

# REALIZACIÓN DE UN ESCÁNER 3D USANDO UN PROYECTOR Y UNA CÁMARA. CALIBRACIÓN

Anna Arias i Duart

Tutor: Antonio Albiol Colomer

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela  
Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación  
de la Universitat Politècnica de València, para la  
obtención del Título de Graduado en Ingeniería de  
Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2014-15

Valencia, 1 de julio de 2015

## Resumen

El escáner objeto de estudio de este proyecto está formado por un proyector y una cámara web. Éste no necesita contacto directo con el objeto que se pretende escanear, sino que, mediante la información que obtenemos de la interacción de la luz con el objeto conseguiremos la reconstrucción de éste.

Para obtener la nube de puntos lo más precisa y fiable posible, en primer lugar se debe calibrar tanto la cámara como el proyector del sistema. Por este motivo, el proyecto se ha dividido en dos partes, esta primera parte corresponde a la calibración y la segunda se centrará en la obtención de la nube de puntos.

Por una parte, lo que se pretende conseguir con la calibración de la cámara será un modelo de la geometría de la cámara así como un modelo de la distorsión de la lente. Estos dos modelos serán los llamados parámetros intrínsecos de la cámara.

Por otra parte, entendiendo el proyector como el sistema inverso de la cámara (la luz viaja en el sentido contrario al de la cámara), también será necesaria la obtención de los parámetros intrínsecos del proyector.

Finalmente, se deberán calcular los parámetros extrínsecos, y poder así saber la matriz de rotación y el vector de traslación, que indican cómo han estado rotados y trasladados los ejes del proyector respecto de la cámara.

## Resum

L'escàner objecte d'estudi d'aquest projecte està format per un projector i una càmera web. Aquest no necessita contacte directe amb l'objecte que es pretén escanejar, sinó que mitjançant la informació que s'obté de la interacció de la llum amb l'objecte aconseguirem la reconstrucció d'aquest.

Per a obtenir un núvol de punts el més precís possible i fiable, en primer lloc s'ha de calibrar tant la càmera com el projector del sistema. Per aquest motiu, el projecte s'ha dividit en dues parts, aquesta primera correspon al calibratge i la segona es centrarà en l'obtenció del núvol de punts.

D'una banda el que es pretén aconseguir amb el calibratge de la càmera serà un model de la geometria de la càmera així com un model de distorsió de la lent. Aquests dos models seran els que s'anomenen els paràmetres intrínsecs de la càmera.

Per un altra part, entenent el projector com el sistema invers de la càmera (la llum viatja en sentit contrari al de la càmera), també serà necessària l'obtenció dels paràmetres intrínsecs del projector.

Finalment, es deuran calcular els paràmetres extrínsecs, i poder així saber la matriu de rotació i el vector translació, els quals ens indiquen com han estat rotats i com han estat traslladats els eixos del projector respecte de la càmera.

## Abstract

The scanner object of study of this project is not based in a contact method, it does not need direct contact with the object. It can be reconstructed with the information obtained from the interaction of the light with the object.

In order to obtain a reliable and accurate point cloud, first, the projector and the camera of the system must be calibrated. For this reason the project is divided in two parts, this first part is about the calibration and the second part consist of obtaining the point cloud.

On the one hand, what is being sought is a model of the camera's geometry as well as a model of the distortion lens. These two models will be called the intrinsic parameters of the camera.

On the other hand, understanding the projector as the inverse camera system (the light in the projector travels in the opposite way than in the camera), it is also necessary to obtain the intrinsic parameters of the projector.

Finally, it must be calculated the extrinsic parameters and in this way it is possible to know how have been rotated and moved the camera axis from the projector axis.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
1.1. Estructura del documento . . . . .	4
<b>2. Modelo de cámara</b>	<b>5</b>
<b>3. Calibración de la cámara</b>	<b>9</b>
3.1. Aspectos prácticos . . . . .	11
<b>4. Calibración del proyector</b>	<b>15</b>
4.1. Aspectos prácticos . . . . .	17
<b>5. Parámetros extrínsecos</b>	<b>21</b>
<b>6. Resultados</b>	<b>23</b>
6.1. Parámetros intrínsecos de la cámara . . . . .	23
6.2. Parámetros intrínsecos del proyector . . . . .	24
6.3. Parámetros extrínsecos . . . . .	27
<b>7. Conclusiones</b>	<b>29</b>



# Capítulo 1

## Introducción

El objetivo de este proyecto es construir un escáner 3D usando un proyector y una cámara web. El montaje utilizado se muestra en las siguientes imágenes:



Figura 1.1: Configuración utilizada.

El método seguido para encontrar los puntos tridimensionales se basa en las matemáticas de triangulación. En la Figura 1.2 se representa el principio. El punto tridimensional se haya donde el plano proyectado de luz interseca con el rayo de la cámara.

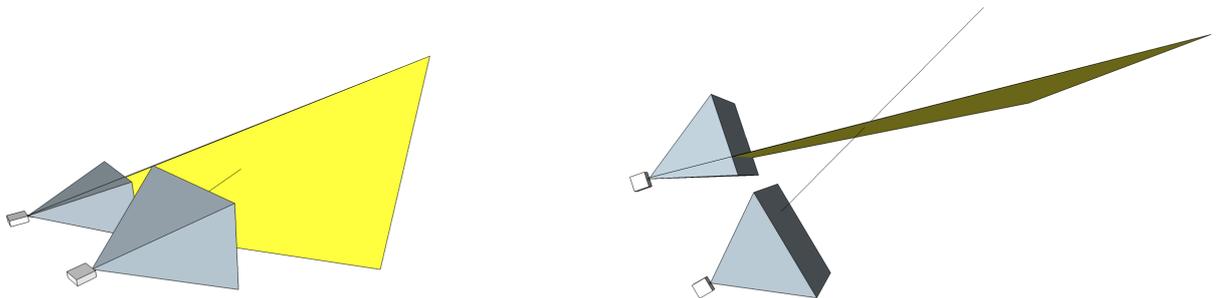


Figura 1.2: Intersección del plano proyectado de luz y el rayo de la cámara.

