

Implementación en un laboratorio virtual de un sistema teleoperado en configuración maestro esclavo con comunicación basada en el protocolo TCP/IP

E. Rafael Hernández-Ríos^a, Mario A. Magaña-Méndez^{a,*}, J. Gerardo Benítez-Morales^a, Omar A. Domínguez-Ramírez^b, Julio C. Ramos-Fernández^a

^aPosgrado en Mecatrónica, Universidad Politécnica de Pachuca, Carretera Pachuca - Cd. Sahagún km 20 Ex-Hacienda de Santa Bárbara, Zempoala, Hidalgo, México

^bCentro de Investigación en Tecnologías de Información y Sistemas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carr. Pachuca-Tulancingo, Km 4.5, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México

Resumen

Este documento presenta el desarrollo de un laboratorio virtual con un sistema de teleoperación entre dos robots virtuales, los robots diseñados para este sistema son un dispositivo PHANTOM OMNI y el robot PUMA 560. Para ello se consideraron las restricciones físicas que se describen de manera matemática en los modelos cinemáticos y dinámicos de los robots. Se realizó una plataforma mediante el software Simulink para simular la teleoperación de ambos robots, esta permite agregar retardos para observar el comportamiento del sistema con la latencia que podría tener la comunicación. Se desarrollaron pruebas de control implementando un controlador PID y un control por par calculado, con ello se puede realizar una comparación en el comportamiento del sistema con dos controles distintos para observar los posibles efectos de los retardos causados por la red de comunicación en el seguimiento de trayectorias.

Palabras Clave: Teleoperación, Laboratorio Virtual, PUMA 560, PHANTOM OMNI

1. Introducción

Grupos de investigación del área de robótica se han interesado en los sistemas teleoperados durante las últimas décadas debido a los beneficios que su implementación proporciona en los distintos sectores productivos y de bienestar social. La teleoperación logra efectuar consignas de control precisas en la ejecución de tareas a distancia. La presencia virtual del operario evita la exposición del mismo a ambientes peligrosos, por lo consiguiente la integridad del operario jamás es expuesta; por otra parte, los sistemas teleoperados, permiten subsanar el traslado de los especialistas para atender necesidades especiales como son el caso de las cirugías.

Los sistemas teleoperados están conformados comúnmente por un robot local (robot maestro) y otro robot remoto (robot esclavo), un canal de comunicación y un operador humano. El robot maestro es manipulado por el operador con el fin de enviar consignas a distancia, al robot esclavo para interactuar con

su entorno y ejecutar una actividad (Correa, 2006).

Aunque estos sistemas son diseñados para operar de una forma intuitiva con el operador, en algunas ocasiones se presentan ciertos accidentes por la falta de entrenamiento por parte del operario. Por lo tanto, ha sido necesario emplear ambientes virtuales con el propósito de habituar al operario al sistema teleoperador antes que utilice el robot esclavo físico.

Uno de los primeros trabajos enfocados en aplicar la realidad virtual en la robótica (Freund and Robmann, 1997) se centró en la teleoperación, donde un operario interactuaba con un ambiente virtual a través de un guante que sensaba la posición y orientación de la mano, además el usuario hacía uso de unas gafas con display, que le permitían visualizar el ambiente virtual.

El trabajo de Cui (Cui et al., 2006) expone el uso de un robot virtual que consiste en un brazo robótico montado sobre un móvil, el robot es operado en un ambiente de realidad virtual con la finalidad de diseñar una planificación de trayectoria para la tarea a realizar en un ambiente real. Posteriormente, los datos de la trayectoria del robot virtual son enviados a un robot real con el objetivo de realizar la tarea encomendada. La parte móvil del robot real presenta ciertos deslizamientos que provocan un ligero error al tratar de alcanzar la posición deseada; por lo tanto, el operador debe ajustar la posición del robot a través de una teleoperación que emplea el uso de cámaras y marcas

*Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: edgar_hdez94@micorreo.upp.edu.mx (E. Rafael Hernández-Ríos), maralb_mm@upp.edu.mx (Mario A. Magaña-Méndez), josegerardo@upp.edu.mx (J. Gerardo Benítez-Morales), omar@uaeh.edu.mx (Omar A. Domínguez-Ramírez), jramos@upp.edu.mx (Julio C. Ramos-Fernández)

URL: www.upp.edu.mx (Mario A. Magaña-Méndez)

para alcanzar la posición deseada.

En (Yamada et al., 2008) presentan un sistema teleoperado en configuración maestro esclavo entre un operario con dos joysticks y un robot tipo retroexcavadora, con interacción háptica. El robot constructor está equipado con cámaras estéreo, 4 cilindros hidráulicos con sus respectivas servoválvulas, la posición y la fuerza de los cilindros son medidos mediante sensores. Todo el sistema es controlado por dos computadoras, la primera recibe los mandos por parte del operario para procesar la información y enviarla al robot constructor; la segunda computadora recibe la información de los sensores colocados en el robot constructor con el propósito de generar las respectivas señales para la interacción háptica con el operador y al mismo tiempo, la información enviada por las cámaras es empleada para construir un ambiente virtual y desplegar la ubicación de cada eslabón del robot en tiempo real con el propósito que el operario pueda observar la posición de cada eslabón del robot. Posteriormente, (Tang et al., 2009) añade a las palancas de los joysticks una interacción háptica con el fin de proporcionar al operario mayor información sobre la tarea que se está realizando con el robot de construcción y así evitar posibles accidentes en la ejecución de la actividad.

Algunos investigadores (N. Rodriguez, 2002) han empleado ambientes virtuales para proveer al operador una visualización del robot en 3D, tratando de atacar la problemática del retardo de las señales. Sin embargo, existen ciertas diferencias entre el modelo virtual y el robot real, ocasionando que el sistema teleoperado no garantice coherencia deseada. El trabajo de (Zainan et al., 2009) propone emplear técnicas de calibración entre el modelo virtual y el modelo real con la finalidad de que el ambiente virtual sea una herramienta útil al minimizar el retardo de las señales.

Otras de las aplicaciones de los ambientes virtuales es el trabajo de (R. Barrera-Gálvez, 2015) donde se presenta una plataforma para la rehabilitación de pacientes con discapacidades en el antebrazo. El paciente emplea un dispositivo PHANTOM OMNI con la finalidad del interactuar con un ambiente virtual y así el paciente deberá realizar ciertos movimientos para su rehabilitación.

Los trabajos anteriormente citados, usan un robot real como robot maestro, mientras que al robot esclavo lo presentan como real o virtual, con una realimentación al operador en un ambiente virtual o de realidad aumentada.

