

Optimización de algoritmos de visión artificial para encontrar los esfuerzos con el método de fotoelasticidad

Optimization of computer vision algorithms for finding stresses with the photoelasticity method

Daniel Hoyos Gonzalez
Facultad de Minas.
Universidad Nacional de Colombia
Medellin, Colombia
dhoyosg@unal.edu.co

Santiago Gonzalez Quiroz
Facultad de Minas.
Universidad Nacional de Colombia
Medellin, Colombia
sangonzalezqui@unal.edu.co

Silvia Camila Melo Reina
Facultad de Ciencias.
Universidad Nacional de Colombia
Medellin, Colombia
scmelor@unal.edu.co

Daniela Moreno Escobar
Facultad de Minas.
Universidad Nacional de Colombia
Medellin, Colombia
danmorenoesc@unal.edu.co

Resumen—This document explains the techniques of photoelasticity that are used at the moment and their importance in the industry, to then show that the technique can be improved by means of digital images and computational processing, showing the different methods of code optimization so that Digital photoelasticity is as efficient as possible in real time.

Index Terms—photoelasticity, stress, pixel.

I. INTRODUCCIÓN

Productos plásticos formados por procesos como lo son la inyección, termoformado, moldeo por soplado, extruido, etc., presentan esfuerzos residuales causados por el enfriado y conformado de los polímeros fundidos.

La distribución de esfuerzos determina en gran parte la resistencia del producto, y por lo tanto la calidad del producto terminado, pudiendo llevar a fracturas, deformaciones y cambios de las propiedades ópticas y térmicas. Aunque a simple vista no se puedan observar los esfuerzos que se tienen dentro de una pieza, existen diferentes métodos para cuantificarlos y poder realizar un control de calidad en tiempo real al proceso.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

La industria del plástico fabrica anualmente más de 300 millones de toneladas de productos, la mayoría de ellos para ser usados en los sectores de empaques, construcción y automotriz. [1]

Debido a la misma naturaleza de procesos de manufactura como inyección, extrusión, termoformado y moldeo por soplado, en los que el polímero fundido se enfría a diferentes

tasas y se le da forma, se obtienen en las piezas esfuerzos residuales. [2]

Algunas veces estos esfuerzos son deseables y permiten diseñar piezas con características interesantes como lo es por ejemplo aumentar la resistencia a tracción de un material frágil cuando este tiene un esfuerzo residual de compresión. Sin embargo, variables como la temperatura ambiente, la temperatura del molde, la tasa de llenado, etc., pueden causar que las piezas tengan esfuerzos residuales imprevistos que afectarán de gran manera la calidad del producto terminado, cambiando la resistencia al impacto, la estabilidad dimensional, así como las propiedades ópticas y térmicas del producto. [3]

El National Physical Laboratory del Reino Unido estima que los costos de fallas asociadas a rajadura por esfuerzos residuales superan los 100 millones de libras, representando el 30 % de los modos de falla de productos plásticos para aquel país. [4] Debido al alto volumen de producción que existe en la industria del plástico, es necesario implementar un método en el que se puedan analizar los esfuerzos de cada producto fabricado en tiempo real, para de esta manera poderle asegurar al cliente los estándares de calidad prometidos.

II-A. Métodos para la medición experimental del esfuerzo

Existen diferentes métodos para la medición experimental de esfuerzos. Clasificados de acuerdo a la cantidad de material que debe ser removido para hacer el análisis (destrutivo, y no destructivo), la profundidad desde la superficie hasta donde el método entrega resultados y la escala de medición

(macroscópica y microscópica).

A continuación, se presentarán algunos métodos existentes y sus aplicaciones:

- **Galgas extensiométricas:** Son sensores cuya resistencia eléctrica varía de acuerdo a la fuerza que se les aplica. Son usadas para medir deformación en objetos. Para poder hacer esto, es necesario primero adherirlas a él para que ambos pasen por las mismas deformaciones, lo que dificultaría el análisis en tiempo real en una línea de producción.

