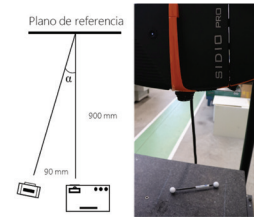


Análisis de la influencia de tres métodos diferentes de calibración de cámaras en un sistema de medición cámara-proyector

Influence analysis of three different camera calibration methods on a camera-projector measuring system



Julietta Tiscareño-Félix, José-Antonio Albajez-García y Jorge Santolaria-Mazo

Universidad de Zaragoza, Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación. María Luna, 3 (Edificio Torres Quevedo) - 50018 Zaragoza (España).

DOI: <https://doi.org/10.6036/10796> | Recibido: 27/ene/2022 • Inicio Evaluación: 17/may/2022 • Aceptado: 17/oct/2022

To cite this article: INFLUENCE ANALYSIS OF THREE DIFFERENT CAMERA CALIBRATION METHODS ON A CAMERA-PROJECTOR MEASURING SYSTEM. TISCAREÑO-FÉLIX, Julieta; ALBAJEZ-GARCÍA, José-Antonio; SANTOLARIA-MAZO, Jorge. *DYNA*. March - April 2024, vol. 99, n.2, pp. 195-200. DOI: <https://doi.org/10.6036/10796>

FINANCIACIÓN

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto "T56_23R: GIFMA. Grupo de ingeniería de fabricación y metrología avanzada" financiado por el Gobierno de Aragón.

ABSTRACT

- The challenges arising from mass production with high quality level require advanced error measurement systems and optical metrology systems. Nowadays, it is more frequent to find this type of controls at the manufacturing industry into the quality control procedures as long as the need for a faster capture speed and precision has increased. However, these techniques can be improved. The accuracy of 3D measurement systems formed by a camera-projector pair depends directly on the calibration procedure used. The projector is usually modelled as the inverse projection of a pin-hole camera, which presents the option to calibrate the system by two different approaches: as a whole system or separately. The most common approach is the use of a camera previously calibrated, followed by the calibration of the projector. Studies show that the uncertainty of the camera parameters from its calibration propagates to the projector parameters and several authors conclude that the three most widespread are: Tsai, Zhang and Direct Linear Calibration. The objective of this study is to have a clear comprehension of the relationships between the camera and projector parameters and of how uncertainty is propagated to the measurement system error. Therefore, the three calibration methods previously mentioned and some of them possible combinations are analyzed.
- Keywords:** Quality Control; Projector-camera calibration; Error propagation; Measurement System Error.

RESUMEN

Los desafíos derivados de la producción en masa con un alto nivel de calidad requieren sistemas de medición de errores y sistemas de metrología ópticos avanzados. En la actualidad es más frecuente encontrar este tipo de controles en la industria manufacturera dentro de los procedimientos de control de calidad conforme la necesidad de una mayor velocidad de captura y de precisión se ha incrementado. Sin embargo, estas tecnologías pueden ser mejoradas. La precisión de los sistemas de medición 3D formados por una cámara y un proyector depende directamente del proce-

dimiento de calibración utilizado. El proyector es generalmente modelado como una cámara inversa "Pin-hole", lo que presenta la opción de calibrar el sistema de medición mediante dos enfoques diferentes: como un sistema completo o por separado. El enfoque comúnmente utilizado es mediante el uso de una cámara previamente calibrada, seguido de la calibración del proyector con el uso de misma. Estudios muestran que la incertidumbre de los parámetros de la cámara se propaga a los parámetros del proyector y varios autores concluyen que los tres métodos más estudiados son: Tsai, Zhang y calibración directa lineal. El objetivo de este estudio es tener una mejor comprensión de la relación entre los parámetros de la cámara y el proyector, así como la propagación de la incertidumbre al error de medida del sistema. Por lo tanto, se analizan los tres métodos de calibración mencionados anteriormente y algunas de sus posibles combinaciones.

Palabras clave: Control de calidad; Calibración proyector-cámara; Propagación del error; Error del sistema de medición.

1. INTRODUCCIÓN

Los retos derivados de la producción a gran escala y de alta calidad, que requieren sistemas de medición de errores cada vez más avanzados y sistemas de metrología óptica (incluidos láser, fotogrametría y proyección de luz blanca), son cada vez más importantes. El escaneado de objetos tridimensionales se ha convertido en un procedimiento de control de calidad de uso común en la industria debido a los niveles de precisión alcanzados y a su alta velocidad de captura; sin embargo, las técnicas aún pueden mejorarse. Para mejorar la calidad general de estas técnicas, se buscan diferentes configuraciones de medición [1] y algoritmos más precisos [2]. Por tanto, identificar la causa de que los resultados no cumplan las expectativas es una tarea complicada y lenta, pero de gran interés.

En la actualidad, los sistemas de medición 3D se aplican ampliamente en metrología industrial, medicina, patrimonio cultural y otras áreas [3-13]. Además de su rapidez y su naturaleza sin contacto, muchas de esas aplicaciones requieren una precisión de medición considerable. Por ello, es importante estudiar y mejorar este tipo de sistemas para disponer de la máxima información posible.

En la actualidad, existe una gran variedad de equipos de medida basados en sistemas estereométricos activos; aquellos formados por una o varias cámaras y un elemento que actúa como

emisor activo, normalmente de dos tipos: láser [14-16] o luz estructurada [17-19]. En el caso de los sistemas de medición 3D formados por un par cámara-proyector, su precisión depende en cierta medida de la precisión de la calibración de todo el sistema de medición.

