

CALIBRACIÓN CÁMARA-BRAZO PARA EL SERVO CONTROL VISUAL DE MANIPULADORES SERIALES ROBÓTICOS

Hand-eye calibration for visual servoing in robotic serial manipulators

RESUMEN

Se presenta una metodología general para la obtención semi-automatizada de la matriz de calibración cámara-brazo, que en manipuladores robóticos representa la transformación homogénea de coordenadas entre el centro óptico de la cámara y el efector final. En el método presentado, la intervención humana se limita a la pre-selección de las posiciones del robot que mejor ubican el patrón de calibración dentro de las imágenes.

El método estima inicialmente los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara, para luego determinar la calibración cámara-brazo por medio de un proceso iterativo altamente robusto al ruido tanto a nivel de pixel como de proceso. Se presentan los algoritmos propuestos, las interfaces gráficas generadas, resultados y se discute acerca de los trabajos futuros.

PALABRAS CLAVES: Calibración, cámara-brazo, calibración de cámara, servo control visual.

ABSTRACT

A general methodology for the semi-automated computation of the hand-eye calibration matrix is presented. In a robot manipulator, the hand-eye calibration is an homogeneous transformation matrix representing the pose of the camera with respect to the end-effector. The presented method requires human on the loop just for the pre-selection of adequate robot positions that allows the calibration pattern to fit into the images.

The presented method estimates the intrinsic and extrinsic parameters first, and then the hand-eye calibration by means of an iterative method highly robust to the pixel and process noise. Algorithms, graphical user interfaces and results are presented. Future work is discussed.

KEYWORDS: Hand-eye calibration, camera calibration, visual servoing.

1. INTRODUCCIÓN

El servo control visual es una técnica de control automático donde la realimentación de lazo cerrado se lleva a cabo con la información obtenida de sensores visuales. Aunque esta técnica fue inicialmente propuesta dentro de la comunidad científica de la robótica, con el fin de controlar el movimiento de brazos articulados, los avances en el área se han ido incorporando con éxito en una gran variedad de aplicaciones de automatización y control industrial [1].

En el caso específico de los manipuladores articulados con al menos seis grados de libertad, una de las configuraciones más populares es la llamada cámara-brazo, conocida como "eye-in-hand" en la literatura en inglés, que se obtiene cuando la cámara está ubicada en el efector final, es decir, en el último eslabón de la cadena articulada. Esta configuración tiene la ventaja de

proporcionar una vista clara y de primer plano del objeto a manipular, lo que facilita su identificación, ubicación y seguimiento. La configuración cámara-brazo sin embargo, requiere de conocer con alto grado de precisión la transformación de coordenadas entre el centro óptico de la cámara y el efector final, con el fin de ubicar el objetivo en el espacio tri-dimensional, usualmente con respecto al origen de coordenadas del robot.

A medida que los sistemas de servo control visual ganan popularidad, se hace necesario desarrollar metodologías de calibración robustas a la naturaleza dinámica y no estructurada del ambiente donde estos sistemas operarán, que hagan de su utilización una alternativa de automatización viable para su operación en planta de forma segura, confiable, y que minimice costos de mantenimiento.

GERMÁN A HOLGUÍN L

Ing. Electricista, M.Sc.

Profesor Asistente

Universidad Tecnológica de Pereira
gahol@ohm.utp.edu.co

MAURICIO HOLGUÍN LONDOÑO

Ing. Electricista, M.Sc.

Profesor Auxiliar

Universidad Tecnológica de Pereira
mau.hol@utp.edu.co

Un problema frecuente es que la calibración se puede perder con relativa facilidad debido a la vibración a la que está expuesta la cámara por estar montada en el efector final. Algunas técnicas de servo control visual libres de calibración [2] han probado cierta viabilidad, sin embargo, por precisión y estabilidad, los métodos basados en calibración siguen predominando. Por esta razón, se hace necesario desarrollar una metodología que permita la calibración automática en planta de sistemas cámara brazo, tal que el procedimiento pueda ser repetido con facilidad, tantas veces como sea necesario y sin sacrificar productividad ni incurrir en tiempos de parada no programados.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

Tal y como se ilustra en la figura 1, un sistema cámara-brazo se crea al instalar una cámara rígidamente en el efector final de un manipulador de al menos seis grados de libertad.

