

MEJORA DE LA COMPOSICIÓN DEL MOSAICO REFLECTOGRÁFICO MEDIANTE MÉTODOS DE CORRECCIÓN GEOMÉTRICA

Juan Torres Arjona y José Manuel Menéndez García
E. T. S. Ingenieros de Telecomunicación
Universidad Politécnica de Madrid
28240 Madrid – España
{jta, jmm}@gatv.ssr.upm.es

1. INTRODUCCIÓN

El bloque óptico de las cámaras de adquisición de imágenes introduce aberraciones que afectan a las imágenes adquiridas. Esta distorsión se puede observar fácilmente en líneas rectas las cuales aparecen curvadas. Dicha desviación depende principalmente de la calidad de las lentes y se incrementa con la distancia entre los puntos observados y el punto correspondiente a la intersección del eje óptico de la cámara con el plano del sensor de ésta (punto principal). Aunque en la mayoría de aplicaciones esta aberración es prácticamente inapreciable, existen otra serie de campos en las que no puede ser ignorada. Tradicionalmente ha sido muy importante en trabajos de fotogrametría donde la medida de la distancia entre puntos de la imagen tiene que ser tomada con gran precisión. En la composición del mosaico de imágenes obtenidas mediante reflectografía [VAN70] este tipo de distorsión afecta en gran medida a la unión de dos imágenes contiguas. Debido a que esta distorsión es más acusada cuanto mayor es la distancia al punto principal y que las zonas de unión del mosaico se sitúan en los lados de la imagen, la unión final será realizada con inexactitud y el error en el mosaico completo puede ser excesivo dando lugar a uniones incorrectas.

En la actualidad son cada vez más las aplicaciones en las que son necesarias correcciones de la distorsión. La mayoría son aplicaciones de visión artificial en las que se necesita extraer información geométrica de la escena. Si bien este no es el caso de las imágenes de reflectografía, los modelos son igualmente aplicables.

La relación geométrica entre la cámara y la escena captada pasa por estimar una serie de parámetros que corresponden a la tarea de calibración de la cámara. De este modo, hemos diseñado e implementado un método que caracteriza la aberración geométrica de la cámara de adquisición en la fase de calibración y que permite posteriormente corregir la distorsión de cualquier imagen captada por dicha cámara y que mejora la precisión en la composición del mosaico.

A lo largo de la siguiente sección se presentará el modelo paramétrico utilizado para caracterizar la distorsión geométrica. A continuación, en la sección 3, se explicará el método propuesto para realizar la corrección de estas aberraciones. Finalmente, en la sección 4 se harán algunas valoraciones sobre el trabajo expuesto en este artículo.

2. DISTORSIÓN GEOMÉTRICA

La distorsión geométrica se debe a diferentes tipos de imperfecciones en el diseño y fabricación de las lentes que componen el bloque óptico de la cámara. Así, hay que diseñar modelos que tengan en cuenta los errores de posición en el plano de la imagen. Existen dos tipos de distorsión geométrica: distorsión radial y tangencial. Los nombres se deben al tipo de desplazamiento del punto de la imagen con respecto al punto ideal (donde el punto (u, v) corresponde al punto sin distorsión y el punto (u', v') al punto distorsionado tomando como origen de coordenadas el punto principal (x_p, y_p) de la cámara [ver Figura 1]). Esta distorsión se puede expresar sumando un término adicional de desplazamiento en cada coordenada como muestra la ecuación (1)

$$\begin{aligned} u' &= u + \delta'_u(u, v) \\ v' &= v + \delta'_v(u, v) \end{aligned} \quad (1)$$

La distorsión radial se debe a la curvatura de las lentes. El grado de distorsión dependerá de la precisión con la que han sido fabricadas. Si la imagen captada presenta un desplazamiento negativo de los puntos en el plano de ésta se le denomina **distorsión de barril** mientras que si el desplazamiento es positivo la distorsión es de **cojín** por el aspecto de las imágenes resultantes.

