

Método de calibración de una cámara CMOS comercial para su uso como cámara polarimétrica

Calibration method of a CMOS consumer camera for its use as polarimetric imager

Sara PEÑA-GUTIÉRREZ ⁽¹⁾, Maria BALLESTA ⁽¹⁾ Santiago ROYO ⁽¹⁾

1. Centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC-CD6), Rambla Sant Nebridi 10, E08222, Terrassa, Spain

Persona de contacto: Sara Peña Gutiérrez (sara.pena.gutierrez@upc.edu).

RESUMEN:

La imagen polarimétrica puede mejorar notablemente el contraste de un objeto, ampliando la información detectada de la escena mediante imágenes de intensidad convencionales. La información obtenida, además, es complementaria a la de intensidad. Aquí presentamos un polarímetro de imagen básico que mide el vector completo de Stokes de la escena utilizando la configuración de división de tiempo (DoT), empleando una cámara CMOS comercial como paso previo al desarrollo de una cámara polarimétrica propia.

Debido a la naturaleza del vector de Stokes, sus componentes no pueden medirse directamente sino mediante mediciones de intensidad. En el artículo, se muestra el método de cálculo de la matriz de reducción de datos determinada en base a los estados de polarización de referencia, así como los parámetros de Stokes teóricos y estimados en el experimento de calibración a 632nm. La raíz del error cuadrático medio (RMSE) obtenido es menor al 10%. Por tanto, este método de calibración puede proporcionar una matriz de reducción de datos bien condicionada que tenga inmunidad al ruido y donde el rango espectral pueda ampliarse utilizando luz blanca y una cámara monocromática.

Palabras clave: Imagen polarimétrica, polarización, calibración, teledetección, metrología óptica, visión artificial

ABSTRACT:

Polarimetric imaging can significantly improve the contrast of an object, expanding the detected information of the scene in conventional intensity images. The information provided, in addition, is complementary to the one provided by intensity-based imagery. Here we present a basic imaging polarimeter that measures the full Stokes vector of the scene based on a division of time (DoT) structure using a consumer CMOS camera, as a preliminary step towards the development of a proprietary polarimetric camera.

Because of its nature, the components of the Stokes vector cannot be measured directly, as they must be recovered from a set of intensity measurements. In the paper, results show the method to calculate a determined data reduction matrix at the reference polarization states, as well as, the theoretical and recovered Stokes parameters from the calibration experiment at 632nm. The root mean square (RMS) errors incurred stay below 10%. Therefore, this calibration method can provide a well-conditioned data reduction matrix with noise immunity, and where the spectral range can be widened by using white light and a monochrome camera.

Key words: Imaging polarimetry, polarization, calibration, remote sensing, optical metrology, machine vision.

1.- Introducción

La polarimetría ha emergido en las últimas cuatro décadas como una poderosa herramienta para la clasificación de imágenes. Proporciona una fuente de información completamente diferente, en gran parte no correlacionada, con las imágenes espectrales y de intensidad, ya bien asentadas. La imagen polarimétrica ofrece aplicaciones en numerosos campos como es la detección remota [1,2], la detección a través de medios difusores como niebla o humo [3-5], la caracterización de aerosoles [6], el diagnóstico de cáncer no invasivo [7,8] o la astrofísica [9], entre otros.

La imagen polarimétrica consiste en la medición del estado de polarización de la luz de la escena para aprovechar sus características y extraer información adicional de la imagen, a través del vector de Stokes. Desafortunadamente, dicho vector no puede medirse directamente en una sola medición. Se han desarrollado métodos teóricos para calcular el vector de Stokes en el que se requieren un mínimo de cuatro mediciones de intensidad independientes. Los cambios de polarización contenidos en el vector de Stokes en una escena pueden proporcionar información tanto sobre características de la superficie observada como de su forma, sombreado y rugosidad. Esta información no está correlacionada con la información recuperada por la intensidad convencional o las mediciones espectrales, convirtiéndose en un campo de interés en aplicaciones de visión artificial, por ejemplo, detectando objetos o segmentándolos dentro de una imagen compleja.

