadena articulada en lazo abierto con cuerpo rígido (eslabones) conectados en serie por articulaciones de revolución o prismáticas movidas por actuadores. Un extremo de la cadena se une a un sistema de coordenadas fijo en la base del manipulador mientras que el otro extremo queda libre. Para el control de los manipuladores se desea saber la descripción espacial del extremo libre con respecto al sistema de coordenadas de referencia fijo de la base (Spong & Vidyasagar, 2008).

1.1. Cinemática directa

Al estudio analítico de la geometría de los manipuladores con respecto a un sistema de coordenadas de referencia fijo sin considerar las fuerzas/momentos que originan dicho movimiento se le conoce como estudio cinemático (Kelly & Santibáñez, 2003, Reyes, 2011).

La Figura 1 muestra la asignación de los sistemas de coordenadas para el dispositivo Omni PHANToM® de acuerdo con el algoritmo de Denavit - Hartenberg, considerando su posición inicial donde los ángulos de las tres articulaciones de posición θ_1 , θ_2 y θ_3 son igual a cero grados. (Chávez, 2017) y en la Figura 2 se muestra los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 ya con valores diferentes de cero.

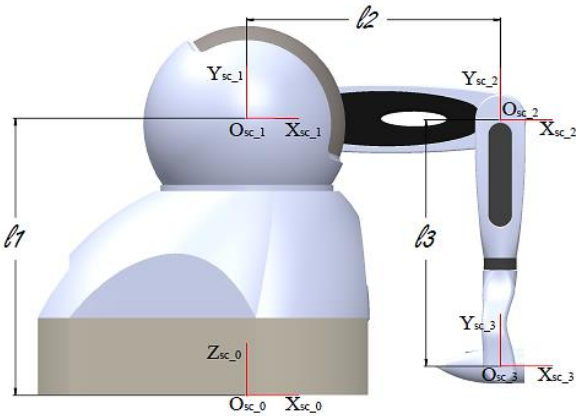


Figura 1. Asignación de los sistemas de coordenadas

La matriz de transformación homogénea propuesta por Denavit y Hartenberg es la que se muestra en la ecuación (1).

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Una vez asignados los sistemas de coordenadas O_{sc_i} a cada articulación, se obtienen los parámetros de Denavit-Hartenberg para cada eslabón del Omni PHANToM®, donde $l_1 = l_2 = l_3 = 1$ es la longitud de cada eslabón, tal como se muestran en la tabla 1 (Chávez, 2017).

Tabla 1 - Parámetros de Denavit – Hartenberg

Articulación	θ_i	α_i	d_i	a_i
1	θ_1	90°	l_1	0
2	θ_2	0°	0	l_2
3	$\theta_3 - 90$	0°	0	l_3

Sustituyendo los parámetros de la tabla 1 en la ecuación (1), se obtiene la ecuación (2).

$${}^0A_3 = \begin{bmatrix} C\theta_1 S\theta_3 & C\theta_1 C\theta_3 & S\theta_1 & l(C\theta_1 S\theta_3 + C\theta_1 C\theta_2) \\ S\theta_1 S\theta_3 & S\theta_1 C\theta_3 & -C\theta_1 & l(S\theta_1 S\theta_3 + S\theta_1 C\theta_2) \\ -C\theta_3 & S\theta_3 & 0 & l(-C\theta_3 + S\theta_2 + 1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

De la ecuación (2) se tiene el vector de posición cartesiana que resuelve el problema cinemático directo de posición, ecuación (3).

$$\begin{aligned} x &= l(C\theta_1 S\theta_3 + C\theta_1 C\theta_2) \\ y &= l(S\theta_1 S\theta_3 + S\theta_1 C\theta_2) \\ z &= l(-C\theta_3 + S\theta_2 + 1) \end{aligned} \quad (3)$$

donde $S\theta_i = \sin \theta_i$ y $C\theta_i = \cos \theta_i$.

