

Método de corrección automática de sistemas de proyección panorámicos multi-proyector



Carlos Zoido-Benítez
Joaquín Maroto-Ibáñez
Gregorio Romero-Rey
José Manuel Mera-de Pedro

Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial

CITEF – UPM. ETSII. C/José Gutierrez Abascal, 2 - 28006 Madrid. Tfno: +34 913 363212.
czoido@etsii.upm.es

Recibido: 17/01/2013 • Aceptado: 08/04/2013

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5713>

AUTOMATIC CORRECTION METHOD FOR PANORAMIC MULTI-PROJECTOR DISPLAYS

ABSTRACT

- In this paper we present an easy and novel method to calibrate a panoramic multi-projector display system. These kinds of displays have a wide range of applications in fields such as simulation, entertainment, marketing and data visualization. Our correction method uses a commercial off-the-shelf camera that rotates around its vertical axis in order to cover the entire screen. Light structured patterns are projected on this screen in order to establish the transformation that relates the camera to each projector. As the camera is only transformed with a pure rotation different views of the camera can be related using panoramic photo stitching algorithms. These photographic techniques allow to establish a common reference frame for all the projectors where the necessary correction can be calculated easily. Once all the transformation relations between the camera, projectors and projection surface are calculated the partial images emitted by each projector can be corrected in order to calibrate the system geometrically. Also, the application of Bezier patches to model the projectors allows the use of an uncalibrated camera. Our main contribution is the application of panoramic photo stitching algorithms to multi-projector display correction in order to make the correction procedure easier compared to previous methods. The validation of the described methodology is done presenting the case of a panoramic display composed of five projectors.
- **Keywords:** multi-projector displays, edge blending, simulation, computer graphics, panoramic projection.

RESUMEN

En el presente artículo se describe un método sencillo y novedoso para calibrar sistemas de proyección panorámicos formados por la composición de las imágenes de varios proyectores. Este tipo de sistemas de proyección tienen multitud de aplicaciones en campos como la simulación, el entretenimiento, el marketing y la visualización de datos.

El método de corrección hace uso de una cámara convencional que puede girar en torno a su eje vertical para captar la totalidad de la superficie de proyección. Sobre esta superficie de proyección cada proyector emite patrones de luz estructurada que permiten relacionar las imágenes emitidas por el proyector con las captadas por la cámara. Gracias a que la cámara experimenta solo una transformación de rotación pura entre vistas se pueden relacionar unas vistas con otras mediante el uso de técnicas de composición de fotografía panorámica. Estas técnicas de composición permiten el establecer un sistema de referencia común para todos los proyectores donde realizar la corrección de manera sencilla. Una vez se han establecido relaciones de transformación entre los elementos del sistema se pueden corregir las imágenes parciales para que la imagen final parezca emitida por un único proyector. Además, la aplicación de modelos de Bezier para definir las zonas de proyección de cada proyector permiten que se pueda emplear una cámara sin calibración previa. La principal aportación de este estudio es la aplicación de téc-

nicas de composición fotográfica a sistemas multi-proyector lo que permite una corrección más sencilla que con métodos anteriores.

El método de corrección descrito se ha validado aplicando la metodología a un sistema de proyección panorámico formado por cinco proyectores.

Palabras clave: sistemas multi-proyector, edge blending, simulación, gráficos por computador, proyección panorámica.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de proyección panorámicos han alcanzado gran popularidad en los últimos años debido al alto grado de inmersión que proporcionan y su utilidad en aplicaciones como los simuladores, los videojuegos, la proyección de películas panorámicas o la visualización de datos. A pesar de que existen sistemas de proyección de este tipo constituidos por multitud de pantallas convencionales a forma de mosaico, no se puede evitar la pérdida de continuidad de la imagen en los bordes de cada una de las pantallas. Es por este motivo por el que los mejores resultados se consiguen usando varios proyectores para componer una imagen final, corrigiendo las imágenes de cada uno de ellos para que la apariencia de la imagen total sea continua al ojo humano. Sin embargo, para construir un sistema de proyección multi-proyector hay que hacer frente a varios retos como la corrección geométrica de las imágenes proyectadas para conseguir una imagen final alineada y la eliminación de discontinuidades colorimétricas a lo largo de la superficie de proyección. El presente trabajo se centra en la parte de corrección geométrica de este tipo de sistemas de proyección. El objetivo es desarrollar un método automático, que hace uso de Hardware de bajo coste al que no se le ha efectuado una calibración previa y donde solo existe un conocimiento aproximado de la geometría de la superficie de proyección.