En este documento se describe en detalle un polarímetro de imágenes por división de tiempo (DoT), basado en una cámara CMOS de gran consumo. Este dispositivo se calibra extendiendo el método mejorado desarrollado para polarímetros convencionales a polarímetros de imagen. Este método tiene la ventaja de funcionar correctamente sin la necesidad de caracterizar completamente la matriz Mueller del sistema, como ocurre con la técnica de modulación de Fourier. El método utilizado es de uso general y permite calibrar el sistema utilizando estados de polarización de referencia (RPS) diferentes de los definidos normalmente para obtener directamente los parámetros

de Stokes y, por lo tanto, permite introducir RPS que pueden mejorar la recuperación de los parámetros, la reducción de los errores de medida y la presencia de ruido.

La base de polarización utilizada y la técnica de medición se explican en la Sección 2 para proporcionar el marco teórico. A continuación, la metodología se describe en la Sección 3 seguida de la presentación de los resultados en la Sección 4 y las conclusiones generales en la Sección 5.

2.- Descripción de la técnica de medición

La medida de la polarización de la luz no es trivial. Debido a su naturaleza vectorial, es necesario medir varios parámetros diferentes, que se conocen como los parámetros de Stokes. Estos parámetros se desarrollaron para expresar el estado de la luz por medio de 4 números escalares normalizados, que no se pueden medir directamente:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

donde S_0 , S_1 , S_2 y S_3 describen la intensidad total, la prevalencia del estado lineal en 0° sobre 90° , la prevalencia del estado lineal en 45° sobre el de 135° , y la prevalencia del estado circular derecho sobre el estado circular izquierdo, respectivamente.

Para obtener estos parámetros, es necesario realizar un mínimo de 4 mediciones de intensidad independientes en diferentes estados de polarización para resolver el sistema lineal:

$$\vec{S} = \mathbf{W} \cdot \vec{I} \quad (2)$$

donde \vec{S} es el vector de Stokes, \mathbf{W} es la denominada matriz de medición del sistema e \vec{I} es el vector de intensidad que contiene las N mediciones de los diferentes estados de polarización.

La imagen polarimétrica se obtiene al resolver la ecuación (2) píxel por píxel, obteniendo el vector completo de Stokes en cada uno. Sin embargo, el sistema debe calibrarse antes de realizar imágenes de polarización para determinar la matriz de medición \mathbf{W} , que proporcionará el vector de Stokes final.

Esta calibración se puede realizar utilizando la técnica de matriz de reducción de datos (DRM), donde no se requiere ningún conocimiento de *a priori* de la matriz de Mueller del sistema. Este método permite determinar W mediante la descomposición en valores singulares (SVD) de un sistema de ecuaciones sobredeterminado. Consiste en realizar N mediciones de intensidad correspondientes a las N configuraciones diferentes de los elementos de polarización del analizador de estado de polarización (PSA). Además, se generan M RPS distintos, de los que se conocen sus vectores de Stokes S_i , ($i = 0, 1, \dots, M$). Por consiguiente, la ecuación (2) se puede reescribir como una ecuación de matriz lineal:

$$S = W \cdot I \quad (3)$$

Puede suceder que, al calcular la pseudoinversa para calcular W la matriz $I \cdot I^T$ no esté bien condicionada, conduciendo a grandes variaciones en el valor de W resultante. Una solución a este problema, como se indica en [10], es aplicar el método SVD para obtener la pseudoinversa de I . Como el vector de Stokes tiene cuatro grados de libertad, el rango de I debe tener cuatro dimensiones al igual que sólo debe tener cuatro valores únicos. Desde [10], se recomienda utilizar la pseudoinversa truncada igualando a cero todos los valores únicos que son más pequeños que los cuatro valores principales.