Este tipo de instrumento permite encontrar los esfuerzos en uno de los ejes de esfuerzo principales sobre el punto en el que está ubicado, por lo que si se quiere saber el estado de esfuerzos del punto es necesario usar un arreglo de galgas llamado roseta. [5]

Un método basado en galgas extensiométricas y que se usa frecuentemente para medición de esfuerzos residuales en metales es el del taladro, en el que se liberan las tensiones en un punto al hacer un agujero pequeño en él. Usando las galgas se mide en el la deformación. Debido al calentamiento que causa el taladrado, se obtienen errores en la medición ya que la resistencia eléctrica de un material varía también con la temperatura.

- **Método de la curvatura:** Para piezas planas es posible calcular el desplazamiento a partir de la medición de la curvatura que se obtiene después de remover capas delgadas de su superficie gracias a que las fuerzas internas buscan equilibrio.

La remoción del material se hace por medio de químicos o por maquinado electroquímico. Consume mucho tiempo y es un método destructivo. [6]

Es un método muy preciso, pero su aplicación está limitada a piezas de geometría muy simples.

- **Difracción de rayos x:** Es un método no destructivo en el que por medio de los patrones de difracción de rayos x se mide la distancia entre los planos cristalográficos del material, valor que aumenta a medida que aumentan los esfuerzos internos.

Es un método de alta precisión que permite obtener el estado de esfuerzo en la superficie de toda la pieza si se realizan múltiples mediciones sobre ellas. En el caso en el que se requiera conocer el estado de esfuerzos por debajo de la superficie es necesario remover capas de material.

Es una técnica que usa equipos costosos y que requiere de un ambiente de laboratorio para realizar mediciones confiables. [7]

- **Ultrasonido:** Se basan en la relación entre el cambio que ocurre en la velocidad de una onda ultrasónica y el estado de esfuerzos residuales. Se puede usar esta

técnica en diversos materiales, sólo es necesario conocer su constante de proporcionalidad entre el esfuerzo y el cambio de velocidad.

Además del método clásico de ultrasonido en el que se deben conectar un transmisor y dos receptores a la pieza, existe un método en el que la onda es generada por láser y no requiere contacto con la pieza. Estos métodos permiten encontrar el promedio de la magnitud del esfuerzo en la pieza pero no dan una idea de qué está ocurriendo en cada punto, es por esto que su uso se recomienda para casos en los que el campo de esfuerzo sea uniforme. [8]

- **Patrón de Muaré:** Es un fenómeno óptico que ocurre cuando dos grupos de líneas paralelas se superponen. El patrón formado cambia si la posición o el ángulo entre las líneas varía.

Para el uso del patrón de Muaré, se proyecta un grupo de líneas sobre un objeto a analizar (que tenga otro patrón pintado/adherido) y se compara el patrón resultante con el original de la pieza para encontrar el retardo en la fase y por consiguiente, el desplazamiento.

Este método permite observar de forma no destructiva los desplazamientos que ocurren en cada punto en vez de tener el esfuerzo para uno en específico o tener el promedio en el cuerpo, como sucedía en los anteriores. Se puede usar para análisis de gran tamaño y diversos materiales, tales como encontrar el esfuerzo en puentes u otras estructuras siempre que lo que se vaya a analizar tenga el patrón en su superficie. [9]

- **Fotoelasticidad:** La fotoelasticidad digital es una técnica experimental para obtener imágenes de esfuerzos en cuerpos birrefringentes sometidos a cargas mecánicas. Adquiere la información de los esfuerzos mediante el procesamiento de patrones de franjas de color. Sin embargo, el precio de los elementos ópticos, su compleja configuración y su precisión han hecho que las nuevas tendencias en fotoelasticidad validen sus resultados mediante la introducción de imágenes sintéticas generadas computacionalmente. []

Este trabajo de visión artificial se centrará en esta última técnica, debido a que es un método no destructivo de alta precisión que permite ver el estado de esfuerzos en toda la pieza, siempre que su material sea birrefringente, lo que cumplen la mayoría de los polímeros después de pasar por un proceso de manufactura.

Un inconveniente actual de la fotoelasticidad en aplicaciones de control de calidad es la gran cantidad de tiempo que toma asociar los colores en cada píxel con un nivel de esfuerzo. Como objetivos de este trabajo se tendrán el realizar la relación entre colores y esfuerzos para una imagen de fotoelasticidad y optimizar este código de modo

que se aproxime más a un proceso de medición en tiempo real.

Para realizar este estudio se hará uso de imágenes generadas por el magíster Juan Carlos Briñez que modelan discos bajo las mismas condiciones de esfuerzo pero con diferentes fuentes de luz y sus respectivas Look Up Table (LUT).