A lo largo de los años se han desarrollado multitud de estudios para resolver el problema de la corrección de sistemas de proyección de este tipo. La mayor parte de estos estudios toma como hipótesis de partida una superficie de proyección plana con lo que se pueden usar transformaciones de homografía para relacionar los sistemas de coordenadas de la cámara, los proyectores y la superficie de proyección. Sin embargo, el ajuste geométrico es mucho más complejo si se proyecta sobre una superficie curvada. Existen dos maneras de enfocar el problema de la corrección geométrica en superficies no planas:

- Corrección “dependiente” del punto de vista. En este caso la imagen proyectada se ve correctamente desde un único punto de vista que normalmente coincide con el punto de vista de la cámara que calibra el sistema de proyección. Este enfoque es válido para sistemas de proyección donde existe un único usuario y donde se proyecta sobre superficies que se encuentran en su mayor parte delante de él (no son panorámicas).
- Corrección “independiente” del punto de vista. Para

poder realizar la corrección independientemente del punto de vista se puede o bien realizar la corrección geométrica en función de la posición del punto de vista del usuario obtenido mediante sistemas de *head-tracking* [1] o bien, como será el caso de la metodología propuesta, se emite sobre la superficie de proyección como si se estuviera “empapelando” la imagen de forma similar a un poster. Este método de corrección necesita un sistema de referencia común donde relacionar geoméricamente los proyectores entre sí y del conocimiento previo de la geometría 3D de la superficie para poder parametrizar la imagen final y así “empapelarla” a ella.

Para conseguir resultados satisfactorios en un sistema de proyección panorámico se debe aplicar una corrección independiente del punto de vista “empapelando” la imagen sobre la superficie. Existen diferentes investigaciones que tratan de cómo realizar este tipo de corrección geométrica sobre superficies curvas. Algunos estudios usan sistemas de cámaras estéreo pre-calibradas y técnicas de luz estructurada para poder reconstruir la información 3D de la superficie de proyección [2][3]. Otros estudios evitan la reconstrucción de la geometría de la superficie pegando marcas fiduciales cuidadosamente calibradas sobre la superficie de proyección para poder parametrizar la imagen final en el espacio de la cámara [4][5]. Investigaciones más recientes, suponiendo que la superficie es una superficie cilíndrica [6] o proviene de la extrusión vertical de una curva [7], recuperan la información 3D de la superficie conociendo la relación de aspecto de la pantalla. Sin embargo estos métodos corrigen superficies que no envuelven al usuario y no comprenden el caso de una superficie panorámica donde los ángulos pueden ser de 180° o más, en los que hay que hacer uso de más de una vista para poder corregir el sistema. La ventaja de la metodología presentada respecto a estos otros enfoques es que no se va a necesitar reconstruir la geometría 3D de la superficie ni colocar marcadores, además se pueden calibrar sistemas de proyección en los que los ángulos de la superficie panorámica sean de más de 180° en torno al usuario.

El método de corrección presentado en este artículo soluciona los dos requerimientos para crear una proyección “independiente” del punto de vista usando técnicas empleadas tradicionalmente en composición de fotografías panorámicas. Primero, capturando imágenes de patrones emitidos por los proyectores desde varias vistas relacionadas por una rotación pura es posible establecer un sistema de referencia común para todos los proyectores. El sistema de referencia se puede establecer ya que la proyección sobre un cilindro de las imágenes capturadas por cada vista representadas en coordenadas cilíndricas se relacionan entre ellas por un transformación de traslación pura. En segundo lugar, parametrizando en el espacio de coordenadas cilíndricas de la proyección se consigue una parametrización muy fiel a la de la pantalla panorámica real evitando reconstruir su información 3D y la colocación de marcas fiduciales sobre la

superficie de proyección, esto es debido a que la superficie panorámica se aproxima a la sección de una forma cilíndrica formada alrededor del usuario.

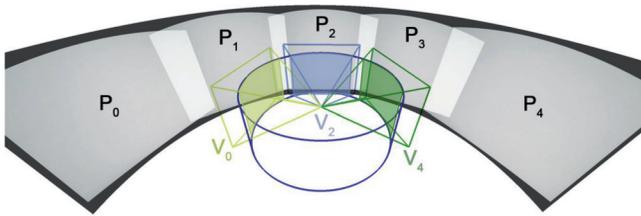


Fig. 1: Esquema de la superficie de proyección con los cinco proyectores y tres de las vistas de la cámara tomadas.

