

Metodología para el Mapeo 3D de la Exactitud de Robots Manipuladores

Sánchez Alonso Roger Ernesto¹, González Barbosa José Joel¹, Castillo Castañeda Eduardo¹, Ortega Moody Jorge Alberto²

¹Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Querétaro. Cerro Blanco No 141, Colinas del Cimatario, Querétaro, Qro, C.P. 76090

²Instituto Tecnológico Superior de San Andrés Tuxtla, Carretera Costera del Golfo Kilómetro 140+100 Matacapán, San Andrés Tuxtla, Veracruz, C.P. 95804

Resumen

Este trabajo presenta una metodología basada en medición fotogramétrica para la estimación de la exactitud de robots manipuladores espaciales. La medición implica la adhesión de un patrón de localización al elemento efector del robot, para que una cámara previamente calibrada adquiera imágenes del patrón mientras se desplaza por todo el espacio de trabajo. Las imágenes son procesadas y las matrices de localización que describen la posición del elemento efector son calculadas. Las posiciones estimadas se comparan con las programadas, lo que permite la determinación y posterior mapeo 3D de la exactitud del robot en todo su espacio de trabajo. La metodología propuesta fue validada experimentalmente con un robot paralelo tipo Delta.

Palabras clave: Mapeo 3D, Exactitud, Cámaras, Robot manipulador.

1. Introducción

En la actualidad, las exigencias de las tareas realizadas por robots manipuladores son mayores debido a los requerimientos de calidad. Estas exigencias impactan en sectores donde los manipuladores son aplicados, tales como cirugías médicas, manipulación de objetos en el espacio o en el las profundidades del océano, o bien ensamblando microcomponentes. Por ello, la evaluación del desempeño de los robots se convierte en una prioridad, y tal y como se señala en [1], esta prioridad apunta hacia la evaluación de la exactitud.

Existe una serie de técnicas para evaluar la exactitud de los robots, una de las más utilizadas es la técnica de medición por láser, donde el elemento principal es el interferómetro. Otra tecnología desarrollada es el *Laser Ball Bar* [2], el cual es un sistema de medición de contacto dotado con un láser dentro de una barra extensible y dos encoders de alta resolución que permiten determinar la posición relativa del elemento efector en coordenadas esféricas. Así se encuentran varios trabajos en la literatura donde utilizan la tecnología láser para evaluar la exactitud de robots manipuladores [3], [4] y [5], sin embargo, la principal desventaja de estos métodos es que algunos sólo miden desplazamientos lineales, otros son muy costosos y la mayoría se ven afectados por las interferencias mecánicas del robot.

Otra tecnología utilizada es la medición por ultrasonido [6], sin embargo, a pesar de ser una tecnología poco costosa, presenta muy poca resolución y en ocasiones se requiere mucho procesamiento en las señales obtenidas.

Por otro lado, hay métodos de medición basados en sistemas inerciales (acelerómetros e inclinómetros), pero resultan costosos comparados con sensores utilizados normalmente en robótica.

Finalmente, están los sistemas basados en fotogrametría, donde patrones de localización son montados sobre el efector final del robot para luego ser identificados y localizados tridimensionalmente a través de una imagen bidimensional. Estos sistemas superan muchas de las desventajas de las tecnologías presentadas anteriormente; permiten hacer mediciones sin contacto, obtener localización tridimensional, no se ven afectados por interferencias mecánicas y principalmente son sistemas relativamente baratos debido al bajo costo de las cámaras y algunos sistemas de adquisición.

En la literatura existen trabajos relacionados con pruebas de exactitud sobre robots manipuladores usando cámaras [7], [8] y [9]. Estos trabajos, presentan resoluciones en el orden de las centésimas de milímetro, lo cual para algunas aplicaciones, pueden ser insuficiente, o bien, utilizan patrones de localización difíciles de identificar, como arreglos de diodos emisores de luz (leds), pudiendo afectar la medición. Además las mediciones hechas en estos trabajos se realizan en pocos puntos de espacio de trabajo del robot, dejando muchos puntos sin sensor.

En este trabajo, se presenta una metodología basada en una técnica de medición con una sola cámara aplicada al mapeo 3D de la exactitud de robots manipuladores en todo su espacio de trabajo. La medición se realiza a través de la localización de un pequeño patrón de calibración, en este caso un tablero de ajedrez, a través de la técnica de calibración de cámaras propuesta por [10]. El sistema es robusto y presenta resoluciones del orden de las micras.