En el presente trabajo se expone la creación de un sistema teleoperado a partir de dos robots virtuales; el robot maestro es un dispositivo háptico PHANTOM OMNI y el robot esclavo es un robot PUMA 560, cada robot virtual se encuentra en diferentes equipos de cómputo y se comunican a través del protocolo de comunicación TCP/IP. Esta plataforma virtual proporciona al operador un sistema teleoperado considerando las restricciones físicas de los robots mediante sus respectivas cinemáticas y dinámicas. Lo que la hace adecuada como laboratorio virtual de experimentación es que no se requiere contar físicamente con los robots por lo que las pruebas en la plataforma, de ninguna manera causarían perjuicio alguno; al comunicarse a través de una red física como puede ser internet, se puede estudiar el efecto de los retardos en el intercambio de las consignas de ope-

ración.

La organización del trabajo es la siguiente: en la sección 2 se describe la obtención y comprobación de los modelos cinemáticos del dispositivo PHANTOM OMNI y el robot PUMA 560. En la sección 3 se describe la obtención del modelo dinámico del robot PUMA 560 por medio del método Euler-Lagrange y se muestran de manera explícita las matrices de inercia, Coriolis y de gravedad. El entorno virtual para la teleoperación se describe en la la sección 4. Los resultados experimentales y pruebas de controladores se describen en la sección 5. Finalmente, en la sección 6 se discuten los resultados obtenidos.

2. Modelo Cinemático

Los movimientos espaciales de cada robot virtual son descritos a partir de modelos matemáticos que restringen sus desplazamientos con base a sus configuraciones físicas respectivamente. A continuación, se presenta el modelo cinemático del dispositivo PHANTOM OMNI y el robot PUMA 560.

2.1. Modelo cinemático del dispositivo PHANTOM OMNI

El PHANTOM OMNI es un dispositivo que está diseñado para realizar tareas hápticas, es utilizado como maestro en sistemas teleoperados o en sistemas que interactúan con ambientes virtuales como se muestra en los trabajos de (Song et al., 2006), (Tzafestas et al., 2008) y (Sansanayuth et al., 2012), el dispositivo PHANTOM OMNI cuenta con seis grados de libertad, de los cuales, tres grados son actuados y otros tres subactuados.

2.1.1. Cinemática directa

La cadena cinemática del dispositivo PHANTOM OMNI se ilustra en la Figura 1 donde se muestra la posición del dispositivo del cual se obtuvo el modelo cinemático directo.

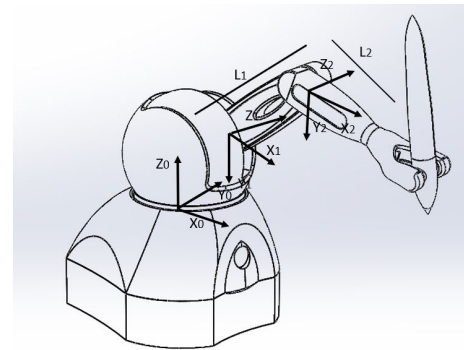


Figura 1: Cadena cinemática del PHANTOM OMNI

La cinemática directa está definida con base al trabajo de (Jarillo-Silva et al., 2009) como

$$\begin{aligned} P_{x_o} &= -S_1(L_1C_2 + L_2S_3), \\ P_{y_o} &= L_3 - L_2C_3 + L_1S_2, \\ P_{z_o} &= -L_4 + C_1(L_1C_2 + L_2S_3), \end{aligned} \quad (1)$$

donde $S_x = \sin(\theta_x)$, $C_x = \cos(\theta_x)$ y $x_1, 2, 3$. La notación se establece como P_{x_0} , P_{y_0} , y P_{z_0} representan la posición del efector final del dispositivo PHANTOM OMNI, L_1 y L_2 son la longitud de los eslabones 1 y 2, respectivamente L_3 y L_4 representan variables auxiliares que ayudan en la obtención del modelo cinemático.

2.1.2. Cinemática Inversa

La cinemática inversa es el cálculo de los ángulos $[\theta_1, \theta_2, \theta_3]$ de las articulaciones a partir de la posición del efector final del robot en una coordenada cartesiana como se muestra en la Figura 2.

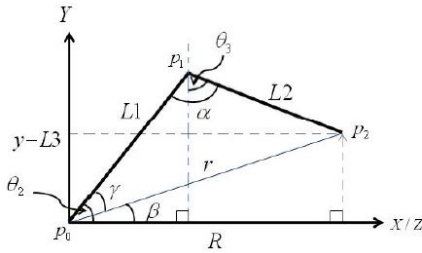


Figura 2: Cinemática inversa PHANTOM OMNI

La solución que define a θ_1 , θ_2 y θ_3 está dada por (Jarillo-Silva et al., 2009)

$$\begin{aligned} \theta_1 &= -\text{atan2}(P_{x_0}, P_{z_0} + L_4), \\ \theta_2 &= \gamma + \beta, \\ \theta_3 &= \theta_2 + \alpha - \frac{\pi}{2}, \end{aligned} \quad (2)$$

donde θ_1 , θ_2 y θ_3 son los ángulos de rotación correspondientes a los eslabones 1, 2 y 3, mientras que las variables γ , β , α , R y r están dadas por

$$\begin{aligned} \gamma &= \cos^{-1} \left(\frac{L_1^2 + r^2 - L_2^2}{2L_1r} \right), \\ \beta &= \text{atan2}(y - L_3, R), \\ \alpha &= \cos^{-1} \left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - r^2}{2L_1L_2} \right), \\ R &= \sqrt{P_{x_0}^2 + (P_{z_0} + L_4)^2}, \\ r &= \sqrt{P_{x_0}^2 + (P_{z_0} + L_4)^2 + (P_{y_0} - L_3)^2}. \end{aligned}$$

2.2. Modelo Cinemático del robot PUMA 560

El Unimation PUMA 560 es un robot con seis grados de libertad y todas las articulaciones rotacionales, es decir, son un mecanismo 6R (Craig, 2006).

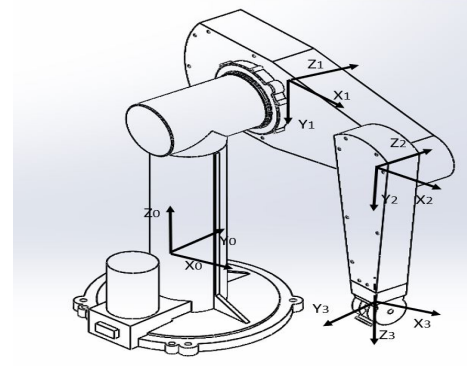


Figura 3: Cadena cinemática robot PUMA 560

2.2.1. Cinemática directa

A partir de los ejes coordenados propuestos en la Figura 3 se obtienen las ecuaciones que describen la posición del efector final a través de los parámetros de Denavit-Hatemberg (DH), estas están definidas como:

$$\begin{aligned} P_{x_p} &= C_1(a_2C_2 + a_3C_{23} - d_4S_{23}) - d_3S_1, \\ P_{y_p} &= S_1(a_2C_2 + a_3C_{23} - d_4S_{23}) - d_3C_1, \\ P_{z_p} &= -a_3S_{23} - a_2S_2 - d_4C_{23}, \end{aligned} \quad (3)$$

donde la notación se establece como $S_{xy} = \sin(q_x + q_y)$ y $C_{xy} = \cos(q_x + q_y)$.