A continuación se describirá el método de corrección aplicado a un sistema de proyección panorámico formado por cinco proyectores tomando cinco puntos de vista de una cámara situada en su interior. En la Figura 1 se muestra el esquema de la superficie de proyección panorámica con los cinco proyectores emitiendo en blanco y tres de las cinco vistas tomadas (se omiten las vistas V_1 y V_3 en favor de la simplicidad de la figura). También se muestra el cilindro sobre el que se van a proyectar las imágenes para establecer la referencia común y la intersección de las vistas de la cámara con el cilindro. Los proyectores son nombrados como P_i y las vistas de la cámara como V_j variando los dos subíndices entre 0 y 4.

Una vez detectados los puntos, se usan para crear un modelo del proyector basado en superficies racionales de Bezier. Se emplea este modelo ya que es capaz de absorber tanto las posibles distorsiones de la cámara como del proyector y así permite crear una relación precisa entre cámara y proyector sin necesidad de hacer uso de una cámara calibrada [10]. La relación entre los puntos emitidos por el proyector y los puntos captados por la cámara en cada una de las vistas quedan definidos entonces por la Ecuación 1.

$$B_{ij}(x,y) = \frac{\sum_{m=0}^k \sum_{n=0}^k PC_{mn} \cdot w_{mn} \cdot b_{m,k}(q) \cdot b_{n,k}(r)}{\sum_{m=0}^k \sum_{n=0}^k w_{mn} \cdot b_{m,k}(q) \cdot b_{n,k}(r)}; b_{h,k}(t) = \frac{h!}{h!(h-k)!} \cdot t^k \cdot (1-t)^{h-k} \quad (1)$$

Siendo $B_{ij}(x,y)$ la superficie racional de Bezier de grado k que relaciona los puntos (q,r) en el sistema de coordenadas del buffer del proyector $P_i(q,r)$ (donde cada coordenada está en el intervalo $[0,1]$) con los puntos en el sistema de coordenadas de la vista $V_j(x,y)$. Además $b_{h,k}$ son los polinomios de Bernstein de grado k y w_{mn} y los pesos asociados a los puntos de control PC_{mn} de la superficie Bezier. Esta ecuación se puede expresar para una correspondencia concreta entre un punto (x,y) en la vista de la cámara y el mismo punto (q,r) correspondiente en el sistema de coordenadas del buffer del proyector según la Ecuación 2.

$$(x,y) \cdot \sum_{m=0}^k \sum_{n=0}^k w_{mn} \cdot b_{m,k}(q) \cdot b_{n,k}(r) - \sum_{m=0}^k \sum_{n=0}^k PC_{mn} \cdot w_{mn} \cdot b_{m,k}(q) \cdot b_{n,k}(r) = 0 \quad (2)$$

2. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE CORRECCIÓN

2.1. CÁLCULO DE LAS RELACIONES ENTRE CÁMARA Y PROYECTORES

El primer paso para poder calibrar un sistema multi-proyector es establecer relaciones de transformación entre la cámara y los proyectores. Para calcular esta relación de forma automática se emite una serie temporal de patrones de códigos Gray [9] y se analizan las imágenes resultantes para establecer puntos de correspondencia entre cámara y proyector. Como se usan diferentes puntos de vista de la cámara, se usa la vista que más puntos recoja de cada proyector para establecer estas correspondencias. En la Figura 2 se muestran los códigos Gray emitidos y los puntos captados para el proyector P_0 en la vista V_0 . En este caso los modelos de los proyectores P_i se calculan en las vistas V_j en las que $i=j$.

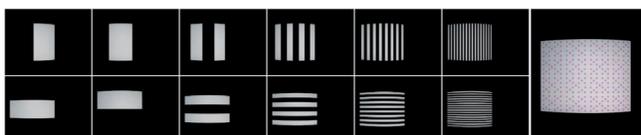


Fig. 2: Secuencia temporal de códigos Gray emitida y los puntos calculados para el proyector P_0 en la vista V_0

En el sistema de ecuaciones al que da lugar esta expresión se desconocen los $(k+1)^2$ puntos de control y sus correspondientes pesos con lo que hay $3 \cdot (k+1)^2$ incógnitas en total ($2 \cdot (k+1)^2$ por cada una de las dos componentes de los puntos de control y $(k+1)^2$ de los pesos). Para poder resolver este sistema de ecuaciones y así estimar el modelo de cada proyector partiendo de los puntos detectados en el espacio de cada vista de la cámara se aplica el algoritmo de optimización de Levenberg-Marquardt [11] ampliamente usado para encontrar una solución numérica al problema de ajustar