Para obtener unos resultados exitosos previamente se debe realizar una buena calibración. Este proyecto ha sido dividido en dos partes. La primera se centra en la calibración y es la que se describe en esta memoria. La segunda se centra en obtener las medidas propiamente dichas usando la calibración obtenida en la primera parte.

La calibración tiene tres fases claramente diferenciadas. En primer lugar, se calibra la cámara y con ello se obtienen los parámetros intrínsecos de la misma. El segundo paso, se centra en la calibración del proyector. Finalmente, se calculan los parámetros extrínsecos, que determinan la posición relativa entre cámara y proyector.

## 1.1. Estructura del documento

El resto del documento se organiza del siguiente modo:

- **Capítulo 2: Modelo de cámara.**  
Se describe el modelado geométrico de las cámaras.
- **Capítulo 3: Calibración de la cámara.**  
Se detalla el procedimiento práctico para obtener los parámetros intrínsecos de la cámara.
- **Capítulo 4: Calibración del proyector.**  
Este capítulo se centra en la obtención de los parámetros intrínsecos del proyector. Un proyector es una cámara inversa, la luz viaja en sentido contrario. No obstante, como el proyector genera imágenes, pero no las captura, el método será diferente.
- **Capítulo 5: Parámetros extrínsecos de calibración.**  
Se explica como una vez calibrados la cámara y el proyector, se puede obtener la posición relativa entre los mismos.
- **Capítulo 6: Resultados.**  
Se analizan e interpretan los resultados obtenidos en los capítulos anteriores.
- **Capítulo 7: Conclusiones.**  
Se explican las conclusiones que se han obtenido a lo largo del trabajo.

## Capítulo 2

# Modelo de cámara

Los parámetros intrínsecos se definen por la matriz de parámetros intrínsecos, que proporciona un modelo de la geometría de la cámara, y por los coeficientes de distorsión, que ofrecen un modelo de distorsión de las lentes.

Para entender la matriz de parámetros intrínsecos, a continuación, se explica el modelo de cámara *pinhole* o de agujero de alfiler. Este modelo consiste en una pared imaginaria con un pequeño orificio, que bloquea todos los rayos excepto aquellos que son capaces de pasar a través del agujero. En la Figura 2.1 a) se ilustra la relación entre las coordenadas de un punto tridimensional y su proyección en el plano de la imagen, en el caso de una cámara de este tipo.

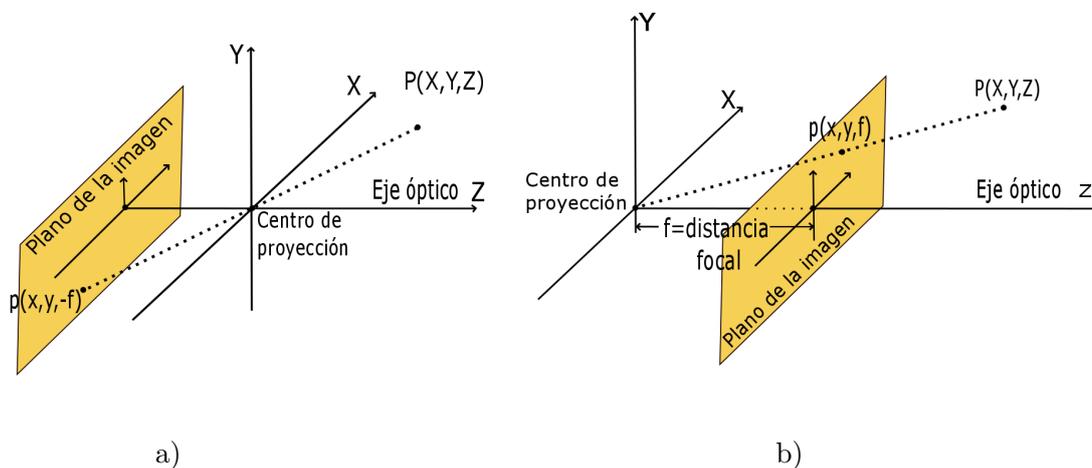


Figura 2.1: Modelo *pinhole*.

Considerando como punto en el espacio el punto representado en la Figura 2.1 a) como  $P(X, Y, Z)$ , dicho punto genera una proyección mediante un rayo que pasa por el centro de proyección e interseca en el plano de la imagen. La proyección de  $P$  será el punto  $p(x, y, -f)$ , donde  $f$  es la denominada distancia focal y que no es otra cosa que la distancia desde el plano de la imagen hasta el centro de proyección, que se supone situado en el origen  $(0, 0, 0)$ . Las coordenadas  $x$  e

y vienen dadas por las coordenadas siguientes:

$$x = -f \frac{X}{Z} \quad y = -f \frac{Y}{Z} \quad (2.1)$$

Con el fin de evitar el signo negativo de la Ecuación 2.1, normalmente se suele considerar que el plano de la imagen se encuentra delante del centro de proyección tal y como se muestra en la Figura 2.1 b). Considerando este aspecto, las ecuaciones anteriores se transforman en:

$$x = f \frac{X}{Z} \quad y = f \frac{Y}{Z} \quad (2.2)$$

Por tanto, si los puntos del mundo y los puntos de la imagen se representan con vectores de coordenadas homogéneas, es simple obtener la matriz de transformación. Esta matriz puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} fX \\ fY \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Utilizando las ecuaciones anteriores, el origen del sistema de coordenadas de la cámara (0, 0) debería estar en el centro de la imagen. En cambio, habitualmente se considera que el origen se encuentra en la esquina superior izquierda. Teniendo en cuenta esto, se añade una traslación a este modelo.

$$x_{imagen} = f \left( \frac{X}{Z} \right) + c'_x \quad y_{imagen} = f \left( \frac{Y}{Z} \right) + c'_y \quad (2.4)$$