2.2.2. Cinemática inversa

El problema cinemático inverso se obtiene por el método algebraico propuesto en (Craig, 2006), en el caso de este trabajo se considera el robot PUMA 560 como un robot de 3 grados de libertad, donde no se contempla la orientación de la muñeca esférica. La solución de la cinemática inversa se define como

$$\begin{aligned} q_1 &= \text{atan2}(P_{y_p}, P_{x_p}) - \text{atan2} \left(d_3, \pm \sqrt{P_{x_p}^2 + P_{y_p}^2 - d_3^2} \right), \\ q_3 &= \text{atan2}(a_3, d_4) - \text{atan2} \left(K, \pm \sqrt{a_3^2 + d_4^2 - K^2} \right), \\ q_2 &= q_{23} - q_3, \end{aligned} \quad (4)$$

donde

$$K = \frac{P_{x_p}^2 + P_{y_p}^2 + P_{z_p}^2 - a_2^2 - a_3^2 - d_3^2 - d_4^2}{2a_2},$$

$$\begin{aligned} q_{23} &= \text{atan2}[(-a_3 - a_2C_3)P_{z_p} - (C_1P_{x_p} + S_1P_{y_p})(d_4 - a_2S_3), \\ &\quad (a_2S_3 - d_4)P_{z_p} - (a_3 + a_2C_3)(C_1P_{x_p} + S_1P_{y_p})]. \end{aligned}$$

2.2.3. Comprobación de los modelos cinemáticos

A partir de los modelos cinemáticos de cada robot, se propone comprobar sus representaciones matemáticas a través del empleo de una trayectoria, que representará las posiciones del efector final de robot. Los valores de la trayectoria son sustituidos en la cinemática inversa con la finalidad de obtener las coordenadas angulares de cada articulación y evaluar estos ángulos en un modelo 3D (Los modelos 3D se describen en la sección

4); posteriormente, las coordenadas angulares son sustituidos en la cinemática directa para obtener la comparación entre la posición y la posición propuesta, es decir, medir el error. Este procedimiento se describe mediante un diagrama a bloques, tal como se muestra en la Figura 4.

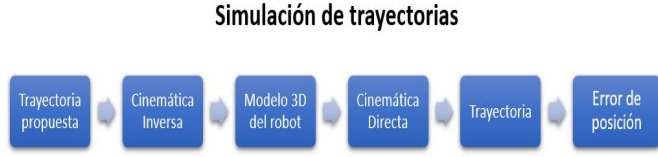


Figura 4: Proceso de comprobación de modelo cinemático

Los resultados de la comprobación de las cinemáticas del dispositivo PHANTOM OMNI se muestran en la Figura 5, donde las trayectorias propuestas para las coordenadas P_{x_0} , P_{y_0} son una señal senoidal y cosenoidal, respectivamente, mientras que la posición en P_{z_0} es una constante.

En el caso del robot PUMA, se propuso una trayectoria para la posición en x como $0.2 + r \sin(t)$ y en la posición en y como $0.2 + r \cos(t)$, donde $r = 0.05 \sin(2t)$. La posición en z es una constante con un valor de cero.

En ambos casos, se observa que la trayectoria propuesta y los resultados de la cinemática directa coinciden, existiendo un error máximo en el caso del PHANTOM OMNI de $19 \times 10^{-4} \text{m}$ y en el PUMA 560 de $2 \times 10^{-4} \text{m}$ por lo tanto se puede inferir la validez de las cinemáticas de los dos robots.

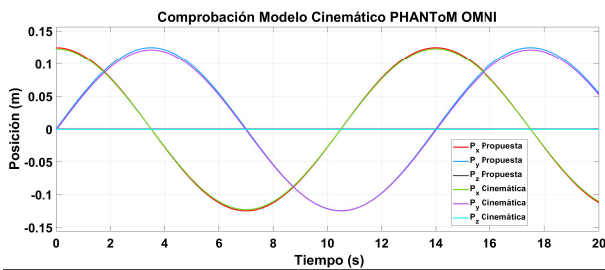


Figura 5: Comprobación de modelo cinemático del dispositivo PHANTOM OMNI

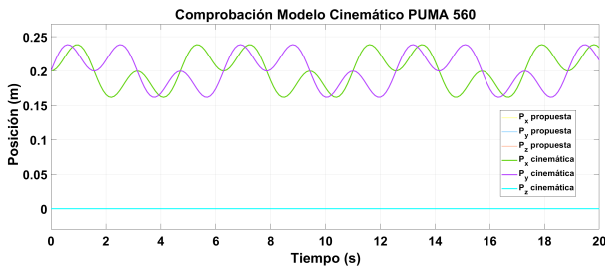


Figura 6: Comprobación de modelo cinemático del robot PUMA 560

3. Modelo Dinámico

El modelo dinámico del robot PUMA 560 se describe como

$$\tau = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q), \quad (5)$$

donde q es $[q_1, q_2, q_3]^T \in R^{3 \times 1}$, $D(q)$ representa la matriz de inercias, $C(q, \dot{q})$ representa la matriz de Coriolis y $G(q)$ la matriz de fuerzas gravitacionales. El modelo dinámico se puede obtener por distintos métodos como Euler-Lagrange o Newton-Euler. En este trabajo se obtiene la dinámica del robot PUMA 560 por el método que se muestra en (Spong et al., 2005), donde la matriz de inercias $D(q)$ está dada por

$$D(q) = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

donde

$$\begin{aligned} d_{11} = & I_1 + \frac{a_2^2 m_2}{2} + \frac{a_2^2 m_3}{2} + \frac{a_3^2 m_3}{2} + d_3^2 m_3 + I_2^2 + I_3^3 \\ & + \frac{a_2^2 m_2 \cos(2q_2)}{2} + \frac{a_2^2 m_3 \cos(2q_2)}{2} \\ & + \frac{a_3^2 m_3 \cos(2q_2 + 2q_3)}{2} \\ & + a_2 a_3 m_3 \cos(q_3) + a_2 a_3 m_3 \cos(2q_2 + q_3), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_{12} = & I_2^2 \cos(q_1) \cos(q_2) \sin(q_1) \sin(q_2) - \\ & I_2^2 \cos(q_1) \sin(q_1) \sin(q_2) - \\ & a_3 d_3 m_3 \cos(q_2) \sin(q_3) - a_3 d_3 m_3 \cos(q_3) \sin(q_2) \\ & - a_2 d_3 m_3 \sin(q_2), \end{aligned}$$

