

Avances en la teleoperación de un robot agrícola usando un dispositivo háptico de bajo coste

César Peña*, Cristhian Riaño⁺, Diego Mejía*

cesarapc@unipamplona.edu.co, cristhianivanrj@aluno.unb.br, diego.mejia@unipamplona.edu.co

*Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías, Km 1 Vía Bucaramanga
Pamplona – Colombia

⁺Universidad de Brasilia

Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatronica, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte - Brasília / DF
Brasília - Brasil

Resumen: *En este artículo se presentan los avances realizados para la teleoperación de un robot agrícola que realiza actividades de siembra, riego, fumigación y corte en un pequeño cultivo urbano escalable para interiores. Se presenta un análisis cinemático del robot construido y se propone el uso de un dispositivo háptico de bajo costo que permite controlar de forma más intuitiva el robot esclavo. Por último se presenta algunos resultados experimentales que evidencian el funcionamiento del sistema.*

Palabras clave: Robots, Teleoperación, Agricultura, Hápticos, Interfaces.

Abstract: *This paper presents the progress made in the teleoperation of a robot that performs agricultural tasks as: planting, irrigation, spraying and cutting in a small scalable indoor urban farming are presented. A kinematic analysis of the robot built is presented, and the use of a low cost haptic device, which controls more intuitive slave robot, is proposed. Finally some experimental results that demonstrate the operation of the system is presented.*

Keywords: Robotics, Teleoperation, Agriculture, Haptics, Interfaces.

1 Introducción

La teleoperación de robots ha existido desde hacia varias décadas, de hecho se considera que uno de los primeros robots fue el M1 desarrollado por Goertz en el Instituto Nacional de Argone, el cual surgió de la necesidad de manipular sustancias radiactivas [Hokayem06].

La teleoperación de robots se usa para evitar que los usuarios entren en medio hostiles o perjudiciales para el su salud como: sistemas de demolición de edificios [Kamezaki16] donde los escombros pueden ocasionar lesiones, desactivación de explosivos [Sheh15], sistemas de búsqueda y rescate [Harihara10], como los que actúan después de desastres tales como nucleares [Li15], terremotos [Hong05], para la realización de operaciones a grandes profundidades en el mar lo que implica grandes presiones y altos riesgos, inspección de líneas eléctricas de alta tensión [Pouliot15] las cuales debido a su altura y los fuertes vientos son de alto riesgo para los operarios, tareas industriales tales como la pintura, blasting [Navarro06] en las cuales el ambiente se llena de partículas en el aire lo cual es contraproducente para el sistema respiratorio en mediano y largo plazo, entre muchas otras tareas.

Otro uso crucial de los sistemas de teleoperación es para el desarrollo de tareas bastante complejas, lo cual hace muy costoso los sistemas de automatización. Esta complejidad puede originarse por un entorno cambiante no estructurado, por la realización de tareas diversas dentro de las que se encuentre algunas no programadas, entre otras. Un ejemplo son los sistemas son teleoperados en el espacio [Leitner09], donde surgen una gran cantidad de imprevistos y situaciones desconocidas.

En este artículo se propone un ejemplo del uso de la teleoperación para aplicaciones agrícolas, similares a un telejardín [Goldberg00], [Goldberg13]. El sector agrícola es uno de los menos desarrollados en Latinoamérica, dado que en estos países no se produce una cantidad significativa de maquinaria y la importada suele tener costos elevados, de igual forma existió una tendencia a que las personas emigraran a la grandes ciudades, disminuyendo la capacidad laboral, a esto se le suma el cambio climático, el conflicto armado y otros factores que han incidido negativamente en el sector.

Las grandes ciudades limitan la movilidad de sus habitantes debido a las enormes distancias que tienen que recorrer entre sus viviendas y los sitios de trabajo, esto sumado con el tamaño de las residencias y las grandes cantidades de trabajo que tiene que realizar los ciudadanos hace que hoy en día las personas se cuestionen sobre la tenencia de mascotas y plantas. Es menos probable a primera vista que un persona que habita en estas ciudades conciba estar involucrado en actividades agrícolas en un entorno urbano.