2. Descripción de la Metodología

En la Figura 1 se presenta la metodología propuesta. La metodología presentada en la Figura 1 implica la utilización de una cámara digital y patrón de localización, en este caso un tablero de ajedrez de dimensiones conocidas, lo suficientemente grande para poder identificar sus esquinas en las imágenes que serán adquiridas.

La metodología inicia con la calibración de la cámara. El modelo de calibración aplicado es el propuesto por [10], el cual está basado en el modelo geométrico Pinhole que relaciona un punto P en tres dimensiones en coordenadas del mundo y un punto C en dos dimensiones en coordenadas normalizadas del plano imagen, esta relación se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$C = AHP \quad (1)$$

Con:

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 & 0 \\ 0 & \beta & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$H = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

La matriz A se conoce como la matriz de parámetros intrínsecos, donde; α y β representan un factor de escala en los ejes x e y multiplicados por el valor del foco, u_0 y v_0 representan el punto central de la imagen y γ es el factor de asimetría de los pixeles.

La matriz H representa los parámetros extrínsecos; R (matriz de rotación) define la orientación del marco de referencia del patrón de localización (tablero de ajedrez) con respecto a la cámara, y T (vector de traslación) especifica las coordenadas del origen del marco de referencia de dicho patrón con respecto al origen del marco de referencia de la cámara.

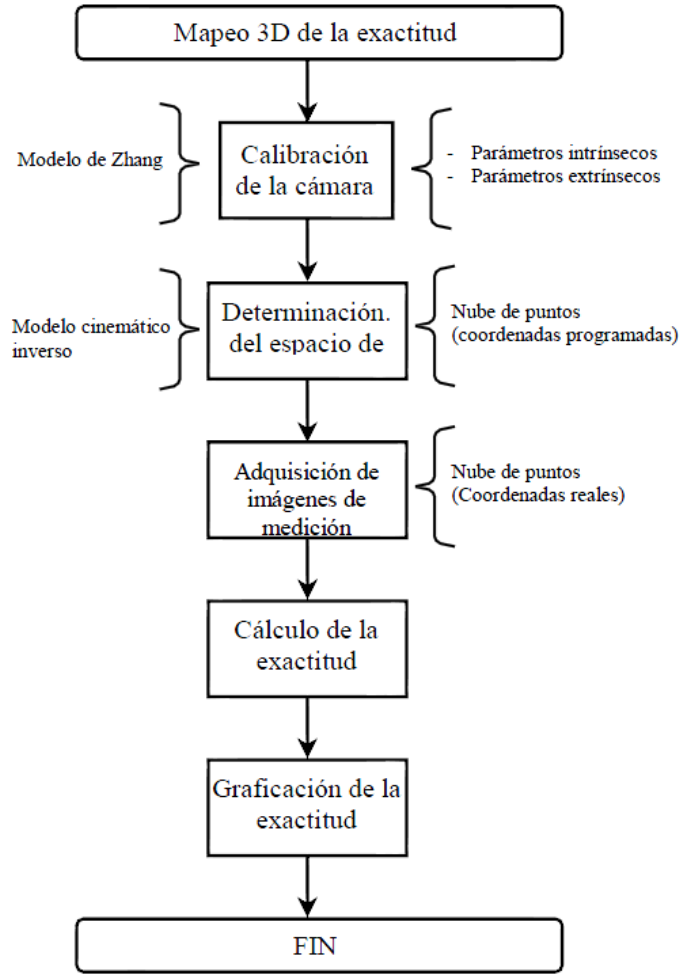


Figura 1. Metodología para el mapeo 3D de la exactitud de robots.

Para calibrar es necesario tomar al menos 20 imágenes del patrón de localización en diferentes posiciones y orientaciones dentro del espacio de medición. Estas imágenes permiten obtener suficientes puntos cuyas coordenadas del mundo son conocidas (pues se conoce las dimensiones del tablero de ajedrez), y cuyas coordenadas del plano imagen se pueden extraer. Lo anterior, basado en la ecuación (1), permite aplicar el algoritmo de optimización de [10] para finalmente determinar la matriz A de parámetros intrínsecos y las matrices H de parámetros extrínsecos.

