



Calibración geométrica de cámara termográfica y medición planar de objetos.

Flores Ochoa Rolando¹✉, Anaya Pérez María Elena², Anaya Eredias Carlos², Verdugo Miranda Rafael³, Lozano Cota Luis Manuel³

¹Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.
✉rolando.flores@unison.mx

²Universidad de Sonora. Departamento de Ingeniería Industrial.

³Universidad de Sonora. Departamento de Física, Matemáticas e Ingeniería.

Resumen

El desarrollo de cámaras termográficas de mayor resolución ha permitido un gran número de aplicaciones de esta tecnología. Una imagen térmica proporciona información de temperatura e información geométrica, siendo esta última poco utilizada y desaprovechada, ya que hoy en día existen pocas aplicaciones geométricas para una cámara termográfica. En este artículo se consideró la cámara termográfica Vario Cam HD como un modelo pinhole para obtener su calibración geométrica, para lo cual se utilizó un patrón sencillo (tablero de ajedrez) similar al utilizado en la calibración geométrica de cámaras RGB. La diferencia de emisividad entre la placa de aluminio y la impresión del patrón es lo que permite a la cámara infrarroja poder distinguir este patrón, aunque estén a la misma temperatura. Después de calibrar la cámara, se midió una moneda de un peso mexicano para verificar las mediciones. Los resultados obtenidos muestran un error porcentual del 2.05 % y 2.22 % para el diámetro de la moneda y para la distancia entre la cámara y el patrón de calibración respectivamente. Se realizó un estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R) en el que se encontró que las monedas contribuyen con el 23.09 % de la variación total, y que el sistema no es capaz de distinguir entre categorías, por lo que no es apto para un sistema 6 sigma debido a la resolución. Sin embargo, la cámara utilizada puede medir y discriminar objetos de diferente tamaño, como una moneda de un peso y una de 50 centavos, ya que la diferencia entre estas monedas es de 4 mm, mayor al 2.05 % de error. En la actualidad existen cámaras termográficas con una mayor resolución a la cámara utilizada en este trabajo, por lo que los valores obtenidos se mejorarían considerablemente al utilizar una cámara con mayor resolución.

Palabras clave: calibración geométrica, cámara termográfica, medición de objeto plano, visión por computadora.

Abstract

The development of higher resolution thermal imaging cameras has allowed a large number of applications of this technology. A thermal image provides temperature information and geometric information, the latter being little used and wasted, since today there are few geometric applications for a thermal imager. In this article the Vario Cam HD thermal imager was considered as a pinhole model to obtain its geometric calibration, for which a pattern (chess board) similar to that used in the geometric calibration of RGB cameras was used. The difference in emissivity between the aluminum plate and the pattern printing is what allows the infrared camera to distinguish this pattern, even if they are at the same temperature. After calibrating the camera, one Mexican peso coin was measured to verify the measurements. The results obtained show a percentage error of 2.05% and 2.22% for the diameter of the coin and for the distance between the camera and the calibration pattern, respectively. A Repeatability and Reproducibility (R&R) study was performed in which it was found that the coins contribute 23.09 % of the total variation, and that the system is not able to distinguish between



categories, so it is not suitable for a 6 sigma system. Due to the resolution. However, the camera used can measure and discriminate objects of different sizes, such as a coin of one peso and one of 50 cents, since the difference between these coins is 4 mm, greater than 2.05% error. Currently there are thermal imaging cameras with a higher resolution to the camera used in this work, so the values obtained would be considerably improved by using a camera with higher resolution.

Keywords: Geometric calibration, thermographic camera, measuring planar objects, computer vision.

1. Introducción

Hoy en día las cámaras termográficas son ampliamente utilizadas en diferentes aplicaciones como mantenimiento predictivo [1], campos de pruebas de materiales, control de calidad, monitoreo de edificios, además del área médica [2][3][4][5], entre otras. Aunque a la fecha las aplicaciones geométricas son raras y los desarrolladores y proveedores de cámaras termográficas muestran poco interés en las técnicas fotogramétricas, con el aumento de la resolución de las cámaras termográficas, el procesamiento geométrico de los datos de la imagen tomará mayor importancia [6]. La termografía infrarroja es una técnica con un grado creciente de desarrollo y aplicaciones. La evaluación de la calidad en las mediciones realizadas con las cámaras térmicas se debe lograr mediante la calibración y verificación metrológica [7].

El trabajo realizado en [6] se presenta una descripción general de los sensores de imagen térmica para aplicaciones fotogramétricas de corto alcance, también exponen los resultados de la calibración geométrica para 5 cámaras termográficas de diferentes marcas con características similares, las cuales se utilizan para la inspección de edificios y pruebas de materiales. Se diseñaron dos campos de prueba diferentes que proporcionan objetivos puntuales que son visibles en la banda espectral térmica de las cámaras. Los resultados presentados sobre la calibración de las cámaras termográficas difieren significativamente entre ellas y los resultados presentados muestran que las cámaras termográficas estándar producen altos valores de distorsión y grandes desplazamientos del punto principal. Solo una cámara (Infratec VarioCam) proporciona un nivel de precisión comparable a las cámaras RGB.