Sin embargo, los movimientos ambientalistas y los evidentes cambios climáticos están haciendo tomar conciencia a los humanos de la importancia de cuidar el medio ambiente y dentro de sus acciones están el desarrollos de ideas verdes las cuales generan acciones conservacionistas y la implementación de vegetación en entornos urbanos, algunos ejemplos son: los jardines verticales que están de moda en los centro comerciales, los techos verdes, jardines de ventana, jardines colgantes y los cultivos urbanos que es una nueva tendencia la cual se implementa en espacios muy reducidos tanto en azoteas como en interiores. Este tipo de cultivos es muy variado y va desde la obtención de hortalizas y plantas

para la creación de infusiones hasta plantas para la producción de vino.

Este trabajo expone los avances realizados para la teleoperación de un robot agrícola que realiza actividades de siembra, riego, fumigación y corte en un pequeño cultivo urbano escalable para interiores. Adicionalmente se propone el uso de un dispositivo háptico de bajo costo que permite controlar de forma más intuitiva el robot.

El resto de éste artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se muestra el robot a controlar y su análisis cinemático. La Sección 3 describe la teleoperación del dispositivo robótico. En la sección 4 se presentan los experimentos y resultados preliminares. Finalmente, se presentan las conclusiones y las referencias.

2 Análisis cinemático del robot agrícola

En la figura 1 se presenta el robot diseñado para esta aplicación. Es un robot antropomórfico de 5 grados de libertad. Sus articulaciones están actuadas por medio de servomotores MX64 y MX12A empresa de la Dynamixel. Estos motores se conectan por medio de un bus serie el cual se comunica con un pc por medio del dispositivo USB2dynamixel. Los eslabones del robot en su totalidad se diseñaron para se construidos por medio de una impresora 3D utilizando como material: el Poliacido Láctico (PLA) dado que es un polímero totalmente biodegradable y brinda una excelentes características mecánicas.



Figura 1: Robot agrícola

A continuación se presenta de forma resumida un análisis cinemático de la estructura robótica.

2.1. Cinemática directa

En la Figura 2 se muestra el diagrama esquemático del robot, donde se pueden apreciar los sistemas coordenados obtenidos mediante el algoritmo de Denavit y Hartenberg (DH). En la Tabla 1 los ilustran los parámetros DH que definen esta estructura.

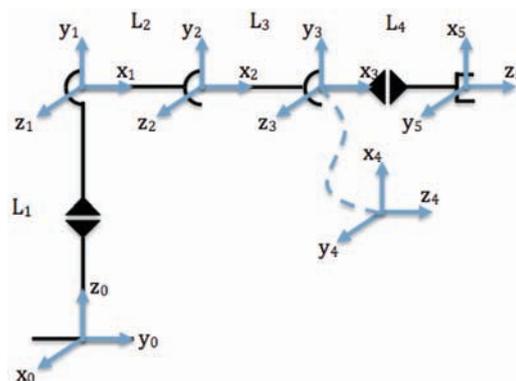


Figura 2: Robot antropomórfico de 5 grados de libertad.

Tabla 1: Parámetros de Denavit-Hartenberg del robot de 5 GDL

No	θ	d	a	α
1	$q_1 + 90$	L_1	0	90
2	q_2	0	L_2	0
3	θ_3	0	L_3	0
4	$q_4 + 90$	0	0	90
5	q_5	L_4	0	0

De cada reglón de la tabla de parámetros DH se obtiene la matriz ${}^{i-1}A_i$, donde i es la articulación.

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i c\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Al multiplicar todas las matrices consecutivamente se obtiene la matriz del efector final con respecto a la base del robot (Modelo cinemático directo), de la siguiente forma:

$${}^0A_5 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5$$

2.2. Cinemática inversa

El modelo cinemático inverso del robot se encarga de calcular la posición de las cinco articulaciones partiendo de la posición y orientación del efector final. Para el caso de la estructura seleccionada el modelo cinemático inverso se puede representar como:

Para la primera articulación

$$q_1 = \text{atan2}(-P_{mx}, P_{my})$$

Donde P_m es el punto de intersección de los últimos dos grados de libertad (punto de la muñeca), definido por:

$$P_m = P_3 = P_4$$

y se puede calcular como:

$$P_m = P_5 - L_4 Z_5$$

Una vez obtenido P_m y q_1 , se procede a calcular los ángulos de las articulaciones 3 y 4 como:

$$q_3 = \text{atan2}(\pm \sqrt{1 - (\cos(q_3))^2}, \cos(q_3))$$

Dónde:

$$\cos(q_3) = \frac{P_{mx}^2 + P_{my}^2 + (P_{mz} - L_1)^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3}$$

y para la segunda articulación

$$q_2 = \text{atan2}\left(P_{mz} - L_1, \sqrt{P_{mx}^2 + P_{my}^2}\right) - \text{atan2}(L_3 \sin(q_3), L_2 + L_3 \cos(q_3))$$

Para el cálculo de las dos últimas articulaciones (las correspondientes a la orientación del efector final), se comienza reemplazando q_1, q_2, q_3 en las matrices ${}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3$ obteniéndose 0A_3 (esta matriz contiene vectores unitarios correspondientes a los ejes coordenados del sistema tres). Conociendo $Z_4 = Z_5$ y haciendo uso de la propiedad del producto punto de vectores unitarios, se puede obtener

$$q_4 = \text{atan2}(z_4 \cdot y_3, z_4 \cdot x_3)$$

Una vez obtenido q_4 se calcula 0A_4 , con el fin de calcular q_5 como:

$$q_5 = \text{atan2}(z_4 \cdot x_5, x_4 \cdot x_5)$$

Quedando definido completamente el modelo cinemático inverso del robot.

2.3. Simulador

Para verificar previamente los movimientos del robot se creo un simulador que permite visualizar los sistemas coordenados de acuerdo a las coordenadas articulares que se fijen al robot. En la Figura 3 se ilustra para el caso de la posición inicial ($q = [0, 0, 0, 0, 0]$).

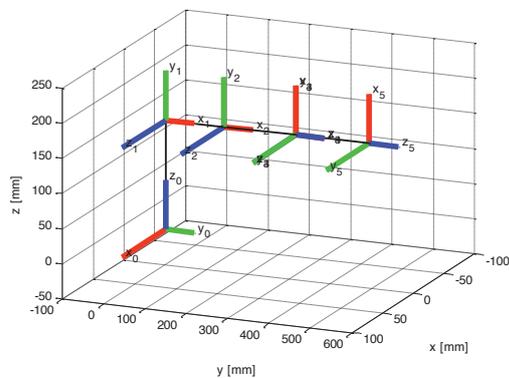


Figura 3: Representación en alambres del robot (posición inicial)

Con el fin de poder visualizar de forma realista el robot se tiene la opción de mostrar las geometrías 3D del robot. Tal como se aprecia en la Figura 4 (El desarrollo de estos algoritmos de simulación son aportes del trabajo presentado y no requieren de librerías externas).

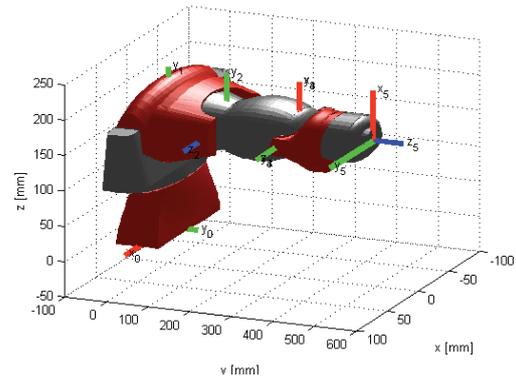


Figura 4: Representación tridimensional del robot en la posición inicial

En las figuras 5 y 6 se ilustra otro ejemplo para cuando el robot se sitúa en las coordenadas articulares $q = [0, \frac{\pi}{4}, -\frac{\pi}{4}, -\frac{\pi}{3}, 0]$