$$d_{13} = -a_3 d_3 m_3 \sin(q_2 + q_3),$$

$$\begin{aligned} d_{21} = & I_2^2 \cos(q_1) \cos(q_2) \sin(q_1) \sin(q_2) \\ & - I_2^2 \cos(q_1) \sin(q_1) \sin(q_2) \\ & - a_3 d_3 m_3 \cos(q_2) \sin(q_3) \\ & - a_3 d_3 m_3 \cos(q_3) \sin(q_2) - a_2 d_3 m_3 \sin(q_2), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_{22} = & \frac{I_2^2 \cos(q_2)^2}{8} - \frac{I_2^2 \cos(4q_1)}{8} \\ & + a_2^2 m_2 + a_2^2 m_3 + a_3^2 m_3 + \frac{9I_2^2}{8} \\ & + I_3^3 - \frac{I_2^2 \cos(q_2)}{4} + \frac{I_2^2 \cos(4q_1) \cos(q_2)}{4} \\ & - \frac{I_2^2 \cos(4q_1) \cos(q_2)^2}{8} + 2a_2 a_3 m_3 \cos(q_3), \end{aligned}$$

$$d_{23} = I_3^3 + m_3 a_3^2 + a_2 m_3 \cos(q_3) a_3,$$

$$d_{31} = -a_3 d_3 m_3 \sin(q_2 + q_3),$$

$$d_{32} = I_3^3 + m_3 a_3^2 + a_2 m_3 \cos(q_3) a_3,$$

$$d_{33} = I_3^3 + m_3 a_3^2,$$

La matriz $C(q, \dot{q})$ se conforma de la siguiente manera

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

donde

$$\begin{aligned} c_{11} = & -\dot{q}_2 \left(\frac{a_3^2 m_3 \sin(2q_2 + 2q_3)}{2} \right. \\ & + \frac{a_2^2 m_2 \sin(2q_2)}{2} \\ & + \frac{a_2^2 m_3 \sin(2q_2)}{2} + a_2 a_3 m_3 \sin(2q_2 + q_3) \\ & - \frac{a_3 m_3 \dot{q}_3 (a_3 \sin(2q_2 + 2q_3))}{2} \\ & \left. + \frac{a_2 \sin(q_3) + a_2 \sin(2q_2 + q_3)}{2} \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{12} = & 3 I_2^2 \dot{q}_2 \cos(q_1) \cos(q_2)^2 \sin(q_1) \\ & - \frac{a_2^2 m_3 \dot{q}_1 \sin(2q_2)}{2} \\ & - \frac{a_3^2 m_3 \dot{q}_1 \sin(2q_2 + 2q_3)}{2} \\ & - 2 I_2^2 \dot{q}_2 \cos(q_1)^3 \sin(q_1) \\ & - 3 I_2^2 \dot{q}_2 \cos(q_1) \cos(q_2) \sin(q_1) \\ & - a_2 a_3 m_3 \dot{q}_1 \sin(2q_2 + q_3) \\ & - \frac{a_2^2 m_2 \dot{q}_1 \sin(2q_2)}{2} \\ & + 4 I_2^2 \dot{q}_2 \cos(q_1)^3 \cos(q_2) \sin(q_1) \\ & - a_3 d_3 m_3 \dot{q}_3 \cos(q_2 + q_3) \\ & - 2 I_2^2 \dot{q}_2 \cos(q_1)^3 \cos(q_2)^2 \sin(q_1) \\ & - a_2 d_3 m_3 \dot{q}_2 \cos(q_2) \\ & a_3 d_3 m_3 \dot{q}_2 \cos(q_2) \cos(q_3) \\ & + a_3 d_3 m_3 \dot{q}_2 \sin(q_2) \sin(q_3), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{13} = & -a_3 m_3 (a_2 \dot{q}_1 \sin(q_3) + a_2 \dot{q}_1 \sin(2q_2 + q_3) \\ & + a_3 \dot{q}_1 \sin(2q_2 + 2q_3) + 2 d_3 \dot{q}_2 \cos(q_2 \\ & + q_3) + 2 d_3 \dot{q}_3 \cos(q_2 + q_3))/2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{21} = & \frac{I_2^2 \dot{q}_2 \sin(4q_1)}{4} + \frac{a_2^2 m_2 \dot{q}_1 \sin(2q_2)}{2} \\ & + \frac{a_2^2 m_3 \dot{q}_1 \sin(2q_2)}{2} \\ & - \frac{I_2^2 \dot{q}_2 \sin(4q_1) \cos(q_2)}{2} \\ & - I_2^2 \dot{q}_1 \cos(q_1)^2 \sin(q_2) \\ & + I_2^2 \dot{q}_1 \sin(q_1)^2 \sin(q_2) \\ & + \frac{I_2^2 \dot{q}_2 \sin(4q_1) \cos(q_2)^2}{4} \\ & + I_2^2 \dot{q}_1 \cos(q_1)^2 \cos(q_2) \sin(q_2) \\ & - I_2^2 \dot{q}_1 \cos(q_2) \sin(q_1)^2 \sin(q_2) \\ & + \frac{a_3^2 m_3 \dot{q}_1 \cos(2q_2) \sin(2q_3)}{2} \\ & + \frac{a_3^2 m_3 \dot{q}_1 \cos(2q_3) \sin(2q_2)}{2} \\ & + a_2 a_3 m_3 \dot{q}_1 \cos(2q_2) \sin(q_3) \\ & + a_2 a_3 m_3 \dot{q}_1 \sin(2q_2) \cos(q_3), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{22} = & \dot{q}_2 \sin(q_2) I_2^2 \cos(q_1)^4 \cos(q_2) \\ & - \dot{q}_2 \sin(q_2) I_2^2 \cos(q_1)^4 \\ & - \dot{q}_2 \sin(q_2) I_2^2 \cos(q_1)^2 \cos(q_2) \\ & + \dot{q}_2 \sin(q_2) I_2^2 \cos(q_1)^2 \\ & - \dot{q}_1 \sin(q_1) I_2^2 \cos(q_1) \cos(q_2)^2 \\ & + \frac{\dot{q}_1 \sin(q_1) I_2^2 \cos(q_1) \cos(q_2)}{2} \\ & + \frac{\dot{q}_1 \sin(2q_1) I_2^2}{4} + \frac{a_2 d_3 m_3 \dot{q}_1 \cos(q_2)}{2} \\ & - a_2 a_3 m_3 \dot{q}_3 \sin(q_3), \end{aligned}$$

$$c_{23} = -a_2 a_3 m_3 \sin(q_3) (\dot{q}_2 + \dot{q}_3),$$

$$\begin{aligned} c_{31} = & \frac{a_3 m_3 \dot{q}_1 (a_3 \sin(2q_2 + 2q_3))}{2} \\ & + \frac{a_2 \sin(q_3) + a_2 \sin(2q_2 + q_3)}{2}, \end{aligned}$$

$$c_{32} = a_2 a_3 m_3 \dot{q}_2 \sin(q_3),$$

$$c_{33} = 0, \quad (8)$$

Finalmente la matriz $G(q)$ que representa los efectos gravitatorios en el sistema se representa como

$$G(q) = \begin{bmatrix} g_{11} \\ g_{21} \\ g_{31} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

donde

$$g_{11} = 0,$$

$$\begin{aligned} g_{21} = & 3 g m_3 (l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 - q_3)) \\ & - g l_2 m_2 \cos(q_2), \end{aligned}$$

$$g_{31} = -3 g l_3 m_3 \cos(q_2 - q_3).$$

Los parámetros utilizados para la dinámica del robot PUMA 560 se obtienen a partir de (Armstrong et al., 2005).

