

DESARROLLO DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL PARA EL CONTROL REMOTO DE UN BRAZO MANIPULADOR DE USO EDUCACIONAL

Tomás de Jesús Mateo Sanguino
Dpto. de Ingeniería Electrónica, Sistemas Informáticos y Automática (DIESIA), Universidad de Huelva
(UHU), Palos de la Frontera (Huelva), tomas.mateo@diesia.uhu.es

Francisco José Aguilar Nieto
DIESIA, UHU, Palos de la Frontera (Huelva), franciscojose.aguilar@alu.uhu.es

Juan José Chica Barrera
DIESIA, UHU, Palos de la Frontera (Huelva), juanjose.chica@alu.uhu.es

Manuel Francisco Mola Mateos
DIESIA, UHU, Palos de la Frontera (Huelva), manuelfrancisco.mola@alu.uhu.es.

José Manuel Andújar Márquez
DIESIA, UHU, Palos de la Frontera (Huelva), andujar@diesia.uhu.es

Resumen

Este trabajo presenta el diseño, desarrollo e implementación de un instrumento virtual que obtiene el modelo cinemático directo e inverso de un manipulador robótico de 5 DOF, orientado a prácticas con propósitos educativos. El brazo forma parte de un proyecto educativo en marcha más amplio, formado por una plataforma móvil de propósito general llamada VANTER (acrónimo de «Vehículo Autónomo No Tripulado Especializado en Reconocimiento»), enfocado en el desarrollo de un prototipo robótico basado en sistemas estándares abiertos, que permita a estudiantes de grado y posgrado en Ingeniería, probar diferentes estrategias y tecnologías en el ámbito de la automática. El interés de este estudio radica en que permite, mediante una aplicación de control desarrollada para tales fines, determinar los límites físicos y el rango de operación que los estudiantes pueden usar para controlar de forma remota un brazo robótico de uso educacional.

Palabras Clave: Instrumento Virtual, Vehículo Robótico, Brazo Manipulador de 5 DOF, Cinemática Directa, Cinemática Inversa, Prototipo Educativo.

1 INTRODUCCIÓN

Este artículo estudia el diseño, desarrollo e implementación de un instrumento virtual (VI en inglés) de control de un brazo robótico tipo Lynx6, como parte de un proyecto educativo de robótica en marcha. El brazo manipulador ha sido elegido por su gran versatilidad y bajo coste. El interés de este

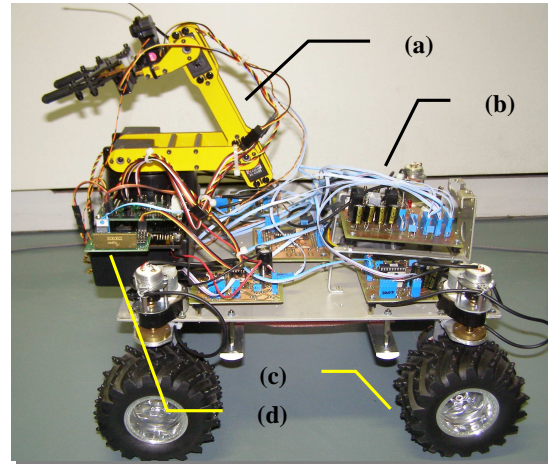


Figura 1: La fotografía muestra el prototipo VANTER con el brazo manipulador Lynx6 incorporado (a). El sistema es controlado por una red de microcontroladores I2C (b). Sus 4 ruedas motrices disponen de tracción y guiado independientes (c). Tanto el vehículo como el brazo pueden ser operados de forma remota mediante un enlace vía radio (d).

trabajo radica en que permite determinar los límites físicos y el rango de operación que los estudiantes pueden usar para controlar de forma remota el brazo robótico. Como paso previo, se ha desarrollado una aplicación que obtiene el modelo cinemático directo (FK) e inverso (IK) del brazo robótico. El paso final ha sido el desarrollo de un panel de control educativo fácil de manipular por medio de VIs desarrollados en LabView.

En la bibliografía hay disponibles un buen número de trabajos sobre el brazo robótico Lynx6. Los más sencillos usan una hoja de cálculo en Excel que permite crear una representación gráfica 2D del brazo, donde mediante ecuaciones algebraicas se obtienen los modelos FK e IK [11] y [15]. Una implementación más avanzada y realizada mediante software en C, se desarrolló para analizar la cinemática de este manipulador como solución aproximada mediante gráficos 2D [16]. Sin embargo, para estudiar otros brazos de robot de uso industrial (Scara, Puma 560-6R) hay una herramienta desarrollada en Matlab que permite definir modelos de trabajo con ecuaciones matemáticas [7]. Proyectos que trabajan en otras áreas, resuelven el modelo cinemático del brazo Lynx6 con esta herramienta, pero están interesados en controlar el brazo de robot mediante análisis de imágenes basado en colores [17] u obtener la situación de objetos en el espacio 3D [9].