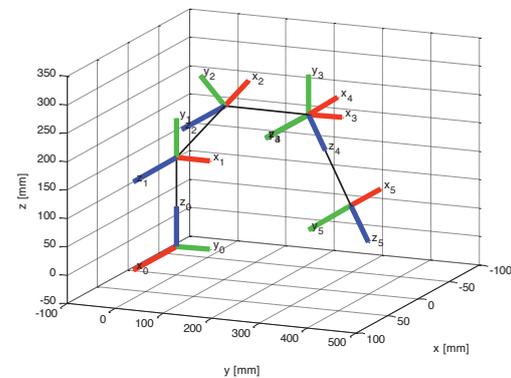


Figura 5: Representación en alambres del robot para la posición $q = [0, \frac{\pi}{4}, -\frac{\pi}{4}, -\frac{\pi}{3}, 0]$

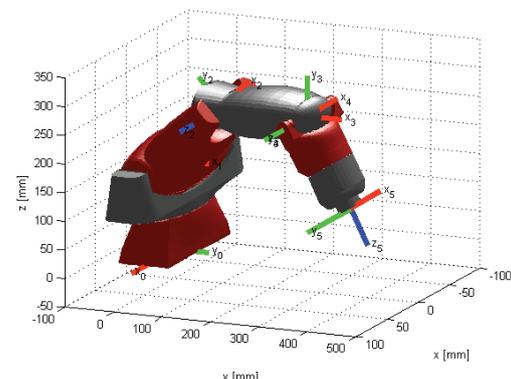


Figura 6: Representación tridimensional del robot en la posición $q = [0, \frac{\pi}{4}, -\frac{\pi}{4}, -\frac{\pi}{3}, 0]$

Por medio de este simulador se hacen las verificaciones visuales correspondientes al realizar el control cinemático del robot, apreciando la evolución del movimiento del robot durante el desarrollo de la trayectoria.

3 Teleoperación del sistema robótico

En la Figura 7 se puede apreciar la arquitectura general del sistema de teleoperación implementado para el cultivo remoto. El sistema se puede dividir básicamente en dos

zonas: la local y la remota. En la primera es donde está ubicado el usuario u operador, el cual por medio de unos dispositivos de entrada (teclado, mouse o el dispositivo háptico) genera las órdenes o comandos para operar el sistema. El usuario a su vez cuenta con dispositivos de realimentación los cuales le permiten conocer información del entorno remoto, en este caso cuenta con un pantalla que visualiza las imágenes capturadas por una cámara en el entorno remoto, al igual que la información proveniente de los sensores (ver Figura 8). Dado que se implementó un dispositivo háptico, se requirió de un controlador en la zona local el cual se encarga de controlar los actuadores de este dispositivo, cuando se requiere ejecutar una fuerza en particular.

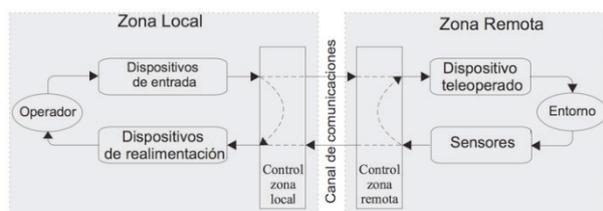


Figura 7: Arquitectura del sistema de teleoperación.

Entre la zona local y la remota debe existir un canal de comunicaciones para poder compartir las referencias de control y la información de los sensores en el entorno remoto. En este caso se creó una red de área local y se implementó el uso de un protocolo universal de datagramas (UDP) para enviar y recibir la información.

En la zona remota se encuentra los dispositivos a controlar que en este caso son: el robot agrícola y carro de desplazamiento, la caja de control que puede ser un PC, el entorno que está compuesto por el cultivo y los sensores incluyendo los dispositivos electrónicos involucrados y el sistema de comunicaciones.



Figura 8: Diagrama general y resumido de la arquitectura del sistema.

Al realizar los algoritmos de teleoperación se detectó que los usuarios se les dificultaban mover el robot usando el teclado y el mouse, dado que en repetidas ocasiones llegaban al límite del espacio de trabajo del robot sin darse cuenta e intentaban seguir moviendo el robot. Debe tenerse en cuenta que el espacio de trabajo varía dependiendo de la orientación del efector final de robot y posee límites interiores y exteriores. Por ejemplo en la

Figura 9 el círculo azul representa el límite interior del espacio de trabajo al cual puede llegar la muñeca del robot (P_m), esto ocurre cuando la coordenada articular $q_4 = \pm 90^\circ$. El círculo verde indicaría las posiciones que lograría alcanzar el efector final manteniendo la misma orientación.