La calibración de una sola cámara se ha estudiado ampliamente y se han propuesto numerosos métodos de calibración [20-23]. Se han realizado estudios que abarcan desde revisiones generales [24] e investigaciones generales [25] hasta la estabilidad de los parámetros [26-27], e incluso se ha analizado la viabilidad de utilizar cámaras de bajo coste [27-29]. La calibración de la cámara puede clasificarse según varios criterios diferentes: Calibración lineal o no lineal, calibración intrínseca o extrínseca, calibración implícita o explícita, métodos basados en puntos o en líneas, o una combinación de ellos [30].

El modelo matemático de la cámara estenopeica [31] es ampliamente utilizado; su objetivo es encontrar una relación lineal entre los puntos 3D de la escena con sus puntos de proyección 2D en el plano de la imagen. Supongamos que un punto 3D Q_w en el sistema de coordenadas mundo con sus coordenadas homogéneas en el plano mundo $(X_w, Y_w, Z_w, 1)$, se proyecta a un punto Q_c , $(x, y, 1)$, en el plano imagen de la cámara con coordenadas x e y . Entonces según el modelo de cámara estenopeica,

$$Q_c = sM_c(R_c \ T_c)Q_w \quad (1)$$

donde "s" es el factor de escala y M_c es el conjunto de parámetros intrínsecos de la cámara dados como,

$$M_c = \begin{pmatrix} f_x & 0 & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Los parámetros (C_x, C_y) son las coordenadas del foco principal y f_x y f_y son las distancias focales de los ejes x e y del plano de la imagen, respectivamente.

$[R_c \ T_c]$ representa la matriz de transformación, los parámetros extrínsecos

$$[R_c \ T_c] = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & t_x \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & t_y \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & t_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

Proporciona la rotación y la traslación entre el sistema de coordenadas mundial y los planos de la cámara.

Varios autores concluyen que los tres procedimientos de calibración de cámaras más extendidos son: Tsai, Zhang y Calibración Directa Lineal (CDL) [32-34]. Tsai es un método de posición de visión múltiple basado en el modelo de la cámara estenopeica; este modelo transforma puntos en el marco de referencia mundial (X_w, Y_w, Z_w) en puntos en el marco de referencia de la imagen (u, v) y considera la distorsión radial. Zhang también utiliza técnicas de calibración tradicionales (puntos de calibración conocidos) y técnicas de autocalibración (correspondencia entre puntos de calibración cuando están en posiciones diferentes). Además, este método considera y compensa tres tipos de distorsión: radial, de descentramiento y de prisma fino. La CDL ignora la distorsión de lente y se basa en la colinealidad entre un punto expresado en el sistema de referencia mundial (x, y, z) , su equivalente directo en las coordenadas de referencia de la imagen (u, v) y el punto de proyección central de la cámara [32]. Por un lado, la comparación de estos métodos muestra sus ventajas e inconvenientes en

diferentes situaciones [33-34]. Por otro lado, hay estudios que se centran en cómo afectan las distorsiones a los resultados [30,35].

Cuando se incluye un proyector en el sistema, se suele modelar como una cámara inversa porque funciona fundamentalmente como una cámara inversa pin-hole, proyectando una imagen en lugar de capturarla [36]. Por lo tanto, es posible calibrarla con cualquier método convencional de calibración de cámaras. Esto presenta la opción de calibrar el sistema mediante dos enfoques diferentes: como un sistema completo o por separado. El enfoque más común es el uso de una cámara previamente calibrada, seguido de la calibración del proyector, utilizando el método CDL, con esta cámara. Sin embargo, los estudios muestran que este método propaga la incertidumbre del procedimiento de calibración de la cámara al proyector [37] y, en consecuencia, aumenta la importancia de la calibración de la cámara. Algunos autores han analizado la sensibilidad del sistema a diferentes factores en una configuración rígida, utilizando únicamente el método CDL en ambas calibraciones (cámara y proyector), y han comprobado el efecto de los errores en los parámetros de distorsión de la lente y en los parámetros extrínsecos, concluyendo que los primeros son los que tienen mayor impacto [38].

Teniendo en cuenta el papel crucial que tiene la calibración de la cámara para la calibración total del sistema, se decidió simular la calibración de la cámara mediante los métodos de Tsai, Zhang y CDL para tener una visión más clara de cómo se ven afectados los parámetros de la cámara y los errores de medición. Para el proyector, se decidió simular uno perfecto utilizando puntos de calibración perfectos para apreciar únicamente la influencia de la cámara en él. Basándose en esto, se seleccionó el método CDL por dos razones: 1) La simplicidad del algoritmo permite ver con mayor claridad la propagación al proyector; 2) El procedimiento iterativo que utiliza el método CDL permite obtener muy buenos resultados, si se deja converger y se limita el tiempo para calcular una solución óptima y, el costo computacional no es determinante en este estudio. El objetivo de este estudio es proporcionar dos contribuciones: desde un punto de vista general, obtener una mejor comprensión de las relaciones entre los parámetros de la cámara y el proyector, y cómo la incertidumbre se propaga desde la cámara al proyector. En concreto, la comparación de las tres configuraciones (calibración de la cámara mediante CDL, Tsai y Zhang, y calibración del proyector mediante CDL), así como las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas y la forma de compensarlas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se decidió utilizar simulaciones para el análisis de este estudio, ya que permiten aislar el error específico seleccionado. En nuestro caso, se trata de cómo se propaga la incertidumbre de la cámara al proyector y, en consecuencia, a todo el sistema de medición.