El procedimiento de calibración presentado en [7] permite la restitución fotogramétrica, para lo cual se utiliza un dispositivo portátil para verificar la precisión geométrica, la repetibilidad y la deriva de dos cámaras termográficas de características similares (una de marca Flir y otra Nec) y las de una cámara visible de marca Jai. Las tres cámaras se calibran, verifican y comparan utilizando cuadrículas de calibración y el dispositivo estándar. Los resultados obtenidos de la verificación indican una repetibilidad mejor que 1 mm para todos los casos, siendo mejor que 0.5 mm para el visible, también, la precisión aparece más alta en la cámara visible, y la comparación geométrica entre cámaras termográficas muestra resultados ligeramente mejores para la cámara Nec.

Por otro lado, en [8] se presenta una técnica simple para recuperar el mapa de temperatura 3D de un par de cámaras térmicas calibradas. Esta técnica también es útil para estimar la profundidad de un objeto en un entorno oscuro, pues presenta como principal ventaja que su configuración se puede utilizar en total oscuridad, a diferencia del sistema desarrollado por los mismos autores en un trabajo previo [9].

Todo instrumento de medición debe estar calibrado para garantizar una medición precisa, en el caso de las cámaras termográficas la calibración y verificación térmica se basa en cuerpos negros, que evitan la reflectividad de la radiación espuria, y generan condiciones de temperatura controlada con trazabilidad a una referencia nacional [7].

La calibración de la cámara en el contexto de la visión artificial tridimensional es el proceso que permite determinar las características geométricas y ópticas internas de la cámara (parámetros intrínsecos) y la posición y orientación tridimensional del marco de la cámara en relación con cierto sistema de coordenadas del mundo (parámetros extrínsecos) [10][11]. En la mayoría de los casos, el



rendimiento del sistema de visión depende en gran medida de la precisión de la calibración de la cámara [12]. Las cámaras termográficas adquieren información geométrica y de temperatura, aunque los procedimientos de calibración y verificación solo son habituales para los datos térmicos, para lo cual se utilizan cuerpos negros para estos propósitos [7].

Algunos métodos de calibración de los mencionados anteriormente utilizan patrones de calibración complejos, los cuales utilizan un arreglo especial de lámparas encendidas para formar el patrón y que pueda ser detectado por la cámara termográfica [6], algunos trabajos utilizan procedimientos laboriosos y objetos como cubos o esferas de aluminio [7][13], obteniendo buenos resultados. Aunque en trabajos recientes [14] se han utilizado los patrones con arreglos de lámparas para la calibración de cámaras termográficas de baja resolución, por otro lado en [5][15] utilizan patrones similares al tablero de ajedrez por ser más sencillos y en [16] adicionalmente utilizan una lámpara para iluminar el patrón de calibración el cual es impreso en un material base de alta emisividad con cuadrados de cobre de baja emisividad.

El objetivo del trabajo está encaminado a la calibración geométrica de una cámara termográfica y a la medición de un objeto plano utilizando imágenes térmicas. En este trabajo se utilizó la Vario Cam HD y un patrón sencillo (tablero de ajedrez) igual al utilizado para la calibración geométrica de cámaras RGB. El patrón es impreso en vinil adhesivo y puesto en una placa de aluminio con dimensiones de 9 x 7 x 0.5 pulgadas. La diferencia de emisividad entre la placa de aluminio y la impresión del patrón es lo que permite a la cámara infrarroja distinguir este patrón, aunque estén a la misma temperatura. En el proceso de calibración se obtiene la distancia a la cual fueron capturados los termogramas, parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara. Esta información se utiliza posteriormente para obtener la medición del diámetro de 10 monedas de un peso mexicano, a partir de los termogramas obtenidos.

El desarrollo de este trabajo incluye las secciones de introducción, calibración geométrica de la cámara termográfica en la cual se describen las características de la cámara y el procedimiento para su calibración, también se describen los pasos para medir el diámetro de las monedas, por último, se presentan las secciones de resultados y conclusiones del trabajo.