Una vez que el modelo cinemático se ha resuelto por medio del algoritmo correcto, el control del hardware es el siguiente paso obligado. Hay diferentes métodos que usan tarjetas controladoras de servos directamente conectadas a un puerto RS-232 o USB, donde el brazo del robot puede desarrollar trayectorias de movimiento marcadas mediante el ratón o la palanca de un mando [22]. También hay por ejemplo, aplicaciones desarrolladas para el telecontrol del brazo Lynx6 mediante una comunicación Bluetooth [10].

El brazo manipulador Lynx6 [19] es parte de un proyecto más amplio enfocado en el desarrollo de un prototipo robótico educacional llamado VANTER (ver fig.1), acrónimo de «Vehículo Autónomo No Tripulado Especializado en Reconocimiento». La motivación de este trabajo surge del Grupo de Control y Robótica de la Universidad de Huelva. La meta principal es construir una plataforma robótica de propósito general que permita desarrollar, implementar y probar diferentes estrategias de Ingeniería con fines fundamentalmente educativos: adquisición y procesamiento de señales, programación de hardware, telecontrol, visión artificial, etc.

La plataforma educativa está compuesta por un manipulador robótico con 5 grados de libertad (DOF) y un robot móvil. Ha sido diseñado y construido por los autores de este trabajo (el grupo dispone de un taller mecánico) con un objetivo que primero fue educativo: servir como multiplataforma donde estudiantes de grado y posgrado en Ingeniería puedan probar, con un sistema real, técnicas y tecnologías en el ámbito de la automática. Este carácter educativo ha primado incluso en el hecho de que el prototipo ha sido diseñado sobre la base de sistemas estándares abiertos. No obstante lo anterior, una vez finalizado

el prototipo, su grado de versatilidad, robustez y facilidad en el control remoto, le confieren una serie de características de aplicación en escenarios reales, donde tanto los ambientes duros (radioactividad, toxicidad, etc) como las reducidas dimensiones (cañerías, cavernas, etc) prohíban la presencia humana.

El proceso de diseño, desarrollo y construcción de VANTER se ha realizado por fases: diseño de un brazo manipulador con 5 DOF equipado con pinzas capaces de recoger pequeñas muestras sólidas del suelo, así como succionar líquidos [1] (no es el mostrado en la figura 1, el cual es comercial), diseño y construcción de un vehículo gobernable tanto en modo guiado como automático [2], diseño y puesta en servicio de una red I2C de microcontroladores para controlar el hardware de bajo nivel [3], y finalmente, el diseño e implementación de un VI que permite controlar en tiempo real de forma remota, los movimientos del vehículo a través de una comunicación UHF punto a punto [4].

Tabla 1: Características mecánicas del brazo Lynx6 con los servomotores correspondientes.

Articulación	Servo Motor	Par (6 V)	Velocidad
Base	DY S0210	6 Kg/cm	0.16s/60°
Hombro	2 x HS 475HB	5.5 Kg/cm	0.18s/60°
Codo	HS 475HB	5.5 Kg/cm	0.18s/60°
Movimiento de la muñeca	HS 475HB	5.5 Kg/cm	0.18s/60°
Rotación de la muñeca	HS 85HB	3 Kg/cm	0.16s/60°
Pinza	HS 81	3 Kg/cm	0.11s/60°

2 CINEMÁTICA DIRECTA

El brazo Lynx6 (ver fig. 2) se considera un manipulador de 5 ejes de rotación (base, hombro, codo, movimiento y rotación de la muñeca), ya que aunque posee un grado más de libertad al tener una pinza funcional, ésta no afecta al posicionamiento ni a la orientación del extremo final. El brazo mecánico entrega movimientos rápidos, exactos y repetitivos gracias a los servomotores que lleva incorporados [14] (ver tabla 1), por lo que resulta un sistema económico de bajo coste y reducido tamaño, recomendable para las prácticas educativas.