Y la matriz de transformación será:

$$M = \begin{pmatrix} f & 0 & c'_x \\ 0 & f & c'_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

La matriz anterior está expresada en unidades métricas (mm,cm,...). En cambio, las coordenadas de la imagen normalmente se expresan en píxeles. Para convertir mm a píxeles se introducirá la frecuencia de muestreo. Puede darse el caso que las frecuencias de muestreo (píxeles que no son cuadrados) sean diferentes en la dirección  $X(f_{sx})$  y en la dirección  $Y(f_{sy})$ .

$$\begin{pmatrix} f_{sx} & 0 & 0 \\ 0 & f_{sy} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f & 0 & c'_x \\ 0 & f & c'_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{sx}f & 0 & f_{sx}c'_x \\ 0 & f_{sy}f & f_{sy}c'_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Finalmente, la matriz de parámetros intrínsecos expresada en píxeles queda de la siguiente manera:

$$M = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Por otra parte, para obtener suficiente luz en el sensor se necesitan lentes. Éstas no son ideales e introducen cierta distorsión (distorsión radial y distorsión tangencial). La distorsión se

modela con unos polinomios viniendo caracterizada por los coeficientes de los mismos. Para más detalles consúltese [1].

Como ejemplo, a continuación se ilustra una imagen de un cuadrado cuando sufre distorsión radial y el mismo cuadrado, después de haber sido corregida esta distorsión.



Figura 2.2: Distorsión radial.



## Capítulo 3

# Calibración de la cámara

Para la calibración de la cámara es necesario tener una serie de imágenes captadas por la misma, donde aparezcan una serie de puntos en la escena, cuyas coordenadas reales en 3D en el espacio sean conocidas. Para obtener esta correspondencia entre las coordenadas del mundo (en mm) y las coordenadas de la imagen de forma automática, se utilizan objetos de calibración. Éstos son objetos planos con una rejilla de puntos regularmente espaciados. Por una parte, el hecho de que los objetos de calibración sean planos hace que la coordenada Z de todos los puntos en 3D se considere cero. Por otro lado, el hecho de que tengan rejillas regulares de puntos, facilita la descripción de las coordenadas mediante listas de puntos que se pueden generar con bucles.

Como objetos de calibración se han utilizado los siguientes tableros:

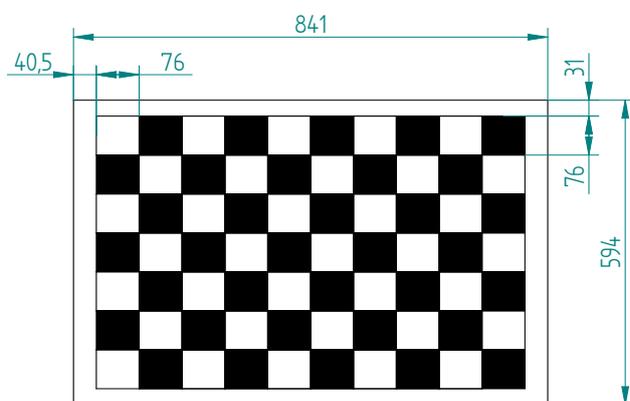


Figura 3.1: Tablero de ajedrez.

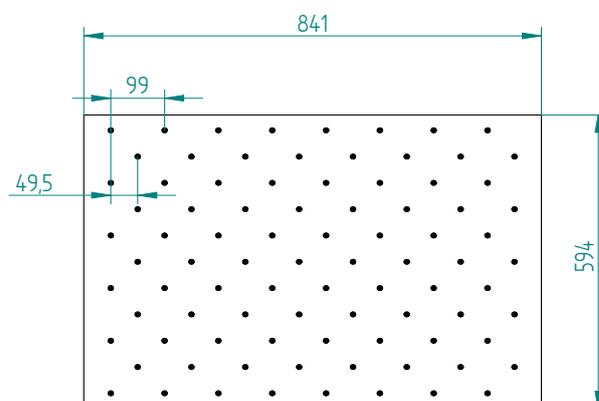


Figura 3.2: Tablero de círculos.

A continuación, en la Figura 3.3 se muestran dos ejemplos de imágenes utilizadas para la calibración de la cámara. Se necesitan un mínimo de dos imágenes. Normalmente, se toman entre 5 y 20, ya que esto permite conseguir resultados más precisos.

La Librería OpenCV proporciona algoritmos automáticos que detectan las esquinas de los tableros de ajedrez y algoritmos que detectan los centros de los círculos en los tableros de círculos. Un aspecto interesante es que devuelven los puntos con un orden conocido. Esto simplificará el proceso para determinar la correspondencia entre los puntos detectados en las imágenes y su



Figura 3.3: Imágenes utilizadas para la calibración de la cámara.

correspondiente coordenada en el mundo real. En la Figura 3.4 se pueden observar las esquinas detectadas por la función *findChessboardCorners* proporcionada por OpenCV.



Figura 3.4: Esquinas interiores detectadas.

Llegado a este punto, se debe tener una lista de puntos en 3D del objeto de calibración y sus correspondientes puntos en una colección de imágenes. Para entender esto mejor, en el Cuadro 3.1 y en el Cuadro 3.2, se muestran los puntos de la última columna del tablero de la Figura 3.4 a) en 3D y sus proyecciones en la imagen.

$x$	$y$	$z$
608	0	0
608	76	0
608	152	0
608	228	0
608	304	0
608	380	0

Cuadro 3.1: Puntos del tablero en 3D.

$x$	$y$
1118.6212	120.6774
1119.5476	219.52089
1120.5	322.5
1122.0172	425.79086
1122.0073	530.69427
1124.1608	635.79486

Cuadro 3.2: Proyecciones de los puntos.

Finalmente, con esta correspondencia de puntos, se utiliza la función *calibrateCamera* proporcionada por la Librería OpenCV. Esta función minimiza el error de reproyección, implementando un algoritmo iterativo de minimización no lineal. Aparte de los parámetros intrínsecos y la distorsión de las lentes, la función proporciona información sobre la posición 3D de la cámara con respecto del objeto de calibración en cada una de las imágenes, véase Figura 3.5 y Figura 3.6.