2. Calibración geométrica de la cámara termográfica

Una cámara IR, teóricamente puede tratarse como el modelo de agujero de alfiler (pinole), donde la calibración puede realizarse resolviendo los parámetros intrínsecos y extrínsecos del modelo de cámara. Los parámetros intrínsecos expresan las características geométricas de la lente y el dispositivo de carga acoplada (CCD). Si no se considera la distorsión de la lente de la cámara, los parámetros intrínsecos se pueden compactar en una matriz A como la ecuación (1) la cual contiene la distancia focal (f_1 , f_2), el factor de inclinación α_c y el punto principal (u_0 , v_0), [10], [12], [17].

$$A = \begin{bmatrix} f_1 & \alpha_c & u_0 \\ 0 & f_2 & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.1. Características de la cámara termográfica.

La cámara termográfica utilizada en este trabajo fue una VarioCam HD básica infrarroja. Las características técnicas se muestran en la tabla 1.

2.2. Calibración de la cámara.

Los parámetros físicos de la cámara se dividen comúnmente en parámetros extrínsecos e intrínsecos. Los parámetros extrínsecos son necesarios para transformar las coordenadas del objeto en un marco de coordenadas centrado en la cámara. En sistemas multicámara, los parámetros extrínsecos también describen la relación entre las cámaras [12].



Tabla 1. Especificaciones técnicas de la VarioCam HD.

Cámara	VarioCam HD Alta Resolución
Rango de temperatura	-40 °C . . . + 600 °C
Resolución térmica NETD	≤ 40 mK
Resolución de imagen [IR detector pixel]	384 x 288
Precisión de la medición	± 2 K o ± 2 %
Rango espectral	7.5 μm ... 14 μm
Resolución espacial / IFOV	0.85 mrad
Campo de visión (FOV) HFOV × VFOV	32.7° × 24.0°
Frecuencia de imagen	30 Hz

Para estimar los parámetros de la cámara, debe tener puntos 3-D del mundo (globales) y puntos de la imagen 2-D correspondientes. Estas correspondencias pueden obtenerse utilizando múltiples imágenes de un patrón de calibración, como un tablero de ajedrez. Usando las correspondencias se pueden obtener los parámetros de la cámara [12].

La cámara termográfica VarioCam HD se calibró utilizando el método de calibración para cámaras ópticas con la aplicación Camera Calibrator del software Matlab R2016b [11], aplicando el método que se describe en [18], el cual es ampliamente utilizado para la calibración de cámaras visibles. Para la captura del patrón de calibración y para obtener mejores resultados, se deben utilizar entre 10 y 20 imágenes de acuerdo a las recomendaciones establecidas en [19]. El procedimiento consiste en los siguientes pasos:

1. Imprimir un patrón y adjuntarlo a una superficie plana (en nuestro caso placa de aluminio).
2. Colocar el tablero de ajedrez en un ángulo menor a 45 grados con respecto al plano de la cámara termográfica.
3. Capturar las imágenes del patrón con diferentes orientaciones moviendo el patrón o la cámara termográfica, cuidando mantener una distancia aproximadamente igual a la distancia a la que se desean medir los objetos.
4. Detectar los puntos característicos en las imágenes (Camera Calibrator de Matlab).
5. Estimar los parámetros intrínsecos y parámetros extrínsecos (Camera Calibrator de Matlab)

2.3 Experimentos.

1. Para la calibración de la cámara se utilizó el patrón que se muestra en la figura 1, donde se aprecia que es un tablero similar al de ajedrez con 6 columnas y 7 filas de cuadrados con dimensiones de una pulgada, patrón de calibración igual al utilizado para calibrar cámaras digitales, ya que para este trabajo se está considerando como un modelo pinhole [17]. Dicho patrón se imprimió en una placa de aluminio con dimensiones de 9 x 7 x 0.5 pulgadas. En la imagen se observa de color negro el patrón impreso, el cual tiene diferente emisividad (proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto) que la placa de aluminio.
2. Para capturar los termogramas del patrón, primeramente, se calentó la placa de aluminio y se mantuvo estable a 38 grados Celsius, utilizando para ello una plancha de calor; mientras se capturaban los 15 termogramas. Cabe mencionar que la placa se calienta para tener una diferencia de temperatura entre la placa y la temperatura ambiente lo que ayuda a evitar reflejos de objetos cercanos o la misma cámara.

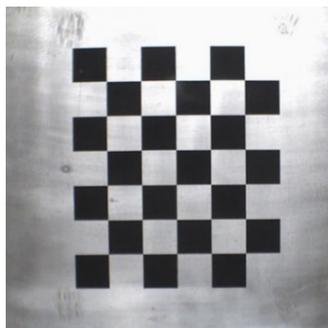


Figura 1. Patrón de calibración para la cámara.

En la figura 2 se puede observar la imagen térmica del patrón impreso en la placa. La cámara termográfica se mantuvo en una posición fija, asegurada en una base, y cuidando no exceder los 45 grados de inclinación, recomendados para este procedimiento.



Figura 2. Imagen térmica del patrón de calibración.