La solución al problema de encontrar el modelo FK consiste en encontrar una matriz de transformación homogénea T que relacione la posición Cartesiana

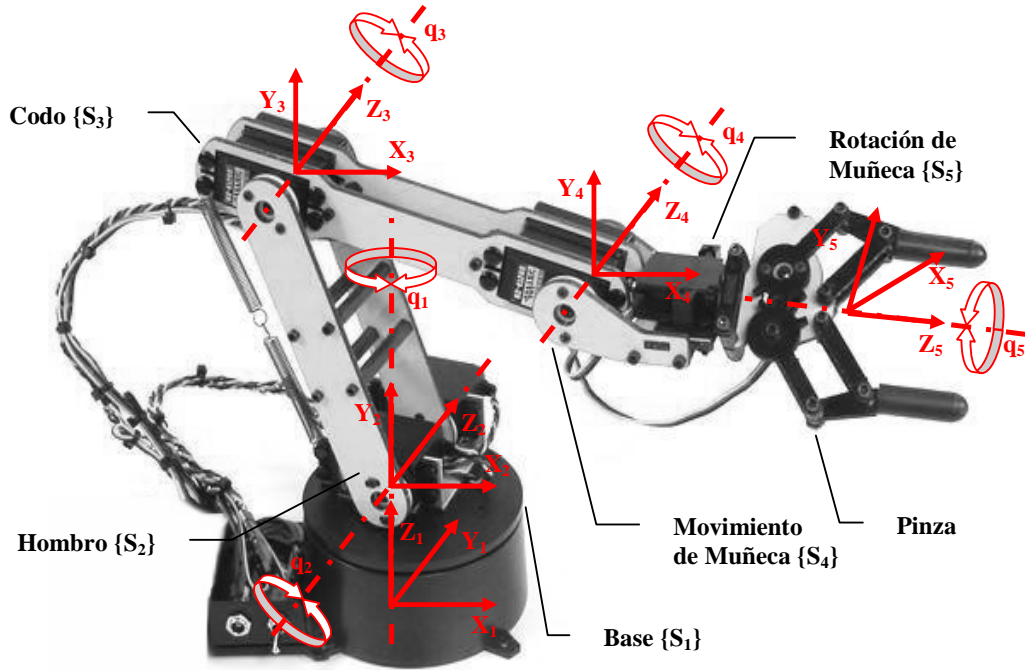


Figura 2: El modelo cinemático del brazo Lynx6 es una transformación que relaciona las coordenadas articulares con las coordenadas Cartesianas gracias al método de matrices D-H.

(Px, Py, Pz) y los ángulos de Euler (Φ , θ , Ψ) del efector del extremo del brazo respecto al origen del sistema de coordenadas situado en su base, cuando los valores de cada articulación establecen la posición y orientación de sus segmentos [5] (ver la fig. 2).

Denavit y Hartenberg (D-H) propusieron un método de matrices basado en cambios en los sistemas de referencia [8], que permite resolver de una manera sistemática el modelo FK para un brazo de propósito general. Así, escogiendo adecuadamente el sistema de coordenadas ligado a cada segmento, es posible ir de un sistema de referencia al siguiente por medio de cuatro transformaciones básicas:

$${}^{i-1}\mathbf{A}_i = \text{Rot}_z(\theta_i) \cdot \mathbf{T}(0,0,d_i) \cdot \mathbf{T}(a_i,0,0) \cdot \text{Rot}_x(\alpha_i) \quad (1)$$

donde ${}^{i-1}\mathbf{A}_i$ ($i=1, \dots, 6$) es la matriz de transformación resultante que relaciona el sistema de referencia del segmento $i-1$ con el sistema de referencia del segmento i -ésimo (ver en la fig. 2 los sistemas de referencia S_1 a S_5), $\text{Rot}_z(\theta_i)$ es la rotación alrededor del eje Z_{i-1} con un valor de θ_i , $\mathbf{T}(0,0,d_i)$ es una traslación de una distancia d_i a lo largo del eje Z_{i-1} , $\mathbf{T}(a_i,0,0)$ es una traslación de una distancia a_i a lo largo del eje X_i ,

y finalmente $\text{Rot}_x(\alpha_i)$ es la rotación alrededor del eje de X_i con un valor de α_i .

Los resultados obtenidos van a depender exclusivamente de las características geométricas del brazo manipulador. Por lo que en nuestro caso, los parámetros físicos θ_i , d_i , a_i y α_i que dependen de los valores de las articulaciones y longitud conocidos en cada sistema de coordenadas, deben asignarse y expresarse en términos de la convención D-H según se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Parámetros físicos usados en el modelo de Denavit-Hartenberg que componen la cadena cinemática mostrada en la figura 2.