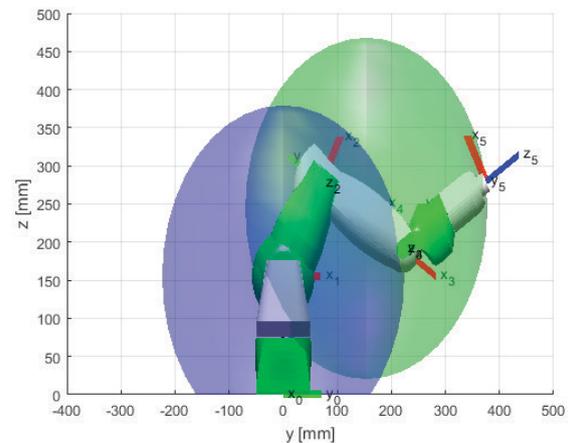


Figura 9: Límite interior del espacio de trabajo del efector final del robot.

De forma análoga en la Figura 10 se representa el límite exterior del espacio de trabajo de la muñera y del efector final del robot, este límite se cumple cuando el valor de la coordenada articular 3 es igual a cero.

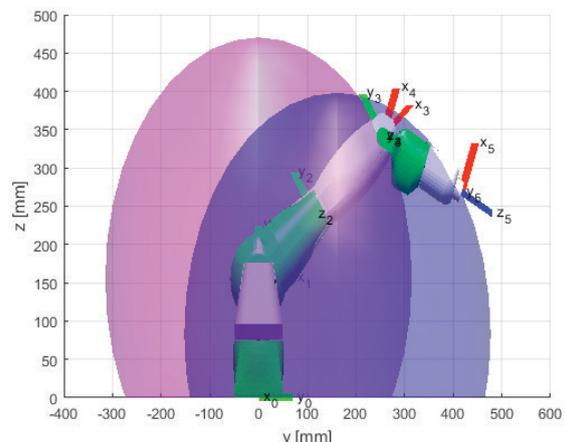


Figura 10: Límite exterior del espacio de trabajo del efector final del robot.

Debe tenerse en cuenta que este espacio de trabajo ilustrado en las figuras 9 y 10 no contempla interferencias entre los eslabones por lo cual el movimiento del robot real va a ser más reducido.

A pesar de las indicaciones visuales suministradas al usuario, la teleoperación del robot no es muy intuitiva usando como dispositivos de entrada el mouse y/o el teclado. Por esta razón se propuso el uso de dispositivos hápticos que faciliten el establecimiento de referencias, sin embargo como es de pleno conocimiento, este tipo de dispositivos es son de un costo considerable por lo cual se procedió al diseño e implementación de un dispositivo usando como actuadores el mismo tipo de servomotores del robot (AX12), los cuales son de un costo

relativamente bajo teniendo en cuentas las grandes prestaciones que brindan.

La idea general fue desarrollar un dispositivo que refleje al usuario unas fuerzas guía que le permitan estimar de una manera intuitiva cuando los eslabones del robot real están próximos a colisionar con el fin de evitar el envío de referencias erróneas o choques del robot. En la Figura 11 se ilustra un diagrama esquemático de la zona local del sistema de teleoperación donde el robot utiliza un robot maestro para generar las referencias.

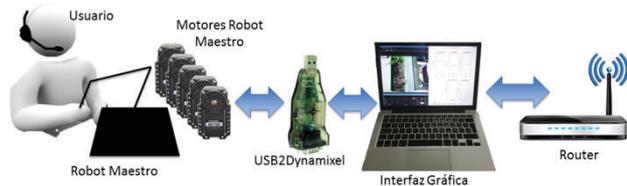


Figura 11: Zona local del sistema de teleoperación.

