

# Estimación de superficies 3D mediante imagen polarimétrica

## 3D surface estimation using polarimetric imaging

Sara PEÑA-GUTIÉRREZ <sup>(1)</sup>, Paula MAYNOU <sup>(2)</sup>, Maria BALLESTA-GARCIA <sup>(1)</sup>,  
Santiago ROYO <sup>(1)</sup>

1. Centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC-CD6), Rambla Sant Nebridi 10, E08222, Terrassa, Spain
2. Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), E08193, Cerdanyola del Vallès, Spain

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

### RESUMEN:

La polarización de la luz reflejada en un objeto aporta información sobre su índice de refracción, su rugosidad, y también de su forma. Así, esta propiedad de la luz puede ser útil en visión artificial para recuperar la forma 3D de un objeto empleando iluminación pasiva y una cámara polarimétrica. En esta comunicación, proponemos una técnica basada en la reconstrucción de superficie utilizando una única perspectiva aprovechando la capacidad de medir los parámetros lineales de Stokes recurriendo a una cámara polarimétrica de división de focal. Los resultados presentados son asimismo comparados con el estado de arte actual demostrando la mejora en el cálculo de los ángulos de las normales de la superficie implementando los parámetros lineales de Stokes.

**Palabras clave** Imagen polarimétrica, polarización, polarimetría, parámetros de Stokes, recuperación forma 3D, metrología óptica

### ABSTRACT:

Polarization of light reflected off an object provides information about its refractive index, its roughness and also form its shape. Thus, this property of light is of interest in computer vision in order to recover the 3D shape of an object by using passive illumination and a polarimetric imager. In this communication, we propose a technique based in a single view to obtain a surface reconstruction taking advantage of the capability of measuring the partial linear Stokes vector employing a division of focal plane linear-polarization camera. Results are presented and compared with current state-of-the-art showing an improvement in the calculation of the surface normal angles implementing the Stokes linear parameters.

**Key words:** Polarimetric imaging, polarization, polarimetry, Stokes parameters, 3D shape recovering, optical metrology

## 1.- Introducción

La reconstrucción 3D de objetos es un procedimiento muy relevante en aplicaciones de visión artificial, inspección, control de calidad e incluso en animación 3D para reproducir formas y rugosidades. Existen varios métodos de recuperación de las formas de las superficies, que se obtienen partiendo de aproximaciones tanto fotométricas como geométricas. En la

aproximación geométrica se encuentran ejemplos como la estereovisión [1], la iluminación estructurada [2], o los cálculos de profundidad basada en el desenfoque [3]. En la mayoría de casos se necesita utilizar más de un sensor y para ello se habría de aplicar una cuidadosa calibración geométrica entre ellos.

Un método no muy habitual para recuperar la rugosidad y la forma de la superficie de un objeto consiste en aprovechar la información

contenida en la polarización de la luz reflejada en el objeto [4,5]. Este enfoque permite utilizar una fuente de luz controlada pero no polarizada y de un sistema capaz de medir la señal de polarización de interés reflejada por el objeto, empleando solamente un sensor. Existen en la bibliografía varias propuestas sobre el tema, desde la recuperación de la forma 3D de objetos dieléctricos de formas diversas a la extensión de la técnica a objetos metálicos, donde el índice de refracción complejo del material requiere un tratamiento específico [6].

En este trabajo nos centraremos en la recuperación de la forma de superficies de materiales dieléctricos utilizando una cámara polarimétrica lineal. La sección 2 desarrolla el marco teórico del algoritmo para la recuperación de las normales a partir de la polarización. En la sección 3, se explicará la nueva metodología y el montaje utilizado para llevar a cabo los experimentos. A continuación, en la Sección 4 se presentarán los resultados obtenidos con la metodología presentada. Finalmente, en la sección 5 se expondrán las conclusiones generales del trabajo.

## 2.- Contexto teórico: recuperar la forma a partir de la polarización

Cuando un objeto es iluminado con luz no polarizada, una parte de esa luz es refractada y otra reflejada, siguiendo las leyes de la reflexión y la de Snell. En la componente reflejada, existe una componente que está polarizada en función del índice de refracción del material y del ángulo de iluminación, entre otros factores. En el caso de los dieléctricos, parte de la luz reflejada por el objeto queda linealmente polarizada respecto a la normal local de la superficie.

Para poder explotar esta propiedad de los dieléctricos, se ha desarrollado un marco teórico en el que se estudia cómo recuperar las normales de las superficies basándose en la medición de luz polarizada tanto en reflexión especular como en reflexión difusa [5,7]. La teoría de Fresnel se utiliza para la estimación de la forma a partir de la polarización ya que solo se requiere medir la polarización lineal de la luz sin entrar en mayores detalles del cálculo

de Mueller-Stokes. Con esta teoría, los ángulos de azimut y zénit (dentro del sistema de coordenadas polares) pueden ser calculados a partir del ángulo de polarización y del grado de polarización [8].

