



## SISTEMA OPTOELECTRÓNICO PARA LA CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES ALEATORIAS

Andrey S. Ostrovsky, Eduardo Ahuatzí Rojas, Demar Severiano Carrillo

*Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Autónoma de Puebla*

### 1.- Introducción.

Se han propuesto diversos métodos para la clasificación de imágenes, en los cuales se han empleado las funciones discriminantes sintéticas (SDFs) satisfactoriamente para dicha clasificación, con topología bien definida o forma específica de las imágenes; sin embargo, su discriminante de potencia se degrada rápidamente con distorsiones de la imagen.

Es un hecho que en la vida real la mayoría de imágenes presentan formas que pueden ser vistas como perfectamente aleatorias o estocásticas. En estos casos es preferible hablar del campo aleatorio de la imagen y no de la imagen misma, es decir, como una función determinística del espacio, lo cual nos lleva a buscar una aproximación estadística para la clasificación de tales imágenes.

Recientemente, los autores hemos propuesto un sistema optoelectrónico para la clasificación de imágenes aleatorias en el tiempo real, utilizando SDFs que son sintetizadas para separar linealmente el espectro de potencia de los campos aleatorios de la imagen denominado como el método de funciones discriminantes sintéticas espectrales (SSDF).

Sin embargo, el método SSDF no es la solución mas adecuada, si tomamos en consideración la confiabilidad para una

correcta clasificación, hablando formalmente, realizamos la síntesis de las SSDF en la base

de una estimación óptima del espectro de potencia del campo aleatorio de la imagen que está siendo clasificada, al mismo tiempo, en la etapa de clasificación se dispone de solamente una muestra del espectro de potencia, el cual es la estimación inconsistente del espectro real de potencia del campo de la imagen. De esta manera parece mas justificable el realizar la síntesis de la función SSDF en base al criterio de máxima confiabilidad de discriminación del campo aleatorio de la imagen y no de la mejor reproducción de la forma real del espectro de potencia del campo de la imagen

El método SSDF consiste en la fijación del índice  $m$  de los valores

$$u_{0m} = \int \int_{-\infty}^{\infty} S_0(p, q) h_m(p, q) dp dq, \quad (1)$$

$$m = 1, 2, \dots, N,$$

el cual corresponde al número de clase de la imagen en clasificación. En Ec. (1)

(2)

$$D = \int \int_{-\infty}^{\infty} S_0(p, q) h_m(p, q) dp dq$$

es un estimador del espectro de potencia de la imagen desconocida  $f_0(x, y)$  dada en el



dominio  $D$  y  $h_m(p,q)$  son funciones discriminantes espectrales sintetizadas por el método de mínimos cuadrados [2].



## 2.- Síntesis de mínimos cuadrados SSDF.

Consideramos una cierta imagen de clase  $n$ -ésima ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) como la  $k$ -ésima función ( $k=1, 2, \dots, K$ ) muestreada 2-D  $f_{nk}(x)$  de un campo aleatorio espacial estacionario  $f_n(x)$  con un espectro de potencia

$$S_n(p) = \lim_{D \rightarrow \infty} \frac{1}{D} \langle |F_{nk}(p; D)|^2 \rangle, \quad (3)$$

donde

$$F_{nk}(p; D) = \int_D f_{nk}(x) \exp(-i2\pi p \cdot x) dx \quad (4)$$

es la transformada finita de Fourier de  $f_{nk}(x)$  sobre el área  $D$  ocupada por la imagen, y los paréntesis triangulares denotan el valor de la operación sobre el índice  $k$ . Tomando como verdadera la hipótesis de la independencia lineal entre el espectro de potencia  $S_n(p)$  para diferentes clases, tenemos

$$\det S \neq 0, \quad (5)$$

donde  $S$  es la matriz de orden  $N$  con un elemento general

$$s_{nm} = \int_{-\infty}^{\infty} S_n(p) S_m(p) dp \quad (6)$$

Bajo la condición (5), la SSDFs puede ser definida como una combinación lineal del espectro de potencia  $S_n(p)$ , es decir

$$h_m(p) \equiv \sum_{l=1}^N a_{ml} S_l(p), \quad m = 1, \dots, N. \quad (7)$$

de tal forma que será determinada la siguiente identidad

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_n(p) h_m(p) dp \equiv \delta_{nm} \quad (8)$$

donde  $\delta_{nm}$  es el símbolo de la delta de Kronecker.

