Adquisición y formación de imágenes multispectrales de obras pictóricas

Acquisition and formation of multispectral images of paintings

Juan Torres^(1,*), Daniel Vázquez⁽²⁾, Tomás Antelo⁽³⁾, José Manuel Menéndez⁽¹⁾, Alberto Posse⁽¹⁾, Antonio Álvarez⁽²⁾, Javier Muñoz⁽²⁾, Carmen Vega⁽¹⁾, Marian Del Egido⁽³⁾

1. Grupo de Aplicación de Telecomunicaciones Visuales, E.T.S.I. de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Complutense, nº 30, Madrid, Spain.

2. Departamento de Óptica, Universidad Complutense de Madrid, C/Arcos de Jalón 118, Madrid, Spain.

3. Departamento de Estudios Físicos, Instituto del Patrimonio Cultural de España, Ministerio de Cultura, C/ El Greco, nº4. Madrid, Spain.

(*) Email: jta@gatv.ssr.upm.es

Recibido / Received: 29/09/2011. Revisado / Revised: 16/01/2011. Aceptado / Accepted: 17/01/2012.

RESUMEN:

En este artículo se introduce una nueva aplicación que permite obtener un conjunto de imágenes de calidad multispectrales de obras pictóricas. Las imágenes se capturan utilizando un conjunto de lentes capaces de difractar la luz en la zona del espectro del infrarrojo cercano. Cada imagen multispectral se representa por una línea de la obra en un intervalo de longitudes de onda. Así, se ha diseñado un método de establecimiento de distancias en la imagen además de una calibración de enfoque para imágenes lineales. Para obtener la imagen completa, la cámara se mueve verticalmente de forma muy precisa. Las imágenes obtenidas ofrecen una herramienta muy útil para restauradores, analistas de obras de arte e historiadores los cuales pueden disponer de información relativa al proceso de creación de la obra. Además de la descripción del sistema en este artículo se presentan algunos resultados relevantes y las actuales líneas de investigación.

Palabras clave: Imágenes Multispectrales, Formación de Mosaicos, Reflectografía de Infrarrojos, Tratamiento Digital de Imágenes.

ABSTRACT:

In this paper, a novel application for obtaining a set of multispectral images of paintings is introduced. The images are captured using a multispectral lens able to diffract the light in the near infrared spectrum. Each multispectral image is represented by a line of the painting in an interval of wavelengths. Thus, a method able to estimate distances in the image and a focus calibration process in linear images have been designed. For obtaining a whole image, the camera is moved vertically in a very precise way. The images obtained offer a very useful tool for restorers and art historians which have information regarding the painting composition process. As well as the system description, a few enlightening results and new lines of investigation are showed.

Key words: Multispectral Imaging, Mosaicing, IR Reflectography, Image Processing.

REFERENCIAS Y ENLACES / REFERENCES AND LINKS

- [1]. A. M. Siddiolo, R. Gr. Maev, "Ultrasonic imaging techniques for painting diagnostic", *Proc. IEEE International Ultrasonic Symposium*, art. no. 1602993, pp. 890-893 (2005).
- [2]. A. Pelagotti, A. D. Mastio, A. De Rosa, A. Piva, "Multispectral imaging of paintings: A way to material identification", *IEEE Signal Proc. Mag.* **25**, 27-36 (2008).

- [3]. J. Torres, A. Posse, J. M. Menéndez, A. Gabaldón, C. Vega, T. Antelo, M. Del Egido, M. Bueso, "VARIM: A computer vision system for the automatic creation of high resolution reflectographic mosaics", *Proc. ELMAR - International Symposium Electronics in Marine 2*, art. no. 4747549, pp. 487-490 (2008).
- [4]. J. Torres, J. M. Menéndez, "An adaptive real-time method for controlling the luminosity in digital video acquisition", *International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing*, pp. 133-137 (2005).
- [5]. J. Torres, J. M. Menéndez, "A practical algorithm to correct geometrical distortion of image acquisition cameras", *Proc. IEEE International Conference on Image Processing* vol III, pp. 2451-2454 (2004).
- [6]. K. Martinez, J. Cupitt, "VIPS - a highly tuned image processing software architecture", *Proc. IEEE International Conference on Image Processing*, vol II, art. no. 1530120, pp. 574-577 (2005).
- [7]. A. Mittal, R. Visvanathan, "An intensity-augmented ordinal measure for visual correspondence", *Proc. IEEE Computer Society on Computer Vision and Pattern Recognition*, art. no. 1640841, pp. 849-856 (2006).
- [8]. A. Posse, J. Torres, J. M. Menéndez, "Matching points in poor edge information images", *Proc. IEEE International Conference on Image Processing*, art. no. 5414221, pp. 197-200, (2009).