Lo más importante de la etapa de calibración es la obtención de los parámetros intrínsecos, pues si se adquiere nuevas imágenes del patrón de localización en cualquier punto del espacio de medición (puntos en coordenadas del mundo y puntos en coordenadas del plano imagen), la ecuación (1) permitirá estimar la posición y orientación de dicho patrón de localización (T y R respectivamente). En este caso, la orientación carece de importancia pues el robot es puramente traslacional, lo importante es el vector de traslación pues se entenderá como la posición de la plataforma móvil (efector final del robot).

Una vez que se calibra la cámara es necesario determinar las posiciones de referencia o posiciones programadas que serán evaluadas en exactitud. Debido a que se pretende realizar un mapeo de la exactitud en todo el espacio de trabajo, es necesario discretizar dicho espacio de trabajo en M puntos. Lo anterior se realiza a través de un barrido de coordenadas en los ejes x , y , z resolviendo su modelo cinemático inverso en posición.

Posteriormente cada una de las M posiciones programadas son ejecutada por el robot mientras trae consigo el patrón de localización en el efector final, esto para extraer imágenes de medición del mismo.

Gracias al proceso de calibración es posible obtener a partir de las imágenes de medición la posición real del patrón, por lo tanto la posición real del efector final.

De manera que, sea:

xc_i, yc_i, zc_i las coordenadas de la i -ésima posición programada Pc_i .

x_i, y_i, z_i las coordenadas de la i -ésima posición real P_i .

Con $i=1,2...M$.

La exactitud de la i -ésima posición se define como:

$$Acc_i = \|nc_i - n_i\| \quad (4)$$

Donde:

$$nc_i = \|Pc_i\| = \sqrt{xc_i^2 + yc_i^2 + zc_i^2} \quad (5)$$

$$n_i = \|P_i\| = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} \quad (6)$$

Las coordenadas de las posiciones programadas y de las posiciones reales no se pueden comparar directamente para extraer la exactitud, pues pertenecen a sistemas de referencias distintos, Q para la cámara y S para el robot (ver Figura 3). Es por ello que en las ecuaciones (5) y (6) se utiliza la magnitud de dichos vectores de posición.

Finalmente, con los valores de exactitud asociados a cada i -ésima posición programada se puede obtener un mapeo 3D de la exactitud del robot en todo su espacio de trabajo.

3. Validación experimental.

La metodología propuesta se aplicó sobre el robot PARALLIX LKF-2040 (ver Figura 2). Se trata de un robot paralelo tipo Delta, con tres grados de libertad puramente traslacionales, diseñado y manufacturado en el IPN-CICATA. El robot posee dos plataformas, una fija y otra móvil, unidas por tres piernas articuladas. La plataforma fija sirve de base para el montaje de los servomotores, mientras que la plataforma móvil es la que se desplaza sobre el espacio de trabajo junto con el efector final.

Para realizar la medición y mapeo 3D de la exactitud del robot, se utilizó equipo fotogramétrico y se aplicó algunas técnicas y procedimientos computacionales, los cuales se describen a continuación.

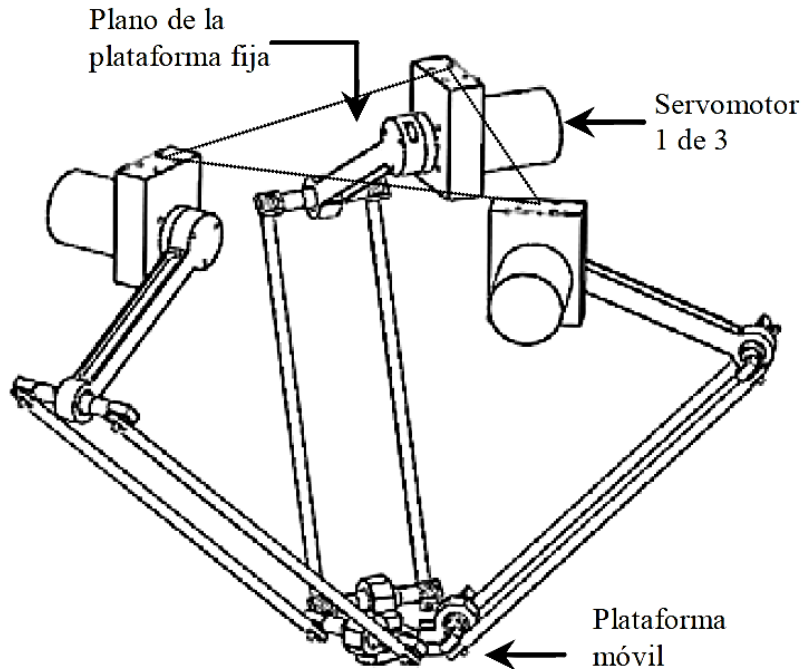


Figura 2. Robot PARALIXLKF-2040.