- Una vez estable la temperatura se capturaron los 15 termogramas, la diferencia en la orientación entre termogramas se obtuvo al mover la placa de aluminio. En la figura 3 se pueden apreciar dos de los termogramas utilizados en el proceso de calibración después de modificar en el software VarioCapture 2.4, el rango y nivel de temperatura, el cambio de paleta de colores a blanco y negro y del formato de la imagen a .bmp, para poder utilizarlas en la aplicación Camera Calibrator toolBox de Matlab.

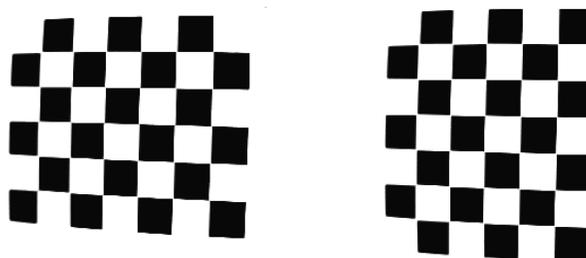


Figura 3. Patrón de calibración para la cámara.

4. En la figura 4a, se observan los puntos característicos detectados, las esquinas del patrón utilizado y los puntos proyectados. En las imágenes utilizadas del patrón, la figura 4b corresponde al error de reproyección, el cual es en promedio de 0.11 píxeles.

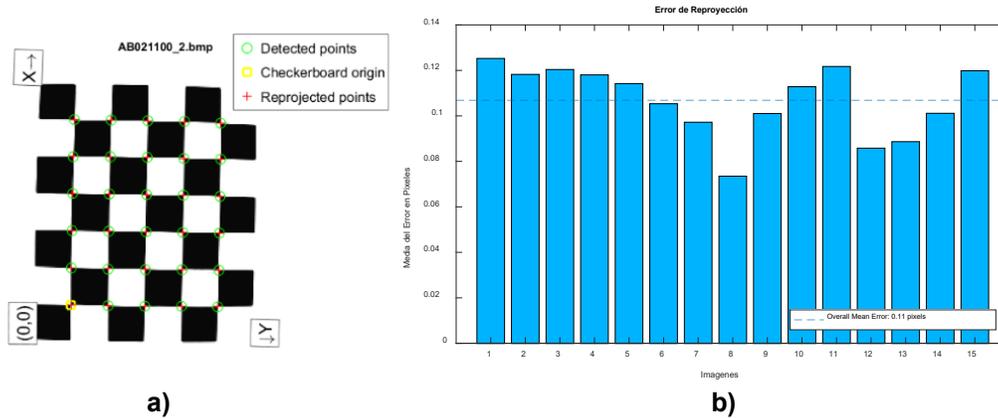


Figura 4. a) Puntos característicos en la imagen; b) Error de reproyección.

La distancia entre la cámara termográfica y el patrón utilizado fue de 60 centímetros, distancia que corresponde con los resultados obtenidos. La figura 5 muestra la posición y orientación de la cámara termográfica correspondiente a cada una de las quince capturas de termogramas del patrón utilizado.

Visualización de Parámetros Extrínsecos

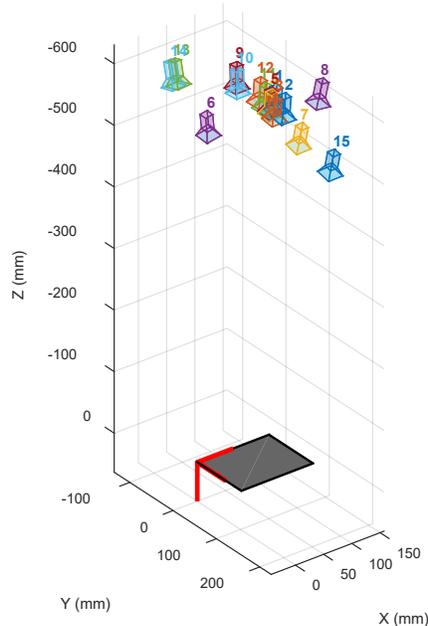


Figura 5. Perspectiva de la captura de las imágenes.

2.4. Medición de moneda.

En las figuras 6a y 6b, se muestra la placa de aluminio con el patrón utilizado. Estas imágenes fueron capturadas con una cámara óptica. En la figura 6a se aprecian las dos monedas utilizadas (un peso y 50 centavos) y en la figura 6b se muestra las monedas mencionadas anteriormente, pero cubiertas con material similar al de la impresión del patrón utilizado para la calibración. Utilizar el mismo material que en la impresión del patrón de calibración o uno con emisividad similar para cubrir la moneda, es lo que permite que la cámara termográfica logre distinguir las monedas, de lo contrario no se apreciarían en la imagen térmica.