La validación experimental de la cinemática directa (3) que representa la posición cartesiana del efector final proyectada en el sistema de coordenadas se muestra en la Figura 2, donde: $\theta_1 = 19.19^\circ$, $\theta_2 = 60.09^\circ$ y $\theta_3 = 59.53^\circ$. (Chávez Montejano, 2017)

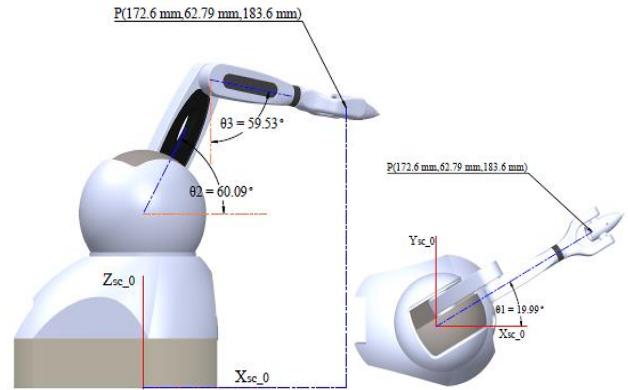


Figura 2 – Validación de la cinemática directa del dispositivo.

1.2. Modelo dinámico

Para el control de manipuladores es necesario conocer las ecuaciones que describen su comportamiento dinámico, dichas formulaciones matemáticas relacionan el movimiento del robot y las fuerzas implicadas en el mismo. El estudio dinámico depende en gran parte de los parámetros del robot (masa y geometría de sus eslabones, inercias, etc.) así como las fuerzas aplicadas en cada una de sus articulaciones y este se puede obtener a partir de leyes físicas (newtoniana y lagrangiana).

Para obtener el modelo matemático del dispositivo háptico Omni PHANToM®, se emplea la formulación Euler-Lagrange para obtener las ecuaciones dinámicas del robot (Kelly & Santibáñez, 2003, Spong & Vidyasagar, 2008, Reyes, 2011), ecuación 3, n son los grados de libertad.

$$H(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta) = \tau \quad (3)$$

donde

- τ vector par generalizado aplicado a las articulaciones $i=1,2,\dots,n$ de dimension $n \times 1$.
- θ vector de posición angular de dimension $n \times 1$.
- $\dot{\theta}$ vector de velocidad angular de dimension $n \times 1$.
- $\ddot{\theta}$ vector de aceleración angular de dimension $n \times 1$.
- $H(\theta)$ matriz simétrica positiva inercial de $n \times n$.
- $C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ matriz de fuerzas de Coriolis y centrífugas no lineales de $n \times n$.
- $g(\theta)$ vector de la fuerza de la carga gravitatoria $n \times 1$.

Los parámetros de la dinámica del dispositivo háptico Omni PHANToM® son mostrados a detalle en (Chávez, 2017).

2. Equipo experimental

En esta sección se describe a detalle el software, hardware y controladores de interfaces utilizadas en este trabajo, como también las características de los diversos elementos que se deben tener para su validación experimental. En la Figura 3, se muestra los dos dispositivos hápticos, uno es maestro y el otro es el esclavo, dos computadoras y software.

Referente al software, se debe tener instalado el siguiente software:

- Sistema operativo Windows 7 o versiones más actuales a esta.
- Matlab® 2015b o versiones más recientes, siempre y cuando sean para 64 bits.
- Driver del adaptador USB a Ethernet para cable de red del Omni PHANToM®: SMSC LAN7500-WDF-v2.0.1.1
- Drivers del Omni PHANToM®: Geomagic_Touch_Device_Driver_2014
- OpenHaptics_Academic_3.1
- PHANSIM_Setup x64-bit Windows
- Librería PHANSIM



Figura 3. Equipo experimental

El hardware que se debe tener para la teleoperación es el siguiente equipo:

- Dispositivo háptico Geomagic® Touch™ OMNI PHANToM®
- Equipo de computo
- Adaptador USB 2.0 a Gigabit Ethernet USB21000S2

2.1 Dispositivo háptico

El dispositivo háptico Geomagic Touch (OMNI PHANToM®) de la Figura 4 proporciona una auténtica navegación tridimensional y retroalimentación de fuerza e integran el sentido del tacto en los sistemas de modelado 3D, así como en aplicaciones comerciales y de investigación. Este dispositivo háptico de 3D Systems puede medir de forma precisa la posición espacial 3D (a lo largo de los ejes X, Y y Z) y la orientación (giro, inclinación y dirección) del lápiz de mano. Utiliza motores para crear las fuerzas de retorno en la mano del usuario para simular el tacto y la interacción con objetos virtuales, es decir, proporciona una retroalimentación de fuerza de 3 grados de libertad (DOF) (3D System Inc., 2014).