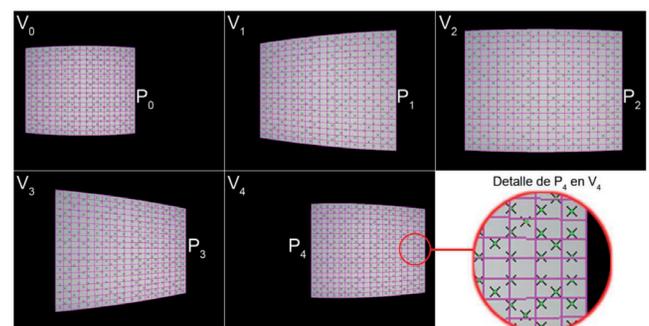


Fig. 3: Superficies de Bezier estimadas. Las cruces negras son los puntos detectados tras la emisión de los patrones y los puntos verdes son los mismos puntos estimados por el modelo (apreciables en el detalle). Se puede observar la gran precisión con la que reconstruye el modelo del proyector

conjuntos de datos a modelos no lineales. Los resultados del cálculo de los puntos de control y pesos con el modelo calculado superpuesto a la imagen de los proyectores se muestran en la Figura 3.

2.2. ESTABLECIMIENTO DE UN SISTEMA DE REFERENCIA COMÚN

El siguiente paso es unir la información conseguida para cada una de las vistas en un único sistema de referencia en el que se puedan realizar las operaciones necesarias para calcular la zona de proyección final. Para esto se proyectan las imágenes de cada vista $V_j(x, y)$ sobre un cilindro que rodea a la cámara y cuyo eje vertical coincide con el de su rotación (Figura 1). En esta superficie cilíndrica los puntos vienen parametrizados por el ángulo q y la altura h del cilindro, en función de los que se define el sistema (x', y') en el que se va a trabajar para realizar la corrección. La transformación viene definida por la Ecuación 3 [12].

$$x' = s \cdot \theta + tx_i = s \cdot \tan^{-1}\left(\frac{x}{f}\right) + tx_i \quad (3)$$

$$y' = s \cdot h + ty_i = s \cdot \frac{y}{\sqrt{x^2 + f^2}} + ty_i$$

Donde s es un factor de escalado arbitrario, f es la distancia focal de la cámara, en principio desconocida ya que la cámara no está calibrada, tx_i y ty_i son las traslaciones horizontal y vertical, también desconocidas, que relacionan las proyecciones de cada una de las vistas en el nuevo sistema de referencia. Si solo se ha girado la cámara respecto al eje vertical se puede considerar que ty_i es igual a cero.

Para calcular la distancia focal de la cámara y los desplazamientos se vuelve a hacer uso del *algoritmo de Levenberg-Marquardt* tomando como valores iniciales un desplazamiento (tx_i, ty_i) cero y longitud focal (f) igual a 1. Se proyectan sobre el sistema de coordenadas los puntos que son captados simultáneamente por varias vistas de la cámara y se itera sobre las variables tx_i, ty_i y f , sabiendo que los mismos puntos captados por diferentes vistas de la cámara se deben proyectar en el mismo punto en el nuevo espacio de coordenadas (x', y') . El resultado de este cálculo se muestra en la Figura 4 aplicado a dos puntos de vista de la cámara que captan imágenes de dos proyectores. Se puede observar en el detalle de la Figura 4 la coincidencia perfecta al final del proceso iterativo entre los puntos comunes proyectados en el espacio de referencia desde la vista V_0 (cuadrados de color rosa) y los proyectados desde la vista V_1 (cruces de color amarillo).

Una vez se han calculado estos parámetros, se proyecta el modelo estimado de cada proyector sobre el nuevo sistema de referencia usando la Ecuación 3. Los contornos resultantes de esta proyección sobre el espacio de coordenadas común (x', y') se muestran en la Figura 5.

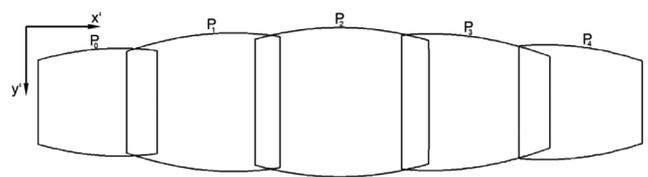


Fig. 5: Contornos de los modelos definidos para cada proyector en el sistema de coordenadas (x', y') .