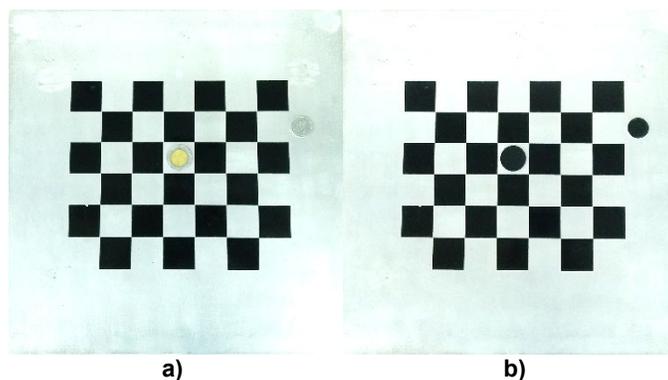


Figura 6. a) imagen original; b) imagen con monedas cubiertas.

Para validar los resultados obtenidos en la sección 2.2 se midió el diámetro de una moneda de un peso. En la figura 7a se observa el patrón utilizado para calibrar la cámara termográfica y un círculo en el centro del patrón el cual corresponde a la moneda de un peso. La moneda fue cubierta con cinta aislante similar al material con que se imprimió el patrón. Para obtener el diámetro de la moneda se siguió el procedimiento utilizado para medir un objeto plano descrito en [20], al cual se le realizaron modificaciones en el código para poder trabajar con las imágenes utilizadas en la sección 2.2. A continuación, se describe el procedimiento utilizado:

1. Para obtener una medición precisa es necesario eliminar la distorsión de la lente en la imagen, para lo cual se utilizó la instrucción `undistortImage` de matlab. En la figura 7a se muestra la imagen original en la que se observa una ligera curvatura por el perímetro del patrón y en la figura 7b la imagen ya sin distorsión.

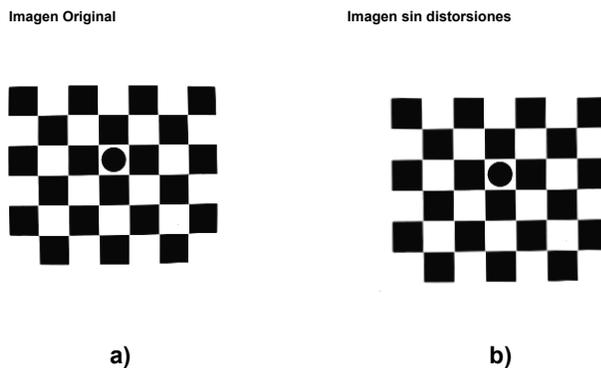


Figura 7. a) imagen original; b) imagen sin distorsión.

- Para encontrar la moneda se utilizó la función `regionprops` con la cual se detectaron las regiones dentro de la imagen sin distorsión, posteriormente se buscó la región de menor área y se marcó con una leyenda que indica que corresponde a la moneda de un peso (21 mm), ver figura 8a. Para el caso de dos monedas diferentes, un peso y 50 centavos (17 mm), se buscan las 2 áreas mínimas, la figura 8b se observa el segundo caso descrito.

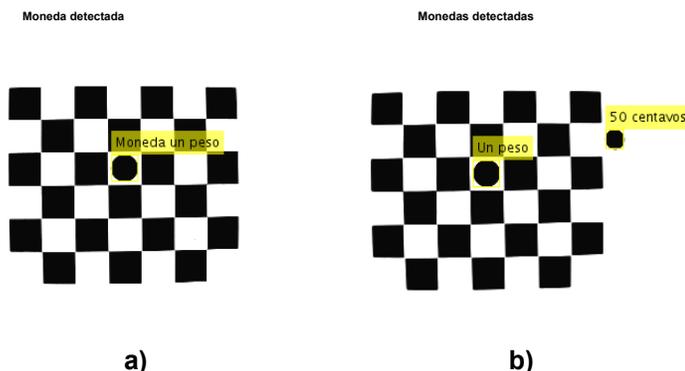


Figura 8. a) Moneda de un peso detectada; b) Monedas de un peso y 50 centavos detectadas.

3. Resultados

La aplicación utilizada, Camera Calibrator, genera la información que incluye la rotación y traslación relativas (R , t) y los parámetros de calibración: distancia focal, el tamaño del formato, el punto principal y la distorsión radial y descentrada de la lente. Los valores de estos parámetros para la VarioCam HD obtenidos con Matlab se muestran en la tabla 2. En la columna 3 del vector de traslación se observa que los valores obtenidos son de 609.75 mm, en promedio, con una desviación estándar de 17.11 mm; estos valores corresponden al eje Z, o distancia de la cámara al patrón de calibración.

Tabla 2. Parámetros de calibración de la VarioCam HD.