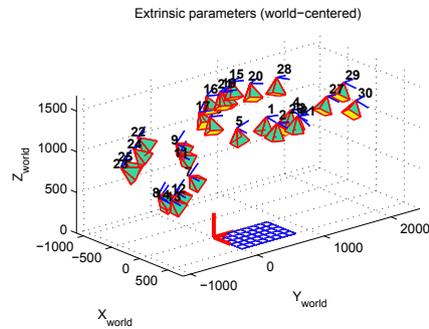


Figura 3.5: Posición 3D de la cámara con respecto al sistema de coordenadas del objeto de calibración.

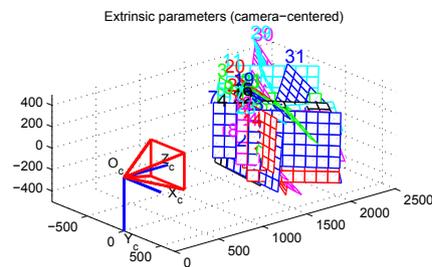


Figura 3.6: Posición del objeto de calibración con respecto al sistema de coordenadas de la cámara.

### 3.1. Aspectos prácticos

En esta sección se dan una serie de consejos que se deben tener en cuenta para conseguir una buena calibración.

- Las imágenes deben contener puntos en todas las partes de la imagen y ser tomadas con diferentes ángulos. Véase la colección de imágenes que se ha utilizado, Figura 3.7.

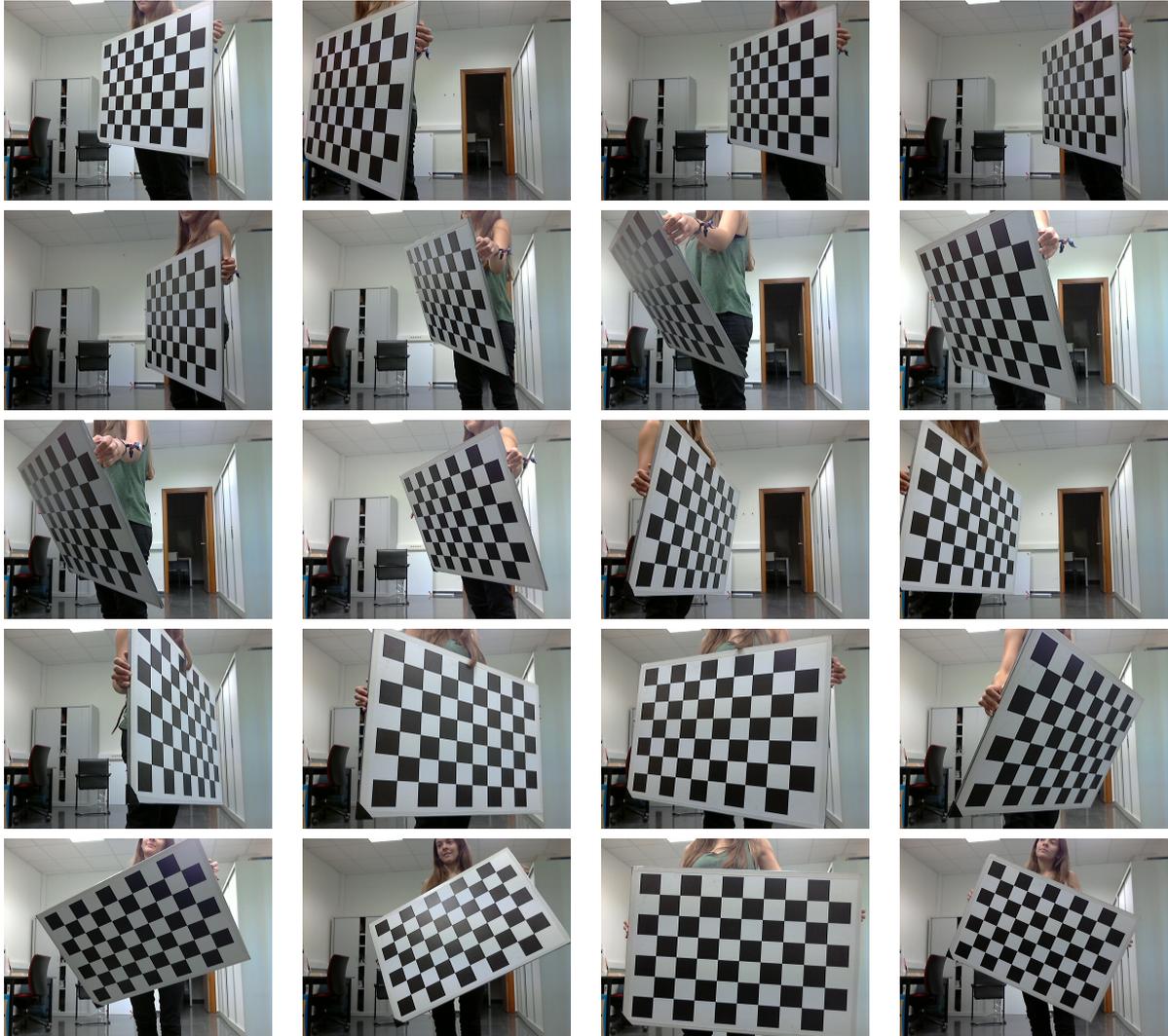


Figura 3.7: Conjunto de imágenes para la calibración de la cámara.

- En el caso del tablero de ajedrez, el fondo debe ser blanco para que OpenCV detecte correctamente las esquinas (Véase Figura 3.8 y Figura 3.9).

