

Etiquetas ópticas identificativas invariantes a deformaciones de perspectiva y distorsión.

Sergio Horrillo^{1*}, Elisabet Pérez-Cabré¹, María S. Millán,¹ y Bahram Javidi²

¹Dept. Òptica i Optometria. Univ. Politècnica de Catalunya. Violinista Vellsolà, 37 08222 Terrassa

²Electrical & Computer Eng. Dept. Univ. of Connecticut, 371 Fairfield Road, Storrs, CT 06269 USA

<http://www.goapi.upc.edu/>

1. Introducción

Las etiquetas ópticas identificativas se han presentado y desarrollado en trabajos recientes como elementos que al ser colocados en un vehículo o cualquier otro objeto, son utilizados como clave de identificación y/o autenticación [1-3]. Para aumentar la seguridad del proceso, las etiquetas pueden contener la información de una imagen representativa del objeto, cifrada siguiendo métodos de encriptación como el de doble fase aleatoria (DRPE, del inglés *Double random phase encryption* [4]), el de sólo de fase (FPE, del inglés *Fully-phase encryption* [5]), o multifactor [6]. El proceso de identificación se lleva a cabo a partir de la captación remota de la etiqueta, la descodificación de la información y su verificación mediante correlación con una referencia conocida. Este proceso puede realizarse en tiempo real aprovechando las ventajas de los métodos ópticos y el cálculo por ordenador.

En trabajos anteriores [2-3], para conseguir la captación remota de la etiqueta y la identificación correcta del objeto, se diseñaba la topología de la etiqueta de forma que fuera invariante a cambios de escala y rotaciones en el plano. Si bien se obtenían buenos resultados con esta propuesta, sin embargo este diseño generaba una etiqueta final de tamaño mucho mayor que la imagen original. En este trabajo presentamos un diseño mejorado de la etiqueta que es invariante a deformaciones de perspectiva y distorsión del sistema óptico de captación y, además, reduce de forma sensible su tamaño.

2. Diseño de las etiquetas ópticas identificativas

La Fig. 1 ilustra el proceso de generación de una etiqueta. A partir de la imagen original, $f(x,y)$, se obtiene una distribución de amplitud compleja correspondiente a la función encriptada, $\psi(x,y)$. En este trabajo se utiliza el método FPE de encriptación porque es más resistente a determinados ataques para descifrar la información sin autorización [7], y es más robusto a la presencia de ruido [8]. El módulo, $|\psi(x,y)|$, y la fase, $\Phi_{\psi}(x,y)$, de la función encriptada se codifican en amplitud con 256 niveles de gris y se distribuyen en sectores en dos círculos para generar la etiqueta identificativa final de la Fig. 1(c). En la etiqueta, el círculo de la izquierda contiene la información del módulo y el de la derecha, de la fase.

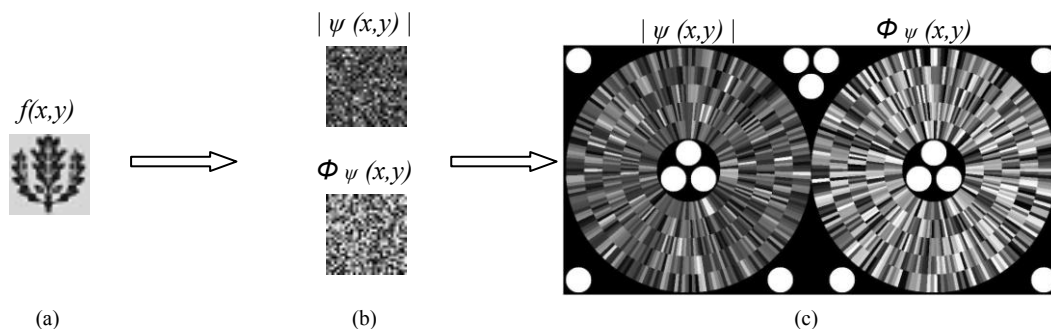


Figura 1: Proceso de generación de una etiqueta óptica identificativa: (a) Imagen representativa del objeto a identificar; (b) Módulo y fase de la función encriptada usando el método de FPE; (c) Etiqueta óptica identificativa.

* e-mail: shorrillo@gmail.com

En función del número de píxeles de la imagen original, se determina el número de círculos concéntricos a utilizar en la etiqueta de manera que la información se distribuye de forma aproximadamente uniforme en los diferentes arcos de círculo (Fig. 2).

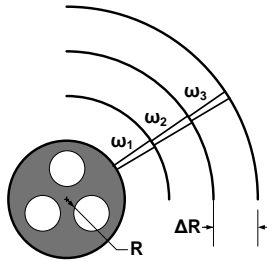


Figura 2: Distribución de la información en sectores circulares de la etiqueta.