Intrinsics			

Focal length (pixels):	[749.6554 +/- 7.7578	753.8411 +/- 7.7396]
Principal point (pixels):	[195.3770 +/- 1.1156	142.0942 +/- 0.7261]
Radial distortion:	[-0.8269 +/- 0.0311	1.3545 +/- 0.6879]
Extrinsics			

Translation vectors (mm):			
[36.2186 +/- 0.9375	-70.6336 +/- 0.6050	622.8403 +/- 6.4108]
[60.3632 +/- 0.9454	-69.4262 +/- 0.6083	625.0933 +/- 6.4260]
[56.7241 +/- 0.9412	-56.7123 +/- 0.6077	624.8365 +/- 6.4251]
[45.1542 +/- 0.9374	-54.5365 +/- 0.6065	624.0890 +/- 6.4204]
[40.2078 +/- 0.9364	-64.9407 +/- 0.6047	622.7557 +/- 6.4130]
[21.0391 +/- 0.8942	-59.6164 +/- 0.5761	597.6901 +/- 6.1851]
[21.1109 +/- 0.9221	-63.3964 +/- 0.5994	615.5551 +/- 6.2056]
[23.8150 +/- 0.9281	-66.6913 +/- 0.6040	618.2811 +/- 6.2378]
[17.3116 +/- 0.9008	-70.9081 +/- 0.5808	601.5044 +/- 6.1856]
[33.9680 +/- 0.8978	-64.9348 +/- 0.5794	599.6785 +/- 6.1653]
[31.5759 +/- 0.9316	-43.6249 +/- 0.6048	622.4385 +/- 6.4068]
[15.5033 +/- 0.9292	-60.5605 +/- 0.6026	620.4029 +/- 6.3993]
[11.6378 +/- 0.8615	-57.0816 +/- 0.5564	576.8544 +/- 5.9838]



Tabla 2 (cont.). Parámetros de calibración de la VarioCam HD.

[8.1251 +/- 0.8584	-56.9626 +/- 0.5545	574.9976 +/- 5.9753]
[-90.5890 +/- 0.9020	66.4674 +/- 0.5900	599.3717 +/- 6.0903]

Los datos presentados en la tabla 3 corresponden a las 10 monedas medidas 4 veces cada una, es decir, se capturaron 40 termogramas donde las monedas se colocaron en el centro del patrón de calibración utilizado. En general se muestra un error de medición del diámetro de 2.05% y un 2.22 % para la distancia de la cámara.

Tabla 3. Valores obtenidos de las mediciones.

	Diámetro mm	Distancia de la cámara en mm
Media	20.772	613.298
DesvEst	0.416	0.752
Max	21.255	615.435
Min	20.438	613.004
Error medio	0.431	13.298
Error porcentual	2.05	2.22

Se realizó un estudio R&R al sistema de medición con la cámara termográfica y se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 4, donde se puede observar que el porcentaje de variación aportado por el sistema de medición (Repetibilidad y Reproducibilidad) es de 76.91 % y el porcentaje de variación que aportan las monedas (parte a parte) es de 23.09 %. En la figura 9 se muestran los componentes de variación obtenidos en el estudio R&R antes mencionado.

Tabla 4. Estudio R&R del sistema de medición - Método XBarra/R

Fuente	VarComp	%Contribución (de VarComp)
R&R del sistema de medición total	0.123580	76.91
Repetibilidad	0.106372	66.20
Reproducibilidad	0.017208	10.71
Parte a parte	0.037104	23.09
Variación total	0.160683	100.00
Fuente	%Var. de estudio (%SV)	
R&R del sistema de medición total		87.70
Repetibilidad		81.36
Reproducibilidad		32.72
Parte a parte		48.05
Variación total		100.00
Número de categorías distintas = 1		

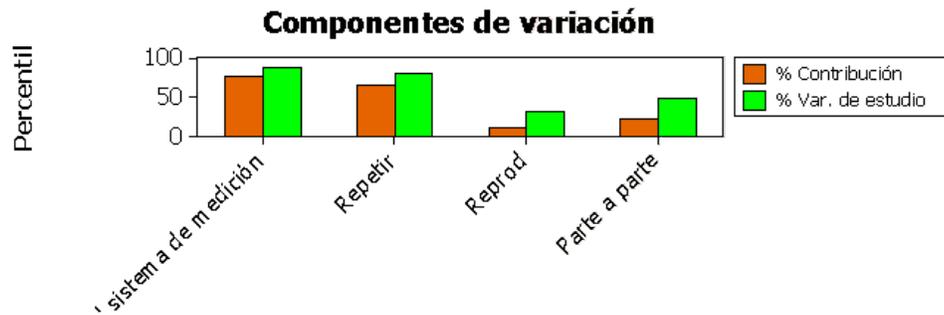


Figura 9. Componentes de variación del sistema de medición.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se utilizó un patrón de calibración similar a un tablero de ajedrez, el cual es muy utilizado en los procedimientos de calibración de cámaras en el área de visión por computadora. Para poder utilizar estos procedimientos el patrón de calibración debe proporcionar puntos objetivo visibles en el espectro térmico. El patrón utilizado se adhirió a una placa de aluminio que posteriormente fue mantenida a 38 ° C para eliminar posibles reflejos externos al cambiar la escala de temperatura mediante software.