3.1 Calibración de la cámara

La cámara utilizada para la medición es una USB CMOS color, modelo DKF-72AUC02 con un lente modelo M0814-MP2, de IMAGINGSOURCE. El software de adquisición de imágenes es el IC- CAPTURE versión 2.2, de la misma compañía. El tamaño de las imágenes es 2592x1944 píxeles.

El patrón de localización utilizado es un tablero de ajedrez de 10x10 cuadros de 1x1 cm cada uno. El patrón es adherido a una base de vidrio plana para reducir el efecto de distorsión radial y tangencial.

El proceso de calibración implicó la extracción de 30 imágenes dentro del espacio de trabajo del PARALLIX LKF-2040. El arreglo físico del experimento se puede apreciar en la Figura 3.

Los resultados de los parámetros intrínsecos se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros intrínsecos de la cámara

Parámetros				
α	β	u_0	v_0	γ
3815.74	3800.99	1435.38	962.96	0.00

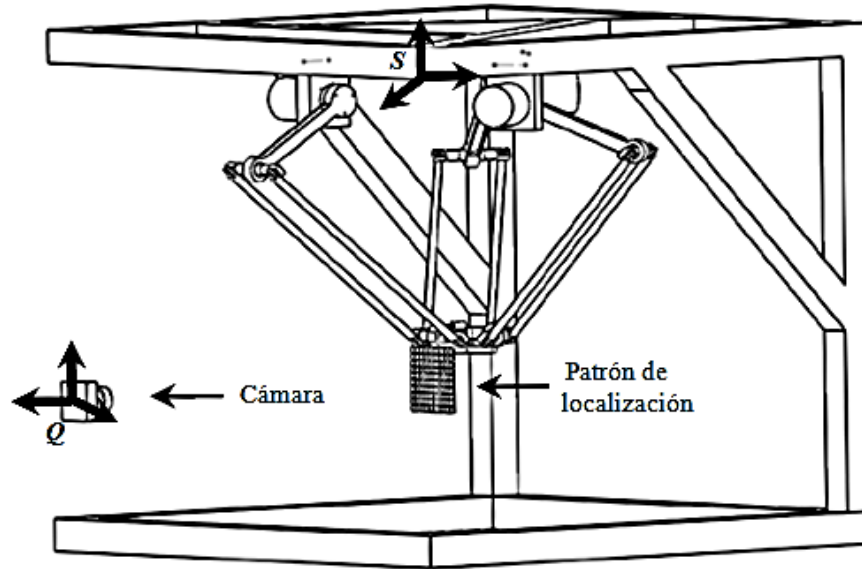


Figura 3. Arreglo físico del experimento.

3.2 Medición de la exactitud del robot

Para determinar las M posiciones programadas se realizó un barrido de coordenadas cada 3 cm en las direcciones x , y , z del espacio de trabajo del robot resolviendo su cinemática inversa (Velázquez, 2003) en Matlab. En la Figura 4 se muestra la nube de puntos que representa las $M=2252$ posiciones programadas.

Cada una de las posiciones programadas es ejecutada por el robot mientras trae consigo el patrón de localización y se extrae una imagen del mismo. Gracias al proceso de calibración es posible obtener la posición real del patrón, es decir de la plataforma móvil (considerada como efector final). Una vez que se procesan las 2252 imágenes se obtiene un valor de exactitud para todas las posiciones seleccionadas del espacio de trabajo. Sobre estos datos se realizó un tratamiento estadístico cuyos resultados se presentan en la tabla 2.