El dispositivo desarrollado brinda la comodidad al usuario de reflejar un comportamiento homotético a la estructura antropomórfica del robot esclavo (robot agrícola), ver figura 12. Esto implica que el usuario no requiere conocer por medio de señales visuales los límites del espacio de trabajo del efector final del robot, solo tiene que guiar con su mano el extremo del robot maestro y el robot esclavo seguirá la referencia establecida. Dado que los dos robots tienen restricciones cinemáticas muy similares, le permiten al usuario interpretar fácilmente la lógica de los movimientos del robot esclavo.

El uso de este dispositivo hace muy intuitivo la operación del sistema. Cuando el usuario intenta señalar referencias que el robot agrícola no es capaz de alcanzar, activa sus actuadores ejerciendo pares y fuerzas al usuario que le permiten detectar el acontecimiento. Por ejemplo, con este dispositivo el usuario puede detectar cuando intenta sobrepasar el límite de $\pm 60^\circ$ de la articulación 4 (una de las mayores limitaciones del robot esclavo), cada vez que intenta sobrepasar este rango, se activa la articulación 4 del robot maestro ejerciendo una fuerza que obliga al usuario a cumplir la restricción, además de evitar que el robot esclavo colisione consigo mismo, indica al usuario el evento y le permite corregir fácilmente la referencia. En la siguiente figura se aprecia el robot maestro de 5 grados de libertad.



Figura 12: Robot maestro implementado para la teleoperación del robot.

4 Experimentos y resultados

Para verificar el funcionamiento del sistema teleoperado se propusieron experimentos donde el usuario tenía que realizar operaciones típicas de un proceso agrícola como lo son la siembra, el riego y la fertilización de plantas. En la Figura 13 se ilustra una fotografía del robot esclavo y dos materas donde se alojan las plantas que están a su cuidado.



Figura 13: Robot agrícola en la zona remota del sistema de teleoperación.

En la Figura 14 se puede apreciar al usuario moviendo el robot maestro para generar las referencias que se envían al controlador del robot esclavo. Se puede distinguir claramente la similitud entre el robot esclavo y el maestro. Cabe señalar que las articulaciones del robot maestro normalmente se encuentra desenergizadas y solo actúan cuando el usuario intenta realizar un movimiento erróneo que el robot en la realidad no pueda hacer, evitando colisiones.

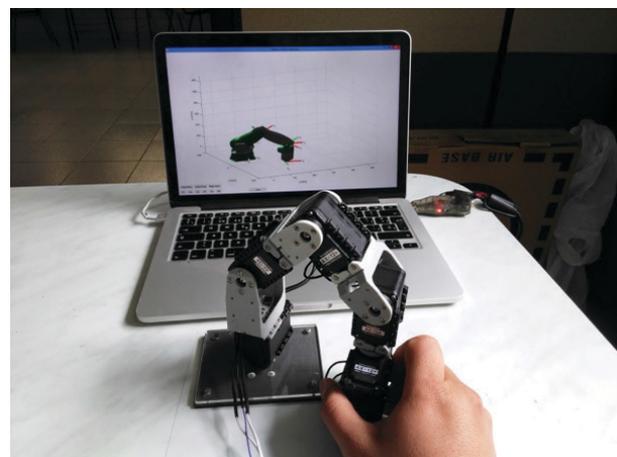


Figura 14: Usuario moviendo el robot maestro de bajo costo.

Para hacer una mejor retroalimentación del entorno el usuario cuenta con el acceso a una cámara IP ubicada en la zona remota la cual le permite visualizar claramente las acciones del robot y si lo desea las ayudas visuales del robot. Tal como se ilustra en la Figura 15.

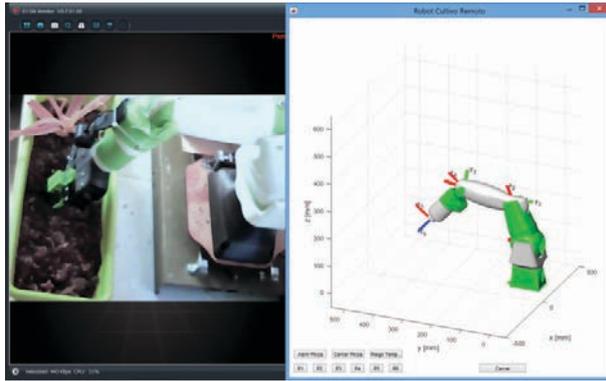


Figura 15: Interfaz de teleoperación del robot.