4. Entorno Virtual de Teleoperación

Los ambientes virtuales proporcionan al usuario una retroalimentación visual sobre la tarea que se está ejecutando, de esta manera se obtiene una gran cantidad de información en un instante de tiempo. En el caso particular de este trabajo, el operario puede observar la posición y la velocidad a la que se desplazan ambos robots, dando la posibilidad al operario de controlar al robot esclavo de manera intuitiva a través del robot maestro. A continuación se describe el entorno virtual de ambos robots.

4.1. Diseño Virtual PHANToM OMNI y PUMA 560

Existen distintos métodos para diseñar modelos virtuales de robots, para este trabajo, se desarrollaron los modelos en *SolidWorks* y posteriormente se diseñaron en formato VRML (siglas del inglés Virtual Reality Modeling Language) a través del software *V Realm Builder* que incluye *Matlab*. Para la teleoperación se importaron los modelos VRML por medio de *VRML Toolbox* de Matlab (MathWorks, 2004). En la Figura 7 se muestra la comparación entre el dispositivo PHANToM OMNI real, el modelo en *Solidworks* y el robot virtual.



Figura 7: Dispositivo PHANToM OMNI real, diseño en Solidworks y Robot Virtual en VRML

Así mismo en la Figura 8 se muestra la comparativa entre el robot PUMA 560, y los modelos virtuales descritos anteriormente.

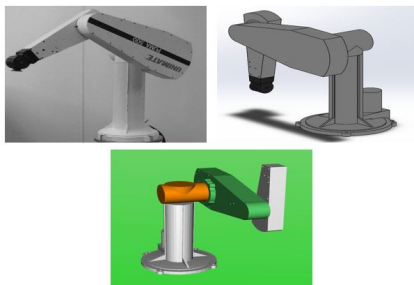


Figura 8: Robot PUMA 560 real, diseño en Solidworks y Robot Virtual en VRML

Los movimientos de los robots virtuales están restringidos por sus modelos cinemáticos y dinámicos con el propósito de dar una animación real de los robots.

4.2. Sistema de comunicación entre los robots

Para la comunicación se utiliza el protocolo TCP/IP, este protocolo establece un conducto de comunicación punto a punto entre dos computadoras, es decir, cuando se requiere la transmisión de un flujo de datos entre dos equipos, el protocolo TCP establece un conducto exclusivo entre dichos equipos por el cual los datos serán transmitidos y este perdurará hasta que la transmisión haya finalizado (Corona, 2004); gracias a esto, el protocolo TCP garantiza que los datos enviados de un extremo de la conexión lleguen al otro extremo y en el mismo orden en que fueron enviados. Las características que posee TCP hacen que el protocolo sea conocido como un protocolo orientado a conexión.

La forma de comunicación se realiza por medio de sockets como se muestra en la Figura 9, estos son un mecanismo de comunicación entre procesos que permiten la comunicación bidireccional tanto en procesos que se ejecutan en una misma máquina como en procesos lanzados en diferentes máquinas como se menciona en (Solá, 2007). Para ello se maneja el modelo de cliente-servidor, el servidor únicamente debe conocer el puerto determinado para la comunicación esperando la conexión de un cliente; el cliente debe conocer el puerto y la dirección IP del servidor para poder conectarse.

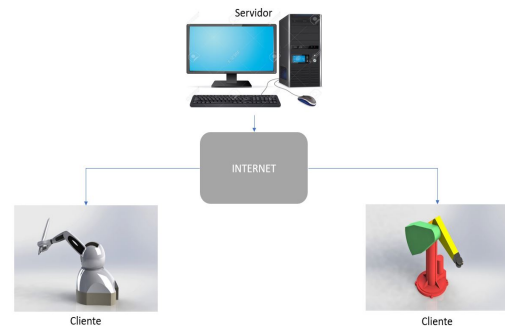


Figura 9: Esquema de comunicación entre robots virtuales por medio de sockets

La comunicación se desarrolló en el software de Simulink con la librería *Instrument Control Toolbox* (MathWorks, 2007) ya que cuenta con las herramientas para la comunicación TCP/IP Cliente para envío y recepción de datos. Para el desarrollo del servidor se utiliza el programa Qt Creator y por medio de Matlab se implementan ambos robots como clientes.

En la Figura 10 se muestra el diagrama de bloques en Simulink para el envío de datos del dispositivo PHANToM OMNI virtual, en el cual se utilizan barras de desplazamiento para la simulación del movimiento del robot, se crean paquetes de bytes, en este caso con datos del tipo 'double' y se envían por medio del bloque *TCP/IP Client Send*, donde se configura la dirección IP del servidor y el puerto de comunicación.

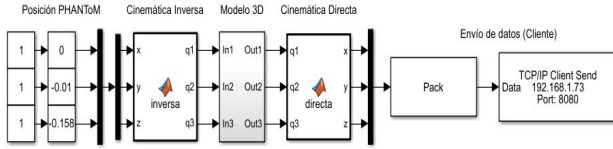


Figura 10: Esquema de comunicación dispositivo PHANToM OMNI virtual por medio de sockets

Posteriormente se reciben las coordenadas enviadas a través del socket como se muestra en el diagrama de la Figura 11 y se realiza la teleoperación entre los robots virtuales.

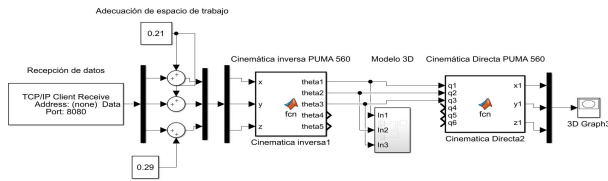


Figura 11: Esquema de comunicación robot PUMA 560 virtual por medio de sockets

4.3. Mapeo de las variables de posición entre robot maestro y robot esclavo

Se definen los espacios de trabajo de ambos robots para realizar una adecuación entre sus movimientos, ya que, el espacio de trabajo del robot PUMA 560 es mayor al espacio de trabajo del dispositivo PHANToM OMNI. El espacio de trabajo del dispositivo PHANToM OMNI se obtuvo utilizando los parámetros de movilidad reportados por (Martin and Trivino, 2006), cuyos límites de posición se definen a través en el modelo cinemático; del mismo modo se delimita el movimiento del robot PUMA 560 por medio de su modelo cinemático y se grafican sus espacios de trabajos como se muestra en la Figura 12.