El experimento sintético basado en el método Monte Carlo simuló por separado la calibración de un sistema de medición formado por un par cámara-proyector. En primer lugar, se calibró la cámara mediante tres métodos diferentes: CDL, Tsai y Zhang, y a continuación se calibró el proyector, utilizando dicha cámara, por el método CDL. En cada una de estas configuraciones se realizaron 5000 simulaciones para analizar los factores que podían influir en la generación de incertidumbre sobre los resultados. El número de simulaciones se decidió sobre la base de un análisis de convergencia, en el que se realizó un número creciente de ensayos de Monte Carlo hasta que los distintos resultados de interés se estabilizaron en un sentido estadístico. La figura 1 muestra la configuración de la cámara-proyector utilizada. Se basó en un equipo de medida

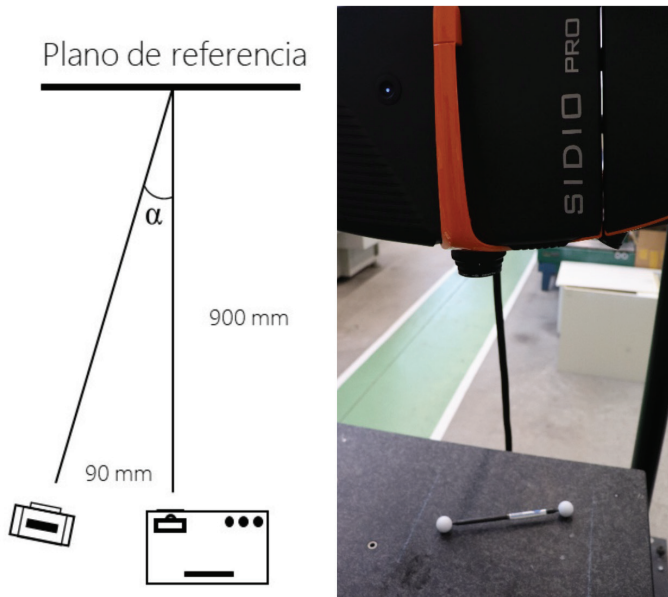


Figura 1. Izquierda: configuración del sistema de medición. Derecha: Representación física.

propiedad del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza: SIDIO Pro.

Los datos de la cámara son 0,0067 mm para el tamaño de píxel dx y dy en los ejes X e Y respectivamente; 1280/2 para C_u y 1024/2 para C_v , correspondientes al centro de las coordenadas de la cámara; 1280 para N_{cx} y N_{fx} , número de elementos del sensor en el eje X de la cámara (sels) y número de píxeles en la dirección x del frame grabber (píxel) respectivamente. La resolución del proyector era de 1024x768, y el coeficiente de distorsión radial de la cámara era $k_1=0,0015$. Se decidió incluir sólo la distorsión radial porque es la única distorsión considerada en dos de los tres métodos aplicados, Tsai y Zhang.

La selección de factores se preseleccionó a partir de los parámetros característicos de la cámara facilitados por el fabricante en

la ficha técnica típica. Normalmente, los fabricantes proporcionan valores de precisión en 4 decimales. A efectos de medición, eso nos da un rango equivalente a alrededor del 2% del valor especificado.

Los datos de la cámara se referirán a esos parámetros: dx , dy , C_u , C_v . Posteriormente, la selección de los factores se determinó mediante un análisis matemático preliminar de los tres métodos de calibración seleccionados. Este análisis consistió en una revisión detallada de los procedimientos matemáticos subyacentes a cada método de calibración y de cómo los datos de la cámara interactuaban con ellos.

Por un lado, pudimos apreciar que los datos de la cámara correspondientes al tamaño del píxel (dx y dy) y las coordenadas del centro de la cámara (C_u y C_v) afectan directamente al cálculo de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de calibración de la cámara en los métodos CDL y Tsai.

Por otro lado, esos datos de la cámara (dx y dy) sólo afectan al cálculo de la distancia focal (f) en el método Zhang. La robustez de este método impide que afecte directamente a la mayor parte del cálculo de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de calibración de la cámara. En este caso, el error de medición se ve afectado sobre todo por los parámetros extrínsecos y el cálculo de la distorsión. Por ello, se decidió introducir un error de $\pm 5\%$ en los parámetros que interfieren en el cálculo de los parámetros extrínsecos de calibración de la cámara y una distorsión radial de la lente del método Zhang. Se introdujo un error de $\pm 5\%$ en los parámetros dx , dy , C_u y C_v para los métodos de Calibración Lineal Directa y Tsai. Todos estos errores siguen una distribución gaussiana normal sin correlación sobre los parámetros seleccionados.

Se ha considerado el caso de ausencia de correlación para facilitar la interpretación de los datos de salida limitando las fuentes de variabilidad de los parámetros de entrada. Si se hubiera considerado algún tipo de correlación, sería una correlación de valor 1 entre dx y dy . Esta correlación implicaría que el píxel sigue siendo cuadrado. Esto es relevante porque el método Tsai considera dx y dy , mientras que el método CDL sólo modela dx .