Brown mostró en la década de los 60 que [BRO71], según la teoría de trazado de rayos ópticos, la distorsión radial es una función de la distancia al objeto. Sin embargo se obtienen buenos resultados suponiendo que el plano del objeto se encuentra en el infinito. De esta forma, se puede modelar el término de distorsión radial, siempre y cuando las coordenadas estén correctamente centradas, como una función Gaussiana (2) donde $O[(u, v)^n]$ son los términos de orden mayor que n y k_1 es el parámetro de distorsión radial.

$$\begin{aligned} \delta_{rad,u} &= k_1 \cdot u \cdot (u^2 + v^2) + O[(u, v)^5] \\ \delta_{rad,v} &= k_1 \cdot v \cdot (u^2 + v^2) + O[(u, v)^5] \end{aligned} \quad (2)$$

Por otra parte, basándose en [WEN92], se puede expresar el término de distorsión tangencial como se muestra en la ecuación (3), donde $O[(u, v)^n]$ siguen siendo los términos de orden mayor que n y p_1 y p_2 se corresponden con los parámetros de distorsión tangencial.

$$\begin{aligned} \delta_{tg,u} &= p_1 \cdot (3u^2 + v^2) + 2 \cdot u \cdot v \cdot p_2 + O[(u, v)^4] \\ \delta_{tg,v} &= 2 \cdot u \cdot v \cdot p_1 + p_2 \cdot (u^2 + 3v^2) + O[(u, v)^4] \end{aligned} \quad (3)$$

Otro de los factores que introduce distorsión geométrica en una cámara y que será tomado en cuenta en nuestro método, es la desviación del punto principal del centro de la imagen. Es decir, idealmente el punto principal se corresponde con el centro del sensor. Sin embargo, debido a que el proceso de fabricación no es perfecto, se produce una desalineación con el eje óptico que introduce distorsión en la imagen.

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO

Son múltiples los métodos adoptados para solucionar el problema de la distorsión. Muchos de ellos están incluidos en una calibración completa de la cámara y otros tan solo se centran en la distorsión geométrica arriba descrita. Sin embargo el método clásico más utilizado es el denominado *plumb-line* ideado por Brown [BRO71] y que se basa en el hecho de que “*la proyección central de una línea recta es también una línea recta*”. Se puede utilizar este hecho ya que, si se obtiene una imagen de un conjunto de líneas rectas y se mide en la imagen distorsionada la desviación con respecto a las líneas ideales (puesto que debido a la distorsión ya no aparecerán rectas) se puede compensar la distorsión introducida por las lentes. Así, se utiliza la ecuación normal de una línea recta (4), donde ρ se corresponde con la distancia de la línea al origen de coordenadas y θ denota el ángulo entre el eje U y la normal a la línea que pasa por el origen (Figura 1). Finalmente, para obtener los parámetros estimados basta con minimizar la distancia entre los puntos de las rectas ideales y los puntos corregidos. Esto suele hacerse mediante un método clásico de mínimos cuadrados, alguno de los cuales son tratados en [GAL04].

