

NUEVOS ALGORITMOS PARA PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE SPECKLE

Eduardo Grumel^{1,2}, Leandro Buffarini², Nelly L. Cap², Héctor Rabal², Marcelo Trivi^{1,2}.

¹UID Óptimo y Cátedra de Física II, Dpto. Cs. Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 1 y 47 La Plata.

²Centro de Investigaciones Ópticas (CONICET La Plata – CIC- UNLP),
marcelot@ciop.unlp.edu.ar

1. Introducción

Los objetos rugosos iluminados por luz láser muestran una apariencia granular llamada speckle [1-2]. Si la superficie no es rígida, el patrón de speckle también cambia y da cuenta de los procesos dinámicos que tienen lugar en la superficie o en el volumen de las muestras. En consecuencia, se han encontrado varias aplicaciones de este fenómeno en medicina, biología, ingeniería, agricultura, etc. [3].

Las técnicas de speckle utilizadas para estudiar diversas situaciones experimentales requieren diferentes algoritmos de acuerdo con los problemas a resolver. En general, los algoritmos utilizados son útiles para algunas situaciones, pero no pueden aplicarse a otras [4]. Por ejemplo, cuando intentamos describir patrones de speckle estáticos o dinámicos, es muy difícil encontrar un solo algoritmo para analizar ambas situaciones.

En este artículo se presentan dos posibles soluciones al problema.

En el primer caso se propone una simple generalización del concepto de dimensión fractal [5] en imágenes, considerando la curva obtenida como una función del umbral de binarización. Esta curva se puede utilizar para describir parcialmente imágenes ordinarias, texturas, patrones de speckle estáticos y dinámicos.

En una segunda aproximación, se desarrolla un algoritmo generalizado para procesar imágenes de actividad de speckle, donde los algoritmos existentes resultan ser casos particulares. Esta propuesta se basa en un conjunto de descriptores sintonizables que utilizan una extensión de las operaciones de suma y resta con un parámetro libre que se puede elegir para optimizar los resultados. La mejor elección de la afinación se elige visualmente.

Para ambos casos, se muestran ejemplos de aplicaciones en algunos casos de interés.

2. Formalismo Box Fractal

El concepto de “dimensión fractal de caja” (Box Fractal Dimension, BFD) es útil como ayuda para caracterizar imágenes compuestas por texturas y se ha aplicado a numerosos casos en biología, medicina, geología, ingeniería, imágenes satelitales, etc. [5].

Para calcular, las imágenes BFD se binarizan y el resultado se cubre con “cajas” de diferentes tamaños. Luego, se cuenta el número de puntos en cada caja cuadrada y este número se representa en un registro log vs log como una función del tamaño de la caja. La pendiente de la línea recta mejor ajustada de esta gráfica se define como la Dimensión de conteo de cajas. Como se requiere un umbral para la binarización, las estructuras detrás y sobre el umbral no se tienen en cuenta y la información se pierde finalmente.

Para superar esta limitación, proponemos la definición de la Curva Fractal de la Caja (BFDC). Es el resultado de la medición de la dimensión de recuento de cajas de una imagen en función del umbral de binarización. La curva abarca el dominio 0-2.

En la práctica, estimamos la pendiente de la línea recta de error de mínimos cuadrados que mejor se ajusta al gráfico log-log:

$$(\log N(s) \text{ vs } \log s) \quad (1)$$

para varios valores de s , donde s es el tamaño del lado de cada caja cuadrada y $N(s)$ es el número de cajas con lados para cubrir la imagen.

El procedimiento es:

a) Una cuadrícula se superpone en una imagen binaria bidimensional de un objeto con tamaño de cuadrícula = $s \times s$.

b) Luego, $N(s)$, el número de celdas que contienen al menos un punto brillante del objeto, se cuenta y se almacena.

Las versiones donde $N(s)$ es el número de celdas que contienen exactamente 1, exactamente 2 y todos los lugares disponibles que también se pueden construir.

c) A continuación, se cambia el tamaño de la cuadrícula $s \times s$ y se repite el proceso.

d) Con los resultados obtenidos, el registro ($N(s)$) se representa frente al registro (s).

e) La línea recta de mejor ajuste se determina utilizando el método de mínimos cuadrados. Su pendiente con signo inverso es, por definición, la estimación de la dimensión fractal de la caja (BFD) para el umbral de binarización elegido U .