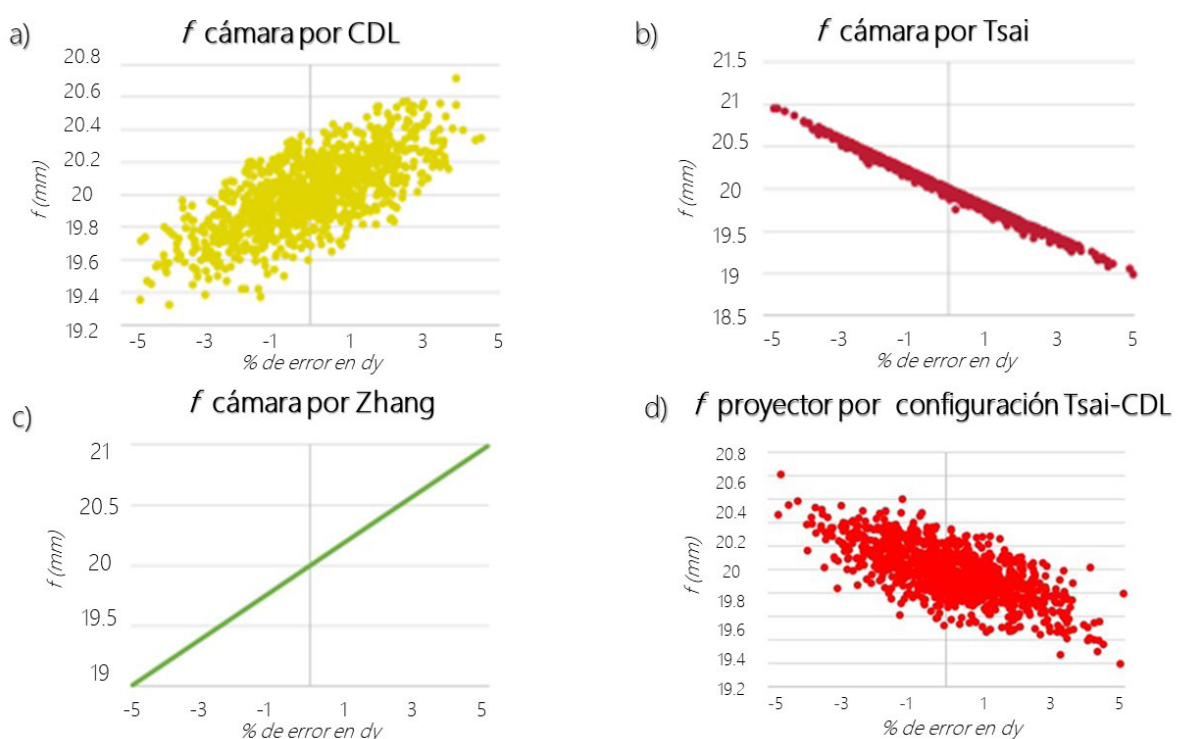


Figura 2. (a) f de la cámara por CDL; (b) f de la cámara por Tsai; (c) f de la cámara por Zhang; (d) f del proyector por configuración Tsai-CDL.

	CDL		TSAI		ZHANG	
	MEDIA	DS	MEDIA	DS	MEDIA	DS
Tx (mm)	3.115	2.018	6.4385	3.7526	2.812	1.482
Ty (mm)	2.731	2.4209	4.1095	2.7621	2.0214	2.0561
Tz (mm)	2.4103	0.6091	0.2308	1.4762	1.1203	0.8069
Rx (°)	-0.007	0.2853	0.0031	0.1695	0.00004	0.00005
Ry (°)	0.0433	0.1291	-0.0006	0.2118	-0.00002	0.00002
Rz (°)	-0.00006	0.00221	0.00001	0.00292	-0.00001	0.00002

Tabla 1. Error de los vectores de rotación y traslación de la cámara.

	CDL-CDL		TSAI-CDL		ZHANG-CDL	
	MEDIA	DS	MEDIA	DS	MEDIA	DS
Tx (mm)	2.291	2.1869	4.4819	4.0299	1.8514	1.519
Ty (mm)	1.6685	1.7936	3.2830	2.5822	1.6397	1.3422
Tz (mm)	0.8091	0.3004	0.2689	1.4488	0.9507	0.5461
Rx (°)	0.0037	0.1130	0.0031	0.1692	0.0002	0.0039
Ry (°)	0.0041	0.1380	-0.0047	0.2108	0.0009	0.0019
Rz (°)	-0.00001	0.00033	0.00006	0.00221	-0.00001	0.00006

Tabla 3. Error de los vectores de rotación y traslación del proyector.

3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

La primera parte de esta sección muestra el comportamiento de los diferentes parámetros de la cámara y la medida del error de la cámara, obtenidos mediante un experimento sintético Monte Carlo en MATLAB. A modo de ejemplo, la Figura 2 (a, b, c) muestra los resultados del cálculo de la distancia focal de la cámara mediante los tres métodos diferentes en función de la d_y de la cámara. El centro focal de la cámara se referirá a la distancia focal efectiva de la cámara estenopeica. Se decidió mostrar los resultados del cálculo de la distancia focal de la cámara sólo en función de d_y porque en el caso del método TSAI sólo se tiene en cuenta este parámetro.

En este primer parámetro analizado es posible observar que el comportamiento de los cálculos de centro focal de las tres cámaras es esencialmente lineal y que el cálculo de centro focal más afectado corresponde al método de Calibración Lineal Directa.

Para el resto de parámetros de cálculo y error de medición en el método Zhang, se introdujo un error de $\pm 5\%$ en los parámetros que interfieren en el cálculo de los parámetros extrínsecos de calibración de la cámara y una distorsión radial de la lente de calibración método Zhang.

También se observó que los parámetros extrínsecos de calibración de la cámara se veían sustancialmente afectados. La Tabla 1 muestra el error medio y la desviación estándar que se obtuvieron en el vector rotacional y traslacional de la cámara.

