

Desarrollo de un sistema de seguimiento de trayectoria para un robot manipulador mediante tecnología accesible de reconocimiento de movimiento

Development of a trajectory tracking system for a robotic manipulator based on low-cost motion recognition technology

Cristian Abraham Medina Jiménez¹, Antonio Balvantín¹, Saúl Andrés Hernández Moreno¹

¹ División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, México.
ca.medinajimenez@ugto.mx, antonio.balvantin@ugto.mx, sa.hernandezmoreno@ugto.mx

Resumen

Este trabajo presenta el diseño e implementación de un sistema de seguimiento de trayectoria para un robot manipulador industrial, empleando tecnología accesible de reconocimiento de movimiento. Se utilizó un sensor de bajo costo con el propósito de establecer una metodología económica, viable para su aplicación en entornos educativos sin requerir infraestructura especializada. El sistema fue desarrollado para el robot manipulador NACHI® MZ04, instalado en el laboratorio de manufactura avanzada de la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. La solución propuesta permite registrar de manera precisa la trayectoria seguida por el manipulador, facilitando la adquisición experimental de datos relacionados con la posición de puntos clave dentro de su espacio de trabajo. Como trabajo futuro, se plantea el procesamiento de la información obtenida con el fin de implementar un sistema de control en lazo cerrado basado en las trayectorias registradas, lo que permitirá mejorar el desempeño y ampliar las capacidades del sistema en contextos académicos.

Palabras clave: Seguimiento de trayectoria; Robot manipulador; Reconocimiento de movimiento.

Introducción

En los programas educativos de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Mecatrónica de la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca (DICIS), de la Universidad de Guanajuato, se imparten Unidades de Aprendizaje (UDA) como Sistemas de Control, Simulación de Sistemas Mecatrónicos y Fundamentos de Sistemas de Información, que desempeñan un papel esencial en la formación de estudiantes altamente capacitados para enfrentar los retos tecnológicos de nuestro entorno. En este contexto, la incorporación de tecnologías emergentes en el proceso de enseñanza-aprendizaje es una estrategia efectiva para fortalecer las competencias profesionales del estudiantado en áreas como la automatización, la robótica y la interacción hombre-máquina.

Recientemente, una de las herramientas tecnológicas que ha demostrado una notable versatilidad en aplicaciones de monitoreo de movimiento, seguimiento de trayectorias y captura de datos espaciales es el sensor Kinect®. Desarrollado originalmente como un dispositivo periférico para videojuegos, el Kinect ha se ha consolidado como un instrumento de bajo costo y fácil implementación en el ámbito académico y de desarrollo tecnológico. Diversos estudios han documentado su implementación en tareas de seguimiento de trayectorias de extremidades humanas, control gestual, así como en la interacción colaborativa con manipuladores robóticos [1, 2].

El seguimiento esquelético alcanzado por las distintas versiones del sensor Kinect® se ha evaluado extensamente en términos de precisión, exactitud y robustez. En particular, Tölgyessy et al. [3] realizaron un estudio comparativo entre el Kinect® v1, Kinect® v2 y Azure Kinect®, demostrando la mejora progresiva en la calidad del seguimiento espacial, lo cual resulta crítico para aplicaciones en robótica educativa y de colaboración. Estas capacidades se han integrado con algoritmos de procesamiento de señales y filtros como el de Kalman, permitiendo realizar estimaciones más estables y confiables del movimiento [1].

Por otro lado, recientes investigaciones han abordado el desarrollo de plataformas que permiten el control de brazos robóticos, en ambientes físicos o virtuales, a partir de gestos reconocidos mediante Kinect®. Dichos estudios representan nuevas alternativas para entornos de formación práctica en robótica, sin la necesidad de costosos laboratorios físicos [4]. Adicionalmente, se han propuesto sistemas de control de manipuladores robóticos basados en el análisis y procesamiento de datos adquiridos por sensores de profundidad, como el Kinect®, destacando su utilidad en entornos donde la interacción física directa con equipos de alto costo no es viable [5].

Asimismo, el desarrollo de estrategias avanzadas de control de trayectoria, detección y evasión de obstáculos mediante visión por computadora y sensores RGB-D ha sido objeto de evaluación experimental en manipuladores reales [6], y se ha demostrado la viabilidad del uso del seguimiento como mecanismo de prevención de colisiones en entornos colaborativos [7].