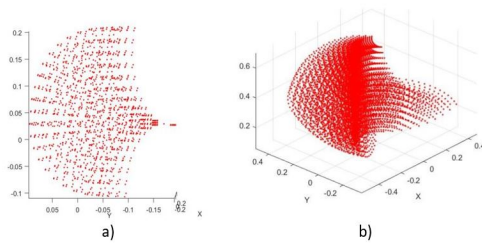


Figura 12: a) Espacio de trabajo dispositivo PHANToM OMNI, b) Espacio de trabajo robot PUMA 560

En este trabajo, se realiza una adecuación en los espacios de trabajo de ambos robots de modo que el movimiento sea simétrico en distancia, es decir, si se manipula 1 cm del dispositivo PHANToM OMNI, el robot PUMA 560 se moverá 1 cm. Para ello se delimita el espacio de trabajo de ambos robots en un rectángulo como se muestra en la Figuras 13-14, esto facilita la relación entre sus movimientos.

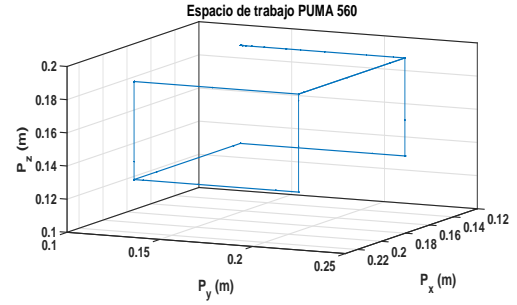


Figura 13: Espacio de trabajo definido del robot PUMA 560

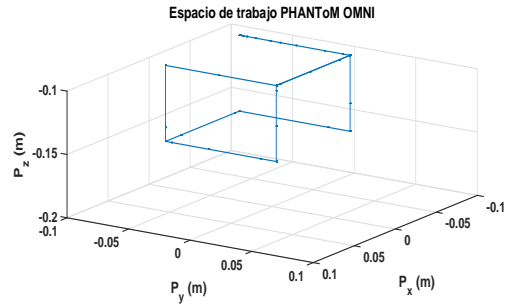


Figura 14: Espacio de trabajo definido del dispositivo PHANToM OMNI

La adecuación entre las coordenadas del dispositivo PHANToM OMNI y el robot PUMA es a través de transformación lineal con el propósito de obtener la simetría deseada, dicha expresión matemática está dada por:

$$\begin{bmatrix} P_{x_p} \\ P_{y_p} \\ P_{z_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{x_o} \\ P_{y_o} \\ P_{z_o} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

donde m_1 , m_2 y m_3 son constantes de ganancia para cada una de las coordenadas de posición entre el robot maestro y el robot esclavo, b_1 , b_2 y b_3 son constantes de ajuste (*offsets*) entre los espacios de trabajo de los robots sobre los ejes horizontal, lateral y vertical respectivamente.

Para comprobar la adecuación de los espacios de trabajo se realiza la teleoperación entre los dos robots virtuales, tal como se muestra en la Figura 15, donde se observa una trayectoria circular ejecutada por el PHANToM OMNI y la reproducción de la trayectoria por el robot PUMA 560. Los valores empleados en la adecuación de espacios de trabajos son: $m_1 = 1$, $m_2 = 1$, $m_3 = 1$, $b_1 = 0.21$, $b_2 = 0.21$ y $b_3 = 0.29$

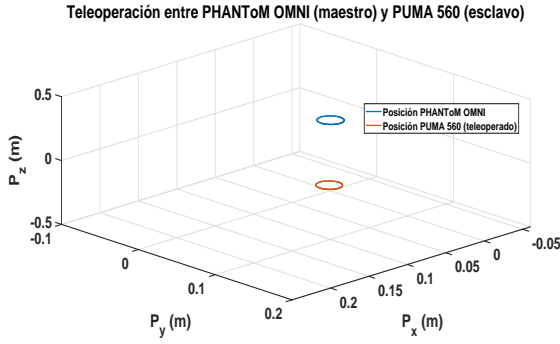


Figura 15: Teleoperación entre dispositivo PHANTOM OMNI y robot PUMA 560

5. Resultados Experimentales del Sistema Teleoperado

En esta sección, se presentan las pruebas realizadas en la plataforma del sistema de teleoperación virtual empleando la cinemática de ambos robots y la dinámica del robot PUMA 560, así como los modelos 3D. Primeramente se muestran los resultados del seguimiento de trayectorias respecto a una trayectoria dada por el robot maestro hacia el robot esclavo, los controladores utilizados para estas simulaciones fueron el control PID y el control de par calculado.

Los parámetros utilizados para el modelo cinemático del dispositivo PHANTOM OMNI se obtuvieron a partir de (Jarillo-Silva et al., 2009), siendo $L_1=L_2=0.135\text{m}$, $L_3=0.023\text{m}$ y $L_4=0.168\text{m}$ y para el robot PUMA 560 se obtuvieron a partir de (Armstrong et al., 2005) siendo $a_2=0.4318\text{m}$, $a_3=0.020\text{m}$, $d_1=0.6858\text{m}$ y $d_3=0.149\text{m}$.

5.1. Controlador Proporcional-integral-derivativo

El control proporcional-integral-derivativo (PID) es una estrategia de control muy utilizada en los sistemas robóticos debido a su simplicidad y buen funcionamiento. Este controlador está definido como

$$u = K_p \tilde{q} + K_i \int \tilde{q} dt + K_d \frac{d}{dt} \tilde{q}, \quad (11)$$

donde $u(t)=[u_1, u_2, u_3]^T \in R^{3 \times 1}$ representa una salida de control para cada articulación, $\tilde{q} = q - q_d \in R^{3 \times 1}$ representa al error entre la posición de sistema y la posición deseada.

El propósito del control PID es mantener una posición de referencia a un valor asignado y ser capaz de aceptar de manera dinámica nuevos valores de referencia (P. I-Hai Lin, 1994). Las ganancias del controlador PID se sintonizaron a partir de la herramienta *Tune* del software Simulink.

Para las pruebas de control PID se propuso una trayectoria de una rosa de cuatro pétalos definida por $P_{x_0}=0.2 + r \sin(t)$ y $P_{y_0}=0.2 + r \cos(t)$, donde $r = 0.05 \sin(2t)$. Los resultados del seguimiento de la trayectoria por parte del robot PUMA 560 se muestran en la Figura 16.

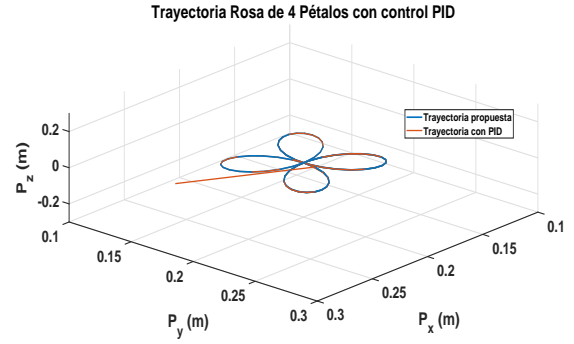


Figura 16: Seguimiento de trayectoria por parte del robot esclavo

Se realizó la medición de latencia de la red a utilizar para efectuar las pruebas, siendo esta de 0.053s , sin embargo, el valor utilizado en las simulaciones fueron de 0.1s , esto nos permite simular la latencia que se pueda dar en la comunicación por medio de la red y así estudiar el comportamiento de este controlador al existir un retardo, en las Figuras 17, 18 y 19 se puede observar que el control sigue la trayectoria a pesar del retardo.