Una vez que se calibra el sistema, se puede recuperar un mapa de los cuatro vectores de Stokes, resolviendo la ecuación (2) píxel a píxel. Así como algunos mapas de parámetros avanzados relacionados con la polarización de interés en procesamiento de imagen, como el grado de polarización (DOP), el grado de polarización lineal (DOLP) y el grado de polarización circular (DOCP), que se puede calcular mediante las siguientes expresiones:

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (4)$$

$$DOLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (5)$$

$$DOCP = \frac{S_3}{S_0} \quad (6)$$

3.- Procedimiento experimental

En esta sección, se describe el procedimiento experimental para obtener las imágenes polarimétricas utilizando un polarímetro de división de tiempo, es decir, en que se toman imágenes consecutivas para cada valor de intensidad. Para lograr las imágenes finales, primero se debe diseñar y ejecutar el experimento de calibración. Una vez que se determina una buena matriz de calibración, se lleva a cabo la adquisición de la imagen final.

3.1.- Montaje de calibración

El diseño inicial se diferencia en dos partes principales: la óptica de iluminación y la óptica de imagen (ver Fig. 1). La óptica de iluminación consiste en un láser de fibra de 632nm de longitud de onda unido a una esfera integradora para borrar cualquier estado de polarización previo y uniformizar espacialmente el haz. A continuación, un generador de estados de polarización (PSG) compuesto por un polarizador lineal y dos polarizadores circulares montados en un rotador manual generará los RPS para la calibración.

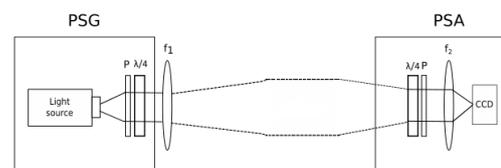


Fig. 1: Esquema de la configuración de calibración (parte superior). La configuración del polarímetro de imagen DoT ya está montada en el banco óptico (parte inferior).

A continuación se coloca una lente acromática de gran distancia focal f_1 (100 mm) para controlar el tamaño del haz y minimizar los errores de distribución espacial en la iluminación. La óptica de imagen consiste en un PSA, que permite medir el estado de polarización deseado, seguido de un telescopio integrado en la configuración para ampliar el tamaño del

haz para cubrir casi por completo el área activa del sensor, una cámara comercial Canon EOS1000 con un sensor CMOS RGB. El PSA está compuesto por una lámina de cuarto de onda (QWP) y un polarizador lineal montado en un rotador manual para seleccionar la configuración de polarización preferida. Los esquemas de la configuración y la configuración final se presentan en la Fig. 1.

Aprovechando la configuración explicada anteriormente, deben abordarse dos tipos de calibraciones. La primera es la calibración radiométrica. Consiste en eliminar el ruido de fondo provocado por los componentes y el detector. Posteriormente, el objetivo de la calibración es determinar la matriz de reducción de datos real \mathbf{W} del sistema. Una fuente no polarizada y espacialmente uniforme se puede utilizar en esta calibración. Esta segunda calibración se basa en el método RDM mejorado, explicado en la Sec. 2, que tiene la ventaja de considerar los efectos de orden superior en el sistema óptico, como las reflexiones múltiples entre o dentro de los dispositivos ópticos (muy común en este tipo de configuraciones), las imperfecciones en los analizadores y las QWP, y efectos de birrefringencia residual y diatenuación. La precisión de reconstrucción de los parámetros de Stokes solo está limitada por las incertidumbres en el RPS, por lo que una buena caracterización de estos elementos es primordial.

El procedimiento de calibración implica producir varios RPS medidos por el PSA en los ángulos óptimos elegidos para su recuperación. Los estados de polarización seleccionados para la calibración son seis: cuatro estados lineales en ángulos 0° , 45° , 90° , 135° y dos estados circulares: dextrógiro (RC) y levógiro (LC). Para producir los diversos RPS lineales, el polarizador lineal estándar se giró manualmente de 0° a 180° en pasos de 10° . Para producir luz polarizada circularmente, el polarizador lineal fue reemplazado por polarizadores estándar LC y RC. Se registraron un total de 126 imágenes para los 21 RPS en el experimento de calibración polarimétrica.

3.2.- Montaje de imagen polarimétrica

Después de determinar la matriz de medición a través de la calibración, es posible tomar las imágenes polarimétricas. Inicialmente se tomaron algunas imágenes polarimétricas en

transmisión utilizando los mismos seis estados del PSA que en la calibración. Después de tomar las seis imágenes, en cada píxel, los diferentes mapas vectoriales de Stokes se calcularon resolviendo la ecuación (2). Posteriormente, siguiendo el mismo procedimiento, se realizó un segundo experimento para medir la polarización de la luz reflejada de una caja de plástico con un polarizador de hoja lineal colocado en un ángulo oblicuo iluminado con luz espacial uniforme de la esfera integradora.