1. Introducción

A lo largo de la historia, el Arte siempre ha estado ligado a los constantes desarrollos de la tecnología. Conforme aparecen nuevas técnicas, la forma en la que los artistas muestran sus ideas cambia. Sin embargo, el progreso tecnológico no solo ha afectado a la creación de composiciones artísticas, sino que también ha permitido mejorar su estudio y análisis. Con este objetivo se forman equipos interdisciplinarios de investigadores que aportan grandes beneficios en el campo de la historia del Arte, la conservación y la restauración del Patrimonio.

El creciente desarrollo de los sistemas de computación así como los nuevos sistemas de adquisición y tratamiento de imagen no solo proveen de nuevos instrumentos de análisis sino que permiten hacer más eficientes los existentes, haciendo la tecnología accesible para un gran número de restauradores, conservadores, historiadores e investigadores en general. Por otra parte, los criterios de conservación de los bienes culturales exigen la protección de la obra en su estudio, por lo que el desarrollo de las técnicas de análisis de imagen, sin toma de muestra, constituyen un campo de investigación de gran interés [1]. De este modo, se hacen evidentes las ventajas que ofrecen los sistemas de procesamiento de imágenes.

Una de estas aplicaciones es la reflectografía de infrarrojos, una técnica de análisis utilizada desde la década de los 70 y que consiste en adquirir, haciendo uso de una cámara sensible a la zona infrarroja, un conjunto de imágenes

contiguas pertenecientes a una obra pictórica. Estas imágenes son más tarde unidas obteniendo una única denominada mosaico. El mosaico final ofrece información detallada sobre la capa subyacente a la capa pictórica la cual no es visible directamente por el ojo humano. Aunque esta técnica se lleva utilizando durante décadas, los métodos tradicionales presentan diversos problemas que hacen que el proceso total sea una tarea lenta y tediosa. Por ello, se ha creado un sistema, denominado Varim, que ofrece una considerable mejora frente a las desventajas de los métodos tradicionales. El método presentado en este artículo utiliza técnicas de adquisición de imágenes multiespectrales en la obtención de imágenes de reflectografía para proveer información sobre la capa subyacente y la capa pictórica, con una información muy precisa respecto a la distribución espectral puesto que estas imágenes son filtradas en bandas muy estrechas en diversas longitudes de onda en el infrarrojo cercano. Además, el sistema implementado también ha requerido el diseño de un nuevo método de enfoque.

El resto del artículo se ha organizado del siguiente modo. En la próxima sección se explican las técnicas de formación de imágenes multiespectrales. En la sección 3 se realiza la descripción del sistema propuesto utilizado para la formación del mosaico reflectográfico multiespectral. En la sección 4 se presentan algunos ejemplos ilustrativos del sistema para finalizar, en la sección 5, con las principales conclusiones extraídas de este trabajo.

2. Formación de imágenes multiespectrales

La adquisición de imágenes multiespectrales es una técnica que consiste en trabajar con imágenes de varias longitudes de onda de la misma muestra de la obra pictórica. Actualmente existen dos aplicaciones principales de dicha técnica [2]: por una parte, utilizando imágenes colorimétricas de alta resolución, y por otra realizando un análisis de materiales mediante espectroscopía.

Sin embargo, se puede aumentar la información de la obra si las imágenes multiespectrales se combinan con la reflectografía de infrarrojos. De este modo, se pueden realizar imágenes reflectográficas de mucho detalle filtrando la imagen reflejada de la obra por la respuesta a su longitud de onda. Esto permite observar algunos detalles o capas que aparecen aislados en la imagen porque su respuesta a la longitud de onda depende de los materiales que componen la obra y de su modo de elaboración.

Antes de explicar las particularidades del sistema de adquisición multiespectral desarrollado se introducirá el sistema completo que gestiona la adquisición y la composición de mosaicos reflectográficos.

3. Descripción del sistema

En esta sección se introducen los elementos físicos que componen la arquitectura hardware así como la aplicación software que los maneja, haciendo especial hincapié en el algoritmo de composición del mosaico [3].

3.a. Arquitectura

La arquitectura física de Varim se compone de un sistema mecánico de posicionamiento 2D, un detector InGaAs (cámara sensible en el infrarrojo cercano) con un bloque óptico multiespectral, un sistema de iluminación y una plataforma PC.