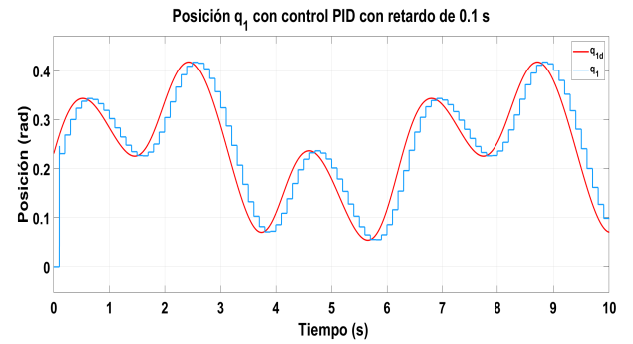


Figura 17: Posición q_1 con control PID y retardo de 0.1 s

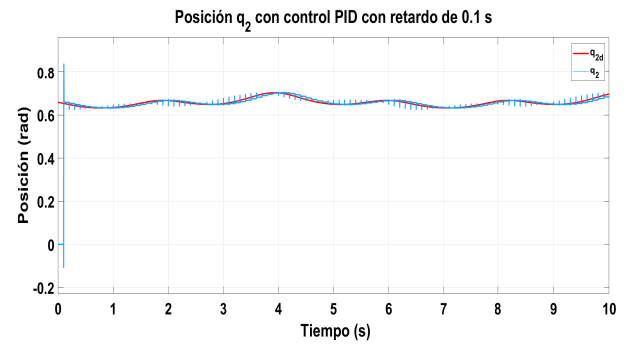


Figura 18: Posición q_2 con control PID y retardo de 0.1 s

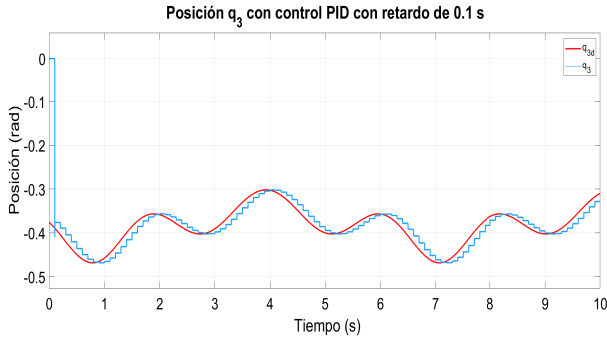
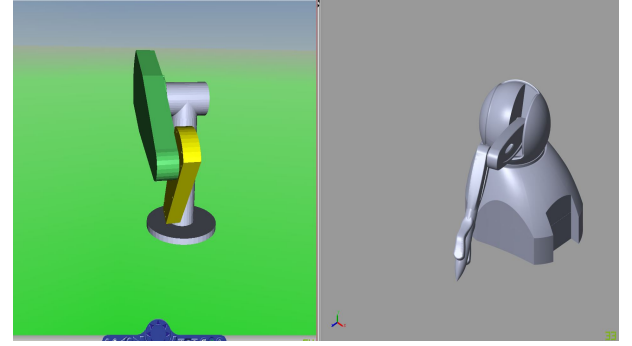
Figura 19: Posición q_3 con control PID y retardo de 0.1 s

Figura 22: Sistema teleoperado (Posición 3)

5.1.1. Sistema teleoperado virtual con control PID

Con base en la simulación del control PID, se implementó un sistema teleoperado en configuración maestro esclavo con los robots virtuales, para ello, se realiza el movimiento del dispositivo PHANTOM OMNI a través de las barras de desplazamiento y se envían las posiciones del efector final al robot PUMA 560, a su vez el robot PUMA 560 va realizando la tarea que el dispositivo PHANTOM le envía como se puede observar en la Figura 20-22.

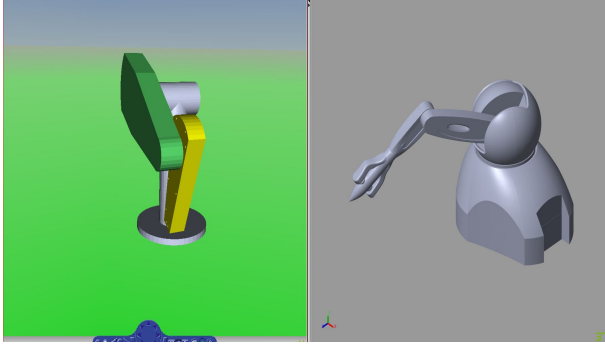


Figura 20: Sistema teleoperado (Posición 1)

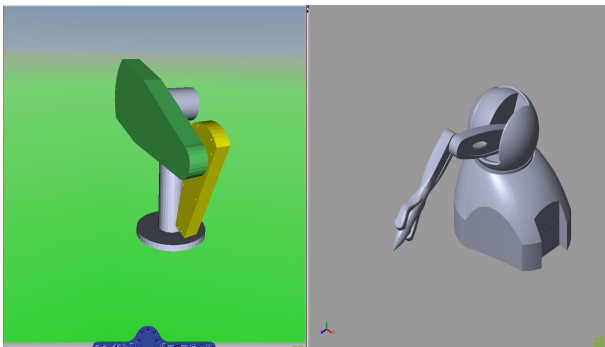


Figura 21: Sistema teleoperado (Posición 2)

5.2. Par Calculado

El control por par calculado compensa los términos no lineales de Coriolis y gravedad del sistema mediante una ley de control obtenida de (Spong et al., 2005) y se representada en la ecuación (12).

$$u = D(q)\ddot{V}_q + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q), \quad (12)$$

donde el término \ddot{V}_q representa una nueva entrada, que se conoce como un sistema integrador doble, este representa n integrales dobles desacopladas y sirve para linealizar un sistema de segundo orden, esta se define como

$$\ddot{V}_q = \ddot{q}^d(t) - K_0\tilde{q} - K_1\dot{\tilde{q}}, \quad (13)$$

donde $\tilde{q} = q - q^d$, y $\dot{\tilde{q}} = \dot{q} - \dot{q}^d$, K_0 y K_1 representan ganancias correspondientes a la posición y velocidad, estas pueden ser seleccionadas de la siguiente manera

$$K_0 = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3^2 \end{bmatrix}, K_1 = \begin{bmatrix} 2\omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & 2\omega_2 & 0 \\ 0 & 0 & 2\omega_3 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Para las pruebas del control por par calculado se propuso la misma trayectoria utilizada en las pruebas del PID, con la finalidad de comparar el comportamiento de ambos, en la Figura 23 se observa que el controlador lleva correctamente a la referencia deseada.