4.- Resultados

Los resultados de los experimentos descritos en la sección anterior se presentan a continuación. En primer lugar, se determina la exactitud de la calibración realizada. Una vez que se evalúa y se considera suficiente, se realizan los experimentos descritos para ver la respuesta de la configuración al adquirir imágenes polarimétricas.

4.1.- Calibración

Después de realizar la calibración, los datos deben procesarse para ver la precisión de la matriz \mathbf{W} determinada. Fig. 2 muestra el valor promedio de la intensidad medida correspondiente a los diferentes RPS y los datos recuperados producidos por el \mathbf{W} determinado. Las intensidades en los estados de polarización de referencia lineal son consistentes con la ley de Malus. Se puede observar la buena adaptación de la intensidad estimada aplicando la matriz calculada \mathbf{W} a los datos medidos, aunque las intensidades en los canales de modulación de polarización circular se desvían del valor medio de la suma de I_0 y I_{90} . Esto se debe principalmente a la desviación de la retardancia y al azimut del QWP acromático que compone el PSA. Como hemos medido directamente la matriz de reducción de datos, esta desviación se incluirá en la matriz \mathbf{W} , y por consiguiente, en los vectores de Stokes estimados y en los mapas DOP, DOLP y DOCP.

Elegimos el DOP como figura de mérito para representar la precisión de la matriz \mathbf{W} determinada. Fig. 3 (izquierda) muestra el DOP para todos los RPS, aplicando las ecuaciones (4-6). Los puntos corresponden a los valores de DOP y las líneas continuas a DOLP y DOCP. Para el RPS lineal, los valores teóricos de DOP y DOLP deben ser el máximo (1.0), mientras que para DOCP deben ser nulos.

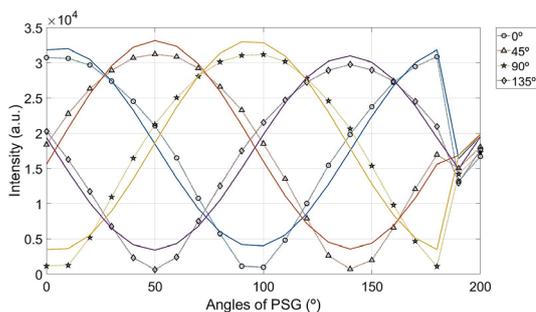


Fig. 2: Valor medio de la intensidad en los diferentes estados del conjunto de las medidas de calibración. Las líneas discontinuas con símbolos representan los datos medidos en las diferentes RPS. Las líneas continuas representan la intensidad recuperada de la matriz W calculada.

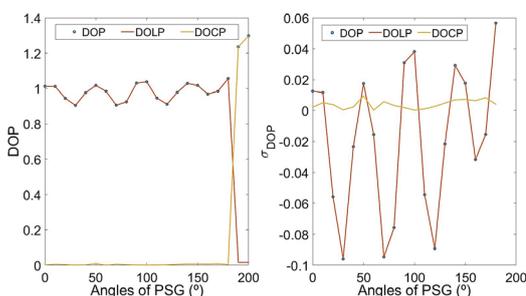


Fig. 3: DOP en cada RPS (izquierda). Desviación de los recuperados a partir del DOP teórico en cada RPS. Los ángulos 190° y 200° corresponden a los estados RC y LC, respectivamente, para preservar la misma representación gráfica (derecha).

De la misma forma, en los estados circulares los valores de DOP y DOCP son 1.0 mientras que el DOLP debe ser nulo. La desviación entre los valores recuperados y el DOP DOLP y DOCP teóricos, se presentan en la Fig. 3 (derecha). Puede apreciarse como las desviaciones máximas son inferiores al 10%. Como conclusión principal, la matriz de reconstrucción de datos determinada a partir del valor medio del área del sensor y los 21 RPS con un nivel de incertidumbre por debajo de 10% se puede utilizar para la reconstrucción de los parámetros de Stokes completos.