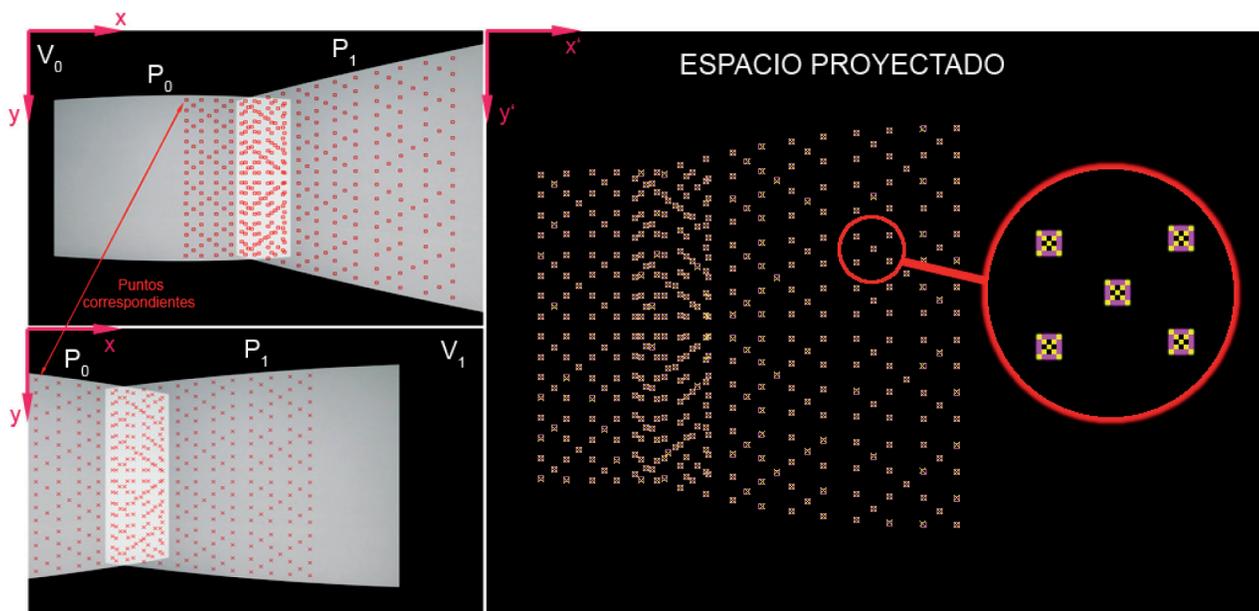


Fig. 4: Puntos comunes para las vistas 0 y 1 captados de los proyectores 0 y 1. Se itera con la longitud focal y la traslación hasta que esos puntos coinciden en el espacio proyectado (imagen derecha).

2.3. CÁLCULO Y PARAMETRIZACIÓN DE LA SUPERFICIE FINAL DE PROYECCIÓN

Con todos los proyectores referidos a un mismo sistema de referencia se procede a calcular la superficie final de proyección $S(x', y')$. Lo ideal es que la zona de proyección final aproveche al máximo la resolución de los proyectores y que toda su superficie se encuentre en el interior del polígono que delimitan las esquinas de los proyectores (marcado en azul en la Figura 6). Para ello se calculan dos curvas de Bezier de segundo grado en el espacio (x', y') que cumplen estas condiciones, $a(w)$ para la zona superior del contorno y $b(w)$ para la inferior siendo $0 < w < 1$. Estas dos curvas, que empiezan y terminan en la misma coordenada x' , se cierran mediante un segmento vertical para definir el área final de proyección.

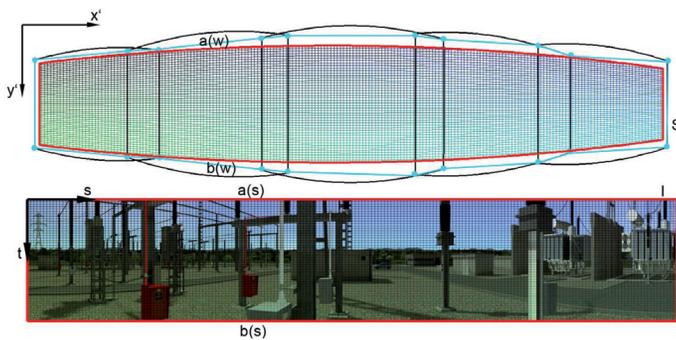


Fig. 6: Esquema del cálculo de la superficie de proyección final en el sistema de referencia común. En la parte inferior se muestra la imagen que se quiere proyectar que en este caso pertenece al escenario de un simulador de subestaciones eléctricas.