III. FOTOELASTICIDAD

Este fenómeno envuelve los principales mapas de tensión a través de patrones de colores. En este proceso, se tiene en cuenta el efecto de los principales parámetros que influyen en las formaciones de imagen, como la fuente de luz, el ensamble de polarización, el modelo de tensión y la respuesta espectral del sensor de la cámara [10]. Este proceso requiere de un ajuste previo en el sensor de la cámara como balance de blancos, corrección de gamma, generación de color entre otros.

El proceso de adquisición de color también se realiza con filtros Bayer y se estudian algoritmos de demostración en imágenes de fotoelasticidad sintética con cámaras digitales que usan tres sensores separados para captar el color. La necesidad de mejorar las validaciones virtuales en los estudios de fotoelasticidad, estudia el efecto que los filtros de color y los algoritmos de demostración de Bayer presentan en el proceso de adquisición. Pero cada algoritmo de demostración introduce diferentes errores, en estos casos, cada imagen evidencia problemas para simular la información correcta en zonas de concentraciones de estrés. [11]

IV. ESTADO DEL ARTE

IV-A. Medición de esfuerzos a partir de foto elasticidad

Las técnicas convencionales utilizan la carga de flexión de cuatro puntos. Una de las configuraciones se compone de un accesorio de flexión, que puede tomar un modelo fotoelástico en forma de C. La carga se puede aplicar al extremo libre del modelo. La carga genera patrones de distribución uniforme de la tensión a lo largo de la pieza y la distribución lineal de tensiones, como se puede ver en la siguiente imagen. [12]

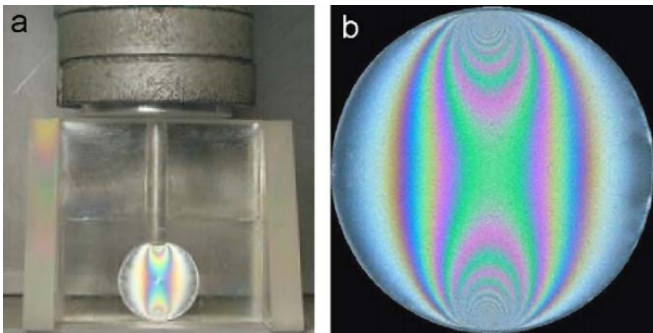


Figura 1: a) Configuración experimental de carga. b) Esfuerzos en el disco.

La configuración óptica utilizada en un experimento consta de una cámara digital con alta resolución de imagen (CCD),

una fuente de luz y un plano polariscopio utilizando un polarizador lineal [13]. Una vez que se ajustan la cámara, la luz y el modelo, la carga se aplica al modelo para inducir un orden de franja conocido, contra el color de la franja.

Esta configuración de franjas está disponible a partir de las características de color isocromáticas estándar [14]. La imagen RGB de los patrones generados se almacena y se extrae un LUT para análisis. El LUT se filtra utilizando un "filtro de mediana" para eliminar ruido electrónico y para suavizar la imagen, ya que el CCD es altamente sensible a los cambios de intensidad.

El primer pixel corresponde a los órdenes de franja cero y las órdenes de franja sucesivas se calculan por escala lineal. Este procedimiento se repite para más líneas transversales (eso depende del experimento), los resultados promediados se guardan en una base de datos de calibración (esto ayuda a eliminar el ruido y a hacer una buena tabla de calibración). Los pasos anteriores se repiten con diferentes valores de orden de franja máximo (N) y cambiando la carga de flexión. Este es el procedimiento básico de recolección de tensión.

Teniendo en cuenta el menor número de arreglos ópticos y que la disposición óptica influye en el procesamiento de lo experimental, se propuso un método que relaciona la intensidad registrada, con la tensión de la pieza. Método de compensación que utiliza imágenes de desplazamiento de fase para la evaluación de parámetros isocromáticos que se encuentran en un contorno isoclínico particular. [15]

$$\delta_c = \tan^{-1} \left[\frac{(I_5 - I_3) \sin 2\theta_c + (I_4 - I_6) \cos 2\theta_c}{(I_1 - I_2)} \right]$$

$$= \tan^{-1} \left(\frac{I_a \sin \delta}{I_a \cos \delta} \right)$$

Figura 2: Ecuación que relaciona la intensidad registrada con tensión de la pieza a estudiar.