El sistema de posicionamiento coloca la cámara a lo largo de una superficie de 1x1 m delante de la obra pictórica a analizar con el fin de adquirir sub-imágenes de forma consecutiva. El bloque óptico elegido suele tener una

distancia focal alta, con el fin de obtener más detalle de cada imagen, lo que conlleva una tarea de enfoque no siempre fácil. Para una composición correcta estas sub-imágenes deben tener una determinada zona de solape entre ellas. Además, el sistema de focos utilizado proporciona iluminación homogénea sobre toda la obra para evitar desviaciones radiométricas. La fuente de luz utilizada es halógena (lámparas modelo 64515 de la casa OSRAM de 300 W y temperatura de color 3300K). Una vez se han adquirido todas las imágenes, se pasa a componer el mosaico completo. El algoritmo utilizado se explica en la sección 3.2.

Hay que destacar que tanto las labores de adquisición como de composición se realizan de forma automática, facilitando el trabajo del usuario. Para ello, el único requisito es establecer una serie de parámetros (tipo de lente utilizada, zona de solape, tipo de composición, etc.), y el sistema es capaz de crear una imagen reflectográfica de alta resolución de la obra pictórica.

Además de lo anterior, se han implementado algunas herramientas que mejoran el resultado, como un control de luminosidad de las imágenes [4], una técnica de corrección de distorsión geométrica [5] y un algoritmo de supresión de ruido.

3.b. Algoritmo de formación del mosaico

El mosaico completo se crea uniendo paso a paso sub-imágenes consecutivas. Para cada unión se necesita calcular al menos un punto común en cada imagen, por lo que es necesario que las imágenes tengan cierto solape. Una vez calculado este punto, se crea una imagen a partir de dos utilizando algoritmos de la librería VIPS [6].

Sin embargo, los métodos de correspondencia de puntos tradicionales no funcionan para los mosaicos reflectográficos dado que muchas de las imágenes a unir no disponen de información de bordes (p. ej. las subimágenes de un cielo despejado), necesarios para encontrar las correspondencias. De este modo, se ha implementado un algoritmo robusto frente al ruido capaz de resolver esta falta de detalles. Dicho algoritmo está basado en [7],

Fig.1: Conjunto de lentes multispectrales.

para encontrar las correspondencias visuales, y en [8] para rechazar las falsas correspondencias. Dicho método es capaz de encontrar puntos comunes entre subimágenes incluso en aquellas con pobre información de bordes.

Éste es el método utilizado para obtener una imagen reflectográfica completa de una obra. Sin embargo, para poder filtrar la información por longitud de onda se hace necesario introducir un elemento nuevo: un conjunto de lentes difractoras multispectrales. Con respecto a la iluminación, para este sistema de adquisición se utiliza la misma fuente lumínica mencionada para la reflectografía y se cuenta con una referencia de calibración de blanco que suministra la casa Specim (White Calibration Tile SPE-01DER00020 CAL/tile 300), tratando de mantener una distribución de luz homogénea en todo el rango espectral de funcionamiento.

4. Gestión de datos multispectrales

La Fig. 1 muestra el funcionamiento de las lentes multispectrales. La luz incidente se difracta a través del sensor de la imagen en diferentes longitudes de onda. Así, la imagen adquirida (I_a) es una señal de dos variables (x_a, λ_a), es decir, un vector de la obra real en diferentes longitudes de onda. El tamaño de la imagen será $C \times F$, donde F es el número de líneas además del número de las distintas longitudes de onda.

4.a. Adquisición de líneas

Para poder obtener información 2D la cámara debe desplazarse a lo largo del eje y (Fig. 2) de una forma muy precisa. La cantidad de desplazamiento depende básicamente de tres factores: la distancia a la obra, la lente utilizada y el ancho del filtro multispectral. Para llevar a cabo el movimiento de la cámara, se utiliza un motor lineal de alta precisión electrónicamente controlado por la aplicación Varim. Este elemento es capaz de mover automáticamente la cámara con la precisión necesaria. Para conocer el desplazamiento que se debe llevar a cabo se estima la correspondencia de la altura de un píxel capturado (o una fila de ellos) con su altura real. En realidad, sabiendo que los píxeles del sensor son cuadrados, basta con calcular el ancho de cada línea capturada. A este efecto se ha diseñado un test que consiste básicamente en obtener una imagen de una línea de un ancho e e inclinada un ángulo α . Esto permite evaluar el ancho de línea real en cada longitud de onda en

Fig. 2: Esquema geométrico del cálculo del ancho de línea.

Fig. 3: Imagen multispectral de una barra inclinada.

Fig. 4: Ancho de línea en función de la longitud de onda.

función de las longitudes D y M de la Fig. 2 con la relación siguiente ecuación:

$$a = D \tan \left(\arcsin \left(\frac{e}{M} \right) \right). \quad (1)$$

Las longitudes D y M se calculan a partir de la variación de luminancia de la imagen en una línea de píxeles. En la imagen multispectral que se obtiene (Fig. 3) aparece reflejada una diferencia sustancial entre el ancho de línea

percibido por la cámara entre las diferentes longitudes de onda.