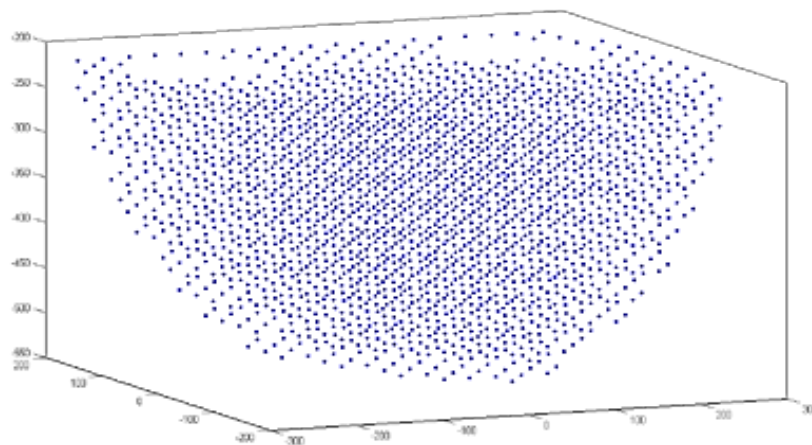


Figura 4. Posiciones programadas

Tabla 2. Resultados de la medición

Parámetro	Valor (mm)
Error medio	3.608
Menor error registrado	0.002
Mayor error registrado	21.357

3.3 Mapeo 3D de la exactitud

Los datos obtenidos permiten realizar un mapeo 3D de la exactitud del robot PARALLIX LKF-2040 en todo su espacio de trabajo (ver Figura 5).

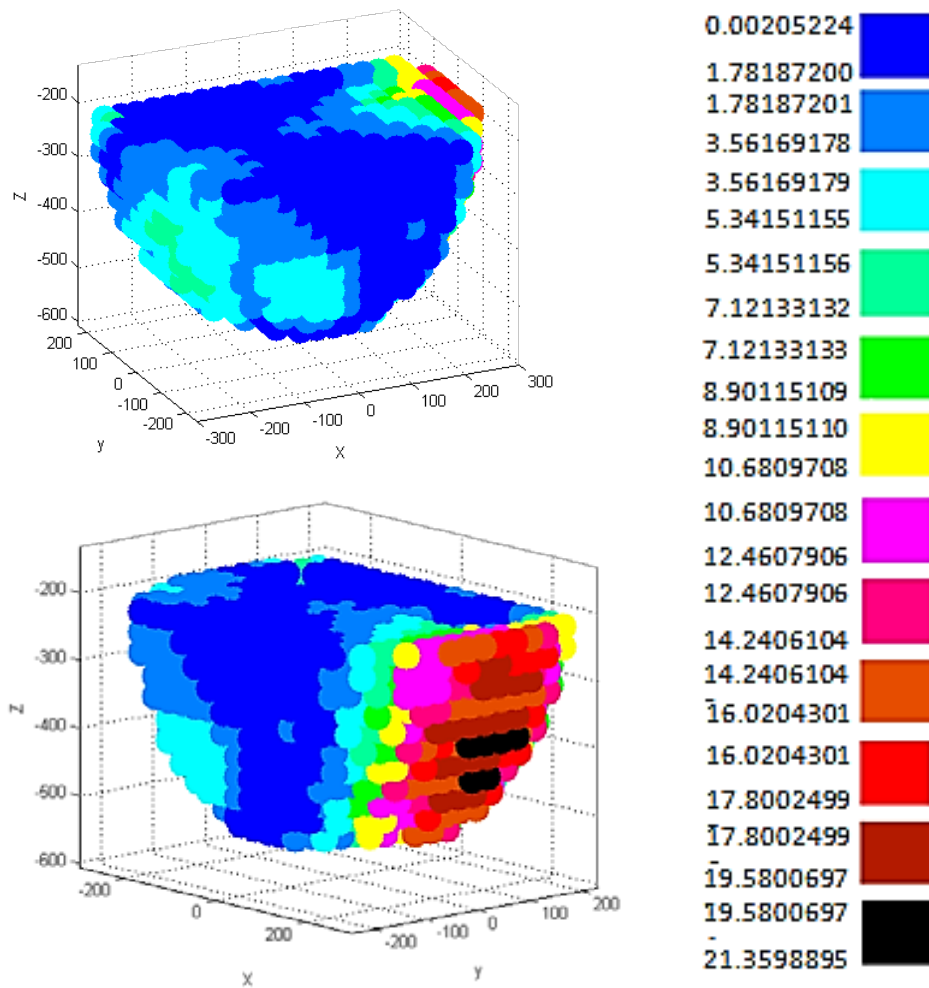


Figura 5. Vistas del mapeo 3D de la exactitud del robot PARALLIX LKF-2040

En la Figura 5 se observa que la zona de menor exactitud del robot está alojada en la parte derecha del espacio de trabajo del robot, es decir sesgado hacia la parte positiva del eje x. Esta figura además representa lo más externo del espacio de trabajo, para poder observar a detalle el comportamiento de la exactitud del robot, se pueden extraer planos sobre el eje z (ver Figura 6).