Figura 4. Geomagic® Touch™ (OMNI PHANToM®)

En la tabla 2 se muestran las especificaciones del dispositivo háptico OMNI PHANToM®.

Tabla 2. Especificaciones del dispositivo Geomagic Touch Omni Phantom®

Área de trabajo de la fuerza	160An × 120Al × 70P mm
Rango de movimiento	Movimiento de la mano con giro de la muñeca
Resolución nominal de posición	0:055mm
Fuerza máxima	3:3N
Retroalimentación de fuerza	x, y, z
Interfaz	Puerto Ethernet conforme a RJ45
Inercia (masa aparente en la punta)	0:45g
Fuerza de Retroalimentación	X, Y, Z
Detección de posición	X, Y, Z (encoders digitales)
Rigidez	Eje X > 1.26 N/mm Eje Y > 2.31 N/mm Eje Z > 1.02 N/mm

2.2 Equipo de cómputo

En equipo de cómputo utilizado para el desarrollo de este proyecto, es una computadora de escritorio marca Dell, modelo Studio XPS 435T/9000, con un procesador Intel® Core™ i7 CPU 920 @2.67Ghz, 2668 Mhz, 4 procesadores principales, 8 procesadores lógicos, con una memoria RAM de 4GB y con sistema operativo Windows 7 Ultimate de Microsoft.

2.2 Software Simulink

Es un entorno de programación basado en bloques para la simulación de varios dominios, apoya en la generación de códigos automáticamente, proporciona un editor gráfico, bibliotecas para modelar y simular sistemas dinámicos. Viene integrado con MATLAB® lo que permite un mayor potencial.

2.2.1. Librería PHANSIM

Es una herramienta para Simulink® de los dispositivos hápticos de SenSable, tal es el caso del OMNI PHANToM®, esta herramienta es para fines académicos y desarrollada para el control de movimiento de robots y la teleoperación. Tradicionalmente, para utilizar estos dispositivos se recurre a generar códigos en C/C++ utilizando las librerías de OpenHaptics® (SDK), mismas que son proporcionadas por el fabricante. Con el uso de la herramienta PHANSIM se facilita la comunicación y control de los dispositivos háptico.

2.2.2. Adaptador USB - Ethernet

El Adaptador USB 2.0 a Gigabit Ethernet USB21000S2 es un dispositivo portátil clasificado como periférico bidireccional, que permite comunicación de datos entre equipos de cómputo y la red ethernet. Además, ofrece una conexión

USB Ethernet fiable, añadiendo un único puerto Ethernet RJ45 a un sistema informático USB habilitado, con soporte para conectarse a redes Gigabit.

Compatible con versiones anteriores de USB 1.0 sistemas informáticos compactos y portátiles. Proporciona la ayuda para las características tales como marcos del Jumbo y el etiquetado de VLAN. Se conecta al puerto USB y en la mayor parte de los casos requiere de controladores para ser reconocido correctamente por el equipo de cómputo (StarTech LTD, 2012).

3. Comunicación

En esta sección se realiza el estudio e implementación para la comunicación de los dispositivos hápticos utilizados y el trabajo en el software de aplicación Matlab®, en este caso se optó por trabajar con el Omni PHANToM® ya que es un dispositivo háptico muy funcional respecto a su auténtica navegación tridimensional y retroalimentación de fuerza en el sentido del tacto.

3.1. Drivers

Para la comunicación del sistema de teleoperación es necesario contar con los controladores indicados, quienes son los que nos proporcionan ese enlace para que el CPU pueda identificar los dispositivos requeridos con el propósito de hacer la transmisión y recepción de datos.