En la Figura 16 se ilustra las ayudas visuales que se le proporcionan al usuario mientras mueve el robot esclavo. En esta se distinguen los límites exteriores e interiores según la orientación que desee.

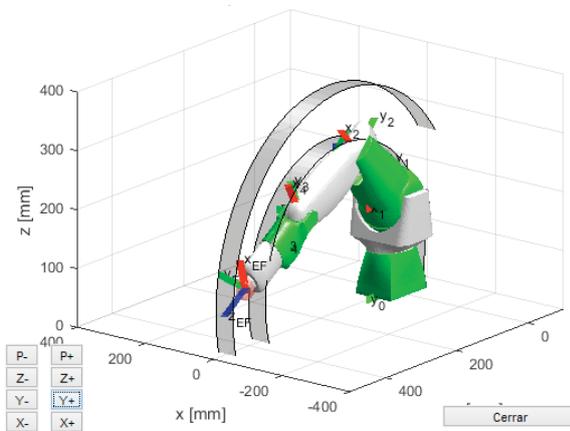


Figura 16: Ayudas visuales para la teleoperación del robot esclavo.

En caso que el usuario llegue al límite del espacio de trabajo e intente cruzarlo, el sistema le indicará visualmente dicho evento cambiando de color el límite respectivo, como se puede apreciar en la Figura 17. De igual forma el sistema háptico producirá fuerzas que indica el evento.

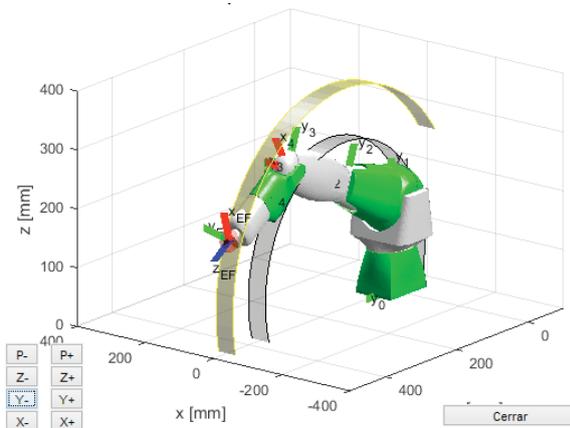


Figura 17: Evento en el cual el robot llega al límite exterior del espacio de trabajo del robot.

Adicionalmente, en el caso que usuario utilice como dispositivos entrada el mouse o el teclado y persista en

cruzar el límite del espacio de trabajo, lo cual es muy común al cambiar la referencia correspondiente a la orientación del efector final, el sistema calculará de forma automática la solución más cercana, tal como lo ilustra la Figura 18 donde se aprecia que el usuario genero una referencia errónea pero el robot se mantiene dentro del espacio de trabajo y lo más cerca posible a la misma.

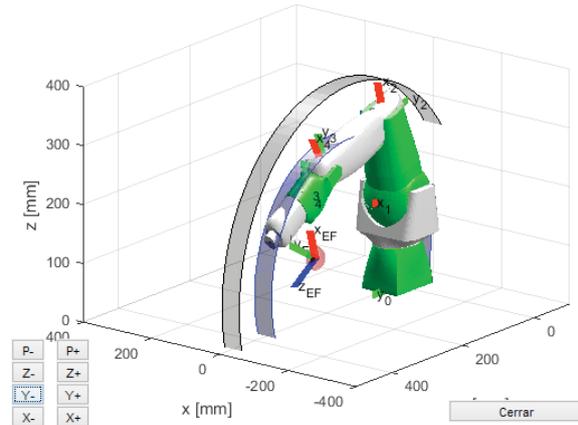


Figura 18: Calculo de soluciones cercanas a las generadas por el usuario y que se encuentran fuera del límite del espacio de trabajo

En la Figura 19 se aprecia al robot esclavo realizando una tarea de siembra por trasplante. En esta tarea se utiliza un efector multifuncional que permite mover tierra con una pala y a su vez puede agarrar objetos al abrir la pala por la mitad. Para mejorar los puntos de apoyo esta herramienta cuenta con unas protuberancias en forma de dedos y dos orificios donde se conectan el sistema de riego de agua y fertilización.