Se puede observar que el error de Tsai en el vector traslacional es significativamente mayor para Tx y Ty pero menor para Tz que para los demás. Esto se debe a que el método Tsai estima Tz después de determinar el resto de parámetros extrínsecos. Los demás métodos estiman todos los componentes de traslación al mismo tiempo. Mientras tanto, en lo que respecta al caso de la rotación, se observó que el método Zhang era el menos afectado. Esto se debe a que el método utiliza como primera aproximación una solución CDL y los parámetros extrínsecos se determinan después de que los parámetros intrínsecos hayan absorbido la mayor parte del error.

La tabla 2 muestra el error de medición en la cámara tras introducir el error mencionado anteriormente. Es importante destacar que el error de medición es el punto clave para apreciar cómo se propaga el error desde los parámetros de la cámara a los errores de medición. Estos errores de medición de la cámara obtenidos se consideraron el error base para cada configuración porque el proyector se calibró con una cámara que tenía este error de medición de partida.

	CDL		TSAI		ZHANG	
	MEDIA	DS	MEDIA	DS	MEDIA	DS
Error X (mm)	0.0032	0.0179	-0.1406	1.8390	0.0013	0.0003
Error Y (mm)	-0.0015	0.0201	-0.0297	0.8903	0.0011	0.0002

Tabla 2. Error de medición de la cámara.

Además, se verificó, mediante una prueba de Anderson-Darling en MATLAB [39], que la distribución estadística del error era gaussiana.

La segunda parte de esta sección muestra el comportamiento de los diferentes parámetros mostrados en la primera parte pero relativos al proyector. Es importante destacar que se ha simulado un proyector sin errores para apreciar únicamente la influencia de la cámara sobre el mismo.

El primer parámetro analizado fue el cálculo de la distancia focal. En los casos de las configuraciones CDL-CDL y Zhang-CDL, el cálculo de la distancia focal no se vio afectado significativamente por la introducción de errores en los datos de la cámara. Sólo en la configuración Tsai-CDL se vio afectado el cálculo de la distancia focal del proyector. La figura 2 (d) muestra los resultados. Se puede apreciar que la distribución observada en la distancia focal de la cámara se mantuvo en la distancia focal del proyector, pero con mayor dispersión.

Al igual que ocurrió en la cámara, los parámetros extrínsecos de calibración del proyector se vieron sustancialmente afectados. La Tabla 3 muestra el error medio y la desviación estándar que se obtuvieron en el vector rotacional y traslacional del proyector. Nuevamente, es posible observar que los errores de Tsai son significativamente superiores a los obtenidos con CDL y Zhang.

Como en el caso de los parámetros extrínsecos de calibración, se observó que el error de medición de la cámara afectaba tanto al error de medición del proyector como al error de medición cámara-proyector.

Es importante mencionar que el análisis de los diferentes errores de medición nos da una visión clara de cómo los errores introducidos en determinados parámetros de la cámara afectan primero al error de medición de la cámara, después al del proyector (simulado sin errores) y finalmente, al de todo el sistema.

La tabla 4 muestra el error medio y la desviación típica obtenidos en el proyector, originalmente sin errores, tras introducir el error mencionado anteriormente y el obtenido en el sistema par cámara-proyector. El subíndice p corresponde al proyector y el cp a la cámara-proyector.

Una vez más, se verificó, mediante una prueba de Anderson-Darling en MATLAB, que la distribución estadística de errores se mantenía hasta los últimos resultados de errores de medición [40]. La distribución del error de medición de la cámara y de la cámara-proyector de las tres combinaciones mantuvo una distribución gaussiana.

Como puede observarse, la configuración Zhang-CDL proporcionó los menores valores de error de medición. El resultado del error de medición cámara-proyector es el efecto combinado de ambos conjuntos de parámetros extrínsecos (cámara y proyector), por lo que algunos errores pueden equilibrarse con los demás.

Es importante mencionar que el método CDL no tiene en cuenta las distorsiones, por lo que es recomendable, después de la calibración, realizar algún tipo de optimización posterior, por ejemplo el método bundle [38] para mejorar el resultado obtenido.

	CDL-CDL		TSAI-CDL		ZHANG-CDL	
	MEDIA	DS	MEDIA	DS	MEDIA	DS
Error Xp (mm)	0.0007	0.0098	-0.1707	3.894	0.0003	0.0003
Error Yp (mm)	-0.0007	0.0095	-0.0573	2.7068	0.0002	0.0003
Error Xcp (mm)	0.004	0.0311	-0.1613	3.8296	0.0015	0.0003
Error Ycp (mm)	-0.0024	0.0282	-0.0539	2.7098	0.0012	0.0003

Tabla 4. Error de medición del sistema del par proyector y cámara-proyector después de la calibración.

4. VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo con el mismo equipo de medición y configuración antes mencionados, Figura 1.

Con esto cubrimos los parámetros extrínsecos del sistema. Dado que los parámetros intrínsecos de la unidad SIDIO Pro no son públicos, se utilizarán los resultados de la autocalibración realizada por la unidad SIDIO Pro para replicarlos en el Simulador CAMPRO. El error es de 0,007 mm en el eje X, 0,006 mm en el eje Y, 0,009 mm en el eje Z, el error medio es de 0,015 mm y la desviación estándar es de 0,010 mm. El objetivo de las pruebas experimentales para este apartado es validar el simulador desarrollado comparando los valores obtenidos, con SIDIO Pro y el Simulador CAM-PRO, del error de longitud entre dos esferas y el error de forma de una de estas esferas, Figura 1.

Mientras que la distancia entre centros de esfera del patrón de barras de esfera era de 199,9943 mm, la distancia entre centros de esfera reconstruida por SIDIO Pro y CAM-PRO Simulator era de 200,0986 mm y 200,0893 mm respectivamente.