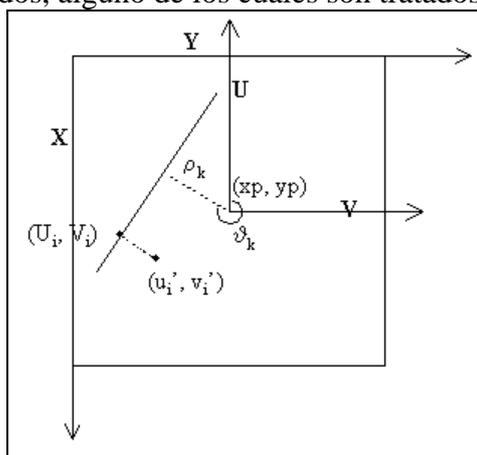


Figura 1: Sistema de coordenadas

$$u \cdot \cos(\theta) + v \cdot \sin(\theta) = \rho \quad (4)$$

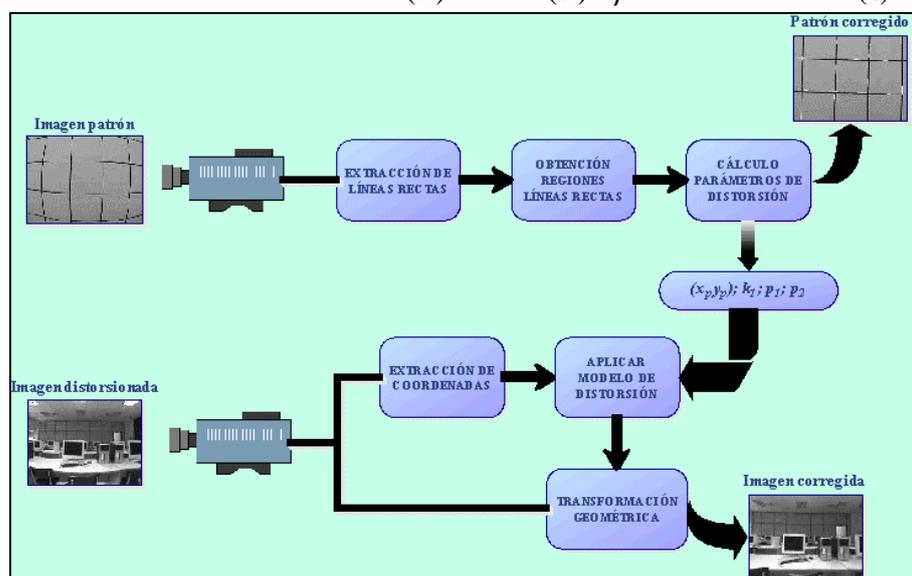


Figura 2: Diagrama de bloques de la corrección geométrica

De este modo, hemos ideado un método basado en el método *plumb-line* que puede verse esquematizado en la Figura 2. En resumen, los pasos que sigue este método son los siguientes [TOR04]:

- Se parte de una imagen patrón adquirida por la cámara que se quiere corregir.
- Se detectan las rectas ideales de la imagen patrón.
- Se asocian los puntos detectados como rectas a la suya correspondiente.
- A partir de estos puntos y de la información de las rectas ideales, se calculan los parámetros del modelo que caracteriza la distorsión.

Una vez obtenidos estos parámetros, se aplica el modelo a toda imagen adquirida por esa cámara para corregir la distorsión geométrica.

La imagen patrón consiste en una serie de líneas rectas horizontales y verticales. En un principio el número de rectas no importa demasiado, si bien cuantas más rectas tenga el patrón, se dispondrá de mayor cantidad de datos y se obtendrán resultados más precisos. Aunque este número no es determinante, sí lo es la posición de la cámara frente a esta imagen. Así, el eje óptico de la cámara debe situarse perpendicular a la imagen. Si esto no fuera así, la imagen proyectada sobre el plano de la imagen sufriría una transformación geométrica afín, lo que modificaría la distorsión original e invalidaría el método.

Si la cámara de vídeo tiene enfoque variable, debe conocerse el valor de éste cuando se adquiera la imagen patrón, puesto que cuando el enfoque varía la distorsión geométrica también lo hace dado que al variar éste cambian los alineamientos del bloque óptico, y con ello los fenómenos que originan la distorsión. De este modo, con los parámetros estimados a partir de esta imagen solo se podrán corregir las imágenes adquiridas por la cámara si no se varía el enfoque de ésta.

Una vez adquirida esta imagen se debe cambiar el sistema de coordenadas ($XY \rightarrow UV$) para adecuarlo al modelo de distorsión según la Figura 1 siguiendo las expresiones (5):

$$\begin{aligned} u_i &= -x_i + x_p \\ v_i &= y_i - y_p \end{aligned} \tag{5}$$

Como estimación inicial se asume que el punto principal se encuentra en el centro exacto de la imagen. Más adelante se tendrá en cuenta el desplazamiento de dicho punto para la corrección. Para caracterizar las rectas según la ecuación (4) hemos utilizado un detector de bordes de Canny [CAN86] y la transformada de Hough [DAV90], lo que nos ofrece una agrupación de puntos asociados a líneas rectas según (6), donde (u_i, v_i) son las coordenadas del punto i -ésimo perteneciente a la recta k -ésima. En este punto se asume que la distorsión no es excesivamente fuerte, lo cual suele ocurrir en la realidad, para poder obtener buenas estimaciones de las líneas rectas.

$$L_k = \{(u_i, v_i) \mid u_i \cos(\mathcal{G}_k) + v_i \sin(\mathcal{G}_k) \approx \rho_k\} \quad (6)$$

A continuación se procede a minimizar una función de coste que mida la distancia entre los puntos corregidos (u'_i, v'_i) y los puntos ideales (U_i, V_i) (Figura 1) como se ha explicado anteriormente. Dicha función se define como (7), asumiendo que se han obtenido N líneas con N_k puntos en la línea k -ésima.

$$FC = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{N_k} d_{ik}^2 = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{N_k} \{(u'_i - U_i)^2 + (v'_i - V_i)^2\}_k \quad (7)$$

El procedimiento anterior sirve para estimar una buena aproximación inicial de los parámetros de distorsión. Sin embargo, esta estimación se ha obtenido asumiendo que el centro óptico de la cámara está en el centro de la imagen, lo cual, como ya se ha comentado, no suele ser cierto. Para resolver esto, hemos implementado un algoritmo iterativo que parte de los puntos asociados a líneas rectas L_k , inicializa los parámetros de distorsión (vector \bar{p}) a cero y el punto principal (x_p, y_p) se asigna, como primera aproximación, al centro de la imagen. A partir de estos datos, se calcula una primera solución. El siguiente paso consiste en realizar desplazamientos de un píxel de las coordenadas del punto principal en las direcciones horizontal y vertical hasta recorrer una zona reducida buscando el mínimo valor de la función de coste. Finalmente, se acepta el vector \bar{p} y el centro real (x_p, y_p) que den el mínimo valor de dicha función.