En primer lugar, se instalan el controlador del adaptador USB a Ethernet que permite utilizar el puerto USB como extensión a un puerto Ethernet ya que el CPU utilizado únicamente provee un solo puerto de este tipo. Es necesario recalcar que el sistema de teleoperación consta de dos dispositivos hápticos Omni PHANToM®, uno denominado como maestro y otro como esclavo por lo cual es necesario dos puertos LAN/RJ45 y este adaptador nos proporciona esa extensión.

Referente a la configuración del dispositivo háptico Omni PHANToM®, se deben descargar e instalar dos programas, el Geomagic Touch Setup y Diagnostic. En el caso del Setup permite agregar la configuración del nombre, modelo, interfaz, emparejamiento, restablecimiento de ángulos y configuración LAN del dispositivo háptico. En el Diagnostic permite seleccionar el dispositivo vinculado previamente para su calibración, posición de los encoders digitales, posición del efector final y su orientación, un "Test Box" en el cual se analizan las fuerzas ejercidas en un área delimitada, entre otras aplicaciones. Una vez instalado y calibrado los dispositivos hápticos se realiza la configuración de la comunicación entre ambos dispositivos.

3.2. Comunicación de dispositivo hápticos vía red LAN

Dentro del desarrollo para la comunicación del sistema de teleoperación entre dos dispositivos hápticos Omni PHANToM® en una misma red de área local (LAN. Por lo tanto, el Omni PHANToM® designado como maestro envía los valores de su posición angular bajo el protocolo UDP (User

Datagram Protocol) proveniente de la PC de este, dado que el Omni PHANToM® denominado esclavo recibe dichos paquetes de datos a través de la misma PC del maestro, por lo que cada PC consta de envío y recibo de datos para efectuar el control y el monitoreo. Por lo que en la Figura 5 se muestra el esquema de comunicación del sistema de teleoperación unilateral.



Figura 5. Esquema de Comunicación de Sistema de Teleoperación Bilateral.

3.3. Protocolo UDP

Para establecer la comunicación entre ambos dispositivos hápticos se ha utilizado el protocolo UDP. El protocolo de datagramas de usuario (UDP) es un protocolo del nivel de transporte basado en el intercambio de datagramas. Permite el envío de dichos datagramas a través de la red sin que se haya establecido previamente una conexión, ya que el propio datagrama incorpora suficiente información de direccionamiento en su cabecera. Tampoco tiene confirmación ni control de flujo, por lo que los paquetes pueden adelantarse unos a otros; y tampoco se sabe si ha llegado correctamente, ya que no hay confirmación de entrega o recepción. Sin embargo, se emplea dado que no se requiere de una confiabilidad crucial, no introduce retardos para establecer una conexión y se emplea en tareas de control con una alta velocidad de transmisión.

Por lo anterior, para implementar esta comunicación se manejan dos computadoras, cabe mencionar que el papel que desempeñan cada una de las PCs de los Omni PHANToM® es de envío y recepción de datos como se ha mencionado con anterioridad. Para ello se crearon programas en el entorno de Matlab/Simulink® por medio de diagramas de bloques para establecer la conexión UDP para el intercambio de datos de la posición angular de ambos dispositivos hápticos.

3.4. Configuración de IP

Para poder realizar la conexión de ambos manipuladores, se debe configurar la dirección IP estática en la PC del maestro, así como de igual manera en la del esclavo. Esto es dentro del panel de control en Windows con la siguiente dirección: Redes e Internet → Centro de redes y recursos compartidos → Cambiar configuración del adaptador, se muestran todas las conexiones a red disponibles por lo cual se deberá de ingresar a la red deseada en la que establecerá la conexión, se deberá seguir la siguiente dirección para realizar la configuración: Propiedades de Ethernet → Funciones de red → Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4).

3.5. Envío y recibo de datos del dispositivo háptico

La lectura y escritura de posición del Omni PHANToM® es llevada a cabo a través de la librería PHANSIM Library, la cual proporciona cada uno de estos 3 valores de posición lineal y

angular por la respectiva cantidad de GDL (Grados de Libertad). Así mismo, permite que estas se puedan manipular dentro del área de trabajo o alcance del robot pueda ser posicionado en el punto que se desee. De tal modo que para el envío y recibo de posiciones angulares, se crea un programa de bloques en Simulink®. Dicho programa es ejecutado desde la computadora de los robots predefinido como maestro y esclavo, donde se usan los bloques para la comunicación llamados UDP Send y UDP Receive, como también los bloques de PHANToM Library y el control aplicado para el sistema de teleoperación.