Utilizando la intensidad media medida para cada RPS y la matriz W determinada, recuperamos sus valores del vector de Stokes correspondientes. Fig. 4 muestra los parámetros de Stokes resultantes basados en el método mejorado de DRM para la calibración [10] y sus errores. Los datos recuperados (línea continua) muestran pequeñas desviaciones respecto de los teóricos (asteriscos) que no pu-

dieron detallarse mediante la descripción simplificada del polarímetro. Los errores en la estimación de los parámetros de Stokes están de nuevo por debajo de 10% en los estados de polarizaciones lineales, y alrededor de 20% solo debido al valor del primer parámetro de Stokes en las polarizaciones circulares. La diferencia en los estados circulares se atribuye a las imperfecciones en el polarizador circular y el QWP del PSA.

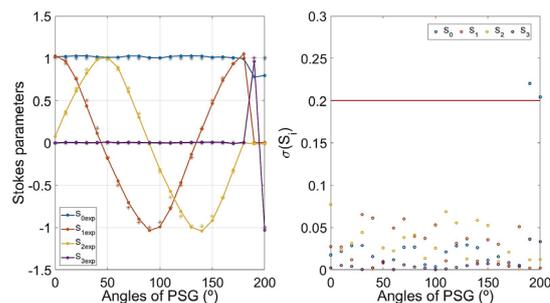


Fig. 4: Parámetros de Stokes recuperados (línea continua) y teóricos (asteriscos) (izquierda). Error RMS entre los parámetros recuperados y los teóricos (derecha). Los ángulos 190° y 200° corresponden a los estados RC y LC.

4.2.- Obtención de imágenes polarimétricas

El siguiente paso es utilizar la matriz caracterizada para capturar imágenes polarimétricas. Para ello, se realizaron dos experimentos. En primer lugar, en la Fig.5 mostramos los mapas de DOP, DOLP y DOCP recuperados de medir en transmisión un polarizador lineal a 45°. El nivel de escala de grises codifica el valor del parámetro píxel por píxel, siendo negro cercano a cero y blanco cercano a 1. Como se esperaba, los mapas de DOP y DOLP tienen valores máximos indicando la presencia de luz totalmente polarizada a la vez que el mapa de DOCP muestra la no existencia de estados de polarización circular. Por tanto, los resultados obtenidos son consistentes con los teóricos.

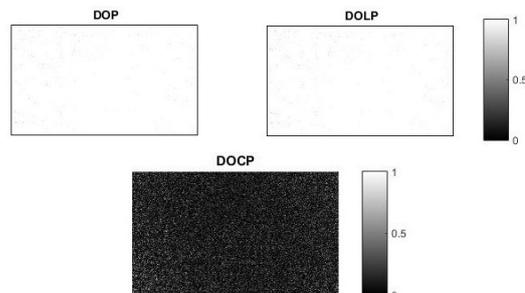


Fig. 5: Mapas del DOP, DOLP y DOCP recuperados de una imagen en transmisión de un estado lineal a 45°.

Yendo un paso más allá, medimos la polarización de la escena utilizando la luz reflejada (iluminación pasiva). En la Fig. 6 se presentan los mapas de polarización obtenidos, donde se puede distinguir la ubicación en la imagen del polarizador lineal ubicado en un ángulo oblicuo, al ser su área más brillante que el entorno.

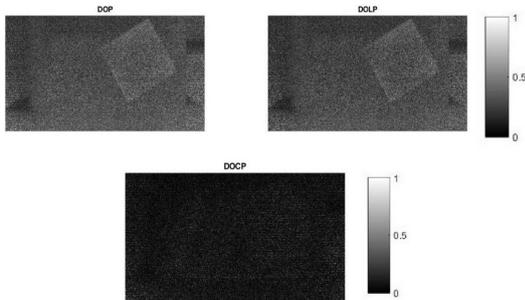


Fig. 6: Mapas de DOP, DOLP y DQCP obtenidos para una imagen con iluminación pasiva.