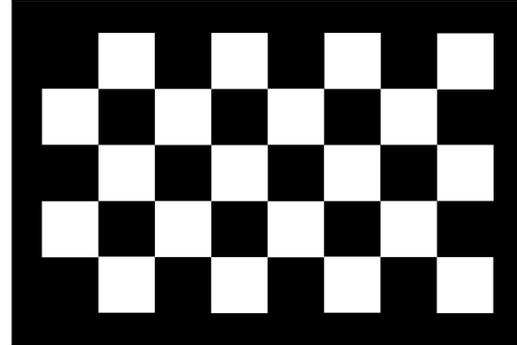
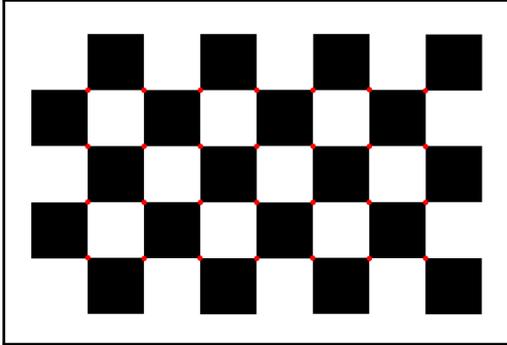


Figura 3.8: Tablero de ajedrez con el fondo blanco. OpenCV detecta correctamente las esquinas.

Figura 3.9: Tablero de ajedrez con fondo negro. OpenCV no detecta las esquinas.

- El algoritmo que detecta las esquinas necesita como parámetros de entrada el número de esquinas en la dirección horizontal y vertical. Este número corresponde a las esquinas interiores. En el caso de la Figura 3.10, el número de esquinas interiores en la dirección  $X$  es cuatro y en la dirección  $Y$  siete.

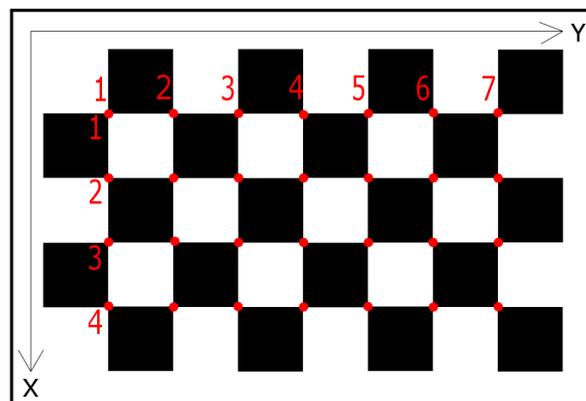


Figura 3.10: Tablero de ajedrez de tamaño 4x7.

- En el caso del tablero de círculos, los círculos deben ser negros y el fondo blanco para que OpenCV detecte los centros de los mismos correctamente.
- En el caso de rejillas de círculos asimétricas, como la de la Figura 3.11, el número de filas debe ser impar. Si el número de filas es par, el algoritmo de OpenCV ordena los círculos incorrectamente (al menos en la versión 2.4.11), véase Figura 3.12.

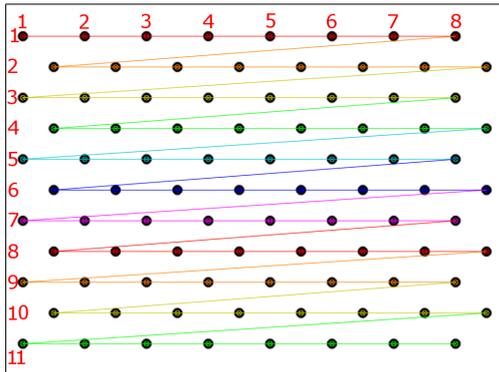


Figura 3.11: Tablero de círculos de tamaño 8x11.

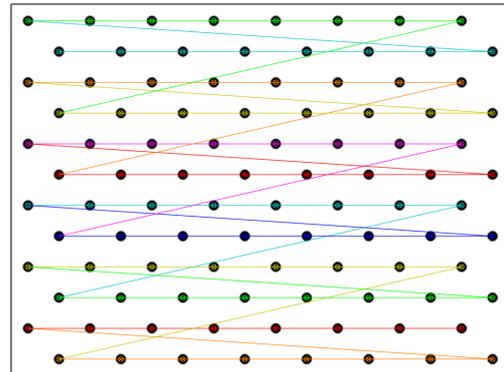


Figura 3.12: Patrón de círculos con número de filas par. OpenCV ordena los círculos incorrectamente.

- Es importante capturar imágenes con la misma resolución con la que se va a escanear el objeto. De lo contrario, los parámetros intrínsecos de la cámara serán diferentes.

## Capítulo 4

# Calibración del proyector

El proyector actúa como una cámara inversa. La luz sale del proyector, mientras que en el caso de la cámara la luz entra. No obstante, la geometría es prácticamente la misma.

Para calibrar el proyector también es necesario tener un conjunto de imágenes proyectadas, y para cada imagen un conjunto de correspondencias entre los puntos de la imagen (proyectados) y sus correspondientes puntos en 3D (en mm).

En el caso de la cámara, las coordenadas 3D eran conocidas (porque estas se medían en el tablero de ajedrez) y las correspondientes coordenadas en la imagen, se detectaban automáticamente.

En cambio, en el caso del proyector, las coordenadas de la imagen son conocidas y corresponden a los puntos de la imagen proyectada (normalmente un tablero de ajedrez o un patrón de círculos, véase Figura 4.1 y Figura 4.2). La dificultad viene con las coordenadas 3D, las coordenadas 3D de los puntos proyectados no se conocen. Por lo tanto, se necesita un procedimiento automático y lo más preciso posible para determinar los correspondientes puntos 3D en el espacio.

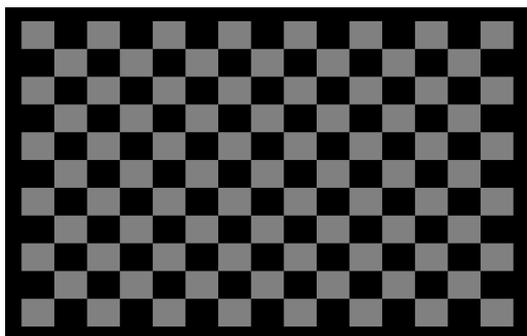


Figura 4.1: Tablero de ajedrez.