Para ello se debe de hacer mención acerca del retardo implicado en la comunicación entre ambos dispositivos hápticos se ha visto presente en el sistema.

4. Resultados experimentales

En esta sección se prueba el esquema de control propuesto PD. Un operador humano teleopera un robot manipulador, y recibe retroalimentación de posición/fuerza proveniente del robot manipulador que interactúa con el entorno.

En cuanto a la relación del sistema de teleoperación con la posición angular de los dispositivos hápticos, se han realizado trayectorias definidas por el operador, actuando directamente con el Omni PHANToM designado como maestro. Ambos dispositivos se han limitado a trabajar un tiempo en específico con el fin de obtener las gráficas de error de posición (posición deseada contra la posición real).

4.1. Controlador lineal PD

El controlador lineal PD es bien conocida en la literatura y se escribe como en la ecuación (4) la ley de control:

$$\tau = -k_p \tilde{\theta} - k_d \dot{\tilde{\theta}} \quad (4)$$

donde

θ es la posición angular del robot.

θ_d es la posición angular deseada.

$\dot{\theta}$ es la velocidad angular real.

$\dot{\theta}_d$ es la velocidad angular deseada.

$\tilde{\theta} = \theta - \theta_d$ es el error de posición angular.

$\dot{\tilde{\theta}} = \dot{\theta} - \dot{\theta}_d$ es el error de velocidad angular.

k_p es una matriz diagonal positiva de $n \times n$.

k_d es una matriz diagonal positiva de $n \times n$.

Las ganancias son sintonizadas con algoritmos experimentales como el método de Ziegler y Nichols, una vez aproximada se emplea el método heurístico.

4.2. Resultados experimentales

El experimento consiste que con el dispositivo maestro (local) envíe una señal deseada q_{dm} al dispositivo esclavo (remoto), y envíe una señal de retroalimentación q_{re} el esclavo al maestro para cerrar el lazo. Las ganancias del controlador son $kp_1=0.505$, $kp_2=0.75$, $kp_3=0.70$, $kd_1=0.18$, $kd_2=0.3$, y $kd_3=0.25$.

En la comunicación entre ambos dispositivos se tiene un pequeño tiempo de retardo de 4.5 milisegundos.

Para la validación experimental se utiliza una trayectoria suave de forma aleatoria deseada de las 3 articulaciones del Omni PHANToM® maestro q_{dm} frente a las del esclavo en una vista en 2D proyectada q_{re} y la comparación entre ambas, como se muestra en las Figuras 6, 7 y 8 las trayectorias de los eslabones en orden ascendente. Como se pueden observar la posición deseada (maestro) q_{dm} es similar a la posición real (esclavo) q_{re} .

En la Figura 9 se muestra el error de posición en radianes para cada una de las articulaciones. Se observa el error a lo largo de la trayectoria a partir de los 5 segundos.

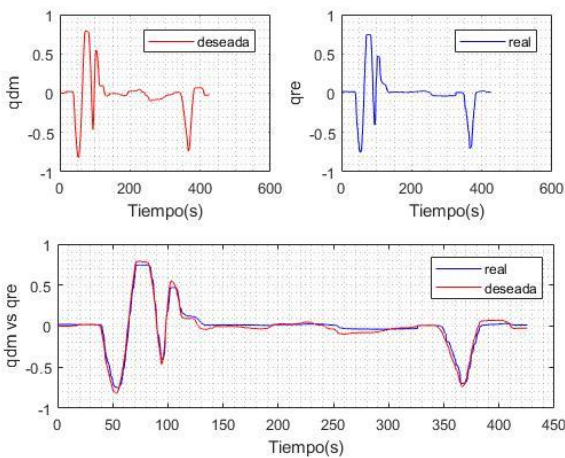


Figura 1. Vista en 2D de la trayectoria deseada del maestro contra la real del esclavo del eslabón 1.