Además de la estimación del desplazamiento necesario, otro problema importante que tienen estos sistemas es que no es posible enfocar con calidad en imágenes complejas y que además es muy difícil conocer el lugar en el que se enfoca la cámara, ya que la imagen corresponde a una única línea de píxeles. A este efecto se ha diseñado y fabricado un test que permite

resolver ambos aspectos. El test consiste en un código de barras que en conjunción con un sistema periódico en el eje longitudinal permite realizar el posicionamiento de la cámara tal y como se muestra en la Fig. 5.

En la Fig. 5 se puede apreciar cómo el enfoque con este sistema es sencillo cuando se utiliza un código de barras cualquiera. En el caso de usar el test de enfoque diseñado se puede ver cómo la barra correspondiente a la altura en la que se encuentra enfocado el objetivo multispectral aparece regresada, y por tanto no hay más que contar posiciones para deducir su emplazamiento en el plano vertical (Fig. 6), con lo que se pueden conseguir imágenes enfocadas de una forma sencilla.

Fig. 5: Test de enfoque de la cámara multispectral.

Fig. 6: Imagen desenfocada (arriba) y enfocada (abajo).

4.b. Creación de la imagen multispectral

Después de repetir la operación de adquisición y desplazamiento vertical N veces, se obtendrán N

líneas diferentes. Así, el conjunto de datos final está compuesto por un conjunto de imágenes bi-dimensionales. Esto se puede representar por $M(x_a, \lambda_a, y_a)$, de tamaño $C \times F \times M$.

Con el fin de obtener imágenes visibles de estos datos, se aplica una transformación de dimensiones. Siguiendo la expresión (2) se obtiene un grupo de imágenes $I_F(x_F, y_F, \lambda_F)$ correspondiente a la misma área de la obra en diferentes longitudes de onda:

$$\begin{pmatrix} x_F \\ y_F \\ \lambda_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_A \\ \lambda_A \\ y_A \end{pmatrix}. \quad (2)$$

En la siguiente sección se pueden apreciar algunos resultados relevantes de estas tareas.

5. Resultados

Los resultados presentados en este artículo se han obtenido utilizando una muestra de pintura (Fig. 7) utilizando distintos tipos de pigmentos y colores. El conjunto de lentes multispectral es capaz de difractar la luz incidente desde los 793.33 nm a los 1938.43 nm. La resolución espectral depende de la longitud de onda comenzando en 2.21 nm y terminando en 2.27 nm de ancho. El sensor de la cámara de infrarrojos tiene un tamaño de 640x512 píxeles y se han adquirido 120 líneas. Como ejemplo, en las figuras 8 y 9 se pueden ver las imágenes de las bandas 1101.71 nm y 1700.58 nm respectivamente.

En un primer análisis, se pueden apreciar claras ventajas. Por ejemplo, el objeto de la derecha se puede reconocer solo en la longitud de onda más alta. De forma similar, el árbol de la izquierda está mucho más presente en la longitud de onda más corta.

6. Conclusiones

El sistema descrito en este artículo ofrece una herramienta muy útil para el estudio de obras de arte. Con éste, se podrá analizar la distribución de los materiales que componen una obra pictórica utilizando un método no-intrusivo capaz de proporcionar imágenes de forma rápida y casi automática.

Fig. 7: Muestra en el visible.

Fig. 8: Imagen reflectográfica en 1101.71 nm (ancho de 2.23 nm).

Fig. 9: Imagen reflectográfica en 1700.58 nm (ancho de 2.26 nm).

Los resultados muestran detalles imposibles de distinguir en el campo visible o a partir de imágenes reflectográficas. Además, el sencillo sistema de calibrado del enfoque diseñado facilita el proceso de adquisición. A esta tarea también contribuye el método de estimación del ancho de línea captado por el sistema lo cual permite evaluar con más rigor la calidad del funcionamiento del conjunto.

Por otra parte, se ha conseguido realizar un sistema que permite establecer la posición de apuntamiento de la cámara en el plano transversal.

El trabajo actual se está llevando a cabo en la mejora del sistema mecánico de adquisición para que permita obtener áreas de imagen más grandes y de forma más rápida. Para lograr este objetivo, se está desarrollando un método preciso de sincronización entre la adquisición de imágenes y el desplazamiento de la cámara. Además, el estudio se extenderá a otras áreas del espectro –visible y ultravioleta–.

Acknowledgements

Este artículo ha sido subvencionado por el Instituto del Patrimonio Cultural Español y parcialmente soportado por el proyecto Proyecto APOLO HAR-2009-12862.