Los resultados obtenidos en el estudio muestran un error porcentual del 2.05 % al medir el diámetro de la moneda de un peso y un error porcentual de 2.22 % para la distancia entre la cámara y el patrón de calibración. En la actualidad existen cámaras termográficas con una mayor resolución a la cámara utilizada en este trabajo, por lo que los valores obtenidos se mejorarían considerablemente al utilizar una cámara con mayor resolución.

Es importante mencionar que los resultados obtenidos en el estudio R&R muestran que las monedas contribuyen con el 23.09% de la variación, y que el sistema no es capaz de distinguir entre categorías, ya que el número de categorías distintas reportadas en el estudio es igual a 1 y el recomendado debe ser mayor o igual a 5, según el Grupo de Acción de la Industria Automotriz (AIAG por sus siglas en inglés). Por lo tanto, no es apto para utilizarse en un proceso donde se requiera mucha precisión, en otras palabras no es el instrumento adecuado para medir la variación en las monedas.

Sin embargo, el error porcentual muestra que con la cámara si se pueden medir y discriminar objetos de diferente tamaño, como una moneda de un peso y una de 50 centavos, ya que la diferencia entre estas monedas es de 4 mm, mayor al 2.05 % de error encontrado en las mediciones, o en cualquier par de objetos que superen el error porcentual mencionado anteriormente.

Agradecimientos

A la Universidad de Sonora por el apoyo brindado para la realización de los estudios de doctorado en Ingeniería Mecatrónica y por todas las facilidades otorgadas durante el proceso de formación en el posgrado.

Referencias

- [1] I. Ullah *et al.*, "Predictive Maintenance of Power Substation Equipment by Infrared Thermography Using a Machine-Learning Approach," *Energies*, vol. 10, no. 12, p. 13, Dec. 2017.



- [2] O. Faust, U. Rajendra Acharya, E. Y. K. Ng, T. J. Hong, and W. Yu, "Application of infrared thermography in computer aided diagnosis," *Infrared Phys. Technol.*, vol. 66, pp. 160–175, 2014.
- [3] S. A. Narod, "Age of diagnosis, tumor size, and survival after breast cancer: implications for mammographic screening," *Breast Cancer Res. Treat.*, vol. 128, no. 1, pp. 259–266, Jul. 2011.
- [4] M. Y. Ameca, "Validación Cuantitativa de Información Termográfica para el Pre-diagnóstico de Cáncer de Mama - Tesis de Maestría.," Laboratorio Nacional de Informática Avanzada, 2012.
- [5] M. Rodríguez-Martín, S. Lagüela, D. González-Aguilera, and J. Martínez, "Thermographic test for the geometric characterization of cracks in welding using IR image rectification," *Autom. Constr.*, vol. 61, pp. 58–65, Jan. 2016.
- [6] T. Luhmann, J. Ohm, J. Piechel, and T. Roelfs, "Geometric Calibration of Thermographic Cameras," in *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2010, vol. XXXVIII, p. 6.
- [7] S. Lagüela, H. González-Jorge, J. Armesto, and P. Arias, "Calibration and verification of thermographic cameras for geometric measurements," *Infrared Phys. Technol.*, vol. 54, no. 2, pp. 92–99, Mar. 2011.
- [8] S. Prakash, P. Y. Lee, and T. Caelli, "3D mapping of surface temperature using thermal stereo," in *9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2006, ICARCV '06*, 2006.
- [9] S. Prakash, P. Y. Lee, T. Caelli, and T. Raupach, "Robust thermal camera calibration and 3D mapping of object surface temperatures," in *Thermosense XXVIII*, 2006, vol. 6205, pp. 182–189.
- [10] R. Y. Tsai, "A Versatile Camera Calibration Techniaue for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses," 1987.
- [11] T. Schmidt and C. Frommel, "Geometric Calibration for Thermography Cameras," Bremen, Germany, 2015.
- [12] J. Heikkilä and O. Silvén, "A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction," Oulu, Finland, 1997.
- [13] S. Lagüela, H. González-Jorge, J. Armesto, and J. Herráez, "High performance grid for the metric calibration of thermographic cameras," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 1, 2012.
- [14] Y. Zoetgnande *et al.*, "Robust low resolution thermal stereo camera calibration," *HAL Open Arch.*, 2018.
- [15] R. Usamentiaga, D. F. Garcia, C. Ibarra-Castanedo, and X. Maldague, "Highly accurate geometric calibration for infrared cameras using inexpensive calibration targets," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 112, pp. 105–116, Dec. 2017.
- [16] P. Saponaro, S. Sorensen, S. Rhein, and C. Kambhamettu, "Improving calibration of thermal stereo cameras using heated calibration board," in *Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP*, 2015, vol. 2015-December, pp. 4718–4722.
- [17] R. Yang, W. Yang, Y. Chen, and X. Wu, "Geometric calibration of IR camera using trinocular vision," *J. Light. Technol.*, vol. 29, no. 24, pp. 3797–3803, 2011.
- [18] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 22, no. 11, pp. 1330–1334, Nov. 2000.
- [19] Mathworks, *Computer Vision Toolbox™ User's Guide R2019a*. 2000.
- [20] Matworks, "Measuring Planar Objects with a Calibrated Camera - MATLAB & Simulink." [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/vision/examples/measuring-planar-objects-with-a-calibrated-camera.html>. [Accessed: 29-Jan-2020].