El ángulo de polarización ( $\phi$ ) hace referencia al ángulo del polarizador en el que se obtiene máxima transmisión. El grado de polarización ( $\rho$ ) indica la proporción del campo electromagnético que está polarizado en el haz detectado. Para poder calcular estos parámetros, es necesario realizar al menos tres medidas de polarización lineal, por ejemplo, con un polarizador orientado en los ángulos  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ . Las ecuaciones para ambos parámetros a partir de las medidas de intensidad en los ángulos descritos son [4], para el ángulo de polarización:

$$\phi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{I_0 + I_{90} - 2I_{45}}{I_{90} - I_0}\right) + 90^\circ \quad (1)$$

$$\text{if } I_{90} < I_0 \begin{cases} \text{if } I_{45} < I_0 & \phi = \phi + 90^\circ \\ \text{else} & \phi = \phi - 90^\circ \end{cases}$$

y para el grado de polarización:

$$\rho = \frac{I_{90} - I_0}{(I_{90} + I_0) \cos 2\phi} \quad (2)$$

En general, estos experimentos se centran en medir la reflexión difusa de materiales dieléctricos con superficies relativamente suaves. La componente de luz difusa polarizada proviene de la parte de la luz incidente absorbida por el medio, que sufre refracción y sale del medio parcialmente polarizada debido a la dispersión. Los ángulos de la normal se pueden calcular a partir de la polarización de la componente difusa. La normal se representa utilizando coordenadas esféricas, definidas a su vez por un azimut  $\alpha$  y un zenit  $\theta$ . El ángulo del azimut ( $\alpha$ ) es el ángulo de proyección de la normal de la superficie en el plano imagen relativo al eje X, mientras que el ángulo zenit ( $\theta$ ) se corresponde con el ángulo entre la normal de la superficie y la dirección de detección (z). Los rangos de los ángulos de las coordenadas son:  $\alpha \in [-90^\circ, 90^\circ]$  y  $\theta \in [0, 90^\circ]$ .

El ángulo  $\alpha$  es equivalente al ángulo de polarización  $\phi$ . Debido a que un polarizador lineal no puede distinguir entre dos estados que difieren  $180^\circ$ , para toda solución encontraremos dos posibles candidatos  $\alpha_1 = \phi - 90^\circ$  y  $\alpha_2 = \phi + 90^\circ$  [9].

Respecto del grado de polarización, partiendo de las ecuaciones de Fresnel, se puede derivar la expresión del grado de polarización de la componente difusa ( $\rho_d$ ) en función del índice de refracción ( $n$ ), y del ángulo zenit de la normal a la superficie ( $\theta$ ) [9]:

$$\rho_d(n, \theta) = \frac{(n - \frac{1}{n})^2 \sin^2 \theta}{2 + 2n^2 - (n + \frac{1}{n})^2 \sin^2 \theta + 4 \cos \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \quad (3)$$

Aquí aparece una segunda ambigüedad en el cálculo, ya que existen dos posibles soluciones del ángulo zenit a partir de  $\rho_d$ , que se obtiene a partir de las intensidades obtenidas a distintas orientaciones de los polarizadores.

### 3.- Procedimiento experimental

En esta sección se presentará se describirá el montaje utilizado y la metodología seguida para realizar los experimentos.

#### 3.1.- Montaje experimental

El montaje utilizado en los experimentos es de gran sencillez, ya que consiste en una fuente de luz blanca colocada en geometría coplanar y al lado del detector de polarización para tener el mismo campo de visión y de iluminación, como se puede ver en la Fig.1. El detector utilizado es una cámara polarimétrica de división de plano focal (PHX050S-PC, Lucid Vision Labs) con un objetivo de focal fija de 25mm (EO #56-789).

El sensor de la cámara está formado por una matriz de micropolarizadores colocados encima de los píxeles. Los ejes ópticos de los micropolarizadores están orientados en cuatro ángulos distintos. La agrupación de cuatro micropolarizadores con los ángulos en  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$  forman un macropíxel. Así, una única cámara permite obtener de manera simultánea cuatro imágenes de intensidad correspondientes a cuatro orientaciones distintas de un polarizador lineal. De esta forma, podemos adquirir los ángulos de polarización y el grado de polarización con

una sola adquisición, reduciendo el tiempo de medida y utilizando una única cámara.