Una vez que las funciones SSDF  $h_m(p)$  han sido calculadas, un procedimiento para clasificar las muestras de imágenes desconocidas  $f_{0k}(x)$  es el verificar la identidad (8) para cada  $m$  cuando sustituimos para cada  $S_n(p)$  el espectro de potencia  $S_0(p)$  del correspondiente campo de imagen  $f_0(x)$ . De esta manera, si la igualdad

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_0(p) h_m(p) dp = 1 \quad (9)$$

es satisfecha, significa que la imagen  $f_{0k}(p)$  es de clase  $m$  y viceversa.

La cantidad que puede ser medida directamente en un experimento es el espectro de potencia

$$S_{nk}(p; D) = \frac{1}{D} |F_{nk}(p; D)|^2, \quad (10)$$

el cual representa una estimación del espectro de potencia en el sentido de que la varianza no tiende a cero mientras  $D \rightarrow \infty$ .

Cuando se dispone de un número suficiente de muestras  $S_n(p)$  puede ser obtenida promediando el espectro de potencia (10) sobre el índice  $k$

$$\hat{S}_n(p) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K S_{nk}(p; D) \quad (11)$$

De esta forma, la definición (7) de SSDF puede ser substituida por

$$\hat{h}_m(p) = \sum_{l=1}^N a_{ml} \hat{S}_l(p) \quad (12)$$

En la etapa de clasificación usualmente se dispone de una muestra, en este caso la identidad (6) es substituida por

$$\sum_{l=1}^N a_{ml} \int_{-\infty}^{\infty} S_{nk}(p; D) \hat{S}_l(p) dp = u_{nmk} \quad (13)$$



donde  $u_{nmk}$  es el valor muestreado de alguna variable aleatoria  $u_{nm}$ .



### 3.- Realización óptica del método SSDF

Como se ha mostrado anteriormente, el problema fundamental para la implementación práctica del método propuesto SSDF es el poder calcular el espectro de potencia muestreado  $S_{nk}(p;D)$ .

Para este caso en particular se puede emplear un procesador de Fourier óptico. Como se sabe, si en el plano del objeto de este procesador se coloca una transparencia con amplitud de transmitancia  $f_{nk}(x)$ , la intensidad del campo de la luz puede ser registrada por un detector CCD en el plano opuesto del lente de Fourier, el cual está determinado por

$$I_{nk}(x') = c \left| \int_{(XY)} f_{nk}(x) \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda f} x'x\right) dx \right|^2, \quad (14)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de la onda,  $f$  es la longitud focal de la lente de Fourier y  $c$  es a partir de este momento, un coeficiente constante.

Comparando la Ec. (12) con las Ecs. (10) y (4) uno puede encontrar fácilmente que esta intensidad es proporcional al espectro de potencia muestreado  $S_{nk}(p;D)$ , donde  $p = x/\lambda f$  y  $D = XY$ , es decir

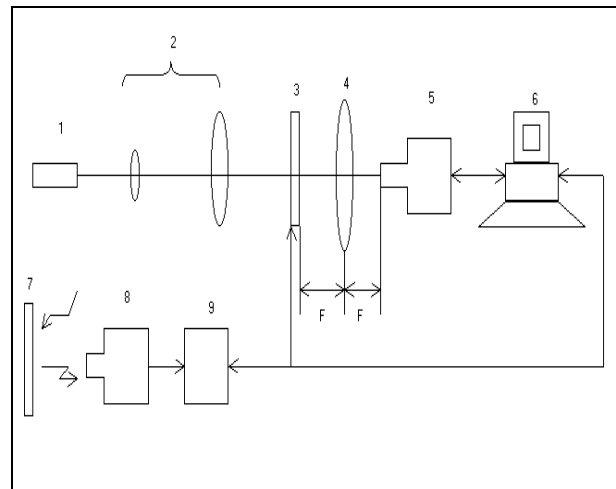
$$I_{nk}(p) = c S_{nk}(p;D) \quad (15)$$

El proceso siguiente al de la obtención de la muestra del espectro de potencia, incluyendo el promedio (Ec.11) y la realización de calcular la función de mínimos cuadrados de acuerdo a la Ec (12) puede ser realizado por un sistema optoelectrónico en el cual la distribución de intensidad puede ser fácilmente registrada en una forma discreta por medio de una cámara CCD conectada con una PC.