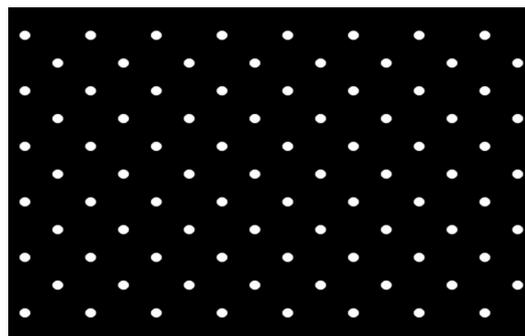


Figura 4.2: Patrón de círculos.

Para conseguir esto, se proyecta una imagen (Figura 4.1 o Figura 4.2) sobre un tablero plano. Como el origen de coordenadas en el espacio puede ser elegido arbitrariamente, se asume que todos los puntos proyectados tienen la coordenada  $Z = 0$ . Para determinar las coordenadas  $X$  e  $Y$  de los puntos proyectados (en mm) el tablero sobre el que se proyecta tiene cuatro marcadores en posiciones conocidas.

Estos son los dos tipos de tableros diseñados:

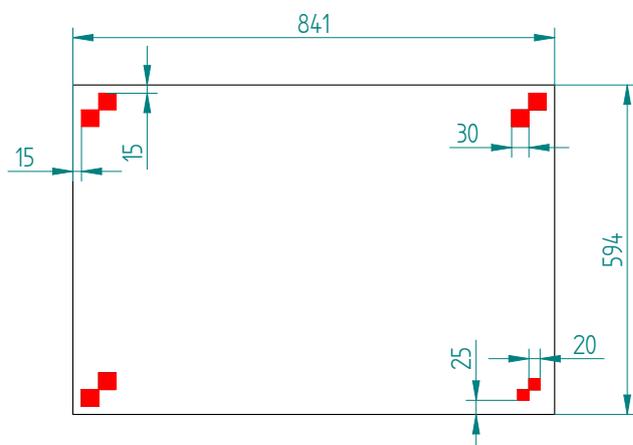


Figura 4.3: Marcadores rojos

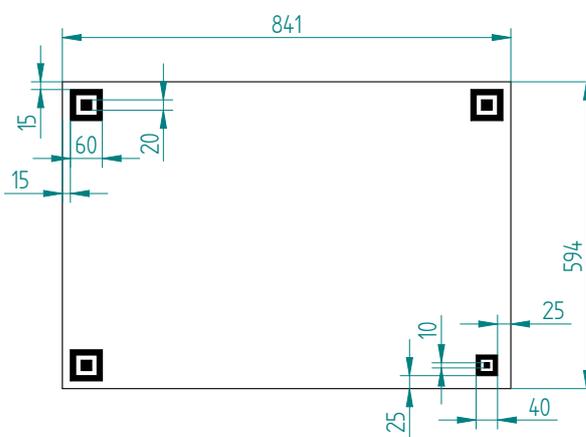
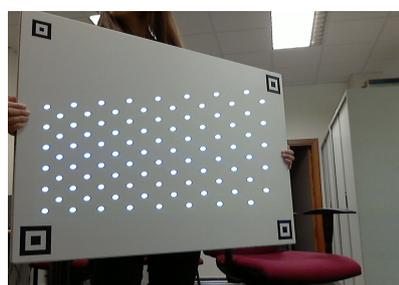
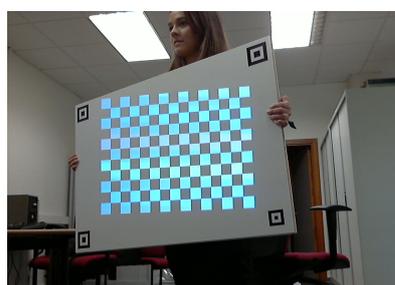


Figura 4.4: Marcadores QR

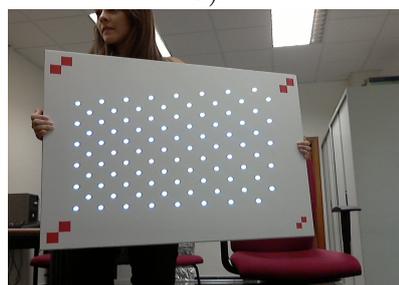
Con la finalidad de automatizar el proceso, y no tener que medir las coordenadas de los puntos proyectados manualmente, se utiliza la cámara (que ha sido calibrada previamente) para determinar dichas coordenadas.



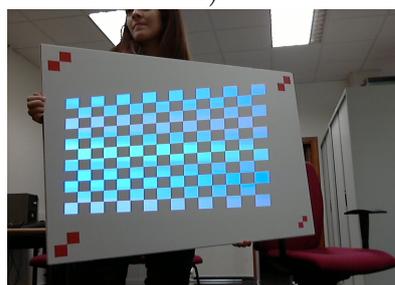
a)



b)



c)



d)

Figura 4.5: Imágenes capturadas por la cámara de los diferentes tableros y patrones proyectados.

Utilizando los cuatro marcadores, es posible determinar la matriz de homografía que pasa de coordenadas donde los marcadores están en la imagen (en unidades de píxel) a las coordenadas conocidas de los marcadores en el espacio (en mm). Aplicando la misma homografía a las posiciones detectadas en la imagen de los puntos proyectados, se obtienen las coordenadas de los puntos en 3D (véase Figura 4.6).

Uno de los marcadores se ha diseñado intencionadamente más pequeño que los otros tres, esto permite hallar la matriz homografía de forma correcta. En las siguientes imágenes se puede observar como después de haber aplicado la homografía a la imagen tomada por la cámara, el marcador pequeño siempre se sitúa en la esquina derecha de la parte inferior.