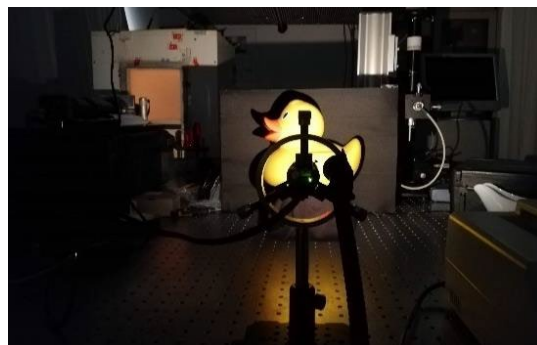


Fig. 1: Foto del montaje del sistema. En él la iluminación y la detección están en el mismo plano.

Las imágenes de intensidad se adquirieron utilizando el software del proveedor de la cámara. El tiempo de exposición es fijo para todo el experimento. Como la cámara permite ajustar el rango dinámico de las imágenes hasta 8 bits, se escoge trabajar con el máximo posible. El procesado de las imágenes lo realizamos con MATLAB 2017b.

#### 3.2.- Metodología

La metodología utilizada para recuperar las normales locales del objeto se divide en tres pasos sucesivos: calibrar las intensidades adquiridas por la cámara, calcular  $\phi$  y  $\rho$  a partir de las imágenes ya calibradas, y, por último, calcular los ángulos de las normales locales.

La calibración de la cámara persigue calibrar radiométricamente el sensor para asegurar que los cuatro canales de medida, correspondientes a las cuatro orientaciones de los micropolarizadores, tienen las mismas características en cuanto a rango dinámico de intensidades y la respuesta de los píxeles. Para ello, primero realizamos una corrección de campo oscuro con 100 adquisiciones de la cámara en negro, para así poder sustraer la señal de fondo debida al ruido electrónico del propio sensor. A continuación, realizamos una corrección de campo plano con 100 adquisiciones iluminando la cámara con la luz uniforme de una esfera integradora. Con ello se consigue corregir la imagen de los defectos introducidos por variaciones en la sensibilidad píxel a píxel del CCD. Por último, aprovechando esta última

medida aplicamos un peso en cada canal para poder nivelar las intensidades entre los canales debido a las posibles no idealidades en el parámetro de transmisión de los micropolarizadores de distinta orientación.

Una vez realizada la calibración del sensor, se calculan los parámetros polarimétricos  $\phi$  y  $\rho$  píxel a píxel, obteniendo un mapa de sus respectivos valores. Debido a que la cámara polarimétrica tiene la capacidad de adquirir cuatro imágenes a distintas intensidades simultáneamente, empleamos estas cuatro medidas en lugar de tres, mejorando el procedimiento habitual en el estado del arte.

A continuación, se calcula el ángulo zenit resolviendo la ecuación (1) píxel a píxel partiendo de una estimación del índice de refracción para cada objeto y utilizando el mapa de  $\rho$  calculado anteriormente. La premisa para poder escoger la raíz conveniente es que el ángulo zenit debe estar dentro del rango de  $[-90^\circ, 90^\circ]$ .

Para poder calcular de manera fiable el ángulo zenit, hemos de resolver la ambigüedad del ángulo azimut. Para ello, procedemos a segmentar la imagen en cuatro cuadrantes y definir unas condiciones para el ángulo azimut.

Por último, a partir de los resultados del mapa azimut y del zenit, se puede obtener un mapa de vectores donde se representan los vectores normales a la superficie introduciendo los ángulos en el sistema de coordenadas polar.

#### 4.- Resultados

En esta sección presentamos los resultados preliminares de la recuperación de la forma 3D de dos objetos de interés.

En primer lugar, tenemos una esfera de EPS con una superficie relativamente rugosa, que nos es útil para testear la capacidad del algoritmo.

En la Fig.2 (a) podemos ver los mapas de intensidad que se podría medir con una cámara convencional, y en la Fig. 2(b) el mapa del grado de polarización obtenido utilizando la ecuación (2). En ellos podemos ver las diferencias relacionadas con la capacidad de los

dieléctricos de producir luz parcialmente polarizada. En el centro de la esfera tenemos valores mínimos de  $\rho$ , que va aumentando en los polos de la esfera.

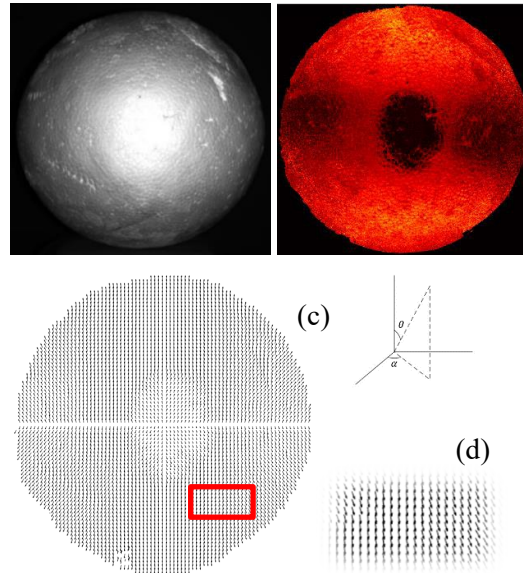


Fig. 2: Mapa de intensidad (a), mapa de grado de polarización (b). Mapa vectorial de las normales de la esfera (c). Ampliación del mapa vectorial en la zona señalada (d).