IV-B. Métricas de similitud

Una métrica de similitud es una función matemática que asocia un valor numérico entre un par de descriptores. Tal valor numérico es conocido con el nombre de distancia.

En este proceso, se usaron 4 tipos de métricas de similitud, los cuales son: correlación entre imágenes, distancia euclidiana para histogramas, correlación entre histogramas y la distancia de Bhattacharyya para histogramas.

Correlación entre imágenes Este cálculo indica la dependencia lineal entre una imagen y otra. El coeficiente de correlación es un valor que oscila entre -1 y 1, el valor 0 representa que no existe dependencia lineal entre ambas imágenes. [16]

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A}) (B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2) (\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2)}}$$

Figura 3: Fórmula de correlación entre imágenes. [16]

Distancia euclidiana para histogramas Se utiliza para comparar los histogramas de las imágenes desde cada canal de color RGB.

$$L = \sqrt{\sum_m^M (H_m A - H_m B)^2}$$

Figura 4: Fórmula de distancia euclidiana para histogramas. [16]

Correlación entre histogramas Al igual que la correlación imágenes, se busca demostrar la dependencia lineal respecto a los histogramas de color de las imágenes.

$$r = \frac{\sum_I (H_1(I) - \bar{H}_1) (H_2(I) - \bar{H}_2)}{\sqrt{(\sum_I (H_1(I) - \bar{H}_1)^2) (\sum_I (H_2(I) - \bar{H}_2)^2)}}$$

Figura 5: Fórmula de correlación entre histogramas. [16]

Distancia de Bhattacharyya para histogramas Usado para evaluar la similitud que existe entre dos distribuciones dadas. El valor 1 tiene como representación la distancia más lejana entre la distribución de los histogramas de las imágenes, el valor 0 representa por el contrario la distancia más próxima entre la distribución de los histogramas.

$$d = \sqrt{1 - \frac{1}{\sqrt{\bar{H}_1 \bar{H}_2 N^2} \sum_I \sqrt{H_1(I) H_2(I)}}$$

Figura 6: Formula distancia de Bhattacharyya. [16]

V. PROPUESTAS DE SOLUCIÓN

La primer propuesta de solución que se plantea en el proyecto es el código estándar para iterar y comparar mediante distancia euclidiana. Como primer paso, se leen las imágenes del experimento y su correspondiente LUT, con la librería OpenCv de python. Luego generamos una matriz de 512x512

para almacenar en ella los valores después de calcular la distancia euclidiana.

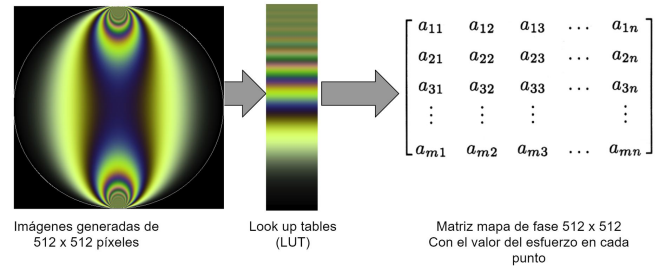


Figura 7: Procedimiento buscado por el algoritmo

Recorremos la imagen del experimento píxel por píxel, para hacer este proceso, creamos dos ciclos for, uno externo que recorre fila por fila la matriz de la imagen experimental. En el for interno, recorremos elemento por elemento la columna. Recordemos que en python, una matriz es una lista de listas, por lo que se debe recorrer primero la lista y luego los elementos de ella.

En este mismo ciclo interno, tenemos las coordenadas del píxel de la imagen experimental. Luego se define otro ciclo for que recorrerá la look up table, píxel a píxel asociada a la imagen experimental realizando la distancia euclidiana entre ambos pixeles, luego compara cual es el menor valor del píxel al realizar el calculo anterior y lo almacena.

Al final, el menor valor es almacenado en una matriz de 512x512 y es mostrado mediante el comando plt.imshow().