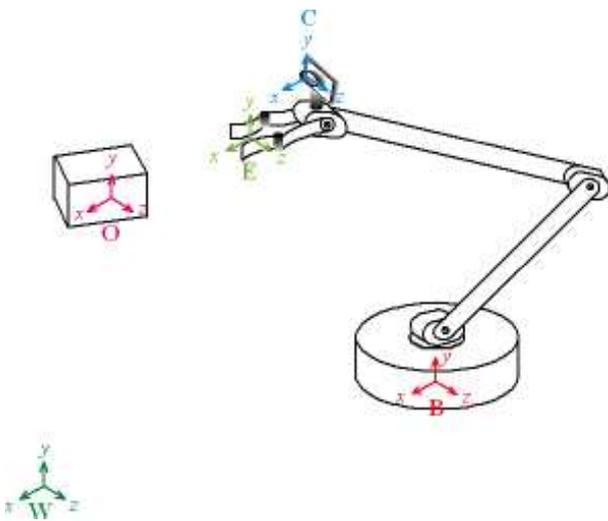


Figura 1. Sistema Cámara-Brazo

Este último requerimiento es debido a que menos de seis grados de libertad harían que el sistema fuese no holonómico, propiedad de gran aplicación en robótica móvil y sistemas de transporte [3], pero de poca utilidad en manufactura avanzada y ensamble industrial. De esta forma, toda posición del robot podrá ser representada vectorialmente mediante 6 parámetros, 3 para la posición en el espacio tri-dimensional y 3 para la orientación de acuerdo con alguna de las representaciones angulares de Euler [4], o matricialmente mediante una matriz de transformación homogénea H, como en la ecuación (1).

$$H = \begin{pmatrix} R & \vec{t} \\ \vec{0}^T & 1 \end{pmatrix} \tag{1}$$

Donde la submatriz *R* representa la orientación, y el vector \vec{t} la posición en el espacio tri-dimensional [5].

2.1. Nomenclatura

Sea B el origen de coordenadas del robot, ubicado en la base del mismo. C el centro óptico de la cámara ubicada en el efector final, E el origen de coordenadas del efector final, O el origen de coordenadas del objeto a manipular y W el origen de coordenadas global o de referencia.

Las transformaciones entre un centro de coordenadas y otra, de forma similar a Denavith-Hartenberg [6], están denotadas por la letra mayúscula *H* que indica que es un matriz de transformación homogénea, un subíndice derecho y un superíndice izquierdo que indican respectivamente el centro de coordenadas definido y la referencia utilizada. Por ejemplo, ${}^E H_B$ representa la matriz de transformación homogénea que define la posición del efector final E con respecto a la base del robot B. La figura 2 muestra el conjunto de transformaciones utilizadas en el sistema en estudio.

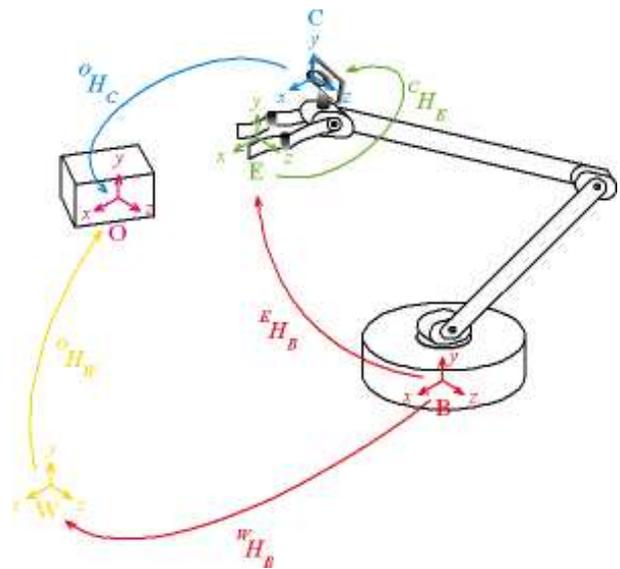


Figura 2. Transformaciones homogéneas

Nótese que todos los sistemas de coordenadas escogidos deben ser consistentes bien sea con la regla de la mano derecha, o izquierda. Lo que no es posible, es utilizarlos de forma combinada.