Este proyecto propone el desarrollo de un sistema de seguimiento de trayectoria para un robot manipulador industrial utilizando un sensor de bajo costo para el reconocimiento de movimiento. El objetivo es establecer una metodología económica y de fácil implementación en entornos educativos, sin la necesidad de infraestructuras complejas para el seguimiento de trayectorias. El sistema propuesto servirá como herramienta para el seguimiento preciso de la trayectoria de un robot manipulador NACHI® MZ04, ubicado en las instalaciones del laboratorio de manufactura avanzada de la División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, de la Universidad de Guanajuato. Este sistema facilitará la adquisición experimental de datos sobre la posición de puntos de interés en el espacio de trabajo del robot. Finalmente, como trabajo futuro, se contempla el análisis y procesamiento de esta información para desarrollar un sistema de control de lazo cerrado, basado en las posiciones obtenidas mediante el seguimiento de la trayectoria del manipulador.

Fundamentación teórica

Descripción del Brazo Manipulador NACHI® MZ04

El robot NACHI® MZ04 es un manipulador industrial de seis grados de libertad (6-DOF), compacto y de alta velocidad, diseñado para aplicaciones de manejo de materiales, ensamble y manufactura avanzada. Este modelo compacto posee una estructura tipo brazo articulado (ver Figura 1), lo cual le otorga una alta flexibilidad de movimiento y capacidad para operar en espacios reducidos. Está compuesto por una serie de eslabones rígidos conectados mediante articulaciones rotativas (tipo R). Cuenta con servomotores AC en cada eje, una carga útil máxima de 4 kg, repetibilidad posicional de ± 0.02 mm y un alcance máximo de 541 mm, ver Tabla 1 con las especificaciones principales del mecanismo [8].



Figura 1. Estructura del robot manipulador NACHI® MZ04.

Tabla 1. Especificaciones del robot manipulador NACHI® MZ04.

Parámetro	Valor
Ejes	6
Carga útil	4 kg
Repetibilidad	±0.02 mm
Alcance	541 mm
Velocidad máxima	8.38 rad/s (480 °/s)
Peso	~26 kg

Fundamentos del Seguimiento de Trayectorias

En actividades académicas y de investigación, el seguimiento de trayectoria implica registrar o controlar el movimiento del efector final de un manipulador a lo largo de una ruta deseada en el espacio de trabajo. En aplicaciones experimentales se realiza un monitoreo externo para comparar la trayectoria real del mecanismo contra la prevista o deseada, identificando errores, evaluando el desempeño del control implementado o incluso haciendo la retroalimentación del error para generar un control de lazo cerrado.

Para la realización del seguimiento de trayectorias, el sensor Microsoft Kinect integra una cámara RGB, un proyector de infrarrojo y un sensor de profundidad. El sensor Kinect proporciona imágenes RGB y mapas de profundidad en 3D mediante tecnología de luz estructurada (Kinect v1) o tiempo de vuelo (Kinect v2), con una resolución estándar de 640×480 a 30 Hz. Estas características convierten a este sensor en una herramienta accesible y no invasiva para seguimiento de movimientos en tiempo real [9].

El kit de desarrollo de software (SDK) de Kinect permite detectar hasta 25 articulaciones y construir un esqueleto tridimensional en tiempo real. Estudios como Wang et al. [10] han evaluado este seguimiento en diferentes posturas y distancias, evidenciando que Kinect v2 ofrece mayor precisión que su predecesor el Kinect V1. Las precisiones y limitaciones del Kinect son las siguientes:

Precisión del seguimiento de articulaciones proximal: errores entre 1–2 cm, aumentando con la distancia y complejidad del movimiento [9, 10].

Limitaciones en movimientos rápidos o con auto-oclusiones: los errores pueden superar los 5°–10° en estimación angular [11, 12].

Para superar las deficiencias del modelo esquelético, algunos trabajos combinan Kinect con marcadores (retroreflectivos o de color) aumentando significativamente la precisión en la captura de trayectoria. Por ejemplo, Bilesan et al. [12] lograron un error cuadrático medio (RMSE) menor a 1.2° para ángulos articulares, comparando con sistemas ópticos avanzados.

Una vez obtenidas las coordenadas tridimensionales de puntos de interés $p(t) = [x(t), y(t), z(t)]^T$, se pueden aplicar técnicas de filtrado, modelado geométrico y restricciones cinemáticas para suavizar trayectorias y reducir ruido [12, 13].