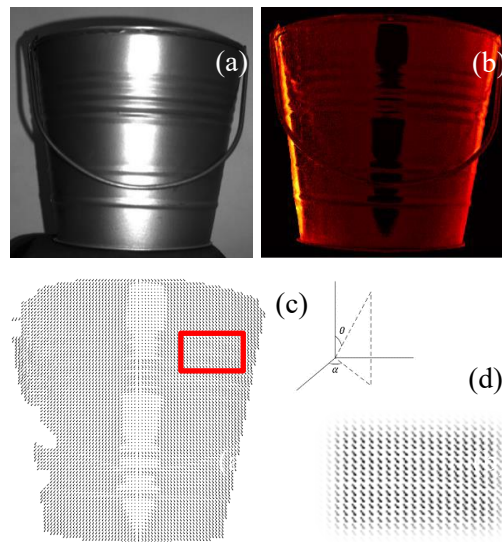


Fig. 3: Mapa de intensidad (a), mapa de grado de polarización (b). Mapa vectorial de las normales del cubo metálico (c). Ampliación del mapa vectorial en la zona señalada (d).

Una vez aplicado el algoritmo descrito en ecuación (3), podemos recuperar el azimut y el zenit de la normal local y con él mapa vectorial de la esfera, como se muestra en la Fig.2 (c-d).

Como segundo objeto de prueba, escogemos un cubo de metal para ver cuáles eran los resultados al introducir un material diferente. En la Fig. 3 puede apreciarse cómo el método propuesto permite calcular la intensidad y el grado de polarización también en este objeto metálico.

## 5.- Conclusiones

El método propuesto para estimar la forma de los objetos ha arrojado buenos resultados. Se ha conseguido recuperar la forma de objetos de diferentes rugosidades y de distintas simetrías, todo ello obtenido con una cámara polarimétrica comercial como sensor. El método propuesto emplea un montaje sencillo que consta de una iluminación y de una cámara polarimétrica.

Una de las dificultades más importantes es su restricción a las condiciones de iluminación. Esto indica la dirección de los trabajos futuros a realizar: por un lado, la optimización y pruebas relativas a diferentes condiciones de iluminación, y por otro la mejora de los algoritmos de cálculo para determinar la normal local en superficies más complejas y bajo luz natural. Asimismo, también queda como futuro desarrollo el estudio de aplicar el algoritmo en superficies especulares.

*Agradecimientos:* Este trabajo ha sido realizado con el soporte de la Secretaria d'Universitats i Recerca de la Generalitat de Catalunya y del Fondo Social Europeo, en el margen de la beca FI con núm. de expediente 2020FI\_B2 00068. Los autores agradecemos también el soporte del Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto FIS2017-89850-R

## Referencias

- [1] H. KIEU, T. PAN, Z. WANG *et al.*, "Accurate 3D shape measurement of multiple separate objects with stereo vision", *Measurement Science and Technology*, 25, 2014.
- [2] S. NAYAR, A. SANDERSON, L. WEISS, D. SIMON, "Specular surface inspection using structured highlight and Gaussian images," *IEEE Trans. Rob. Autom.* 6, 208–218, 1990.
- [3] A. S. MALIK, T. CHOI, "A novel algorithm for estimation of depth map using image focus for 3D shape recovery in the presence of noise", *Pattern Recognition*, 41, 2200-2225, 2008.
- [4] G. ATKINSON, E. HANCOCK, "Shape from diffuse polarization", *Proceeding of the British Machine Vision Conference*, 2004.
- [5] S. RAHMANN, N. CANTERAKIS, "Reconstruction of specular surfaces using polarization imaging," *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, I-149, 2001.
- [6] O. MOREL, F. MERIAUDEAU, C. STOLZ *et al.*, "Polarization imaging applied to 3D reconstruction of specular metallic surfaces", *Machine Vision Applications in Industrial Inspection XIII*, 5679, 178-186, 2005.
- [7] A. KADAMBI, V. TAAMAZYAN, *et al.*, "Depth sensing using geometrically constrained polarization models", *International Journal of Computer Vision*, 125,34-51, 2017.
- [8] L. ZHANG, E., R. HANCOCK: "Robust Estimation of Shape and Polarisation using Blind Source Separation", *Pattern Recognition Letters*, 2013.
- [9] G. A. ATKINSON and E. R. HANCOCK. "Recovery of surface orientation from diffuse polarization". *IEEE Trans. Image Process.*, 15, 1653–1664, 2006.

**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 [optoel2021@unizar.es](mailto:optoel2021@unizar.es)).

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