θ_i	d_i (cm)	a_i (cm)	α_i	Límites
θ_1	6,5	2,5	90°	$0,180^\circ$
$\theta_2 + 90^\circ$	0	12	0°	$0,90^\circ$
$\theta_3 - 90^\circ$	0	12	0°	$0,90^\circ$
θ_4	0	15,5	-90°	$-90^\circ, 90^\circ$
θ_5	0	0	0°	$0,180^\circ$

Multiplicando las matrices individuales de la ecuación (1) en el orden correcto, la matriz de transformación ${}^{i-1}\mathbf{A}_i$ que resuelve los valores de

posición y orientación en cada sistema de coordenadas es la de la ecuación (3).

$${}^{i-1}\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} n_{xi} & o_{xi} & a_{xi} & p_{xi} \\ n_{yi} & o_{yi} & a_{yi} & p_{yi} \\ n_{zi} & o_{zi} & a_{zi} & p_{zi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Los términos individuales de las tres primeras columnas de la matriz (\mathbf{n} , \mathbf{o} , \mathbf{a}) representan la orientación del eje principal en el sistema de coordenadas. La última columna \mathbf{p} indica la posición (x, y, z) del origen. Cada uno de los términos de la matriz pueden calcularse a partir de las ecuaciones (4) a (15) siguientes:

$$n_{xi} = \cos(\theta_i) \quad (4)$$

$$n_{yi} = \sin(\theta_i) \quad (5)$$

$$n_{zi} = 0 \quad (6)$$

$$o_{xi} = -\cos(\alpha_i) * \sin(\theta_i) \quad (7)$$

$$o_{yi} = \cos(\alpha_i) * \cos(\theta_i) \quad (8)$$

$$o_{zi} = \sin(\alpha_i) \quad (9)$$

$$a_{xi} = \sin(\alpha_i) * \sin(\theta_i) \quad (10)$$

$$a_{yi} = -\sin(\alpha_i) * \cos(\theta_i) \quad (11)$$

$$a_{zi} = \cos(\alpha_i) \quad (12)$$

$$p_{xi} = a_i * \cos(\theta_i) \quad (13)$$

$$p_{yi} = a_i * \sin(\theta_i) \quad (14)$$

$$p_{zi} = d_i \quad (15)$$

Quizás, utilizando un enfoque más educativo, es conveniente expresar los términos de la matriz (3) en la forma (16).

$${}^{i-1}\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

donde $C\theta_i$ representa $\cos(\theta_i)$ y $S\alpha_i$ representa $\sin(\alpha_i)$, etc. La relación entre las matrices de transformación ${}^{i-1}\mathbf{A}_i$ forma la cadena cinemática de las articulaciones y segmentos consecutivos del brazo robótico de (17).

$$\mathbf{T} = {}^1\mathbf{A}_6 = {}^1\mathbf{A}_2 \cdot {}^2\mathbf{A}_3 \cdot {}^3\mathbf{A}_4 \cdot {}^4\mathbf{A}_5 \cdot {}^5\mathbf{A}_6 \quad (17)$$

donde \mathbf{T} es la matriz de transformación homogénea buscada. Sustituyendo los parámetros de la tabla 2 en las matrices de transformación ${}^1\mathbf{A}_2$ a ${}^5\mathbf{A}_6$ se obtienen las ecuaciones (18) a (22).

$${}^1\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & 2,5C\theta_1 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 & 2,5S\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 6,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$${}^2\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} C\theta_{2+90} & -S\theta_{2+90} & 0 & 12C\theta_{2+90} \\ S\theta_{2+90} & C\theta_{2+90} & 0 & 12S\theta_{2+90} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$${}^3\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} C\theta_{3-90} & -S\theta_{3-90} & 0 & 12C\theta_{3-90} \\ S\theta_{3-90} & C\theta_{3-90} & 0 & 12S\theta_{3-90} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$${}^4\mathbf{A}_5 = \begin{bmatrix} C\theta_4 & 0 & -S\theta_4 & 15,5C\theta_4 \\ S\theta_4 & 0 & C\theta_4 & 15,5S\theta_4 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$${}^5\mathbf{A}_6 = \begin{bmatrix} C\theta_5 & -S\theta_5 & 0 & 0 \\ S\theta_5 & C\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Calculando la multiplicación no conmutativa de la ecuación (17), se obtiene la matriz de transformación homogénea, la cual puede escribirse de forma compacta como en (23).

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{o} & \mathbf{a} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

donde (\mathbf{n} , \mathbf{o} , \mathbf{a}) es una terna ortogonal que representa la orientación y \mathbf{p} es un vector (Px, Py, Pz) que representa la posición del efector extremo del brazo.