Materiales y Métodos

Para el presente trabajo se implementó el lenguaje de programación de propósito general y código abierto Python® para generar el sistema de seguimiento de la trayectoria de un robot manipulador NACHI® MZ04. Para la conexión del sensor Kinect a través de puerto USB 2.0 con una PC con sistema operativo Windows® 7 se utilizó un adaptador genérico USB con fuente de alimentación de 120 V a 60 Hz en la entrada y de 12 V y 1 A en la salida, ver Figura 2.



Figura 2. Adaptador genérico para sensor Kinect.

Adicionalmente, se requiere instalar en la PC los drivers del sensor Kinect para Windows SDK v1.8 y el software Windows Developer Toolkit v1.8, de manera que el sistema operativo de la PC pueda reconocer de manera apropiada el sensor. Una vez que el sistema operativo reconoce el sensor se deben instalar las librerías apropiadas para el uso del Kinect en Python. La versión de Python que se utiliza es la 2.7.18 debido a su compatibilidad y a que la mayoría de las librerías desarrolladas para el Kinect fueron para esta versión, por lo que hay mayor estabilidad. Las librerías y versiones utilizadas se enlistan en la Tabla 2.

Tabla 2. Librerías para el uso de Kinect en Python.

Librería	Versión
Pykinect	1.0.0
Pygame	2.0.3
Numpy	1.16.6

Una vez instaladas las librerías, se ejecuta el archivo “TrackPoint_ProgramaUsuario” en donde se definen los parámetros y configuraciones de trabajo:

Colores para identificación: en esta sección en formato RGB de 8 bits, debemos de colocar el rango de colores para la tolerancia de detección, es decir, si tenemos una esfera verde claro, se recomienda usar un límite superior de colores verdes claros más altos (mayor contraste) y un límite inferior verdes más opacos, esto con la finalidad que la luz no sea un problema ya que cambia la saturación. Considere también que los experimentos se realizaron con luz solar y luz fría (blanca) por lo que los colores se perciben “puros”.

Radio de las esferas: A mayor radio, discriminará puntos más pequeños, lo cual es útil si se tienen diferentes objetos de interés alrededor, solo considere que sus objetivos sean capaces de ser visualizados en todo el rango de visión y que a mayor distancia del Kinect al plano este radio digital decrece por lo que se necesita recalibrar en caso de querer filtrar otros objetos.

Distancia Kinect al plano de trabajo: Debemos de colocar el Kinect de forma perpendicular al plano de trabajo, preferiblemente que el punto de referencia esté en el centro del plano para que funcione apropiadamente, posteriormente se mide la distancia del Kinect al plano donde se tendrán las posiciones del mecanismo y esa distancia se introduce en la variable. Una mala referencia del plano hará que la precisión sea pobre, por lo que esta medida es crítica.

Puntos de la estela: El programa genera una estela que sigue a los objetivos detectados, esta estela se desvanece al reescribirse nuevos puntos, por lo que a mayor número de puntos la estela será mayor. Esta estela genera la traza de la trayectoria recorrida por el mecanismo.

Variables de salida: Estas variables corresponden a la distancia euclidiana (en línea recta) entre los centros de los objetivos (normalmente origen y efector final del manipulador), la distancia en el eje X y eje Y, útiles para obtener ángulos y posiciones en cada eje.

Descripción de las pruebas experimentales y resultados

Para el desarrollo de las pruebas experimentales se utilizó un robot manipulador industrial NACHI® MZ04 para recorrer una trayectoria en un plano vertical dentro del espacio de trabajo del manipulador. Posteriormente, se realizó la conexión de un sensor comercial Kinect a una computadora con Windows® 7 implementando un adaptador genérico. Sobre el manipulador se instaló un marcador de color verde para la detección de la posición de la última articulación; adicionalmente, un marcador de referencia se montó sobre una superficie blanca de contraste donde se trazó una geometría con puntos de referencia para determinar la precisión de la estimación de la posición del mecanismo, ver Figura 3.

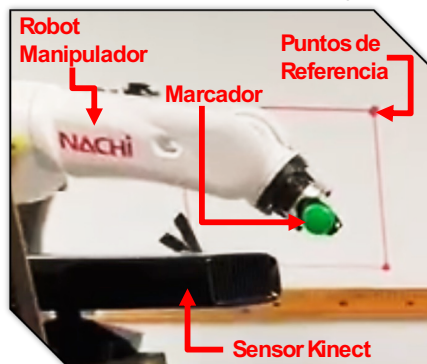


Figura 3. Adaptador genérico para sensor Kinect.