Para poder parametrizar la superficie de proyección final hay que relacionar S con la imagen final I que se quiere proyectar. Esta imagen I está definida en un sistema de coordenadas (s, t) . Para crear esta relación se divide la imagen I con una malla en cuadrícula y se traslada a la superficie final de proyección S haciendo equivalentes s y w . En la Figura 6 está representada esta malla con colores de vértice equivalentes al valor de la parametrización en los canales verde y azul y el canal rojo igual a cero.

2.4. CÁLCULO DE LAS TRANSFORMACIONES DE CADA PROYECTOR

Después de definir el contorno que delimita la zona de proyección final y su parametrización en el espacio (x', y') hay que calcular las transformaciones que hay que aplicar a cada uno de los proyectores para realizar la corrección geométrica. Para poder hacer esto lo primero que habría que calcular es la intersección de los contornos C_i de cada uno de los n proyectores con el de la superficie final de proyección S , resultando n contornos que se denominan C'_i de manera que:

$$C'_i = S \cap C_i \tag{4}$$

Cada uno de estos contornos es discretizado en el sistema de referencia (x', y') mediante una malla formada por triángulos. A cada vértice de esa malla se le asigna un valor de la parametrización de la superficie final calculada en el punto anterior. El resultado de la triangularización de los contornos calculados se muestra en la Figura 7.

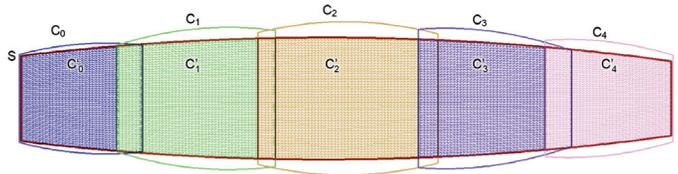


Fig. 7: Intersección de las zonas de proyección con el contorno que define la imagen final en el espacio (x', y') .

Esta discretización va a permitir hacer la transformación inversa de la parametrización de la imagen final, desde el sistema de coordenadas (x', y') al sistema de coordenadas local de cada proyector $P_i(q, r')$ para así poder determinar las imágenes parciales que deben emitir cada uno de los proyectores. Esta transformación es la composición de la transformación del espacio (x', y') de referencia común al espacio $V_j(x, y)$ de cada vista y de éste al $P_i(q, r')$ de cada proyector.

Para poder hacer esta transformación de sistemas de coordenadas primero hay que deshacer la proyección en cilíndricas, transformando los puntos de la malla triangularizada al espacio de coordenadas $V_j(x, y)$ de cada una de las vistas de la cámara empleadas. La transformación inversa de la aplicada en la Ecuación 3 sería:

$$x = f \cdot \tan(\theta) = f \cdot \tan\left(\frac{x' - tx_i}{s}\right) \tag{5}$$

$$y = h \cdot \sqrt{x^2 + f^2} = \frac{y' - ty_i}{s} \cdot f \cdot \sqrt{1 + \tan^2\left(\frac{x' - tx_i}{s}\right)}$$

El resultado de aplicar esta transformación se muestra en la Figura 8, donde se superpone la malla en el espacio de referencia de cada vista sobre la imagen del proyector proyectando blanco puro.



Fig. 8: Proyección inversa de la triangularización de las intersecciones calculadas en el sistema de referencia común. Cada vértice ha sido transformado junto con su parametrización asociada.

Para poder transformar estas mallas al sistema de referencia de cada uno de los proyectores hay que transformarlas según la inversa del modelo no racional de Bezier definido en la Ecuación 1. Esta transformación inversa permiti-

ría transformar los puntos de cada una de las vistas $V_j(x, y)$ al sistema de coordenadas $P_i(q, r)$ de cada proyector. Para ello se muestrea de forma regular el espacio $P_i(q, r)$, creando una malla de triángulos correspondiente en el sistema $V_j(x, y)$ transformada por la Ecuación 1. Después de hacerlo se pueden obtener las coordenadas de un punto en el sistema $V_j(x, y)$, interior a uno de estos triángulos, transformadas en el espacio $P_i(q, r)$ haciendo uso de coordenadas baricéntricas. El resultado de la transformación es una malla en el sistema de coordenadas del buffer de cada proyector, donde cada vértice tiene asociada la parametrización correspondiente a la imagen final que se quiere emitir sobre la superficie total.