La cámara mantendrá siempre una posición relativa constante con respecto al efector final. La matriz de coordenadas homogéneas ${}^C H_E$ que representa la posición del centro óptico de la cámara con respecto al efector final, es conocida como la matriz de calibración cámara-brazo, y cuya determinación es el objeto del presente artículo.

2.2. Cadena de Transformaciones

Es evidente que para que un sistema como el de la figura 2 sea consistente, se debe cumplir que:

$${}^O H_W * {}^W H_B = {}^O H_C * {}^C H_E * {}^E H_B \quad (2)$$

Donde el operador * está definido como la multiplicación matricial. Ambos lados de la ecuación (2) representan la posición del objeto de interés con respecto a la base del robot ${}^O H_B$, que es usualmente lo que se trata de estimar en una aplicación de servo control visual. En la práctica se utiliza sólo el lado derecho de la ecuación (2), donde la posición del objeto respecto a la cámara ${}^O H_C$ puede ser estimada en tiempo real (asumiendo conocidos los parámetros intrínsecos de la cámara). La posición del efector final ${}^E H_B$ es conocida, ya que el controlador del robot conoce las lecturas de los encoders en los servos y la cinemática directa del robot. De esta cadena de transformaciones, sólo falta por determinar entonces la calibración cámara-brazo ${}^C H_E$, que por ser una constante puede realizarse a-priori. La transformación base-referencia ${}^W H_B$ también es constante, y aunque no se utiliza durante la operación normal del sistema, conocerla resulta de interés práctico ya que permite validar los resultados de la calibración tanto de forma cualitativa como cuantitativa.

2.3 Ecuación homogénea

En la calibración se utilizó un objeto patrón de dimensiones conocidas fijo en el espacio de trabajo del robot en una posición y orientación plenamente establecida con respecto al origen de coordenadas global. Como objeto patrón se utilizó una superficie plana con fondo blanco y textura tipo tablero de ajedrez, donde la posición de cada uno de los $m \times n$ vértices interiores de la cuadrícula, con respecto al origen de coordenadas global, es conocida. Nótese además que es posible hacer coincidir los orígenes de coordenadas global y del objeto patrón, haciendo que ${}^O H_W$ sea convenientemente igual a la matriz identidad, transformando la ecuación (2) en:

$${}^W H_B = {}^W H_C * {}^C H_E * {}^E H_B \quad (3)$$

La ecuación (3) contiene dos transformaciones constantes, ${}^W H_B$ y ${}^C H_E$, independientes de la posición del efector final y que constituyen las incógnitas a encontrar. A cada posición del robot $({}^E H_B)_i$ corresponde entonces una matriz de parámetros

extrínsecos de la cámara $({}^W H_C)_i$. Por supuesto, sólo podrán utilizarse posiciones del efector final que permitan que el objeto patrón este contenido totalmente en la imagen capturada por la cámara, como es el caso de la figura 3, donde se muestra la imagen del patrón de calibración capturada por la cámara, montada en el efector final, para un posición específica del robot.

El número de muestras N a utilizar debe ser optimizado para minimizar el error sin causar sobre-ajuste. Cada muestra debe exhibir independencia, lo que en la práctica se logra tomando imágenes en posiciones no similares, por ejemplo, alterando suficientemente el ángulo de incidencia, la posición del robot de una imagen a otra, procurando cubrir la mayor área de trabajo posible.



Figura 3. Detección de esquinas del patrón de calibración

En la literatura, se pueden encontrar diferentes métodos para resolver la ecuación homogénea (3). Por ejemplo, en [7] Tsai y Lenz, proponen un método geométrico para encontrar una solución algebraica. Dornaika y Haraud proponen en [8], un método para hallar simultáneamente tanto la calibración cámara-brazo, como la transformación referencia-base. Para ello, se soluciona una ecuación de matrices homogéneas de la forma $AX = ZB$, y se sugiere separar la estimación de la rotación y la traslación.

Las soluciones algebraicas tienen la desventaja de no ser robustas al ruido, por lo que en la práctica los resultados presentan bajo desempeño. Hirsh, DeSouza, y Kak [9], establecieron el método que arrojó mejores resultados en nuestra comparación. Aquí, se formula la ecuación (3) como un problema de optimización no-lineal separando la parte rotacional de la traslacional, al igual que en [8], pero resolviendo las incógnitas de forma iterativa, método que es naturalmente más robusto al ruido tanto a nivel de píxel como de proceso.