Sobre la computadora con Windows® 7 se corrió el programa de seguimiento de la trayectoria del manipulador, ver Figura 4a; estableciendo los parámetros apropiados para el seguimiento del marcador del robot se capturaron los datos de la posición de la última articulación con relación al marcador de referencia localizado en la superficie de contraste. El software de seguimiento genera una interfaz donde se muestra las posiciones obtenidas durante el seguimiento del mecanismo trazando una estela de la trayectoria generada, ver Figura 4b.

Considerando las posiciones obtenidas durante el seguimiento de la trayectoria del manipulador y las posiciones de los puntos de referencia en la superficie de contraste se puede determinar que la estimación de la posición del manipulador tiene un error máximo del 0.19% para la trayectoria generada y la velocidad programada. En la Tabla 3 se presentan las posiciones de los puntos de referencia con respecto al marcador localizado en la superficie de contraste, así como las posiciones obtenidas por el programa de seguimiento.

Con base en los resultados obtenidos por el sistema experimental de seguimiento de la trayectoria del robot manipulador NACHI® MZ04 es posible determinar que dicho sistema puede ser utilizado para determinar de forma confiable la posición de distintos puntos de interés en la configuración articular de un mecanismo. La estabilidad de la estimación del posicionamiento depende de la calibración del sistema, la velocidad del manipulador y la complejidad de las trayectorias. Para el esquema y parámetros experimentales propuestos en este trabajo, el sistema de seguimiento presenta un desempeño apropiado para actividades académicas.

```
#Variables para modificar el programa: -----
#Coloracion para identificacion (rango)
lower_limit = np.array([40, 70, 70])
upper_limit = np.array([00, 255, 255])

#Radio de las esferas:
Radio_size_minimum_detection = 50

#Distancia Kinect al plano de posiciones:
Distance_Kinect_Surface = 71 #Centimetros

#Puntos de la estela:
trail_lenght = 1800 #Mientras mas grande mas larga y duradera es la estela.
#Considerese que el sistema funciona a 60 Hz.

#Datos de salida (distancias en centimetros):
#NOTA: Para usar estas variables y exportarlas, basta con usarlas en el ciclo
#principal y publicarlas a una base de datos u otro programa en python, c++,
#c o matlab
Distancia_En_EL_Eje_X = None
Distancia_En_EL_Eje_Y = None
Distancia_Euclidiana = None

#NOTA: No se recomienda alterar otras variables no definidas previamente
#ya que el codigo es muy sensible a cambios y las variables del programa
#están basadas en calculos, direcciones de memoria u operaciones
#necesarias para la compatibilidad del Kinect con el sistema.
#-----
```

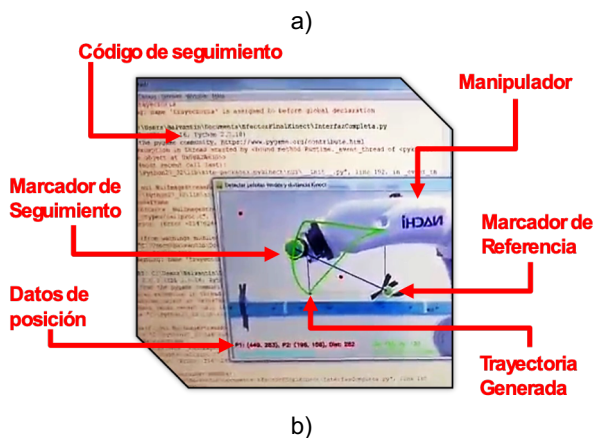


Figura 4 a). Parte del código de seguimiento para el sensor Kinect; b). Interfaz de seguimiento del manipulador.

Tabla 3. Estimación de la posición del manipulador.

Punto de Referencia	Posición real	Posición estimada
1	33.3	33.28
2	25.9	25.95
3	33.5	33.49

Conclusiones

El proyecto de “desarrollo de un sistema de seguimiento de trayectoria para un robot manipulador mediante tecnología accesible de reconocimiento de movimiento” se llevó a cabo y validó exitosamente mediante una serie de pruebas experimentales. El sistema fue generado con tecnología de bajo costo, implementando un sensor comercial Kinect, así como software de código abierto para el seguimiento de la trayectoria de un robot manipulador industrial NACHI® MZ04, ubicado en las instalaciones del laboratorio de manufactura de la División de Ingenierías, del Campus Irapuato-Salamanca, de la Universidad de Guanajuato. La estimación de la posición del marcador de seguimiento con respecto a un marcador de referencia a lo largo de una trayectoria predefinida arrojó un error del 0.19%.