Cuando se comparan dos texturas diferentes, es posible que el resultado sea un valor similar para ellas debido a una elección desafortunada del umbral de binarización. Es decir, su dimensión fractal puede ser similar para un cierto valor de umbral y diferente para otros.

Aquí se propone utilizar todo el conjunto de valores de binarización para obtener una curva, la curva de dimensión fractal de caja (BFDC), que describe mejor las texturas en diferentes escalas.

Para obtener el BFDC, la imagen original se binariza con un conjunto de valores de umbral de U . El procedimiento de medición de BFD se repite en los resultados y se dibuja una curva con ellos. En este trabajo, utilizamos todos los valores posibles de U para que la información sobre las estructuras con diferentes niveles de gris se pueda conservar. Toma valores entre 0 y 2 y describe una curva que es característica de la distribución de los niveles de gris en la imagen.

Esta propuesta se puede aplicar a diferentes tipos de imágenes, incluyendo texturas, simulaciones y experimentos en patrones de speckle dinámico tanto en imágenes individuales como en un conjunto de patrones de speckle que evolucionan a lo largo del tiempo.

2.1 BFDC en imágenes de patrones de speckle [6-7].

El fenómeno de speckle aparece principalmente como un ruido granular de alto contraste con una distribución estadística casi aleatoria que degrada la calidad de la imagen [2].

En el caso de la propagación de luz libre desde el objeto hasta el detector, cada píxel de la imagen recibe contribuciones de todos los puntos del objeto. Como la irradiancia en todos los puntos de la imagen es representativa de las propiedades estadísticas del objeto difusor, entonces se puede obtener un solo BFDC como se describió anteriormente.

La Figura 1 muestra una imagen de a) un patrón de speckle y b) una imagen binaria de umbral obtenida de ella. La Figura 1c) muestra el BFDC del patrón de speckle. El BFDC es una descripción cuantitativa de cómo se distribuyen los niveles de gris y cubre el plano de la imagen.

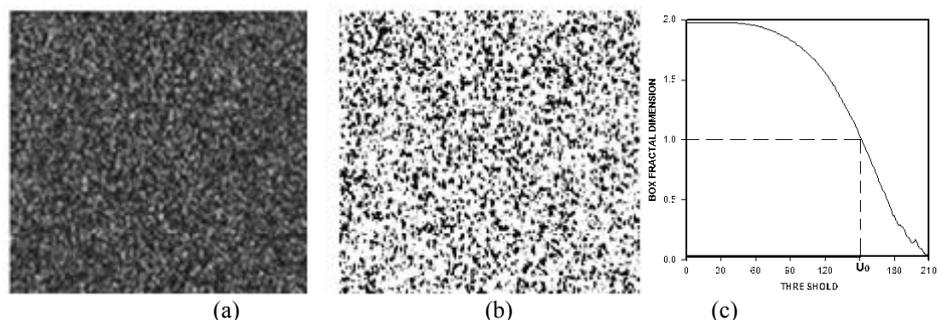


Figure 1: a) patrón de speckle, b) Imagen binarizada, c) BFDC del patrón de speckle.

Como el histograma de un patrón de speckle contiene una distribución continua de niveles de gris, la curva no muestra pasos, sino que también es una curva continua. Comienza cerca del valor 2 para umbrales bajos y luego disminuye a una tasa que depende de la rugosidad de la superficie de la muestra iluminada y termina cerca de cero para valores altos del umbral. Se observa que para valores altos del umbral, la curva muestra un comportamiento irregular. Esos valores no fueron tomados en cuenta para los cálculos en el resto de este trabajo.

2.2 Imágenes de actividad de speckle

Cuando el patrón de speckle se obtiene a través de una lente se establece una correspondencia aproximada entre cada punto en la imagen y un área restringida correspondiente del objeto. Por lo tanto, diferentes regiones de la imagen pueden representar diferentes regiones de actividad y puede ser necesario segmentar las imágenes. Hay varios métodos de procesamiento de imágenes para este fin [3-4] y han demostrado ser útiles en varias aplicaciones.