El código realizado es el siguiente:

Listing 1: Código Python 3

```
import cv2
import numpy as np
from scipy.spatial import distance
%matplotlib inline
from matplotlib import pyplot as plt

img = cv2.imread("res/Img_TFP_1.bmp")
img_lut = cv2.imread("res/LUT_1.bmp")
img_esfuerzos = np.zeros((512,512)) #,order=3)

for i in range(512):
    for j in range(512):
        val = img[i,j]
        minima_distancia = None
        posicion = None
        for k in range(400):
            distancia = distance.euclidean(val, img_lut[0,k])
            if (minima_distancia == None or distancia
                <= minima_distancia):
                minima_distancia = distancia
```

```

    posicion = k
    print(img_esfuerzos[i,j], img_lut[0, posicion])
    img_esfuerzos[i,j] = img_lut[0, posicion][0]
plt.imshow(img_esfuerzos)

```

VI. CONCLUSIONES

- La fotoelasticidad es una alternativa atractiva para el control de calidad en la industria del plástico, debido a que es una técnica no destructiva, que da una idea del estado de esfuerzos en toda la pieza y que no requiere de un espacio de laboratorio especializado para realizarlo. Aunque para poder implementarla es necesario disminuir el tiempo que tarda encontrar los esfuerzos en cada producto (o imagen) para poder realizar el control de calidad en tiempo real.
- El algoritmo implementado tarda bastante tiempo en completar el proceso por cada imagen, por lo que se debe analizar mediante varias técnicas, ya sean matemáticas o computacionales, como reducir este tiempo.

REFERENCIAS

- [1] E. Beckman, "The world of plastics, in numbers," 2018. [Online]. Available: <http://theconversation.com/the-world-of-plastics-in-numbers-100291>
- [2] P. Technology, "Stress: Diagnose it before it ruins your parts," 2005. [Online]. Available: <https://www.ptonline.com/articles/stress-diagnose-it-before-it-ruins-your-parts>
- [3] E. Foltz, "Accounting for residual stress in injection molded parts," 2018. [Online]. Available: <https://www.madisongroup.com/publications/TMGNewsMarch2018.pdf>
- [4] T. Maxwell, "Residual stress in plastics." [Online]. Available: http://resource.npl.co.uk/materials/polyproc/iag/march2003/residual_stress.pdf
- [5] *Mecanica de materiales*. Pearson Educacion de Mexico S.A. de C.V. k] author=Hibbeler, R. C., year=2011, pages=504.
- [6] B. Ekmekci and N. Ekmekci, *Residual Stresses Measurement with Layer Removal Method*. 1st Cappadocia International Mechanical Engineering Symposium, 2004. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/228533123_Residual_Stresses_Measurement_with_Layer_Removal_Method
- [7] P. S. Prevéy, "X-ray diffraction residual stress techniques." [Online]. Available: <https://www.lambdatechs.com/wp-content/uploads/200.pdf>
- [8] R. Sanderson and Y. Shen, "Measurement of residual stress using laser-generated ultrasound," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 87, no. 12, pp. 762–765, 2010.
- [9] S. Ri, M. Fujigaki, and Y. Morimoto, "Sampling moiré method for accurate small deformation distribution measurement," *Experimental Mechanics*, vol. 50, no. 4, pp. 501–508, 2009.
- [10] T. M. Yoneyama S, "A new method for photoelastic fringe analysis from a single image using elliptically polarized white light," *Optics and Lasers in Engineering*, 1998.
- [11] A. R. M. J. W. B. Juan C. Briñez de León, Hermes A. Fandiño Toro, "Bayer and demosaicking effect for imaging the stress field in digital photoelasticity," *Imaging and Applied Optics*, 2018.
- [12] G. S. G. Venketesh N. Dubey, "Noise removal in three-fringe photoelasticity by median filtering," *Optics and Lasers in Engineering*, 2009.
- [13] O. Edmund, "Determining fast axis of quarter wave plate, edmund," *Optics*, 2004.
- [14] T. Note, "Introduction to stress analysis by the photostress method," *Vishay Measurement Groups*, 1989.
- [15] B. N. S. K Ramesh, T Kasimayan, "Digital photoelasticity – a comprehensive review," *Department of Applied Mechanics, Indian Institute of Technology, Madras, India*, 2011.
- [16] J. Briñez de León, A. Restrepo-Martinez, and F. Giraldo, "Similarity metrics applied to image analysis of photoelasticity," *DYNA*, vol. 80, pp. 42–50, 06 2013.