Como ejemplo de matriz de transformación práctica, la solución obtenida para una posición en reposo del brazo con $\theta_1=0^\circ$, $\theta_2=90^\circ$, $\theta_3=0^\circ$, $\theta_4=-90^\circ$ y $\theta_5=0^\circ$, la posición y orientación alcanzada del efector del extremo (6, 0, 18.5) queda definida como en (24).

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 6 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 18,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

3 CINEMÁTICA INVERSA

El algoritmo IK hace fácil el posicionamiento del brazo cuando se dan las coordenadas (Px, Py, Pz) para el extremo efector. Los grados de libertad de un brazo de robot, son una buena medida de su capacidad de movimiento y de lo complicado que puede ser su control. No existen algoritmos generales de solución al problema de la IK y para un brazo como el Lynx6 con 5 DOF, hay varias soluciones para poder alcanzar un punto dado en el espacio. Por estas razones, resolver el modelo IK es más complejo que resolver el modelo FK.

Hay varios métodos de solución propuestos para resolver el problema del posicionamiento [14]. Por un lado, las soluciones numéricas iterativas son descartadas ya que no son aplicables al control de un manipulador en tiempo real. Por otro, las ecuaciones algebraicas son difíciles de obtener pero permiten una solución cerrada aunque no lineal del problema. Por último, encontrar una forma cerrada y relativamente fácil al problema inverso, es posible utilizando un método geométrico que relacione las coordenadas del extremo, los ángulos de las articulaciones y los parámetros físicos del brazo Lynx6 [13]. Éste es un método conveniente, ya que divide la solución en un conjunto de subproblemas geométricos en el plano. Además, resulta adecuado cuando sólo se consideran los primeros DOF que definen la posición de la pinza para minimizar las múltiples soluciones (de {S1} a {S4} en la figura 2).

Generalmente no es suficiente el posicionamiento del efector extremo del brazo en el espacio Cartesiano, por lo que es necesario orientar la muñeca con un ángulo θ_1 respecto del suelo, denominado *wartg*, para encarar los objetos. Por simplicidad, el usuario puede proporcionar un valor constante para disminuir el número de soluciones; así con este criterio, hay una única solución posible a las ecuaciones geométricas [16]. Además, para facilitar el control del brazo, el grado de apertura o cierre de la pinza también puede ser introducido a mano por el usuario. La solución a las ecuaciones se resuelve en las ecuaciones (25) a (31).

$$\theta_1 = \arctg\left(\frac{Py}{Px}\right) \quad (25)$$

$$\theta_2 = \arctg\left(\frac{x_b - (q \times z_b)}{z_b + (q \times x_b)}\right) \quad (26)$$

$$\theta_3 = \theta_2 - \arctg\left(\frac{x_b + (q \times z_b)}{z_b - (q \times x_b)}\right) \quad (27)$$

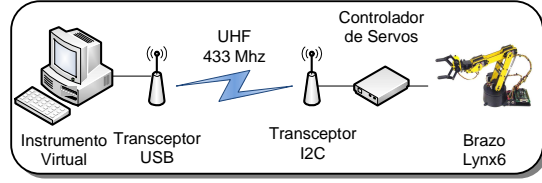


Figura 3: Esquema del sistema hardware controlado por el instrumento virtual desarrollado.

$$\theta_4 = \text{wartg} - \arctg\left(\frac{x_b + (q \times z_b)}{z_b - (q \times x_b)}\right) \quad (28)$$

donde θ_1 , θ_2 , θ_3 y θ_4 son los ángulos de las articulaciones que forman la cadena cinemática del brazo.

$$X_b = \frac{(Px - a_1 - (a_4 \times \cos(\text{wartg})))}{2 \times a_2} \quad (29)$$

$$Z_b = \frac{(Pz - d_1 - (a_4 \times \sin(\text{wartg})))}{2 \times a_2} \quad (30)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{[(X_b)^2 + (Z_b)^2] - 1}} \quad (31)$$

donde X_b y Z_b representan respectivamente las coordenadas X y Z al final del cúbito, y q es una relación para facilitar la compacidad y el manejo de las ecuaciones.

4 INSTRUMENTO VIRTUAL

Las articulaciones del brazo son operadas por servos analógicos con 180 grados de rango y de 0.45 a 0.78 grados de ancho de banda muerto. Cada posición del servo puede ser controlada por un pulso positivo entre 0.5ms y 2.5 ms, generados cada 20 ms por una tarjeta controladora [6]. La relación entre los parámetros de posición de los servos y los ángulos reales de las articulaciones, han tenido que ser determinados a mano para evitar romper los engranajes, midiendo el rango de operación del servo con el rango del pulso correcto.