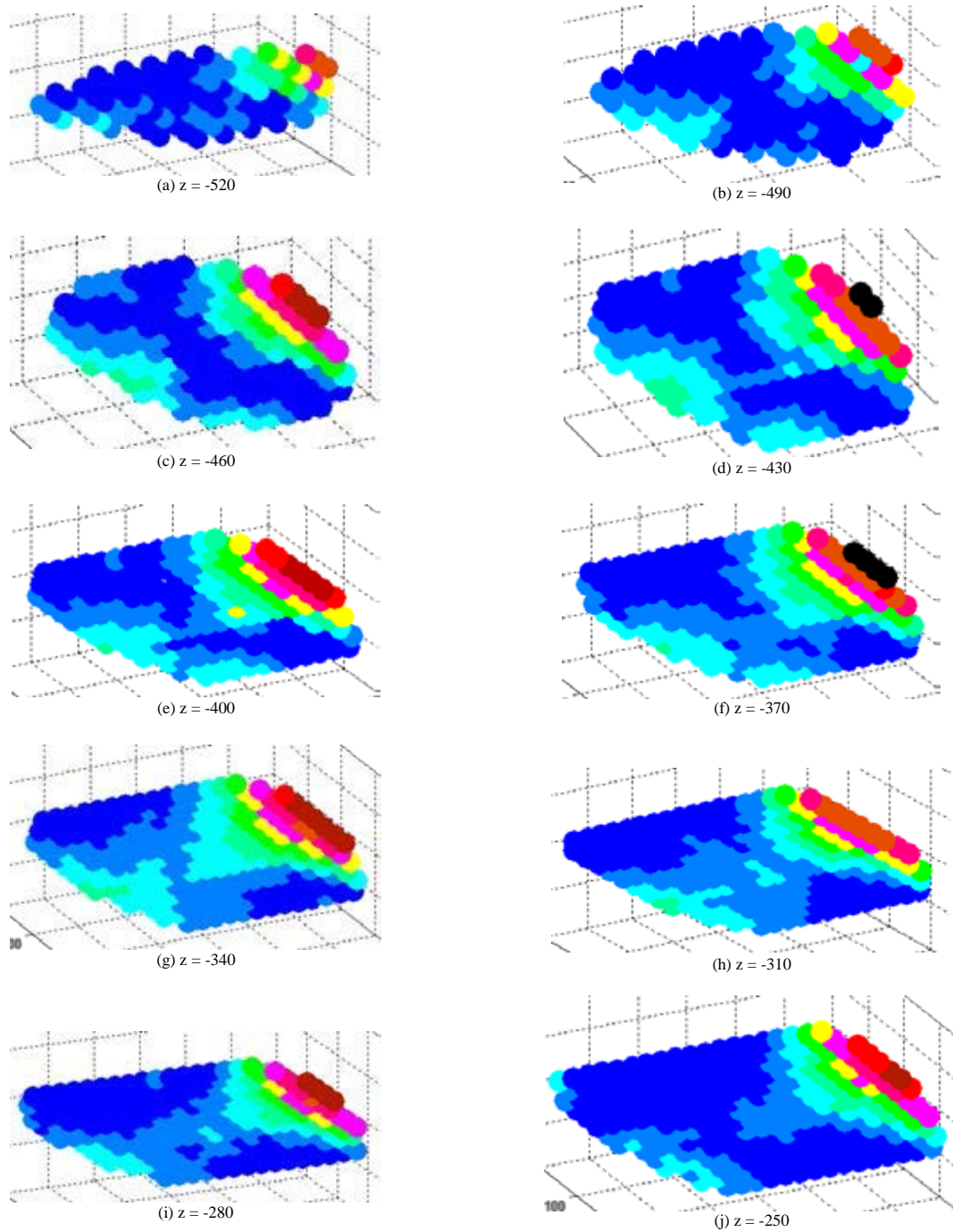


Figura 6. Mapeo de la exactitud del robot PARALLIX LKF-2040 por planos sobre el eje z.