La aplicación de las correcciones geométricas se lleva a cabo en tiempo real en el procesador de la tarjeta gráfica (GPU) mediante *shaders*. Los *shaders* son programas ejecutados por la tarjeta gráfica y que permiten manipular vértices y texturas. Para poder usar la información generada en un formato más adecuado para el procesador de la tarjeta gráfica se interpolan los valores de la parametrización entre los vértices de la malla y se genera una textura que actúa como “tabla de búsqueda” o LUT (*look-up table*) [13]. Esta textura representa en sus canales de color azul y verde los valores del pixel que tiene que emitir cada proyector y será uno de los parámetros de entrada del *shader* usado para la corrección final del sistema. En la Figura 9 se muestra esta textura para cada uno de los proyectores con el valor de la parametrización guardada codificada en el color y las imágenes parciales de cada proyector.

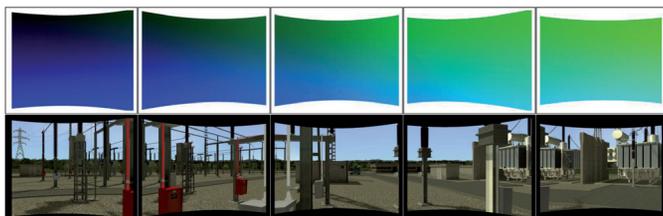


Fig. 9: Tablas de búsqueda generadas para hacer la corrección final (zona superior) y las imágenes finales emitidas por cada proyector (zona inferior).

3. RESULTADOS

Para verificar la validez de la parametrización de la imagen descrita en el apartado 2.3 se re proyecta una malla regular sobre el modelo de la superficie de proyección y se comprueba que no se producen fenómenos de deformación evidentes. En la Figura 10 se muestran tres vistas capturadas de la proyección de esa malla.

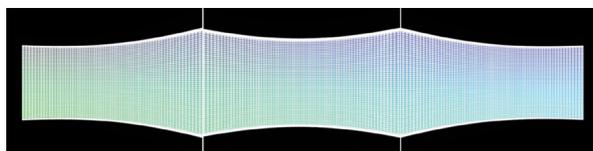


Fig. 10: Diferentes capturas de la rejilla emitida, se puede observar que la parametrización no provoca deformaciones

El método de corrección descrito ha sido implementado enteramente en C++ y en pocos segundos es capaz de procesar toda la información para calcular la corrección geométrica que es necesario aplicar. En la Figura 11 se muestran cuatro capturas de los resultados de proyectar sobre una superficie panorámica el escenario de un simulador de subestaciones eléctricas. Las zonas de solape se muestran sin corregir para poder apreciar mejor la coincidencia geométrica perfecta en el paso de un proyector a otro. El proceso de corrección colorimétrica de las zonas de solape se efectúa mediante las técnicas optimizadas descritas en [14] que permiten realizar una transición suave entre los proyectores.

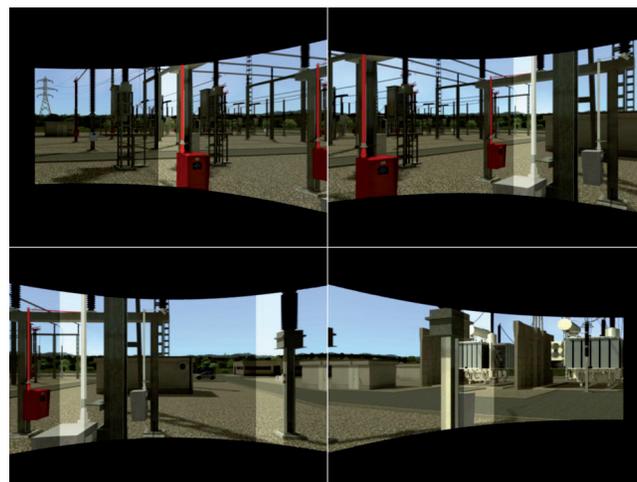


Fig. 11: Resultados de proyectar el escenario de un simulador de subestaciones eléctricas capturado en cuatro puntos de vista diferentes. Se han dejado las zonas de solape sin corregir para apreciar la coincidencia geométrica.