La tarjeta controladora ejecuta un programa *firmware* que maneja los servos a través de un bus I2C mediante dos parámetros: la posición angular y la velocidad. Estos parámetros son definidos a través de tres bytes sin signo antes de ser enviados consecutivamente a través de un transceptor UHF de baja potencia a 19200 bps [18]. Una vez los parámetros del estado del sistema aplicados al experimento físico a controlar son definidos por los

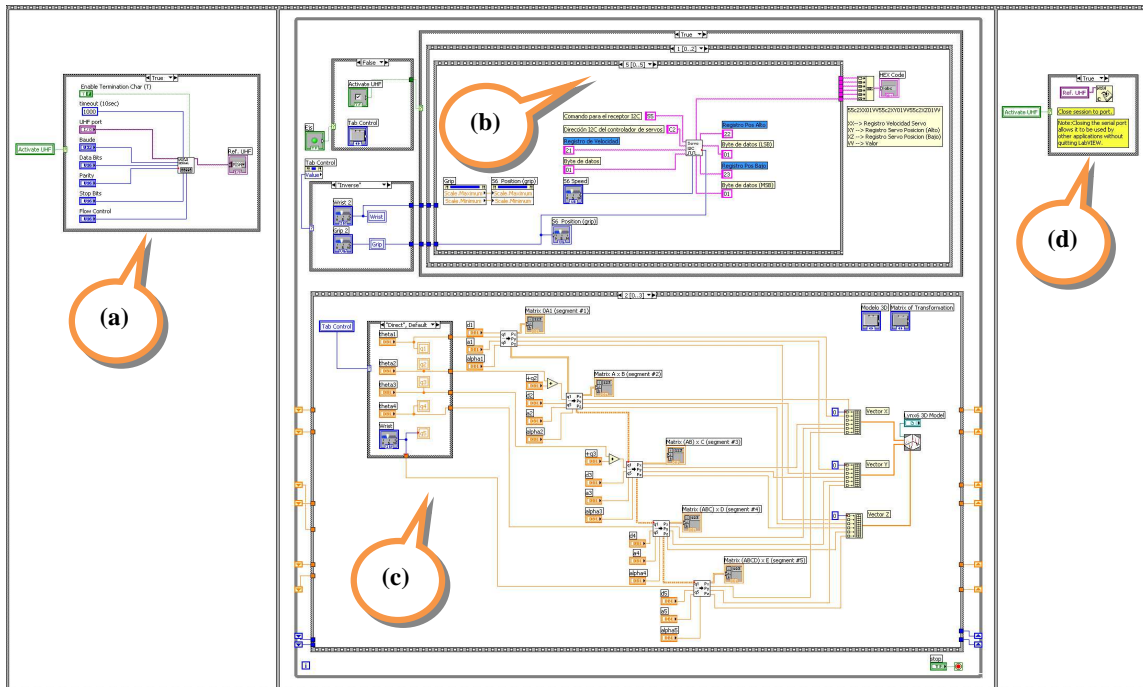


Figura 4: Vista del panel de la programación gráfica del VI. Son notables las secciones en las que se divide el control del flujo (a) inicialización del hardware, (b) control del experimento físico, (c) modelo cinemático directo e inverso y, (d) reseteo del hardware antes de finalizar.

usuarios, los datos de las acciones se escriben y se leen a través de los bloques de comunicación conectados al hardware (vea la figura 3). Esta sucesión de bytes, que especifican la posición angular y la velocidad de las articulaciones, se proporcionan al VI remoto según los modelos FK e IK estudiados.

El panel de diagramas del VI (fig. 4) contiene múltiples hilos programados con diferentes tiempos de muestreo y prioridades. La tarea de control, calcula las variables del sistema y se ejecuta en una estructura de bucle temporizada, respetando la arquitectura común de una tarea en tiempo real (RTT) como se describe en [21].

El VI permite a los estudiantes relacionar conceptos teóricos con prácticas sobre las estructuras mecánicas, parámetros de Denavit-Hartenberg y cinemáticas directa e inversa. La interfaz gráfica de usuario, cuya versión de demostración del VI se encuentra disponible en [20], está dividida en dos áreas verticales (fig. 5). Desde ellas el estudiante puede actuar de forma interactiva con el brazo y entender su control y comportamiento.