3. PROCEDIMIENTO

La metodología que se propone puede ser ejecutada en línea ya que el costo computacional del método es despreciable en comparación con el tiempo que tarda el robot en desplazarse hasta las N posiciones predeterminadas $\left({}^E H_B\right)_i$, donde se tomarán N correspondientes imágenes del patrón de calibración. Las principales etapas del proceso se describen a continuación.

3.1. Vértices del patrón de calibración

En cada imagen capturada, se deben encontrar los vértices interiores de la cuadrícula, tal como se muestra en la figura 3. Para ello, es posible utilizar el detector de esquinas y bordos de Harris [10], o el detector de bordos optimizado de Canny [11]. Sin embargo, como es necesario etiquetar estos vértices con el mismo número en todas las imágenes, resulta de gran utilidad detectar las líneas que forman la cuadrícula utilizando la transformación de Hough, como en [12]. El resultado de esta etapa será un vector de coordenadas (x, y) de tamaño $m \times n$, para cada imagen i .

3.2 Parámetros de la cámara

Los parámetros intrínsecos de la cámara se obtienen utilizando el método flexible propuesto por Zhang en [13] que utiliza el algoritmo de minimización de Levenberg-Marquardt para hallar las distancias focales, el punto principal, y los parámetros de distorsión radial.

Luego, para cada posición $\left({}^E H_B\right)_i$ se pueden encontrar los parámetros extrínsecos $\left({}^W H_C\right)_i$, [5].

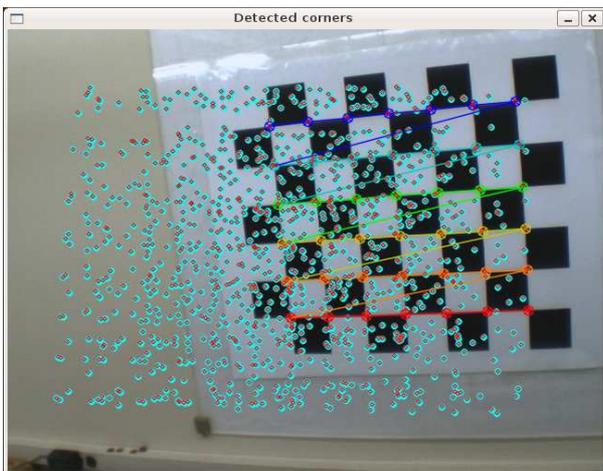


Figura 4. Calibración de Cámara

La figura 4, muestra la última de las N imágenes capturadas. Los vértices de la cuadrícula de todas las N imágenes, se han superpuesto en verde.

Ya que las coordenadas reales con respecto a la referencia global de cada uno de los vértices de la cuadrícula son conocidas, se utilizaron las recién calculadas matrices de calibración para retro-proyectarlos en cada una de sus respectivas imágenes. El resultado de esta prueba es superpuesto con color rojo en la misma figura 4, probando así que la calibración es satisfactoria.

3.3. Problema de Optimización no-lineal

De regreso a la ecuación (3), y separando inicialmente la parte rotacional de las matrices homogéneas, se tiene que

$${}^W R_B = \left({}^W R_C\right)_i * {}^C R_E * \left({}^E R_B\right)_i \quad (4)$$

En la iteración inicial se asume que ${}^C R_E$ es la matriz identidad. Entonces, la iteración $j + 1$ está dada por

$$\left({}^W R_B\right)_{j+1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\left({}^W R_C\right)_i * \left({}^C R_E\right)_j * \left({}^E R_B\right)_i \right) \quad (5)$$

El mayor cuidado que se debe tener al evaluar (5), es recordar que las funciones suma y cociente no están definidas para los rotacionales en la forma aritmética convencional. Debe utilizarse aritmética de cuaterniones [14], por lo que la representación matricial de la rotación debe ser convertida primero a cuaternión. El resultado deberá ser regresado de nuevo a la representación matricial. La iteración termina encontrando el nuevo valor de ${}^C R_E$ para lo que será necesario pre y pos multiplicar por algunas transformaciones homogéneas inversas

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\left({}^C R_W\right)_i * \left({}^W R_B\right)_{j+1} * \left({}^B R_E\right)_i \right) = \left({}^C R_E\right)_{j+1} \quad (6)$$

El proceso iterativo continúa hasta que el cambio en las matrices buscadas sea menor a la tolerancia deseada. La convergencia del método está probada en [9]. De nuevo, la función promedio en la ecuación (6) debe ser entendida como el promedio de las rotaciones descritas por las matrices R , y no como un simple promedio matricial aritmético.