Biografía de Autores

Flores Ochoa Rolando, cuenta con maestría en Ingeniería Industrial por la Universidad de Sonora, actualmente es maestro de tiempo parcial en la facultad de Ingeniería Industrial de la UNISON. Cuenta con experiencia en la industria en el área de calidad. Además, se ha certificado en el Instituto Mexicano de Mantenimiento Predictivo en: Análisis de Vibraciones, Categoría I, RCM Mantenimiento centrado en confiabilidad y en Ingeniería de Confiabilidad Aplicada a la gestión del mantenimiento. Actualmente se



encuentra en la etapa final del Doctorado en Ingeniería Mecatrónica en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.

Anaya Pérez María E., realizó su Doctorado en Ingeniería Mecatrónica en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, cuenta con Maestría en Calidad y Licenciatura en Ingeniería Industrial y 12 años de experiencia en la industria. Actualmente es profesor a Tiempo Completo adscrito al Departamento de Ingeniería Industrial — Área de Mecatrónica, Universidad de Sonora, responsable y colaboradora en varios proyectos de investigación. Es miembro de la Academia “Diseño y Control de Sistemas”, integrante del Cuerpo Académico en consolidación “Automatización y Control”, Miembro de la Comisión Académica del Posgrado “Maestría en Internet de las Cosas e Inteligencia Artificial”. Ha participado como Director de Tesis para obtener el grado tanto de maestría y de doctorado. Es autora del libro “Impacto Económico en el Error de las Mediciones”, de algunos artículos de divulgación científica, artículos arbitrados, además, mantiene una participación continua con ponencias en Congresos de Reconocido Prestigio.

Anaya Eredias Carlos, es Maestro en Ingeniería con orientación en Optimización de Sistemas, actualmente es Profesor de Tiempo Completo adscrito al Departamento de Ingeniería Industrial - Área de Mecatrónica, Universidad de Sonora. Cuenta con 35 años de experiencia trabajando en áreas académicas relacionadas con Probabilidad, Estadística, Optimización y Métodos Numéricos. Es miembro de la Academia “Optimización y Modelación” y ha sido director de Tesis de Maestría y trabajos de licenciatura para obtener el grado académico correspondiente, también ha fungido como responsable y colaborar en varios proyectos de investigación.

Verdugo Miranda Rafael, es maestro en Ingeniería Industrial por la Universidad de Sonora, Actualmente es maestro de tiempo completo en la facultad de Ingeniería Industrial de la UNISON. Cuenta con experiencia en la industria en el área de gestión de mantenimiento en planta Tecate de Navojoa, además de experiencia en el área de producción en plantas de alimentos balanceados. Se ha certificado en el Instituto Mexicano de Mantenimiento Predictivo en: Ultrasonido (pasivo) Industrial nivel I, Termografía Infrarroja niveles I y II y en el Instituto Mexicano de Pruebas No Destructivas en: Ultrasonido (activo) Industrial nivel I. Fungió como coordinador de programas educativos en la UNISON de 2018 a 2019 y actualmente es jefe de departamento del área de Física Matemáticas e Ingeniería en la Universidad de Sonora.

Lozano Cota Luis Manuel, De profesión es Ingeniero Industrial egresado de la Universidad de Sonora, posee el grado de Maestro en Ingeniería Industrial (Optimización de Sistemas Productivos) por el Instituto Tecnológico de Sonora y actualmente cursa el programa doctoral en Ciencias de la Computación. Presta sus servicios docentes en la Universidad de Sonora, Unidad Regional Sur cubriendo materias del eje especializante del programa de Ingeniería Industrial y de Sistemas y participa en actividades y/o proyectos de investigación relacionados con el área de Investigación de Operaciones, Estadística Aplicada, Sistemas de Computación y Procesos de Manufactura.