En la Figura 12 se muestra la superficie de proyección en una sola captura, se puede apreciar la continuidad geométrica perfecta.



Fig. 12: Captura completa de la superficie de proyección final.

4. CONCLUSIONES

Se puede afirmar que se ha desarrollado un método que cumple satisfactoriamente con todos los objetivos definidos:

- Completamente automático. No se requiere de ninguna intervención manual, esto hace que el usuario final del sistema de proyección pueda recalibrar por sí mismo el sistema en caso de desajustes
- No se conoce de forma exacta la forma de la super-

ficie de proyección y no es necesario colocar marcas fiduciales en ella. El único dato que se conoce de la superficie en la que se proyecta es que se trata de una superficie curvada alrededor del usuario que se puede aproximar a un cilindro. Este es el tipo más común en cuanto a superficies de proyección panorámicas

- *Hardware* de bajo coste. Se puede llevar a cabo la calibración del sistema con una cámara convencional de tipo webcam, no es necesario tener una cámara de gran resolución ya que la calibración se hace tomando varias vistas de manera que se puede calibrar con precisión una gran superficie.
- No es necesaria una calibración previa de la cámara o los proyectores. El uso de modelos basados en superficies racionales de Bezier permite establecer relaciones entre los proyectores, la cámara y las superficies de proyección sin necesidad de considerar las distorsiones presentes en la cámara o los proyectores.

La novedosa aplicación de técnicas de composición de imágenes panorámicas a la calibración de sistemas de proyección multi-proyector ha hecho posible el desarrollo de la metodología descrita en el presente trabajo gracias a la cual es posible corregir sistemas de proyección panorámicos de forma rápida y sencilla.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Brown R, Majumder A, Yang R. "Camera-Based Calibration Techniques for Seamless Multiprojector Displays". En: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. March, 2005. Vol 11-2. p.193-206. <http://dx.doi.org/10.1109/TVCG.2005.27> PMID:15747642
- [2] Raskar R, Baar J, Willwacher T et al. "Quadric Transfer Function for Immersive Curved Screen Displays". En: Proceedings of EUROGRAPHICS, 2004. Vol 23-3. p.451-460.
- [3] Raskar R, Brown M, Yang R et al. "Multi projector displays using camera based registration". En: Proceedings of the conference on Visualization, 1999. IEEE Computer Society, San Francisco, California, USA, p.161-168.
- [4] Harville M, Culbertson B, Sobel I et al. "Practical Methods for Geometric and Photometric Correction of Tiled Projector". En: Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop. 2006. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, p.5
- [5] Wei S, Sobel I, Culbertson B et al. "Calibrating multi-projector cylindrically curved displays for "wallpaper" projection". En: PROCCAMS, 2008. ACM, Marina del Rey, California, p.1-8.
- [6] Sajadi B, Majumder A. "Markerless View-Independent Registration of Multiple Distorted Projectors on Extruded Surfaces Using an Uncalibrated Camera. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009. p.1307-

1316. <http://dx.doi.org/10.1109/TVCG.2009.166>
PMid:19834203

- [7] Sajadi B, Majumder A. "Auto-calibration of cylindrical multi-projector systems". En: Proceedings of the 2010 IEEE Virtual Reality Conference, 2010. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA. p.155-162. <http://dx.doi.org/10.1109/VR.2010.5444797>
- [8] Szeliski R. "Image alignment and stitching: a tutorial". En: Foundation and Trends in Computer Graphics and Vision, 2006. p.1-104. <http://dx.doi.org/10.1561/0600000009>
- [9] Horn E, Kiryati N. "Toward optimal structured light patterns". En: International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling 1997, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA. p.28-35
- [10] Bhasker E, Majumder A. "Geometric Modeling and Calibration of Planar Multi-Projector Displays Using Rational Bezier Patches" En: Computer Vision and Pattern Recognition, 2007. CVPR '07. IEEE Computer Society. p.1-8.
- [11] Marquardt D. "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters". En: SIAM Journal on Applied Mathematics, 1963. Vol.11-2. p. 431-441.
- [12] Szeliski R, Shum H-Y. Creating full view panoramic image mosaics and environment maps. En: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '97), 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, USA, p.251-258.
- [13] Wolff D. OpenGL 4.0 Shading Language Cookbook. Packt Publishing. 2011. ISBN: 978-1849514767
- [14] Zoido C, Maroto J, Felez J et al. Optimized methods for multi-projector display correction. En: International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 2012. p.1-13.