La correspondencia de las posiciones de referencia con respecto a la estimación realizada por el sistema de seguimiento hace posible determinar que este sistema puede ser utilizado para futuras tareas de retroalimentación de controles en lazo cerrado para diferentes mecanismos utilizados en actividades académicas y de investigación. Sin embargo, es necesario realizar un mayor número de pruebas experimentales, utilizando diferentes mecanismos en múltiples trayectorias complejas recorridas a diferentes velocidades, así como también incluir un mayor número de marcadores de seguimiento en diferentes puntos de interés del mecanismo. Considerando todos estos factores, se podrá determinar un protocolo de calibración para cada el sistema experimental, lo que permitirá realizar tareas de seguimiento con resultados válidos para distintas condiciones de operación de los mecanismos.

Bibliografía/Referencias

- [1]. Palmieri, P., Melchiorre, M., Scimmi, L. S., Pastorelli, S., & Mauro, S. (2021). Human arm motion tracking by Kinect sensor using Kalman filter for collaborative robotics. In *Advances in Italian Mechanism Science: Proceedings of the 3rd International Conference of IFToMM Italy 3* (pp. 326-334). Springer International Publishing.
- [2]. Čorňák, M., Tölgyessy, M., & Hubinský, P. (2021). Innovative collaborative method for interaction between a human operator and robotic manipulator using pointing gestures. *Applied Sciences*, 12(1), 258.
- [3]. Tölgyessy, M., Dekan, M., & Chovanec, L. (2021). Skeleton tracking accuracy and precision evaluation of Kinect v1, Kinect v2, and the Azure Kinect. *Applied Sciences*, 11(12), 5756.
- [4]. Chico, A., Cruz, P. J., Váscquez, J. P., Benalcázar, M. E., Álvarez, R., Barona, L., & Valdivieso, Á. L. (2021, October). Hand gesture recognition and tracking control for a virtual UR5 robot manipulator. In *2021 IEEE fifth Ecuador technical chapters meeting (ETCM)* (pp. 1-6). IEEE.
- [5]. Cheng, X., & Kimoto, T. (2022, October). Kinect-based Data Processing Noncontact Robotic Arm Control System. In *2022 16th International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS)* (pp. 626-633). IEEE.
- [6]. Scoccia, C., Ubezio, B., Palmieri, G., Rathmair, M., & Hofbaur, M. (2024). Experimental Assessment of a Vision-Based Obstacle Avoidance Strategy for Robot Manipulators: Off-line Trajectory Planning and On-line Motion Control. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 110(3), 107.
- [7]. Forlini, M., Neri, F., Ciccirelli, M., Palmieri, G., & Callegari, M. (2024). Experimental implementation of skeleton tracking for collision avoidance in collaborative robotics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 134(1), 57-73.
- [8]. Nachi Robotics. (2018). NACHI MZ04: Compact and super-fast 6-axis industrial robot – Specifications brochure. Nachi Robotics. Retrieved from Nachi Robotics Publications 30/06/2025.
- [9]. Jia, W., Wang, H., Chen, Q., Bao, T., & Sun, Y. (2025). Analysis of Kinect-based human motion capture accuracy using skeletal cosine similarity metrics. *Sensors*, 25(4), 1047. <https://doi.org/10.3390/s25041047>
- [10]. Wang, Q., Kurillo, G., Ofli, F., & Bajcsy, R. (2015). Evaluation of pose tracking accuracy in the first and second generations of Microsoft Kinect. *arXiv preprint arXiv*, 1512.04134. <https://arxiv.org/abs/1512.04134>
- [11]. Choppin, S., & Wheat, J. (2012). Marker-less tracking of human movement using Microsoft Kinect. *International Society of Biomechanics in Sports Conference Proceedings*.

- [12]. Bilesan, A., Komizunai, S., Tsujita, T., & Konno, A. (2021). Improved 3D human motion capture using Kinect skeleton and depth sensor. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 33(6), 1408–1416.
<https://doi.org/10.20965/jrm.2021.p1408>
- [13]. Manevarthe, B., & Kalpathi, R. (2018, September). Depth based movable display using projector Kinect system. In *Proceedings of the 12th International Conference on Distributed Smart Cameras* (pp. 1-6).