En la figura 5, la página superior derecha del VI muestra en todo momento una representación 3D del brazo robótico en tiempo de ejecución. En la parte superior central, el área de parámetros D-H permite

al usuario configurar, tanto la longitud de los segmentos, como los grados de libertad de cualquier manipulador robótico de hasta 5 DOF. Por defecto, los valores articulares y los parámetros geométricos están configurados para el brazo Lynx6 según los valores de la tabla 2. En la parte inferior derecha, el panel muestra en diferentes pestañas, las matrices de transformación homogénea de cada sistema de referencia, desde {S1} a {S5}. Además, los ángulos de las articulaciones y las coordenadas XYZ de la base, hombro, codo, muñeca y del extremo final, pueden ser siempre visualizadas en un marco separado.

La página inferior del VI (*Wireless*), maneja los parámetros de configuración inalámbricos y el módulo de comunicación del brazo de robot por medio del enlace RF (fig. 5).

El área a la izquierda del panel permite al usuario elegir el modelo de funcionamiento directo o inverso que se desee para controlar el brazo manipulador. La vista de la pestaña superior muestra los botones degradados y barras deslizadoras, cuyas posiciones definen valores de entrada al modelo FK. Por el contrario, la página del fondo permite al usuario usar el modelo cinemático inverso y modificar los valores (P_x , P_y , P_z) e inclinación *wartg* del extremo efector para alcanzar cualquier posición del espacio de trabajo 3D.

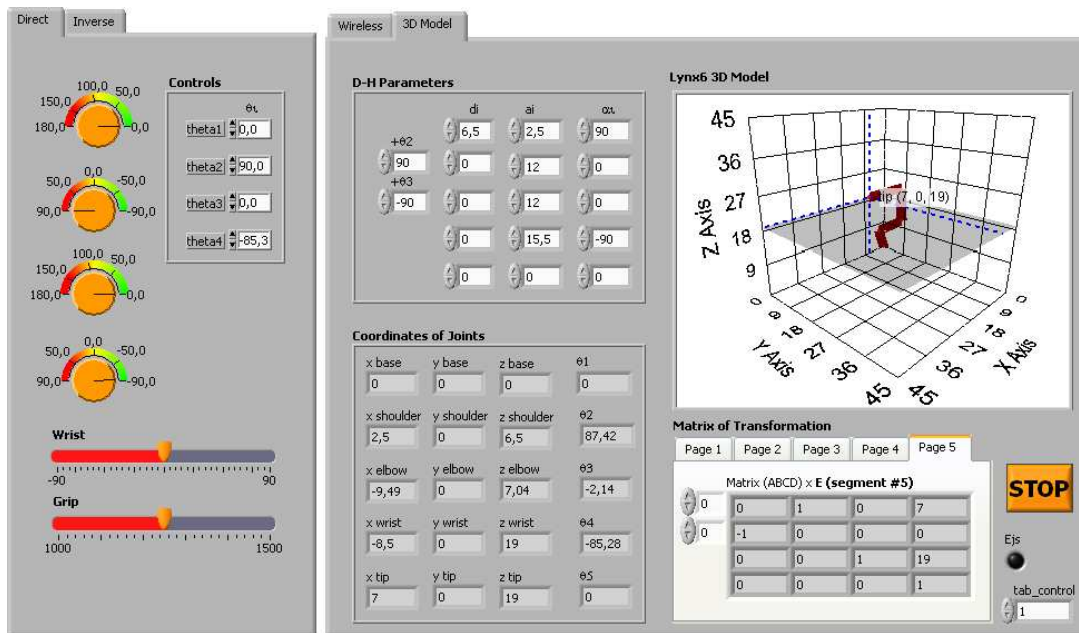


Figura 5: Panel frontal del VI con los gráficos, indicadores y mandos de control.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado un estudio del modelo cinemático directo e inverso para un brazo manipulador de 5 DOF con fines educativos, orientado a prácticas de estudiantes de grado y posgrado de Ingeniería.

Para el manejo del brazo robótico, se ha presentado el desarrollo e implementación de un instrumento virtual diseñado para tales propósitos, donde el interés de este estudio radica en el hecho de que permite determinar los límites físicos y el rango de operación que los estudiantes pueden usar para su control remoto.

El brazo Lynx6 forma parte de un proyecto educativo en marcha surgido del Grupo de Control y Robótica de la Universidad de Huelva. Está enfocado en el desarrollo de un prototipo de vehículo móvil que sirva de multiplataforma de propósito general dotado de sistemas estándares abiertos. El uso de un sistema físico real permite desarrollar, implementar y probar diferentes estrategias de Ingeniería. Por otro lado, una vez finalizado el prototipo, su grado de versatilidad, robustez y facilidad en el control remoto, le confieren una serie de características de aplicación en escenarios industriales reales más allá del ámbito educativo, donde tanto los ambientes duros (radioactividad, toxicidad, etc) como las reducidas dimensiones (cañerías, cavernas, etc) prohíban la presencia humana.