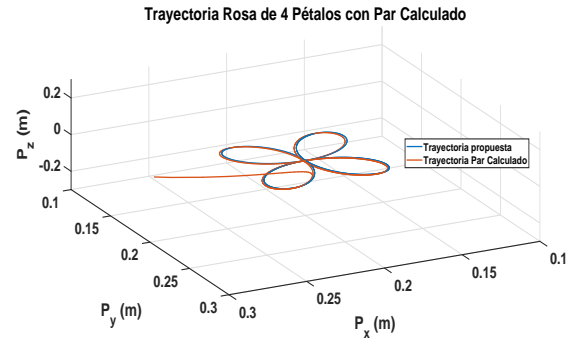


Figura 23: Trayectoria Rosa de 4 pétalos con Par Calculado

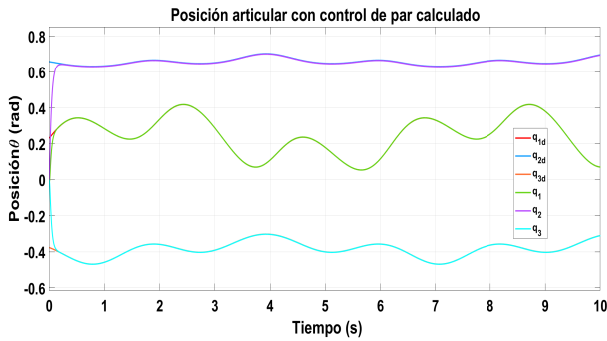


Figura 24: Posiciones articulares con control de Par Calculado

Así mismo, se realizan simulaciones con el retardo de 0.1s para comprobar que el controlador compense el error a pesar de la latencia como se muestra en la Figura 25.

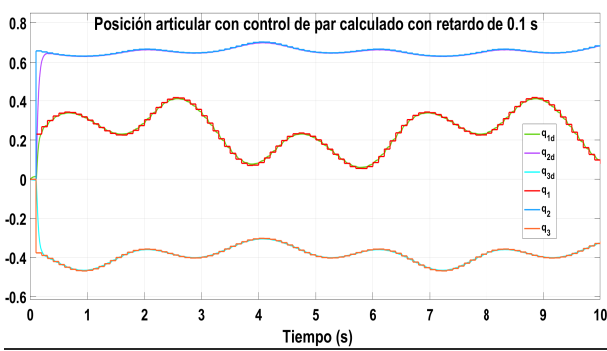


Figura 25: Posiciones articulares con control de par calculado con retardo de 0.1 s

6. Conclusión

La propuesta del presente trabajo muestra la factibilidad de emplear en un laboratorio virtual, un sistema de teleoperación empleando dos robots virtuales conectados a través del protocolo de comunicación TCP/IP. Los resultados obtenidos de las simulaciones de sus modelos cinemáticos y dinámicos permiten concluir que la plataforma propuesta además de ser funcional, es completamente fiable, manifestando los mismos problemas presentados en los robots físicos y el canal de comunicación, específicamente con los retardos.

English Summary

Implementation in a virtual laboratory of a teleoperated system in master slave configuration with communication based on the TCP/IP protocol

Abstract

This paper presents the development of a teleoperation system between two virtual robots, the designed robots for this system were a PHANTOM OMNI device and the PUMA 560 robot. For this, the physical constraints of the robots were considered through their respective kinematic and dynamic models.

A platform was made using the Simulink software to simulate the teleoperation of both robots, this allows adding delays to simulate the behavior of the systems with due to protocol communication problems. Control tests were developed to implement a PID controller and an inverse dynamics control to adjust, with this a comparison can be made in the behavior of the system with the control of the effects of the delays of the communication network in the tracking of trajectories.

Keywords:

Teleoperation, Virtual Laboratory, PUMA 560, PHANTOM OMNI .

Referencias

- Armstrong, B., Khatib, O., Burdick, J., 2005. The explicit dynamic model and inertial parameters of the PUMA 560 arm, 510–518.
DOI: 10.1109/robot.1986.1087644
- Corona, A. E., 2004. Protocolos tcp/ip de internet. Revista Digital Universitaria 5 (8), 1–7.
- Correa, A. C., 2006. Sistemas robóticos teleoperados. Ciencia e Ingeniería Neogranadina (15), 62–69.
- Craig, J., 2006. Robótica. Pearson Educación.
- Cui, F., Zhang, M.-L., Liu, B.-Q., 08 2006. Design of the mending robot based on virtual reality and intelligent decision system, 753–758.
- Freund, E., Robmann, J., 07 1997. How to control a multi-robot system by means of projective virtual reality, 759–754.
- Jarillo-Silva, A., Domínguez-Ramírez, O. A., Parra-Vega, V., Ordaz-Oliver, J. P., 2009. Phantom omni haptic device: Kinematic and manipulability. CERMA 2009 - Electronics Robotics and Automotive Mechanics Conference, 193–198.
DOI: 10.3923/ijbc.2010.190.202
- Martin, J., Trivino, G., 01 2006. A study of the manipulability of the phantom omni haptic interface., 127–128.
DOI: 10.2312/PE/vrphys/vrphys06/127-128
- MathWorks, I., 2004. Virtual Reality Toolbox. The MathWorks Inc.
- MathWorks, I., 2007. Instrument Control Toolbox 2: user's guide. The MathWorks Inc.
- N. Rodriguez, J. P. J., 09 2002. A virtual reality tool for teleoperation research, 57–62.
- P. I-Hai Lin, . S. W., 1994. Comparison on fuzzy logic and pid controls for a dc motor position controller.
DOI: 10.1109/ias.1994.377695
- R. Barrera-Gálvez, . J. M. Fernández-Ramírez., O. A. D.-R., 02 2015. Design and integration of a human-robot physical integration platform with purposes of medical diagnosis and rehabilitation of upper limb, 57–62.
- Sansanayuth, T., Nilkhamhang, I., Tungpimolrat, K., 01 2012. Teleoperation with inverse dynamics control for phantom omni haptic device. Proceedings of the SICE Annual Conference, 2121–2126.
- Solá, S., 2007. Fundamentos de sistemas operativos: teoría y ejercicios resueltos. Thomson.
- Song, G., Guo, S., Wang, Q., 2006. A tele-operation system based on haptic feedback, 1127–1131.
- Spong, M. W., Hutchinson, S., Vidyasagar, M., 2005. Robot Modeling and Control. Wiley.
- Tang, X., Yamada, H., Dingxuan, Z., Tao, N., 08 2009. Haptic interaction in tele-operation control system of construction robot based on virtual reality, 78–83.
- Tzafestas, C., Velanas, S., Fakiridis, G., 2008. Adaptive impedance control in haptic teleoperation to improve transparency under time-delay. In: 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, pp. 212–219.
- Yamada, H., Tao, N., Dingxuan, Z., 08 2008. Construction tele-robot system with virtual reality, 36–40.
- Zainan, J., Hong, L., Jie, W., Jianbin, H., 09 2009. Virtual reality-based teleoperation with robustness against modeling errors, 325–333.
DOI: 10.1016/S1000-9361(08)60106-5