Se mostrará que el método BFD también se puede usar para segmentar imágenes de actividad comparando el historial de tiempo de cada perfil de píxel con uno de referencia en una condición conocida. Como ejemplo, aplicamos este algoritmo en el caso de una moneda pintada.

Se aplica el algoritmo BFD a una muestra con detalles topográficos ocultos. Para ello se aplica el algoritmo en un ejemplo estándar, una moneda cubierta con capas de pintura fresca en el proceso de secado [8]. La topografía de la moneda era conocida de antemano pero se suponía desconocida. En este caso, se aplicó una película uniforme de pintura a una moneda argentina de 5 centavos con detalles topográficos en relieve. Registramos un conjunto de 400 imágenes consecutivas (512×512 píxeles²) de la moneda.

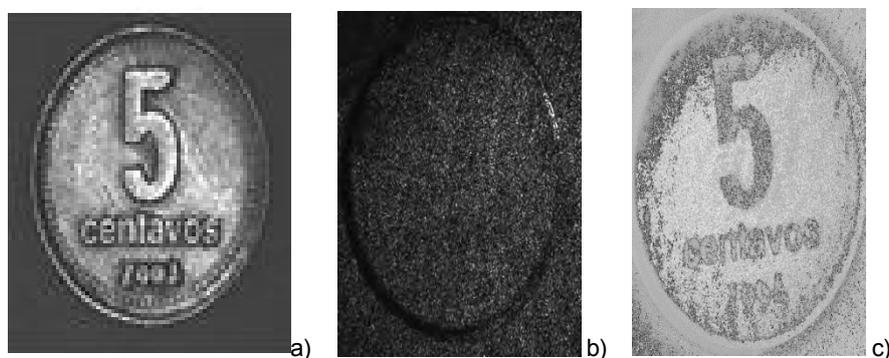


Figura 2. Imagen del BFD de una moneda pintada. a) moneda original b) moneda pintada iluminada por laser. c) moneda procesada con el método BF.

En la Figura 2 se muestra el resultado de esta operación en una moneda pintada. a) La moneda original, b) la moneda pintada iluminada por laser. La moneda aparece cubierta por un patrón de speckle y no se pueden percibir detalles de la topografía oculta. Y finalmente, en c) la imagen de la moneda procesada con el método BF, mostrando los detalles del relieve

3. Descriptor sintonizable para imágenes de speckle [9].

En esta Sección, se propone un nuevo algoritmo adaptativo para imágenes de speckle dinámico. El mismo puede sintonizarse según las aplicaciones que sean requeridas.

En las técnicas de speckle dinámico se utilizan muchas imágenes de al menos 300 x 300 píxeles cada una (0 a 255 niveles de gris). Típicamente se emplean entre 400 y 4000 imágenes. Tomaremos un caso simple de 4 imágenes consecutivas para ilustrar el algoritmo sintonizable propuesto. Llamamos a, b, c, d los valores de nivel de gris tomados por un píxel (i, j) en los primeros 4 imágenes. Definimos la función $\tau(I)$ como:

$$\tau(I) = |a - b||a - c||a - d||b - c||b - d||c - d| \quad (2)$$

En este caso, cuando dos niveles de gris tienen el mismo valor para un píxel, la función es igual a cero. Para este caso, asignamos $(a - a) = 0.1$ para evitar este inconveniente en el procesamiento de datos. Luego, se realiza una normalización de todos los valores de gris de cada píxel para limitarse entre 0.1 y 255. Con los valores de $\tau(I)$ de cada píxel, construimos la imagen resultado.