Por otro lado, para crear en el plano focal anterior de la lente la señal óptica con la amplitud  $f_0(x,y)$ , también es posible utilizar una cámara CCD conectada a través de una PC con la pantalla TV de cristal líquido [3].

Dicho sistema también es utilizado para realizar de una manera automática la decisión del tipo de clase de la imagen muestreada  $f_{0k}(x)$ .

A continuación se muestra un esquema de los componentes que conforman al sistema optoelectrónico para la clasificación de imágenes aleatorias



**Figura 1.** Sistema optoelectrónico para la clasificación de imágenes aleatorias: 1.-Láser; 2.-Expansor de haz; 3.-Pantalla de cristal líquido; 4.-Lente; 5.-Cámara CCD1; 6.-PC; 7.-Imagen en clasificación; 8.-Cámara CCD2; 9.-Interfase.

Para verificar el funcionamiento del sistema realizamos su simulación física y llevamos a cabo los experimentos con el objetivo de clasificar algunas imágenes texturales adoptadas de Ref. 2. Los resultados preliminares obtenidos en experimentos mostraron la capacidad de trabajo del sistema propuesto.



#### 4.- Resultados experimentales

Para verificar la eficiencia del método propuesto, se han realizado experimentos de simulación física sobre la clasificación de campos de imágenes aleatorias reales utilizando una aproximación óptica de la técnica descrita en las secciones anteriores.

En el experimento realizado para la clasificación de imágenes de textura se emplearon seis diferentes clases obtenidas de Brodatz: “paja” (D15) “piel de lagartija”(D36), “abanico de mar” (D87), “músculo suelto” (D104), “pergamino” (D109) y “burbujas plasticas”(D111).

Se tienen 50 muestras de imágenes disponibles para cada clase obtenidas como diferentes fragmentos de texturas de brodatz (transparencias de 35 mm en blanco y negro) tomadas con diferente orientación. Se utilizaron 45 muestras en la etapa de síntesis de mínimos cuadrados SSDF y el resto en la etapa de clasificación.

Para eliminar las variaciones de la intensidad media de la imagen en la entrada al plano óptico de Fourier normalizamos cada resultado obtenido sobre el valor registrado por el elemento central del detector.

La estimación normalizada del espectro de potencia obtenida para algunas imágenes de texturas se presentan en la tabla 1 y las correspondientes funciones SDF se presentan en la tabla 2.

| $\rho(i)$ | D15    | D36    | D87    |
|-----------|--------|--------|--------|
| 1         | -2.15  | -2.98  | -2.13  |
| 2         | -13.22 | -13.07 | -10.72 |
| 3         | -16.45 | -16.08 | -13.47 |
| 4         | -18.90 | -19.80 | -16.81 |
| 5         | -20.80 | -22.53 | -19.20 |
| 6         | -22.49 | -25.58 | -21.42 |
| 7         | -24.54 | -25.97 | -23.11 |
| 8         | -27.21 | -28.43 | -25.20 |
| 9         | -30.11 | -30.20 | -27.17 |
| 10        | -31.43 | -31.51 | -29.15 |

**Tabla 1:** Espectro de potencia normalizado para imágenes de Brodatz

| $i$ | $m$     |         |         |
|-----|---------|---------|---------|
|     | 1       | 2       | 3       |
| 1   | -0.1267 | 0.0731  | 0.4110  |
| 2   | -0.0057 | 0.0960  | 0.1149  |
| 3   | -0.0662 | -0.1099 | 0.1849  |
| 4   | -0.0803 | -0.2083 | 0.0622  |
| 5   | -0.1559 | -0.0270 | 0.1272  |
| 6   | 0.2026  | -0.2803 | -0.0531 |
| 7   | -0.1139 | 0.0468  | -0.0110 |
| 8   | -0.3307 | 0.2019  | 0.0713  |
| 9   | -0.4391 | 0.3391  | 0.0719  |
| 10  | 0.1007  | 0.0584  | -0.1673 |

**Tabla 2:** Mínimos cuadrados SSDF  $h_m(\rho_i)$  para clasificación de texturas de Brodatz

La investigación fue apoyada por la BUAP, proyecto II68G01, y por el CONACYT, proyecto 36875-E.

1. A. S. Ostrovsky, E. Pino Mota: Opt. Rev., **5** (1998) 219.
2. A. S. Ostrovsky et al: Proceed. SPIE, **4113** (2000) 115.
3. K. Lu, B. Saleh: Optical engineering, **29** (1990) 240.