El radio de los círculos concéntricos aumenta siempre una misma cantidad ΔR , mientras que la anchura angular de los sectores ω_i disminuye de un círculo al siguiente para mantener constante el número de píxeles con los que se codifica cada valor de la función $\psi(x,y)$ en la etiqueta. Los valores escogidos dependerán de la aplicación y podrán ser optimizados en función de las tolerancias requeridas, por ejemplo, en las variaciones a escala. Como se observa en el ejemplo de la Fig. 1(c), los círculos que contienen el módulo y la fase de la función encriptada, tienen una zona central sin división de sectores, puesto que en esta área no es posible reproducir diferentes zonas con suficiente resolución.

Como novedad en este trabajo, en las zonas libres de información de la etiqueta se introducen 15 círculos blancos (valor más alto de los niveles de gris utilizados) que permiten determinar las deformaciones y/o distorsiones producidas en el proceso de captura, de manera que se puede descodificar satisfactoriamente la información introducida en la etiqueta en una gran variedad de situaciones.

Los círculos blancos de referencia se sitúan en las esquinas de la etiqueta, la zona central de los círculos del módulo y de la fase, y en la parte central superior e inferior de la etiqueta (Fig. 1(c)). Éstos últimos, introducen una asimetría en la etiqueta global que permite establecer una correspondencia biunívoca entre los círculos de referencia originales y los de la etiqueta captada remotamente. Los centros de masa de los círculos de referencia, así como su distribución geométrica en la etiqueta, permitirán determinar el ángulo de rotación y la función de transformación que compensaría las posibles deformaciones y distorsiones que puede haber sufrido la etiqueta al ser captada.

Para trabajar con deformaciones más generales de perspectiva y distorsión, se ha seguido el procedimiento indicado en la Ref. [9], y se ha comprobado que es necesario aproximar la función de transformación por un polinomio de orden tres,

$$u \quad v = \begin{bmatrix} 1 & x & y & x \cdot y & x^2 & y^2 & y \cdot x^2 & x \cdot y^2 & x^3 & y^3 \end{bmatrix} \cdot T \quad , \quad (1)$$

donde (u, v) son las coordenadas en el espacio final, (x, y) son las coordenadas en el espacio origen y T es la matriz de transformación que contiene 10 pares de coeficientes. Teóricamente, son necesarios un mínimo de 10 puntos de referencia para determinar el valor de estos coeficientes. Sin embargo, en la práctica se ha comprobado que es conveniente disponer de al menos 11 o 12 puntos. Para poder contar con un número suficiente de puntos de referencia se han introducido un total de 15 círculos blancos, de manera que el sistema de identificación puede ser tolerante a la pérdida de la información de 3 o 4 círculos situados en las esquinas de la etiqueta.

La introducción de estos círculos de referencia permite a su vez, reducir el número de puntos de la etiqueta en comparación con las primeras propuestas [2,3,8], que contenían la información de la función encriptada no solo por sectores circulares, sino también distribuida de forma radial. Así pues, si partimos de una imagen de 30x30 píxeles como la del ejemplo de la Fig. 1, la etiqueta actual generada tiene un tamaño de 1090x550 píxeles, que corresponde a una reducción hasta el 30% de la propuesta inicial.

3. Lectura y descodificación de la información de la etiqueta óptica identificativa

Para recuperar la información de la etiqueta, es necesario, en primer lugar, determinar la posible deformación que la etiqueta haya podido sufrir en el proceso de captación remota. Para ello se tienen que discriminar los 15 círculos de referencia del resto de elementos de la imagen, teniendo presente que, según la deformación sufrida por la imagen, éstos se habrán transformado en elipses más o menos deformadas. El proceso seguido consiste en un primer paso de binarización de la imagen aplicando un valor de corte del 80% del nivel máximo de gris. A continuación se realiza un proceso de opening morfológico para eliminar los objetos más pequeños. Finalmente, la discriminación de los círculos se consigue a partir de un estudio morfológico de los objetos presentes en la imagen procesada.

Una vez localizados los 15 círculos, el ángulo de rotación de la etiqueta captada se determina a partir de la distribución geométrica de los círculos de referencia en la etiqueta. El centro de masas de los 15 círculos permite también calcular la matriz de transformación T (Ec. 1) que define la transformación de la imagen.