Este enfoque puede tomar fotografías no consecutivas para incluir varias escalas de tiempo. Si las imágenes son de alto contraste (imágenes binarias) es conveniente "suavizar" esta imagen. En consecuencia, consideramos una función $\tau(I)$ modificada definida por $\tau'(I)$

$$\tau'(I) = \frac{|a-b||a-c||a-d||b-c||b-d||c-d|}{|a+b||a+c||a+d||b+c||b+d||c+d|} \quad (3)$$

También probamos versiones atenuadas de $\tau'(I)$ que incluyen operaciones complejas. En este caso, proponemos una operación intermedia que da resultados entre los dos límites cambiando un solo parámetro en completa analogía a una adición compleja y la definimos como:

$$c = (a + b)_\varphi \equiv \sqrt{a^2 + b^2 + 2abc\cos\varphi} \quad (4)$$

Cuando $\varphi = 0$ el resultado coincide con el valor absoluto de la resta ordinaria de los valores reales y cuando $\varphi = \pi$ da la suma ordinaria. Para valores intermedios, el resultado cambia de forma continua entre estos valores extremos. Entonces, la función $\tau'(\varphi)$ se convierte en:

$$\tau(\varphi)_{i,j} = \sum_{a,b,c,d=1}^{N-3} \sqrt{\frac{\left(\frac{(a_{i,j}^2 + b_{i,j}^2 + 2a_{i,j}b_{i,j}\cos(\pi - \varphi))(a_{i,j}^2 + c_{i,j}^2 + 2a_{i,j}c_{i,j}\cos(\pi - \varphi))(a_{i,j}^2 + d_{i,j}^2 + 2a_{i,j}d_{i,j}\cos(\pi - \varphi))}{(a_{i,j}^2 + b_{i,j}^2 + 2a_{i,j}b_{i,j}\cos(\varphi))(a_{i,j}^2 + c_{i,j}^2 + 2a_{i,j}c_{i,j}\cos(\varphi))(c_{i,j}^2 + d_{i,j}^2 + 2c_{i,j}d_{i,j}\cos(\varphi))} \right)}{\left(\frac{(b_{i,j}^2 + c_{i,j}^2 + 2b_{i,j}c_{i,j}\cos(\varphi))(b_{i,j}^2 + d_{i,j}^2 + 2b_{i,j}d_{i,j}\cos(\varphi))(c_{i,j}^2 + d_{i,j}^2 + 2c_{i,j}d_{i,j}\cos(\varphi))}{(b_{i,j}^2 + c_{i,j}^2 + 2b_{i,j}c_{i,j}\cos(\pi - \varphi))(b_{i,j}^2 + d_{i,j}^2 + 2b_{i,j}d_{i,j}\cos(\pi - \varphi))(c_{i,j}^2 + d_{i,j}^2 + 2c_{i,j}d_{i,j}\cos(\pi - \varphi))} \right)}}$$

3.1 Descriptor sintonizable: Resultados

El algoritmo propuesto ha sido probado para el estudio biológico mediante la técnica de speckle dinámico: una semilla de maíz en proceso de germinación.

La semilla de maíz presenta dos regiones principales diferentes: el endosperma y el embrión. Las mismas tienen distinta actividad biológica, donde el embrión es la parte más activa y el endosperma, que es la fuente de alimento del embrión, presenta menor actividad. En este caso, un láser de He-Ne expandido de baja potencia (5 mW) iluminó la muestra de maíz y sus imágenes sucesivas fueron registradas por una cámara CCD, digitalizadas y almacenadas.

Los resultados se muestran en la Figura 3. Se observa claramente el embrión y el endosperma en una semilla de maíz procesada con el método ajustable para diferentes valores de ángulo φ . Ambas presentan cambio de contraste y detalles de la estructura interna que están más resaltados en una u otra imagen. Estos resultados constituyen una herramienta útil para el estudio de viabilidad de semillas y cálculo de proporciones de diferentes tejidos vegetales.