4.- Conclusión

El sistema que se presenta aquí constituye una configuración simple para la obtención y calibración de un polarímetro de imagen. Usando elementos ópticos básicos y una cámara CMOS comercial, hemos podido construir un dispositivo de imagen polarimétrica cuyos resultados de calibración son muy satisfactorios, aunque algunas imperfecciones en los componentes ópticos parecen inducir errores a pesar de extender el método de calibración mejorado para polarímetros normales a nuestro sistema. El error de desviación máxima, inferior a 10% en la estimación de los parámetros de Stokes lineales, valida la metodología utilizada para calcular la matriz de W para una buena calibración para realizar imágenes polarimétricas. Estos resultados pueden mejorarse significativamente si se utilizan polarizadores con mayor índice de extinción, y si se caracterizan adecuadamente los errores previos de alineamiento y diatenuación en los elementos ópticos.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido apoyado por el Secretaría de Universidades e Investigación de la Generalitat de Catalunya y el Fondo Social Europeo con la subvención 2018FI-B-00868 y parcialmente subvencionado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) en el marco del proyecto FIS2017-89850R.

Referencias

- [1] Tyo, J. S., Goldstein, D. L., Chenault, D. B., and Shaw, J. A., *Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications*, Appl. Opt. 45, 54535469, 2006.
- [2] Snik, F., Craven-Jones, J., Escuti, M., Fineschi, S., Harrington, D., De Martino, A., Mawet, D., Riedi, J., and Tyo, J. S., *An overview of polarimetric sensing techniques and technology with applications to different research fields*, Proc. of SPIE 9099, 90990B, 2014.
- [3] Lewis, G., Jordan, D., and Roberts, P., *Backscattering target detection in a turbid medium by polarization discrimination*, Appl. Opt. 38, 39373944, 1999.
- [4] Fade, J., Panigrahi, S., Carré, A., Frein, L., Hamel, C., Bretenaker, F., Ramachandran, H., and Alouini, M., *Long-range polarimetric imaging through fog*, Applied Optics 53 (18), 3854, 2014.
- [5] Sudarsanam, S., Mathew, J., Panigrahi, S., Fade, J., Alouini, M., and Ramachandran, H., *Real-time imaging through strongly scattering media: Seeing through turbid media, instantly*, Scientific Reports 6, 1–9, 2016.
- [6] Deschamps, P. Y., Buriez, J. C., Bron, F. M., Leroy, M., Podaire, A., Bricaud, A., and Sze, G., *The polder mission: instrument characteristics and scientific objectives*, IEEE Trans. Geosci 32, 598–615, 1994.
- [7] Novikova, T., Pierangelo, A., and Martino, A. D., *Polarimetric imaging for cancer diagnosis and staging*, Opt. Photonics News 23, 26–33, 2012.
- [8] Pierangelo, A., Nazac, A., Benali, A., Validire, P., Cohen, H., Novikova, T., Ibrahim, B. H., Manhas, S., Fallet, C., Antonelli, M.-R., and Martino, A.-D., *Polarimetric imaging of uterine cervix: a case study*, Opt. Express 21, 1412014130, 2013.
- [9] Trujillo-Bueno, J., Moreno-Insertis, F., Sanchez, F., DeglInnocenti, E. L., Stenflo, J. O., Mathys, G., Antonucci, R., Blandford, R., Agol, E., Broderick, A., Heyl, J., Koopmans, L., Lee, H.-W., Elitzur, M., Hildebrand, R. H., and Keller, C. U., *Astrophysical Spectropolarimetry*, (Cambridge University, 2002).
- [10] Boulbry, B., Ramella-Roman, J. C., and Germer, T. A., *Improved method for calibrating a Stokes polarimeter*, Appl. Opt. 46 (35), 8533–8541, 2007

Otros:

(Marque la casilla haciendo doble click y seleccionando activar)

Deseo presentar esta comunicación como candidata a alguno de los premios (sólo si el primer autor es un estudiante; debe acreditar dicha condición con un documento oficial que debe ser enviado a optoel2019@unizar.es).

En este caso recuerde marcar la casilla **SI** en la pregunta correspondiente del formulario.