Referencias

- [1] Andújar Márquez, J.M., Mateo Sanguino, T.J. y Aguilar Nieto, F.J., "Virtual Interface for Controlling a Remote Handle Rover", en *Proc. IADAT-aci2005 Conf.*, pp. 224-228, Bilbao (España), 2005
- [2] Andújar Márquez, J.M., Mateo Sanguino, T.J. y Aguilar Nieto, F.J., "Control de un Vehículo Robótico Dotado de Brazo Manipulador Mediante un Interfaz Virtual de Usuario", *XXVI Jornadas de Automática*, Alicante (España), pp. 743-748, 2005
- [3] Andújar Márquez, J.M., Mateo Sanguino, T.J., Aguilar Nieto, F.J. y Chica Barrera, J.J., "Plataforma Robótica Controlada de Forma Remota Mediante una Red I2C de Microcontroladores", *XXVII Jornadas de Automática*, Almería (España), pp. 511-516, ISBN: 84-689-9417-0, 2006
- [4] Andújar Márquez, J.M., Mateo Sanguino, T.J., Aguilar Nieto, F.J., Chica Barrera, J.J. y Mola Mateos, M.F., "An Image Acquiring, Processing and Transfer System over Bluetooth for an Educational Robotic Platform", *Robótica 2007 - 7th Conference on Mobile Robots and Competitions*, Albufeira (Portugal), pp. 1-6, 2007
- [5] Barrientos, A. et al., "Fundamentos de Robótica (2nd edition)", *Ed. McGraw-Hill/Interamericana de España, SAU*, Madrid (España), 2007
- [6] Controlador para 21 Servos por I2C SD21. Disponible en <http://www.superrobotica.com/S310180.htm>
- [7] Corke, P.I., "A Robotics Toolbox for Matlab", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, pp. 24-32,

- Vol.3, 1996. Disponible en http://www.petercorke.com/Robotics_Toolbox.html
- [8] Denavit y Hartenberg, R.S., "A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices", *Journal of Applied Mechanics*, 1955
- [9] Fennander, H., "Project for Active and Robot Vision Course", Lappeeranta University of Technology, Department of Information Technology, Lappeeranta (Finlandia), 2006
- [10] Filippi, H., "Wireless Teleoperation of Robotics Arms", *Master's Thesis*, Luleå University of Technology, Department of Space Science, Kiruna (Suecia), ISSN: 1653-0187, 2007
- [11] Gay, L., "Using Inverse Kinematics to Position the Lynxmotion L5 and L6 Arms", 2004. Disponible en <http://www.lynxmotion.com/images/html/proj073.htm>
- [12] Hitec Product Line, 2006. Disponible en <http://www.hitecrd.com>
- [13] Hong, H., "Another Method for Inverse Kinematics of Lynxmotion Robotic Arms", 2004. Disponible en <http://www.lynxmotion.com/images/html/proj058.htm>
- [14] Horsch, Th., "Introduction to Robotics: Module Trajectory Generation and Robot Programming", Fachhochschule Darmstadt (Alemania), 2000
- [15] Keesling, M., "Lynxmotion Arms and Inverse Kinematics", 2003. Disponible en <http://www.lynxmotion.com/images/html/proj057.htm>
- [16] Koyuncu, B. y Güzel, M., "Software Development for the Kinematic Analysis of a Lynx 6 Robot Arm", *International Journal of Applied Science, Engineering and Technology*, Vol.4 No.4, ISSN 1307-4318, 2007
- [17] Kock, H. y Svenson, P., "Crane Control, Intelligent Robotics VT-07", 2007. Disponible en <http://www.cs.umu.se/~c03hkk/IR-lab4.pdf>
- [18] LPRS Easy Radio. Disponible en <http://www.lprs.co.uk/>
- [19] Lynx6. Disponible en <http://www.lynxmotion.com/>
- [20] Mateo Sanguino, Tomás de J., "Demo Brazo Lynx6". Disponible en <http://www.uhu.es/tomas.mateo/vanter/vanter.htm>
- [21] Salzmann, Ch., Guillet, D. y Huguenin, P., "Introduction to Real-Time Control Using LabView with an Application to Distance Learning", *International Journal of Engineering Education*. Special Issue: LabView Applications in Engineering Education, 16(3):255-272, 2000
- [22] SSC-32 servo controller for RIOS software. Disponible en <http://www.lynxmotion.com/Product.aspx?productID=395&CategoryID=52>