Dado que el cálculo de este error de longitud se ve afectado por los errores presentes en la reconstrucción de las esferas medidas y simuladas, la Tabla 5 muestra los diámetros y errores de forma para la barra de esferas estándar, así como las reconstruidas por SIDIO Pro y por el Simulador CAM-PRO.

Ahora, mirando de cerca la Esfera 1, en la Tabla 6 podemos observar los errores medios y sus desviaciones estándar obtenidos por SIDIO Pro y el Simulador CAM-PRO.

Como es posible observar, los valores obtenidos por el Simulador CAM-PRO son bastante semejantes a los del SIDIO Pro, siendo posible concluir que el código del Simulador CAM-PRO es efectivamente válido, por disponer de los datos necesarios, para simulaciones de situaciones específicas con un sistema de medición formado por una cámara y un proyector.

5. CONCLUSIONES

Se realizaron numerosas simulaciones en MATLAB mediante el método Monte Carlo para caracterizar el comportamiento de los errores de medición en un par cámara-proyector, cuando se

		Patrón de barra esférica	Reconstruido por SIDIO Pro	Reconstruido por CAM-PRO Simulator
Esfera 1	Diámetro (mm)	24.9972	24.9879	24.9838
	Error de forma (mm)	0.0017	0.0061	0.0054
Esfera 2	Diámetro (mm)	24.9961	24.9868	24.9799
	Error de forma (mm)	0.0019	0.0070	0.0061

Tabla 5. Diámetros y errores de forma de las esferas.

	SIDIO Pro	Simulador CAM-PRO
Error medio (mm)	2.4e-6	1.8e-6
DS (mm)	0.0077	0.0076

Tabla 6. Errores de la esfera 1 obtenidos por SIDIO Pro y por el simulador CAM-PRO.

calibran por separado. Para comprender mejor las relaciones entre los parámetros de la cámara y el proyector, y cómo se propaga la incertidumbre de la cámara al proyector, se introdujeron dos tipos de error. Para las configuraciones CDL-CDL y Tsai-CDL, se introdujo un error de $\pm 5\%$ en los datos de la cámara: dx, dy, Cu y Cv y un coeficiente de distorsión radial de la lente de la cámara $k_1=0,0015$. Para la configuración Zhang-CDL, se introdujo un error de $\pm 5\%$ en los parámetros que interfieren en el cálculo de los parámetros extrínsecos de calibración de la cámara y un coeficiente de distorsión radial de la lente de la cámara $k_1=0,0015$. Todos los errores mencionados anteriormente siguen una distribución gaussiana normal.

En primer lugar, dados los resultados de centro focal de cámara obtenidos, se observa que el método de calibración más afectado por los errores introducidos para este cálculo es el CDL. Lejos de compararse con los otros dos métodos, la dispersión mostrada en los cálculos del centro focal CDL es significativa. A continuación, cuando se analizaron los resultados del cálculo del centro focal del proyector, los resultados obtenidos por la configuración CDL-CDL y la configuración Zhang-CDL no se vieron afectados de forma significativa. Sólo en la configuración Tsai-CDL el cálculo de la distancia focal del proyector se vio afectado y mostró una relación directa entre los cálculos del centro focal de la cámara y del proyector. La distribución observada en la distancia focal de la cámara se mantuvo en la distancia focal del proyector, pero con mayor dispersión.

También se pudo observar que en los demás cálculos de parámetros extrínsecos, la configuración Tsai-CDL fue de nuevo la más afectada. Queda claro, por tanto, que el método Tsai y todas las configuraciones que incluyen este método son extremadamente sensibles a las variables dx, dy, Cu y Cv. Por lo tanto, recomendamos utilizar el método Tsai cuando se esté seguro de que los parámetros de la cámara son precisos.

En segundo lugar, con los errores de base indicados en la Tabla 2, errores de medición de la cámara, se calibró el proyector mediante CDL. Y se observó que los parámetros extrínsecos de calibración del proyector se veían afectados y, en consecuencia, los errores de medición del sistema cámara-proyector. Como mencionamos anteriormente, el resultado del error de medición de la cámara-proyector es el efecto combinado de ambos conjuntos de parámetros extrínsecos (cámara y proyector) que, por lo tanto, algunos errores pueden equilibrarse con los otros.

Como era de esperar, las pruebas parecen indicar que la configuración Zhang-CDL proporciona los menores valores de error de medición. Desde el principio, la calibración de la cámara mediante el método Zhang dio errores más pequeños en los parámetros extrínsecos y en los resultados de medición que los demás métodos. Como antes concluimos que el método Tsai es el más sensible a las variables dx, dy, Cu y Cv que se analizaron, por lo tanto hay que reconocer que el método Zhang es el menos sensible a ellas. Por lo tanto, cuando no se está seguro de que los parámetros de la cámara son exactos se recomienda utilizar el método Zhang.

Como hemos mencionado anteriormente, el método CDL no tiene en cuenta la distorsión de la lente y es necesario, tras la calibración, realizar algún tipo de optimización posterior. Se recomienda utilizar un algoritmo de ajuste del haz para mejorar el CDL

cuando no hay límite de tiempo para calcular la solución óptima, debido a su elevado coste computacional.

Finalmente, tal y como se ha comprobado tras la validación del Simulador CAM-PRO, éste ha simulado satisfactoriamente una situación real concreta medida por el equipo de medida SIDIO Pro, siendo posible concluir que el código del Simulador CAM-PRO es válido.