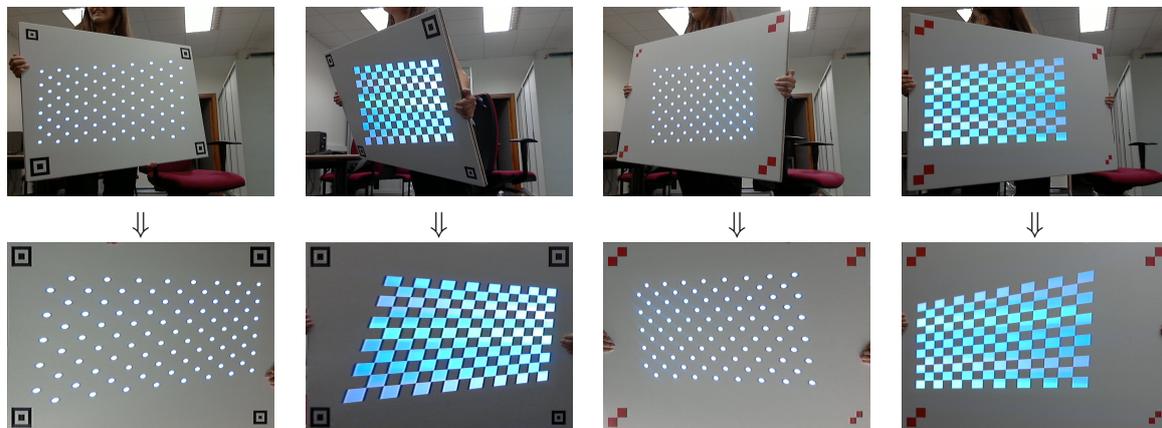


Figura 4.6: Transformación proyectiva.

Por tanto, la posición de los puntos 2D de los puntos proyectados es la misma para todas las imágenes. En cambio, la posición de los puntos 3D es diferente dependiendo de la posición del tablero.

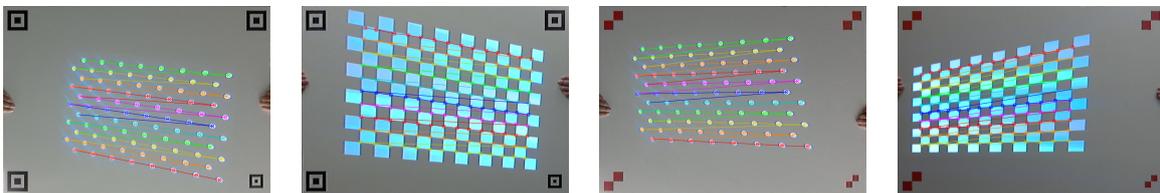


Figura 4.7: Puntos 3D detectados.

Finalmente, con esta correspondencia de puntos se utiliza la función *calibrateCamera* proporcionada por la Librería OpenCV, para calcular los parámetros intrínsecos del proyector.

## 4.1. Aspectos prácticos

En este apartado se destacan algunos aspectos que se deben tener en cuenta para conseguir una buena calibración del proyector.

- Las imágenes deben tomarse en diferentes ángulos. Véase una colección de imágenes utilizada para la calibración del proyector, Figura 4.8.
- El patrón proyectado debe tener el fondo negro. Si el patrón proyectado tiene el fondo blanco, la cámara no es capaz de capturar tanta luz y como consecuencia aparecerán en la imagen capturada franjas de colores, véase Figura 4.9.

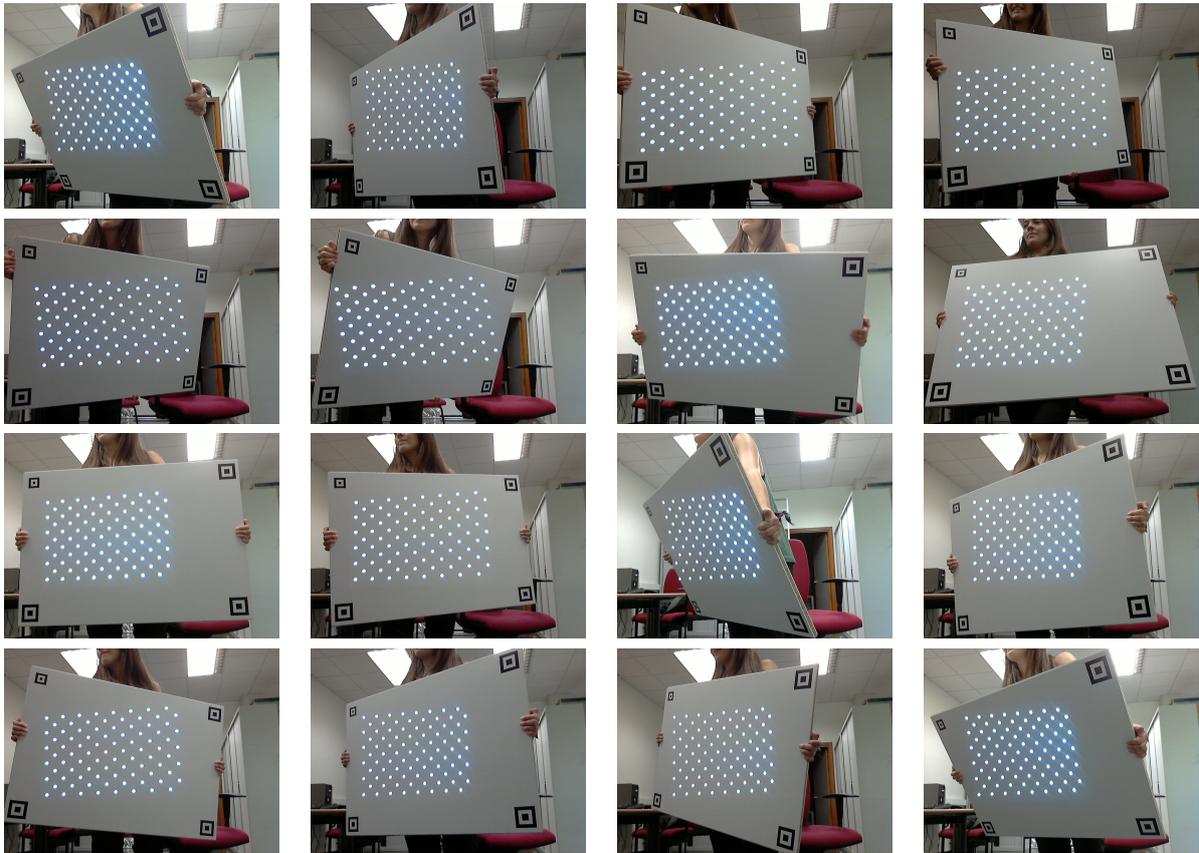


Figura 4.8: Conjunto de imágenes para la calibración del proyector.