Una vez determinadas ${}^W R_B$ y ${}^C R_E$, la parte traslacional puede ser calculada entonces utilizando la misma estrategia. La formulación, mostrada en la ecuación (7), es sin embargo un poco más simple ya que en primer

lugar se pueden asumir constantes las partes rotacionales y en segundo lugar, porque en geometría euclidiana la parte translacional sí es operada con aritmética clásica.

$$\begin{pmatrix} {}^wR_B & \overrightarrow{{}^wt_B} \\ \vec{0}^T & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^wR_C & \overrightarrow{{}^wt_C} \\ \vec{0}^T & 1 \end{pmatrix}_i * \begin{pmatrix} {}^cR_E & \overrightarrow{{}^ct_E} \\ \vec{0}^T & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} {}^ER_B & \overrightarrow{{}^Et_B} \\ \vec{0}^T & 1 \end{pmatrix}_i \quad (7)$$

4. IMPLEMENTACIÓN

El método y los algoritmos mencionados fueron implementados en su totalidad utilizando el compilador GNU de C/C++ para Linux. Se utilizaron además las librerías OpenCV [15], libdc1394 [16], y lapack3 [17], para procesamiento de imagen, captura de vídeo de cámaras IEEE1394 y álgebra lineal respectivamente.

Adicionalmente, se creó una interfaz gráfica de usuario que permite controlar el sistema remotamente desde una terminal de supervisión vía TCP/IP. Las interfaces gráficas de usuario fueron creadas en LabVIEW® de National Instruments, con el fin de que pueda ser utilizada en cualquier sistema operativo. La figura 5, muestra el menú principal desde donde se pueden escoger las N posiciones deseadas, o simplemente iniciar el procedimiento de calibración utilizando un conjunto de posiciones preseleccionado.

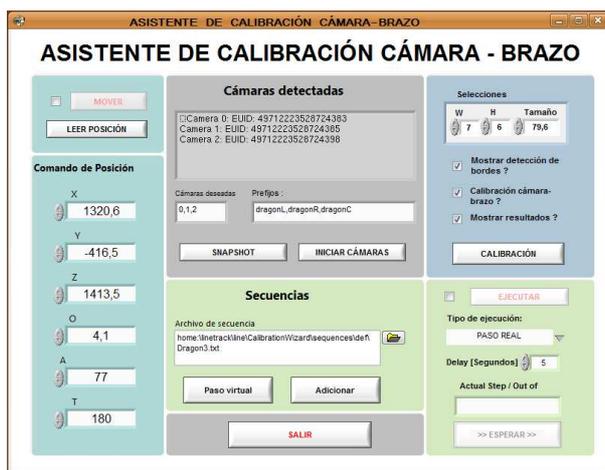


Figura 5. Interfaz de control

La interfaz gráfica permite además calibrar simultáneamente cualquier número de cámaras, lo que en la práctica está limitado por el número actual de cámaras que puedan ser fijadas del efector final. Las matrices resultado de la calibración son almacenadas para su

futura utilización en el sistema de servo control visual y pueden ser visualizadas en pantalla como se muestra en la figura 6.

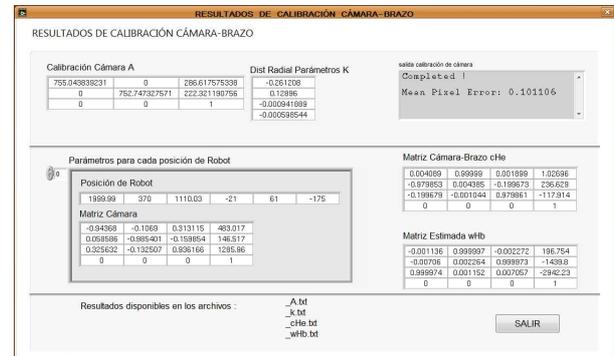


Figura 6. Resultados de la calibración

5. RESULTADOS Y TRABAJOS FUTUROS

La metodología presentada permite encontrar en forma semi-automatizada la matriz de calibración cámara-brazo para un sistema de servo control visual. El método toma sólo un par de minutos en ejecutarse, siendo el movimiento del robot el principal contribuyente al tiempo de ejecución. En el experimento presentado se utilizaron 27 imágenes del patrón de calibración tomadas desde diferentes posiciones y orientaciones del efector final. Una vez se han obtenido todas las imágenes requeridas, el método tarda menos de 5 segundos en converger, presentar y almacenar los resultados.