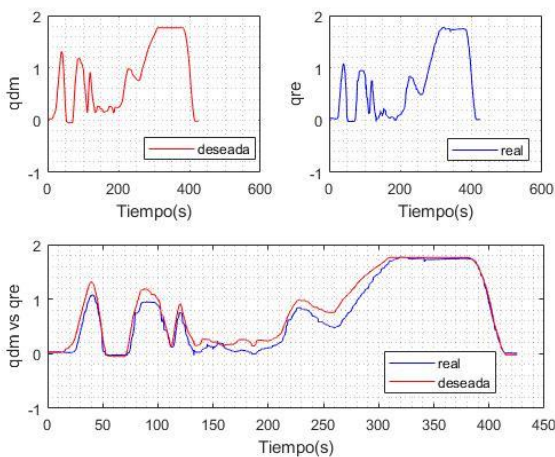


Figura 2. Vista 2D de la trayectoria deseada del maestro contra la real del esclavo del eslabón 2.

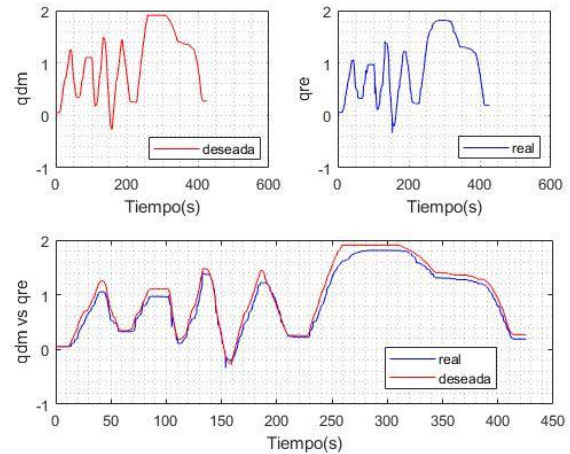


Figura 3. Vista 2D de la trayectoria deseada del maestro contra la real del esclavo del eslabón 3.

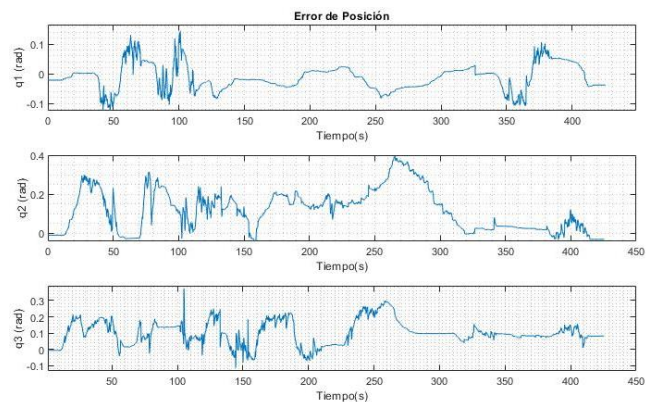


Figura 9. Error de posición.

Por último, en la Figura 10 se muestra la evidencia al emplear la comunicación entre ambos dispositivos hápticos Omni PHANToM® para el sistema de teleoperación unilateral funcionando correctamente previo a la configuración de red LAN bajo el protocolo UDP más aún el control PD propuesto.



Figura 10. Funcionamiento del Sistema de Teleoperación Bilateral a través de la red LAN.

5. Conclusión

Los resultados obtenidos a partir del establecimiento de la comunicación presente en los dispositivos para el sistema de teleoperación unilateral permite ver un pequeño retardo de tiempo de 4.5 milisegundos, tomando en cuenta que el

retardo es pequeño el controlador PD funciona correctamente.

Se implementó un sistema de teleoperación compuesto de dispositivos hápticos Omni PHANTOM® para conocer e interpretar su funcionamiento bajo el protocolo UDP, dicho protocolo se ajusta sin complicación dando como resultado al sistema la alta transferencia en el intercambio de datos en una red LAN

Además, el esquema del controlador lineal PD propuesto y el algoritmo de control demuestra óptimos resultados ante las perturbaciones presentes que son la gravedad y el retardo evidenciado entre la trayectoria generada del maestro con las del esclavo.