Para evitar manipular y alterar los valores de amplitud del módulo y de la fase de la función encriptada, en lugar de aplicar una transformación inversa a la etiqueta captada, se crean dos máscaras, una para el módulo y otra para la fase, que se deformará acorde con los cambios sufridos por la etiqueta captada, para permitir la lectura directa de todos los valores. La Fig. 3 muestra una etiqueta deformada por perspectiva, y las correspondientes máscaras deformadas por la matriz de transformación calculada a partir de los círculos de referencia de la etiqueta. Las máscaras contienen el mismo número y distribución de sectores circulares que la etiqueta original. Sin embargo, cada sector tiene un área menor (aproximadamente el 50%) que el área ocupada por el mismo sector en la etiqueta (ver detalle de Fig. 3(b)). Proponemos reducir los márgenes del sector para poder hacer una lectura más fiable de los datos en la zona central, consiguiendo así que el sistema sea mucho más tolerante a deformaciones.

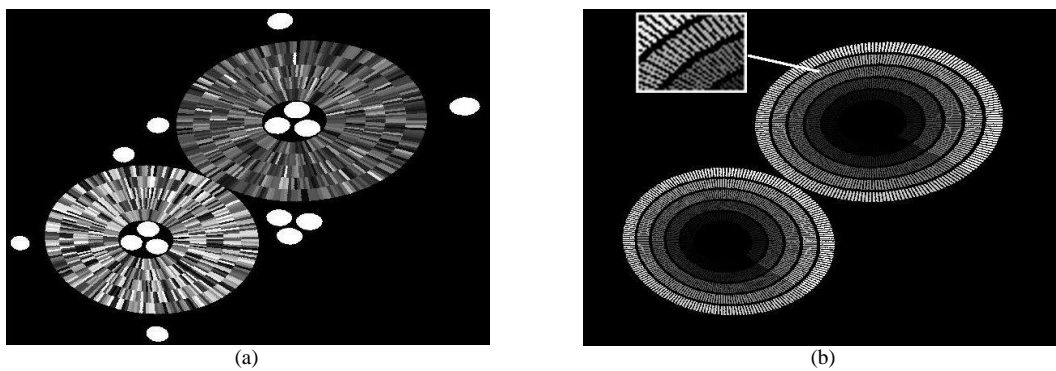


Figura 3: (a) Imagen de la etiqueta en perspectiva. (b) Máscara para la lectura de la etiqueta captada.

Finalmente, se realiza la lectura directa de los datos de la etiqueta, se organiza la información en forma matricial, habitual de las imágenes en dos dimensiones, y se realiza la descodificación de la información siguiendo el procedimiento descrito en [8] para el método de encriptación FPE.

4. Resultados de identificación

A continuación mostramos algunos resultados de identificación utilizando las etiquetas ópticas descritas. Para validar el método introducido, calcularemos el error medio cuadrático (RMS, del inglés *Root-Mean-Square*) [10] entre la imagen original encriptada en la etiqueta, y la imagen descodificada después de captar la etiqueta deformada por perspectiva o distorsión del sistema de captación.

Las variaciones de perspectiva de la etiqueta se han simulado utilizando los ángulos θ y φ que controlan el cambio de perspectiva del sistema de captación [9]. Se define el parámetro θ como el ángulo de rotación de la cámara respecto al eje óptico, equivalente a la rotación de la etiqueta en su plano, y φ corresponde al ángulo de inclinación de la cámara respecto al plano de la etiqueta.

Las imágenes de la Fig. 4 muestran dos ejemplos de etiqueta captada con un fuerte efecto de perspectiva. Se han considerado $\theta=25^\circ$ y $\varphi=25^\circ$ para la etiqueta de la Fig. 4(a), y $\theta=90^\circ$ y $\varphi=40^\circ$ para la Fig. 4(b). En ambas figuras, se muestra la imagen descodificada en la esquina superior izquierda. Los valores del RMS son $6.36 \cdot 10^{-4}$ y $6.27 \cdot 10^{-4}$, respectivamente. Ambos coinciden con una buena valoración visual de la imagen recuperada por el sistema de identificación.

La Fig. 5 muestra dos ejemplos de etiquetas deformadas por la distorsión de barril (Fig. 5(a)) y de corsé (Fig. 5(b)) que produciría el objetivo de la cámara del sistema de captación. En los dos casos se muestra la imagen recuperada, de calidad muy aceptable, para las cuales el RMS vale $6.79 \cdot 10^{-4}$ y $7.18 \cdot 10^{-4}$. La deformación es muy acentuada, pero sirven para poner de manifiesto que las etiquetas ópticas identificativas propuestas toleran fuertes distorsiones de barril o corsé, superiores a las que cabe esperar de un sistema óptico real.