3.1 RESULTADOS

Para demostrar el funcionamiento de este método vamos a presentar la corrección de la distorsión en una cámara de infrarrojos con tubo Vidicon. En la Figura 3 se puede apreciar la adquisición de una imagen patrón utilizando dicha cámara. Como bien se puede observar en esta imagen, la distorsión más apreciable es la de cojín, caso no muy frecuente dado que la curvatura de las lentes típicas suelen introducir el efecto de barril contrario a éste.

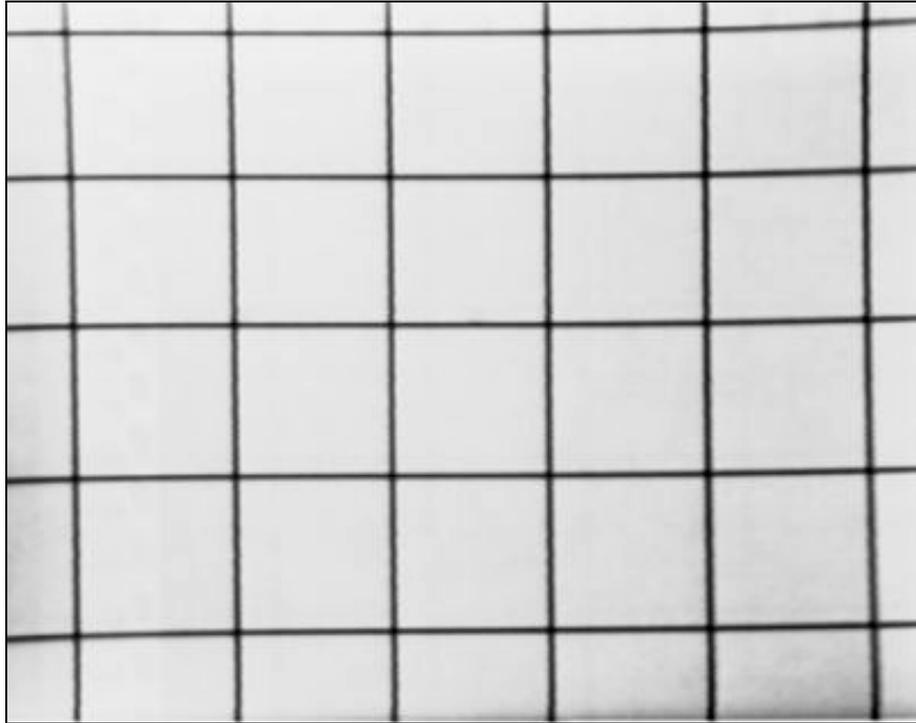


Figura 3: Imagen tomada como patrón de aberración geométrica

Después de aplicar el algoritmo explicado en este artículo, se obtiene una imagen corregida como la de la Figura 4, donde las líneas que anteriormente aparecían torcidas, aparecen esta vez rectas.