Como trabajo futuro, se espera aplicar diversos esquemas de controladores no lineales, con el objetivo de reducir el error en los sistemas a causa de la estabilidad y transparencia afectadas por el retardo de tiempo con un compensador de dicho retardo.

English Summary

Unilateral teleoperation through a PD.

Abstract

In this article we present the unidirectional teleoperation with two haptic devices through a PD linear control. In recent years, researchers in the area of robotics are on track to manipulate and remotely control robots. Currently, the main contributions of teleoperation systems abound in different areas of application such as medicine, industry, construction, hazardous tasks, work in unsafe or unstable environments, in difficult to reach places, tasks of high complexity, among others, since it allows the user protection, security and does not risk his physical integrity. In this article we describe the antecedents, state of the art, experimental results which allows us to demonstrate that the control works correctly despite having the disadvantage of the delay time between the haptic devices, both are of 3 degrees of freedom, in addition, the description detailed experimental equipment, the configuration of the software to select and calibrate the haptic devices. On the other hand, the teleoperation between the manipulative robots is carried out in the Matlab / Simulink® software, where the IP addresses are assigned and the packet traffic between both devices is controlled.

Keywords: Teleoperation, PD control, haptic device, manipulated variable, communication, feedback, UDP protocol.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del Programa de Fortalecimiento de la Calidad Educativa PFCE 2019 de la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima.

Referencias

- 3D System Inc. (2014). *Geomagic Touch Haptic Device - User Guide*.
- Alfaro Ballesteros, S. (2012). *Sistema de teleoperación mediante una interfaz natural de usuario*. Tesis de Maestría.
- Cerón Correa, A. (2015). *Sistemas Robóticos Teleoperados*. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*(1), 62-72.
- Chávez Montejano, F. (2017). *Controladores no lineales aplicados al dispositivo háptico Omni PHANTOM®*. Tesis de Maestría. Universidad de Colima. Manzanillo, Colima.
- Chellali, R. (2010). Tele-operation and human robots interactions. *In Remote and Telerobotics*.
- Duff, E. S., Roberts, J. M., & Corke, P. I. (2003). Automation of an underground mining vehicle. *Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSS International Conference on*, 3, 3775 - 3780. doi:10.1109/IROS.2003.1249742
- Guzmán, D. M., Ballesteros, A. R., Sánchez, Á. E., & Alonso, M. Á. (2014). Robots de inspección aplicados en el sector eléctrico. *136 Divulgación*, 136-140.
- Kelly, R., & Santibáñez, V. (2003). *Control de Movimiento de Robots Manipuladores*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Koenemann, J., Burget, F., Bennowitz, M. (2014). *Real-time imitation of human whole-body motions by humanoids*. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2806-2812
- Mendoza Fuente, P. F. (2017). *Perforadora de rocas teleoperada para la minería profunda, con control autónomo del brazo hidráulico en un grado de libertad*. Tesis Maestría Mecatrónica. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- Nuño Ortega, E., & Basañez Villaluenga, L. (2004). *Teleoperación [de robots]: técnicas, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente*.
- Raju G. J., G. C. Verghese y T. B. Sheridan (1989). *Design Issues in 2-Port Network Models of Bilateral Remote Teleoperation*. Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1316-1321.
- Reyes, Fernando. (2011). *ROBÓTICA - Control de Robots*. Manipuladores. Ed. Alfaomega. ISBN: 978-607-7071-90-7.
- Sheridan T. B (1989). *Telerobotics. Automática*, Vol. 25(4).
- Spong, M. W., & Vidyasagar, M. (2008). *Robot dynamics and control*. Ed. J. Wiley, & Sons, Edits.
- StarTech LTD. (2012). *Adaptador Tarjeta de Red Externa NIC USB - Puerto Gigabit Ethernet 1Gbps RJ45*. Obtenido de <https://www.startech.com/mx/support/USB21000S2>
- Yokokohji Y. and T. Yoshikawa (1992). *Bilateral Control of Master-Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 849-858.