REFERENCIAS

[1] Buytaert, Jan y otros. Aberration-free moire profilometry-Analysis, simulation and implementation of the optimal setup geometry in Optics and Lasers in Engineering, Agosto 2012, vol. 50, nº. 8, p.1119-1129, ISSN: 0143-8166, DOI: <http://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.01.006>

[2] Ribbens, Bart y otros. Projection Moiré Profilometry Simulation Software for Algorithm Validation and Setup Optimisation in Optical measurement techniques for structures and systems 2 (OPTIMESS2012), Maastricht, by Shaker publishing, 2013, p. 349-358, ISBN 978-90-423-0419-2.

[3] Mirza, Saba y Shakher, Chandra. Surface profiling of turbine blade using phase shifting Talbot interferometric technique en Proceedings of the SPIE: Interferometry XII: Applications, agosto de 2004, Vol. 5532, p. 372-379, DOI: <https://doi.org/10.1117/12.560385>

[4] Bieri, Louis-Severin y Jacot, Jacques. Three-dimensional vision using structured light applied to quality control in production line en Proceedings of the SPIE: Optical Metrology in Production Engineering, septiembre de 2004, Vol. 5457, p. 463-471, DOI: <https://doi.org/10.1117/12.545039>

[5] Sadleir, Rosalind, Owens, Robyn y Hartmann, Peter. System for routine surface anthropometry using reprojection registration en Measurement science and Technology, 2003, Vol. 14, nº 11, p. 1912-1926, ISSN: 0957-0233, DOI: <http://doi.org/10.1088/0957-0233/14/11/009>

[6] Sansoni, Giovanna, Trebeschi, Marco y Docchio, Franco. State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation en Sensors, enero de 2009, Vol. 9, nº, p. 568-601, ISSN: 1424-8220, DOI: <http://doi.org/10.3390/s90100568>

[7] Chen, Frank, Brown, Gordon y Song, Mumin. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods en Optical Engineering, enero de 2000, Vol. 39, nº 1, p. 10-22, ISSN: 0091-3286, DOI: <http://doi.org/10.1117/1.602438>

[8] Schlobohm, Jochen, Pösch, Andreas y Reithmeier, Eduard. A raspberry pi base portable endoscopic 3D measurement system en Electronics, septiembre 2016, Vol. 5, nº 3, artículo número 43, ISSN 2079-9292, DOI: <http://doi.org/10.3390/electronics5030043>

[9] Zhang, Haolin y otros. A systematic study and framework of fringe projection profilometry with improved measurement performance for in-situ LPBF process monitoring en Measurement, marzo de 2022, Vol. 191, ISSN 0263-2241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110796>

[10] Lui, Yue y otros. A simple calibration method for a fringe projection system embedded within an additive manufacturing machine en Machines, septiembre 2021, Vol. 9, nº 9, p. 200. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines9090200>

[11] Ghazouali, Safouane y otros. Optimised calibration of machine vision system for close range photogrammetry based on machine learning in Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, June 2022, Vol. 34, nº 9, p. 7406-7418. ISSN 1319-1578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.06.011>

[12] Xia, Renbo y otros. Detection method of manufacturing defects on aircraft surface based on fringe projection en Optik, abril de 2020, Vol. 208, ISSN 0030-4026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jljo.2020.164332>

[13] Xu, Jing y Zhang, Song. Status, challenges, and future perspectives of fringe projection profilometry in Optics and Lasers in Engineering, diciembre de 2020, Vol. 135, ISSN 0143-8166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106193>

[14] Santolaria, Jorge y otros. Técnica de modelado y calibración de sensores de triangulación láser para su integración en brazos robóticos y máquinas de medición de coordenadas de brazo articulado en Sensors, Septiembre 2009, Vol. 9, nº 9, p. 7374-7396, ISSN:1424-8220, DOI: <http://doi.org/10.3390/s90907374>

[15] Brosed, Francisco y otros. Sensor de triangulación láser y modelado de seis robots manipuladores antropomórficos para la medición de productos de geometría compleja en Robótica y fabricación integrada por ordenador, diciembre 2012, Vol. 28, nº 6, p. 660-671, ISSN: 0736-5845, DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.04.002>

[16] Isa, Mohammed y otros. Modelización de errores volumétricos de un sistema de visión estereoscópica para la corrección de errores en metrología fotogramétrica de coordenadas tridimensionales en Ingeniería de precisión, abril de 2020, Vol. 64, p. 188-199, ISSN 0141-6359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.04.010>

[17] Bender, Christoph y otros. A Hand-held Laser Scanner based on Multi-camera Stereo-matching in Visualization of Large and Unstructured Data Sets: Applications in Geospatial Planning, Modeling and Engineering-Proceedings of IRTG 1131 Workshop 2011, Dagstuhl, by Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2012, p.123-133, ISBN: 978-3-939897-46-0, DOI: <http://doi.org/10.4230/OASlcs.VLUDS.2011.123>

[18] Shammari, Ahmed y otros. A Study to Evaluate the Calibration of Optical Three-Dimensional Scanner, en Journal of Mechanical Engineering Research and Developments, febrero de 2022, Vol. 44, nº 8, p. 359-370, ISSN: 1024-1752.

[19] Dickin, Fraser, Pollard, Stephen y Adams, Guy. Mapping and correcting the distortion of 3D structured light scanners en Precision Engineering, junio de 2021, Vol. 72, p.