Consideramos que el método es semi-automatizado, ya que aún se requiere intervención humana para la preselección de las posiciones de calibración. En la actualidad, estamos trabajando para incorporar los elementos necesarios que permitan al sistema escoger autónomamente dichas posiciones del efector final de forma óptima.

El procedimiento discutido puede ser considerado, en el sentido estadístico, como la captura de una sola muestra del valor de la matriz de calibración. Una mejor estimación del valor real puede ser obtenida simplemente aumentando el número de muestras que se obtienen para el mismo conjunto de posiciones preseleccionadas y aplicando cualquier técnica clásica de estimación paramétrica.

Gracias a que el método calcula además la transformación referencia-base, es posible hacer una evaluación cualitativa del resultado de la calibración, simplemente ordenando al robot desplazarse a una posición cuyas coordenadas respecto del origen global sean conocidas.

El método presentado es de gran utilidad, ya que permite recalibrar el sistema completamente, en minutos, tantas

veces como sea necesario, presionando tan sólo un botón, sin afectar significativamente la producción, ni incrementar tiempos de parada no programados.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Chaumette y S. Hutchinson, "Visual servo control I. basic approaches," *Robotics and Automation Magazine*, IEEE, vol. 13, pp. 82–90, Dec. 2006.
- [2] F. Chaumette y S. Hutchinson, "Visual servo control II, advanced approaches [tutorial]," *Robotics & Automation Magazine*, IEEE, vol. 14, pp. 109–118, March 2007.
- [3] K. Kyriakopoulos, P. Kakambouras y N. Krikelis, "Potential fields for nonholonomic vehicles," in *Intelligent Control, 1995.*, Proceedings of the 1995 IEEE International Symposium on, pp. 461–465, Aug 1995.
- [4] J. Selig, *Geometric fundamentals of robotics*. Springer Verlag, 2005.
- [5] R. Hartley y A. Zisserman, *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge Univ Pr, 2003.
- [6] J. Denavit y R. Hartenberg, "A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices," *Trans. ASME J. Appl. Mech*, vol. 22, no. 1, pp. 215–221, 1955.
- [7] R. Tsai y R. Lenz, "A new technique for fully autonomous and efficient 3d robotics hand/eye calibration," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 5, pp. 345–358, Jun 1989.
- [8] F. Dornaika y R. Horaud, "Simultaneous robot-world and hand-eye calibration," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 14, pp. 617–622, Aug 1998.
- [9] R. Hirsh, G. DeSouza y A. Kak, "An iterative approach to the hand-eye and base-world calibration problem," en *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, vol. 3, pp. 2171–2176 vol.3, 2001.
- [10] C. Harris y M. Stephens, "A combined corner and edge detector," en *Alvey vision conference*, vol. 15, p. 50, Manchester, UK, 1988.
- [11] J. Canny, "A computational approach to edge detection," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. PAMI-8, pp. 679–698, Nov. 1986.
- [12] R. O. Duda y P. E. Hart, "Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures," *Commun. ACM*, vol. 15, no. 1, pp. 11–15, 1972.
- [13] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 1330–1334, Nov 2000.
- [14] W. Hamilton, "On quaternions; or on a new system of imaginaries in algebra," *Philosophical Magazine*, vol. 25, no. 3, pp. 489–495, 1844.
- [15] G. Bradski y A. Kaehler, *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*. O'Reilly Media, Inc., 2008.
- [16] D. Douchamps, "1394-based dc control library." Free Open Source Software, Sourceforge.net.
- [17] E. Anderson, Z. Bai, C. Bischof, S. Blackford, J. Demmel, J. Dongarra, J. Du Croz, A. Greenbaum, S. Hammarling, A. McKenney y D. Sorensen, *LAPACK Users' Guide*. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, third ed., 1999.