Figura 19: Robot esclavo haciendo tareas agrícolas por medio de un efector multifuncional para mover tierra, agarrar y regar.

5 Conclusiones y trabajos futuros

El dispositivo háptico demostró experimentalmente que permite al usuario una teleoperación del robot de una forma más natural e intuitiva. Por lo cual es más relevante que las ayudas visuales. Sin embargo estas últimas brindan un papel muy importante en caso que se quiera realizar la teleoperación por utilizando como dispositivos de entrada el teclado o el mouse.

Los resultados obtenidos con los experimentos preliminares evidenciaron que el sistema de teleoperación con aplicaciones agrícolas es viable y puede llegar a ser empleado para la vigilancia y cuidado de plantas, lo cual facilita a los usuarios la realización de este tipo de actividades sin estar zona de cultivo. Por otra parte los materiales empleados para el desarrollo del dispositivo háptico fueron muy económico logrando los objetivos propuestos inicialmente.

Como trabajos futuros se propone la realización de experimentos donde el robot se ubique sobre un riel de mayor tamaño para que pueda ejecutar tareas agrícolas a una mayor escala, de igual forma se plantea el uso del robot en jardines verticales o en fachadas verdes evitando someter a usuarios a alturas considerables y por consiguiente disminuyendo riesgos. En cuanto a la parte háptica se prevé la generación o emulación de fuerzas que eviten al operario pasar por singularidades o colisionar, al igual que la implementación de un sistema más complejo que haga uso del modelo dinámico del robot para su funcionamiento.

Referencias bibliográficas

- [Goldberg00] Goldberg, K. Ed., *The Robot in the Garden: Telerobotics and Telepresence on the Internet*, Cambridge, MA: The MIT Press, 2000.
- [Goldberg13] Goldberg K., Santarromana J., Telegarden website at <http://queue.ieor.berkeley.edu/~goldberg/garden/Ars/>
- [Harihara10] Harihara, K. Dohta, D. Akagi, T. and Zhang, F. "Development of a search type rescue robot driven by pneumatic actuator," SICE Annual Conference 2010, Proceedings of, Taipei, 2010, pp. 1311-1317.
- [Hokayem06] Hokayem, Peter F., and Mark W. Spong. "Bilateral teleoperation: An historical survey." *Automatica* 42.12 (2006): 2035-2057
- [Hong05] Hong G, Zhelong Wang and Hongwei Wang, "Shape reconfigurable mechanism of an earthquake rescue robot," IEEE International Conference Mechatronics and Automation, 2005, Niagara Falls, Ont., Canada, 2005, pp. 1145-1150 Vol. 3.
- [Kamezaki16] Kamezaki, M. et al., "Design of four-arm four-crawler disaster response robot OCTOPUS," 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, 2016, pp. 2840-2845.
- [Navarro06] Navarro, P. Suardiaz, J. Alcover, P. Borraz, R. Mateo A. and Iborra, A. "Teleoperated Visual Inspection System for Hull Spot-Blasting," IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Paris, 2006, pp. 3845-3850.
- [Leitner09] Leitner, J. "Multi-robot Cooperation in Space: A Survey," *Advanced Technologies for Enhanced Quality of Life*, 2009. AT-EQUAL '09., Iasi, 2009, pp. 144-151.
- [Li15] Li, J. Fu, R. Wu, X. Liu, Q. Wang G. and Hou, S. "A way of nuclear station inspection robot location," *Information and Automation*, 2015 IEEE International Conference on, Lijiang, 2015, pp. 2037-2041.
- [Pouliot15] Pouliot, N. Richard P. L. and Montambault, S. "LineScout Technology Opens the Way to Robotic Inspection and Maintenance of High-Voltage Power Lines," in *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 1-11, March 2015.
- [Sheh15] Sheh R. and Mees D., "Human-system interaction for bomb squad applications: Preliminary experiments with low cost cameras in real world deployment," 2015 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), West Lafayette, IN, 2015, pp. 1-6.