543-555. ISSN 0141-6359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.06.001>

[20] Heikkila, Janne y Silven, Olli. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction en Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, junio de 1997, p. 1106-1115, ISBN:0-8186-7822-4, ISSN: 1063-6919, DOI: <http://doi.org/10.1109/CVPR.1997.609468>

[21] Tsai, Roger. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D-machine vision en IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 86), ca. 1986, p. 364-374, ISBN: 9780818607219

[22] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration en IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, noviembre de 2000, Vol. 22, nº 11, p. 1330-1334, ISSN:0162-8828, DOI: <http://doi.org/10.1109/34.888718>

[23] An, Gwon Hwan y otros. Método de calibración de cámara omnidireccional basado en placa de charuco en Electrónica, diciembre de 2018, Vol. 7, nº 12, número de artículo 421, ISSN 2079-9292, DOI: <http://doi.org/10.3390/electronics7120421>

[24] Fraser, Clive. Photogrammetric camera component calibration: A review of analytical techniques in Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision of Springer series in information sciences book series, Germany, by Gruen & Huang, Springer-Verlag, 2001, Vol. 34, pp. 95-121, ISSN: 0720-678X, DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-662-04567-1_4

[25] Jantos, Ralf y otros. Photogrammetric Performance Evaluation of the Kodak DCS Pro Back en Proceedings of the ISPRS commission V Symposium of International archives of photometry remote sensing and spatial information science, ca 2002, Vol. 34, nº 5, p. 42-47, ISSN: 1682-1750.

[26] Peipe, Juergen y Stephani, Manfred. Performance evaluation of a 5 megapixel digital metric camera for use in architectural photogrammetry en International Archives of Photogrammetry Remote Sensing And Spatial Information Sciences, ca 2003, Vol. 34, nº 5, p. 259-261, <https://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/5-W12/proceedings/65.pdf>

[27] Läbe, Thomas y Förstner, Wolfgang. Geometric stability of low cost digital consumer cameras en Proceedings of the 20th International society for photogrammetry and remote sensing congress, Estambul, 2004, Vol. 35, p. 528-535, ISSN 1682-1750, <https://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm1/papers/95.pdf>

[28] Kunii, Yoichi y Chikatsu, Hirofumi. On the application of 3 million consumer digital camera to digital photogrammetry in Videometrics and optical methods for 3D shape measurement of the society of photo-optical instrumentation engineers (SPIE), January 2001, Vol. 4309, p. 278-287, ISSN: 0277-786X, DOI: <https://doi.org/10.1117/12.410884>

[29] Campanelli, Valentina, Howell, Stephen y Hull, Maury. Accuracy evaluation of a lower-cost and four higher-cost laser scanners en Journal of Biomechanics, enero 2016, Vol. 49, nº 1, p. 127-131, ISSN 0021-9290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.11.015>

[30] Remondino, Fabio y Fraser, Clive. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons en International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2006, Vol. 36, nº 5, p. 266-272. DOI: <http://doi.org/10.3929/ethz-b-000158067>

[31] Anwar, Hafeez. Calibración flexible del proyector para un sistema de escaneo 3D activo en tiempo real en Optik, 2018, Vol. 158, p. 1088-1094, ISSN: 0030-4026, DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jljo.2018.01.005>

[32] Feng, Xiuxia y otros. The Comparison of Camera Calibration Methods Based on Structured-Light Measurement in Proceedings of DISP 2008: First international congress on image and signal processing, Sanya, por Li & Deng, mayo de 2008, Vol. 2, p. 155-160, ISBN:978-0-7695-3119-9, DOI: <http://doi.org/10.1109/CISP.2008.163>

[33] Zollner, Helmut y Sablatnig, Robert. Comparison of Methods for Geometric Camera calibration using Planar Calibration Targets en Proceedings of the 28th Workshop of the Austrian Association of Pattern Recognition, Graz, Österreich, por OCG Schriftenreihe, ca 2004, Vol. 28, p. 237-244, ISBN: 3-85403-179-3, <https://cvl.tuwien.ac.at/wp-content/uploads/2014/12/oagm04b.pdf>

[34] Zhang, Xi y Zhang, Jian. Summary on calibration method of line-structured light sensor in 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ca 2017, p. 1142-1147, ISBN:978-1-5386-3742-5, DOI: <http://doi.org/10.1109/ROBIO.2017.8324571>

[35] Kopparapu, Sunil y Corke, Peter. The effect of noise on camera calibration parameters en Graphical Models, 2001, Vol. 63, nº 5, p. 277-303, ISSN 1524-0703, DOI: <https://doi.org/10.1006/gmod.2001.0551>

[36] Martynov, Ivan, Kamarainen, Joni-Kristian y Lensu, Lasse. Projector calibration by inverse camera calibration in Lecture note in computer science of 17th Scandinavian conference (SCIA 2011), Ystad, by Heyden & Kahl, ca 2011, Vol. 6688, p. 536-544, ISBN: 978-3-642-21227-7, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-21227-7_50

[37] Din, Irfanud Ud y otros. Calibración de proyectores para sistemas de proyección de patrones en Journal of applied research and technology, febrero 2014, Vol. 12, p. 80-86, ISSN: 1665-6423, DOI: [http://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)71608-6](http://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)71608-6)

[38] Huang, Junhui y otros. Calibración de un sistema de medición cámara-proyector y análisis del impacto del error en Measurement science and technology, diciembre 2012, Vol. 23, nº 12, p. 14, ISSN: 0957-0233, DOI: <http://doi.org/10.1088/0957-0233/23/12/125402>

[39] Test de Anderson-Darling - MATLAB adtest - MathWorks España [en línea] [fecha de consulta: 23 de febrero de 2023]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/help/stats/adtest.html>

[40] Furlan, Axel, Marzorati, Daniele y Sorrenti, Domenico. On the normality of the projection parameters en First interdisciplinary workshop on Mathematics of filtering and its applications (MFA2011), Contributed sessions, Londres, 14 de julio de 2011.