El mapeo por planos mostrados en la Figura 6 muestra que efectivamente hay un sesgo de los mayores errores del robot hacia la parte positiva del eje x con un comportamiento simétrico sobre el eje y.

Según (Klimchik, *et al.*, 2013) la inexactitud de un robot depende de muchos factores, pero principalmente es causada por errores de manufactura y ensamble, y errores debido a deflexiones producidas por fuerzas y momentos durante la operación del robot.

Esta técnica de medición se realiza con mínima carga sobre la plataforma móvil del robot, por lo que se puede intuir que los errores del robot y su comportamiento sesgado son debidos a defectos de manufactura de componentes y ensamble de los mismos.

En la literatura no está reportada la aplicación de una técnica de medición de exactitud a todo el espacio de trabajo de un robot manipulador. Sí está reportada la medición en algunos puntos del mismo, por ejemplo en [3] a través de tecnología láser se reporta la medición en cuatro puntos del espacio de trabajo, encontrando resoluciones en el orden de las micras. En [4] también se usa tecnología láser y a través de la medición de seis puntos del espacio de trabajo se encuentran resoluciones en el orden de las centésimas de milímetro. En [6] se reportan resoluciones de décimas de milímetro y en [8] de centésimas de milímetro, en ambos casos se muestrean pocos puntos del espacio de trabajo.

4. Conclusiones

Se desarrolló una metodología basada en una técnica de calibración de cámaras para realizar mapeos 3D de la exactitud de robots manipuladores. La técnica requiere únicamente una cámara de alta resolución y un patrón de localización. La precisión de esta técnica depende de la resolución de la cámara.

La metodología fue validada experimentalmente con el robot paralelo PARALLIX LKF-2040, los resultados de la medición indican un error promedio de posicionamiento de 3.608 mm con una desviación estándar de 3.748 mm. El mapeo 3D muestra un comportamiento sesgado en la exactitud del robot, la zona con menos exactitud está alojada en la parte positiva del eje x , presentando un comportamiento simétrico sobre el eje y .

La metodología propuesta es muy robusta y de elevada resolución, y puede ser implementada en cualquier robot manipulador sin importar su configuración. Los resultados de este trabajo o aplicaciones similares sirven para evaluar el desempeño de un robot manipulador y pueden ser utilizados como datos fuente para la calibración del mismo.

Referencias

- [1] Merlet J. (2007). Jacobian, manipulability, condition number and accuracy of parallel robots. Springer Tracts in Advanced Robotics. 28, 175- 184.
- [2] Fan K., Wang H., Shiou F., Ke C. (2004). Design analysis and applications of a 3D laser ball bar for accuracy calibration of multiaxis machines. Journal of Manufacturing Systems. 23, 194-203.
- [3] Park K., Park C., Shin Y. (2008). Performance Evaluation of Industrial Dual-Arm Robot. International Conference on Smart Manufacturing Application. 437-440.
- [4] Liao H., Yoshimura K., Utsugida T., Matsumiya K., Masamune K., Dohi T. (2007). Surgical manipulator with linkage mechanism for anterior cruciate ligament reconstruction. International Conference on Intelligent Robots and Systems. 1266-1271.
- [5] Yang C., He J., Han J., Liu X. (2009). Real-time state estimation for spatial six-degree-of-freedom linearly actuated parallel robots. Mechatronics. 19, 1026-1033.
- [6] Aoyagi S., Kayama Y., Okabe S., Sasaki K., Takano M. (1995). Measurement of 3-D position and orientation of a robot using ultrasonic waves. Journal of the Japan Society for Precision Engineering. 61, 964-968.
- [7] Motta J., de Carvalho G., McMaster R. (2001). Calibration using a 3D vision-based measurement system with a single camera. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 17, 487-497.
- [8] Neumayr R., Zsombor-Murray P., O'Leary P. (2011). Precise pose measurement with single camera calibration for planar parallel manipulators. Canadian Society for Mechanical Engineering. 35, 201-213.

- [9] Meng Y., Zhuang H. (2007). Autonomous robot calibration using vision technology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 23, 436-446.
- [10] Zhang Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22, 1330-1334.