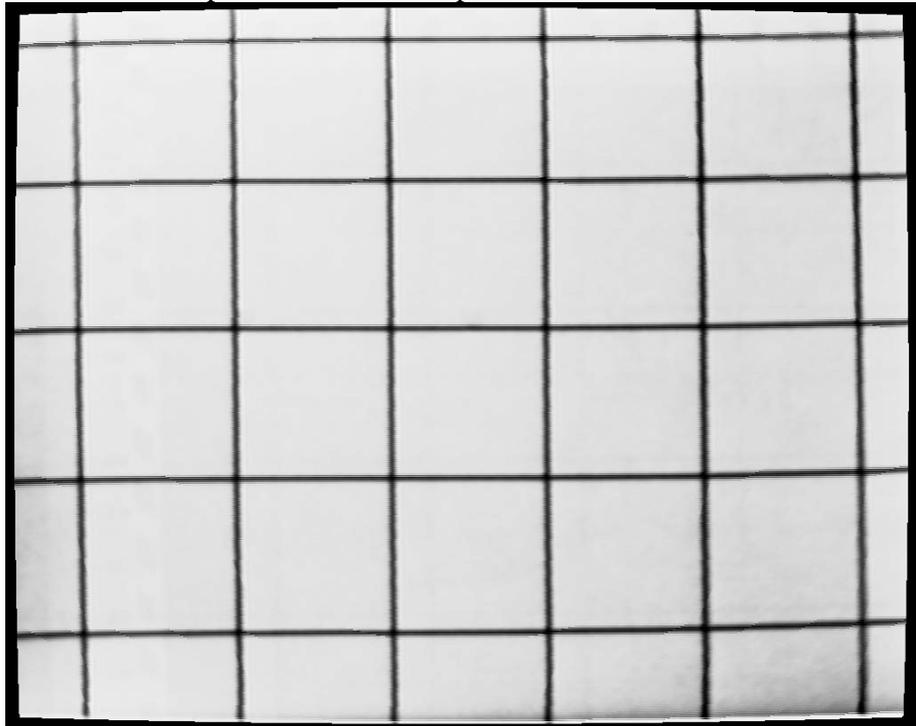


Figura 4: Imagen patrón corregida

Una vez obtenidos los parámetros que han conseguido corregir la imagen patrón, se puede aplicar el mismo modelo al resto de imágenes adquiridas. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de adquisición de parte de una obra y su imagen corregida en la Figura 6 donde, a pesar de que la distorsión no es apreciable, la corrección realizada facilita la posterior unión para la composición del mosaico de la obra completa.



Figura 5: Imagen ejemplo de una obra pictórica



Figura 6: Imagen de la Figura 5 corregida

4. CONCLUSIÓN

A lo largo de este artículo se ha podido analizar el problema que introduce las aberraciones geométricas de las cámaras de adquisición en el proceso de composición del mosaico reflectográfico. De este modo, se ha presentado un método sencillo de implementar y fiable a

la vez que fácil de utilizar y que es capaz de corregir esta distorsión que puede ser tan determinante en algunos procesos específicos. En relación a las líneas de investigación que se están realizando en la actualidad se está trabajando en el estudio de las variaciones del enfoque en la cámara de reflectografía y en qué medida afectan estos cambios a la distorsión. También se están planteando y probando nuevos patrones distintos a los utilizados para intentar obtener medidas más fiables que caractericen de forma más precisa la distorsión.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [BRO71] BROWN, D. C.; «Close-range camera calibration», *Photogrammetric Eng.*, Volumen: 37(8), Pag(s): 855-866, Agosto 1971.
- [CAN86] CANNY, J.; «A computational approach to edge detection», *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *IEEE Transactions on*, Volumen: 8(6), Pag(s): 679-698, Noviembre 1986.
- [DAV90] DAVIES, E. R., *Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities*, Academic Press, 1990
- [GAL04] GALLEGO BONET, G.: *Sistema de autocalibración de cámaras y reconstrucción 3D* Proyecto Fin de Carrera; E.T.S.I.T.; U.P.M., Madrid, 2004.
- [TOR04] TORRES, J.; MENÉNDEZ, J. M.; «A practical algorithm to correct geometrical distortion of image acquisition cameras», *IEEE International Conference on Image Processing*, vol III, pag 2451-2454, Octubre, 2004.
- [VAN70] VAN ASPEREN DE BOER, J. R.; *A contribution to the examination of earlier European paintings* Tesis Doctoral, Universidad de Amsterdam, Amsterdam, 1970.
- [WEN92] WENG, J.; COHEN, P.; HERNIOU, M.; «Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation», *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *IEEE Transactions on*, Volumen: 14(10), Pag(s): 965 – 980, Octubre 1992.

Juan Torres Arjona obtuvo el título de Ingeniero de Telecomunicación en 2004 por la E. T. S. Ing. de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid. Desde 2002 es miembro del Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones donde actualmente se encuentra realizando estudios de Doctorado relacionados con la visión artificial y la adquisición de vídeo.

José Manuel Menéndez García recibió el título de Ing. de Telecomunicación en 1988 y el de Dr. Ing. de Telecomunicación con “Summa Cum Laude” en 1996, ambos por la ETSIT de la Universidad Politécnica de Madrid. Desde 1988 pertenece al Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones de la ETSIT y es Profesor Titular de Universidad desde 1996.