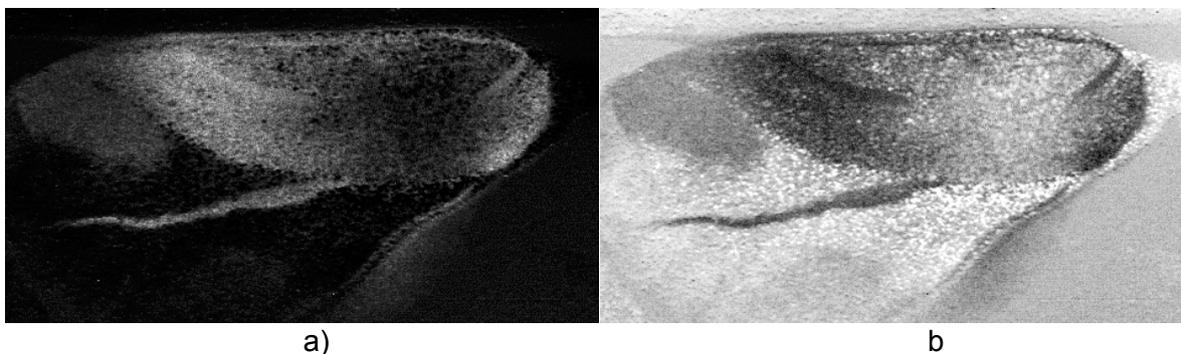


Figura 3: Función de adición compleja con a) $\varphi=50^\circ$ y b) $\varphi=120^\circ$

4. Conclusiones

En este trabajo se han presentado dos algoritmos alternativos para el procesamiento de imágenes de diagramas de speckle, que puedan ser utilizados en varias aplicaciones.

Se ha desarrollado un algoritmo que utiliza el formalismo de la dimensión fractal como descriptor. El mismo ha sido probado a través de simulaciones, experimentos controlados y diversas aplicaciones industriales y biológicas, que muestra su utilidad potencial. En particular, a modo de ejemplo, en este trabajo se presentan resultados para un patrón de speckle rígido en propagación libre y en imágenes de speckle para detección de información oculta.

Se continúa trabajando para perfeccionar la metodología de investigación y en estudios comparativos con otras técnicas.

Asimismo, se propuso un nuevo algoritmo sintonizable para la caracterización de la actividad en imágenes de speckle procesando muchas imágenes. El mismo puede ajustarse para obtener resultados casi binarios y en distribuciones de nivel de gris más continuas cambiando un parámetro en lo que resulta ser una operación que generaliza la suma y la resta. Se han desarrollado experimentos para probar la validez del método y se han obtenido buenos resultados. Actualmente se están probando nuevas variantes de la función τ para refinar los resultados y buscar nuevas aplicaciones para este algoritmo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con subsidios para Proyectos de la Facultad de Ingeniería UNLP, CONICET y CICIPBA

Referencias

- [1] J. C. Dainty (Ed.), "Laser Speckle and Related Phenomena", Springer Verlag, Berlin-New York, (1975).
- [2] J. W. Goodman, "Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications", Roberts & Company, Englewood, CO, (2007).
- [3] H. Rabal, R. Braga Eds., "Dynamic Laser Speckle and Applications", CRS Press, Taylor and Francis, Boca Raton, FL, (2009).
- [4] A. L. Dai Pra, L. I. Passoni, G. H. Sendra, M. Trivi, H. J. Rabal, "Signal Feature Extraction Using Granular Computing. Comparative Analysis with Frequency and Time Descriptors Applied to Dynamic Laser Speckle Patterns", International Journal of Computational Intelligence Systems, 8, Suppl 2, 28-40, (2015).
- [5] B. B. Mandelbrot, "The Fractal Geometry of Nature", W. H. Freeman and Co, (1982).
- [6] H. J. Rabal, E. E. Grumel, L. Cap, L. Buffarini, M. Trivi. "Box Fractal dimension in speckle images". Optical Methods for Inspection, Characterization, and Imaging of Biomaterials III, edited by P. Ferraro, S. Grilli, M. Ritsch-Marte, C. K. Hitzenberger, Proc. SPIE Vol. 10333, 103331H, (2017).
- [7] H. Rabal, E. Grumel, N. Cap, L. Buffarini, M. Trivi. "A descriptor of speckle textures using box fractal dimension curve". Optics and Lasers in Engineering, 106, 47-55, (2018).
- [8] P.A. Faccia, O.R. Pardini, J.I. Amalvy, N. Cap, E.E. Grumel, R. Arizaga, M. Trivi. "Differentiation of the drying time of paints by dynamic speckle interferometry Progress in Organic Coating. 64, 350-355, (2009).
- [9] L. Buffarini, H. J. Rabal, N. L. Cap, E.E. Grumel, M. Trivi. "Tunable descriptors for dynamic speckle images", 2nd. Global Summit & Expo on Laser Optics & Photonics, Roma, Italia, (2018)