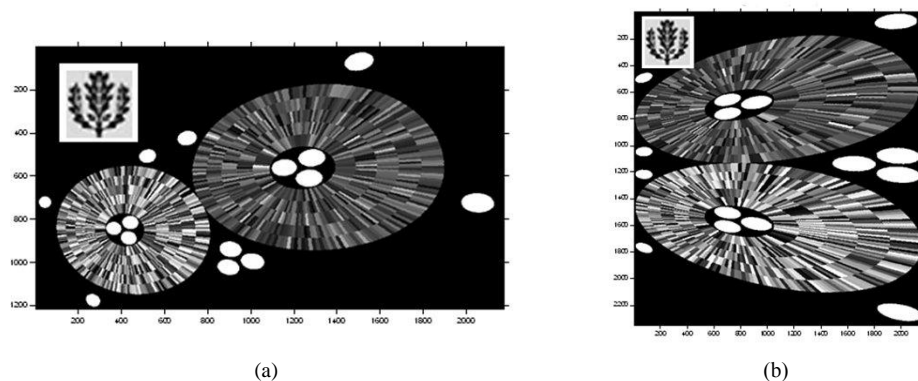


Figura 4: Imágenes de la etiqueta deformada por perspectiva. En la esquina superior izquierda de cada etiqueta se muestra la imagen recuperada. (a) $\theta=25^\circ$ y $\varphi=25^\circ$; (b) $\theta=90^\circ$ y $\varphi=40^\circ$.

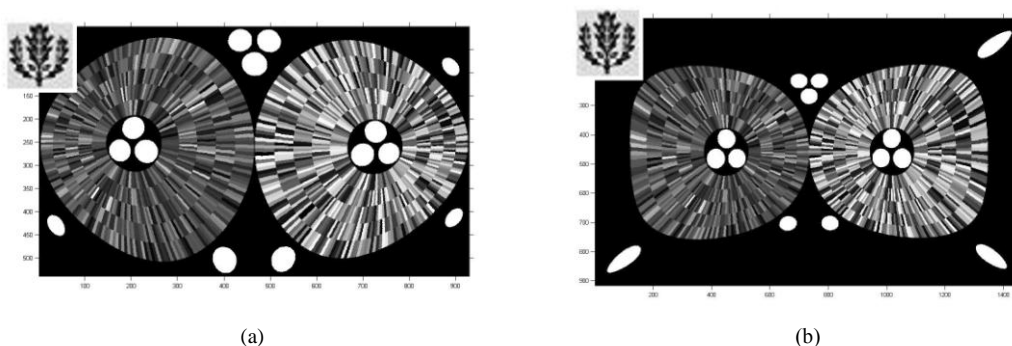


Figura 5: Imagen de la etiqueta con distorsión de: (a) barril y (b) corsé, e imagen recuperada.

5. Conclusiones

Se ha presentado un diseño mejorado para las etiquetas ópticas identificativas, de manera que éstas reducen significativamente su tamaño y permiten resultados satisfactorios de identificación incluso cuando la etiqueta se capta fuertemente deformada por perspectiva o distorsión introducida por el sistema óptico de captación.

La información de la función encriptada se distribuye en sectores circulares de área similar y se posicionan 15 círculos de referencia para determinar la deformación de la etiqueta captada, aproximando la función de transformación por un polinomio de orden 3. La matriz de transformación se aplica a una máscara para poder leer directamente los valores de la etiqueta sin alterarlos y poder así descodificar correctamente la información.

Bibliografía

- [1] B. Javidi, "Real-time remote identification and verification of objects using optical ID tags", *Opt. Eng.* **42**, p. 1 (2003).
- [2] E. Pérez-Cabré, M. S. Millán, B. Javidi, "Design of distortion-invariant optical ID tags for remote identification and verification of objects", in *Physics of Automatic Target Recognition* (Springer, New York, 2007).
- [3] E. Pérez-Cabré, M. S. Millán, B. Javidi, "Near infrared multifactor identification tags", *Opt. Express*, **15**, p. 15615 (2007).
- [4] P. Refregier, B. Javidi, "Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding", *Opt. Lett.*, **20**, p. 767 (1995).
- [5] N. Towghi, B. Javidi, Z. Luo, "Fully phase encrypted image processor", *JOSA A*, **16**, p.1915 (1999).
- [6] M. S. Millán, E. Pérez-Cabré, B. Javidi, "Multifactor authentication reinforces optical security", *Opt. Lett.*, **31**, 721 (2006).
- [7] Y. Frauel, A. Castro, T. J. Naughton, B. Javidi, "Resistance of the double random phase encryption against various attacks", *Opt. Exp.*, **15**, p.10253 (2007).
- [8] E. Pérez-Cabré, M. S. Millán, B. Javidi, "Remote optical ID tag recognition and verification using fully spatial phase multiplexing", *Proc. SPIE*, **5986**, p. 598602 (2005).
- [9] W. K. Pratt, *Digital image processing*, 2nd Ed., (John Wiley & Sons, New York, 1991).
- [10] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, *Digital image processing*, (Addison-Wesley, New York, 1993)