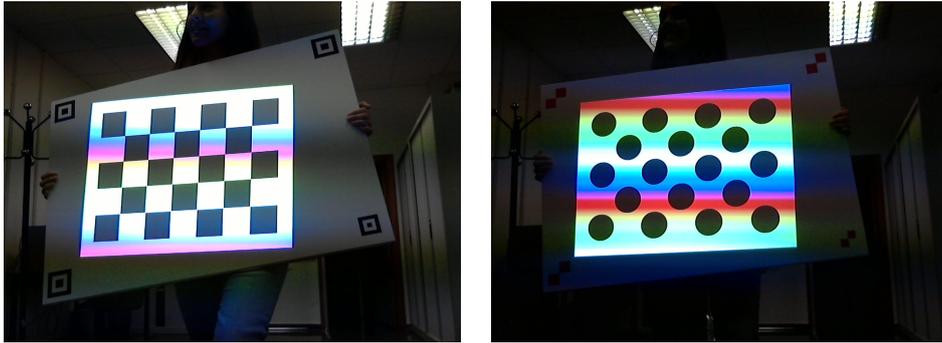


Figura 4.9: Franjas de colores.

- El algoritmo de OpenCV para detectar círculos y esquinas funciona si el patrón tiene el fondo negro, como se explicó en la sección 3.1. Por tanto, para que funcione correctamente el conjunto de imágenes deben ser invertidas, es decir, el fondo debe ser claro y los cuadrados y los círculos negros, véase Figura 4.10.

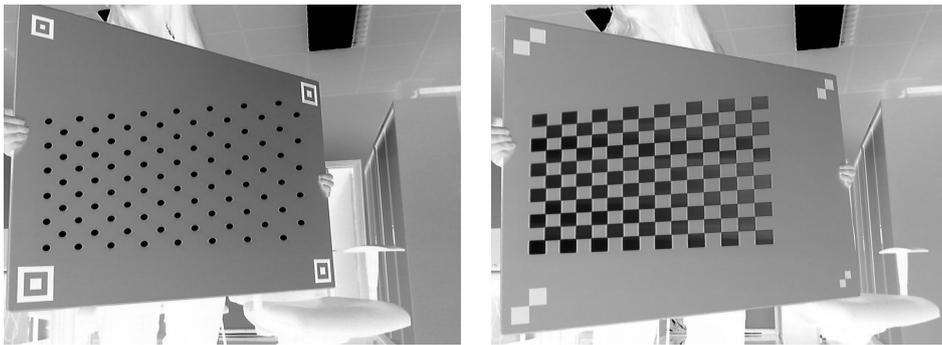


Figura 4.10: Imágenes invertidas.

- Excepto el fondo, el resto de características del tablero de ajedrez proyectado así como del patrón de círculos deben ser las mismas que las descritas para los tableros de calibración de la cámara (véase sección 3.1).



## Capítulo 5

# Parámetros extrínsecos

Los parámetros extrínsecos determinan la posición relativa entre la cámara y el proyector. Éstos vienen determinados por el vector de traslación y la matriz de rotación.

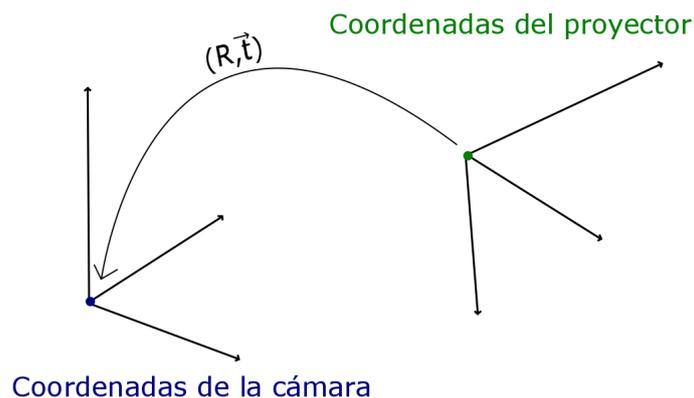


Figura 5.1: Parámetros extrínsecos.

La Librería de OpenCV proporciona la función *stereoCalibrate* la cual realiza la calibración estéreo de dos cámaras. Ésta función necesita como parámetros de entrada:

1. La lista de puntos del objeto de calibración en coordenadas 3D.
2. Las proyecciones de los puntos del patrón de calibración, observadas por la cámara izquierda.
3. Las proyecciones de los puntos del patrón de calibración, observadas por la cámara derecha.

Para la obtención de los parámetros extrínsecos del escáner también se utiliza esta función, pero con la siguiente particularidad: la cámara izquierda es el proyector, por tanto, las proyecciones de los puntos del patrón de calibración, observadas por la cámara izquierda, serán los

puntos que proyecta dicho proyector (siempre se proyecta el mismo patrón, ya sea el tablero de ajedrez o el patrón de círculos).

En las siguientes imágenes se intenta ilustrar las tres listas de puntos que necesita la función *cameraCalibrate* para la calibración del escáner. Como se puede observar, los puntos que proyecta el proyector son siempre los mismos (2). En cambio, tanto los puntos del objeto de calibración en coordenadas 3D (1), como las proyecciones de los puntos del patrón de calibración, observadas por la cámara (3), varían según la posición del tablero.

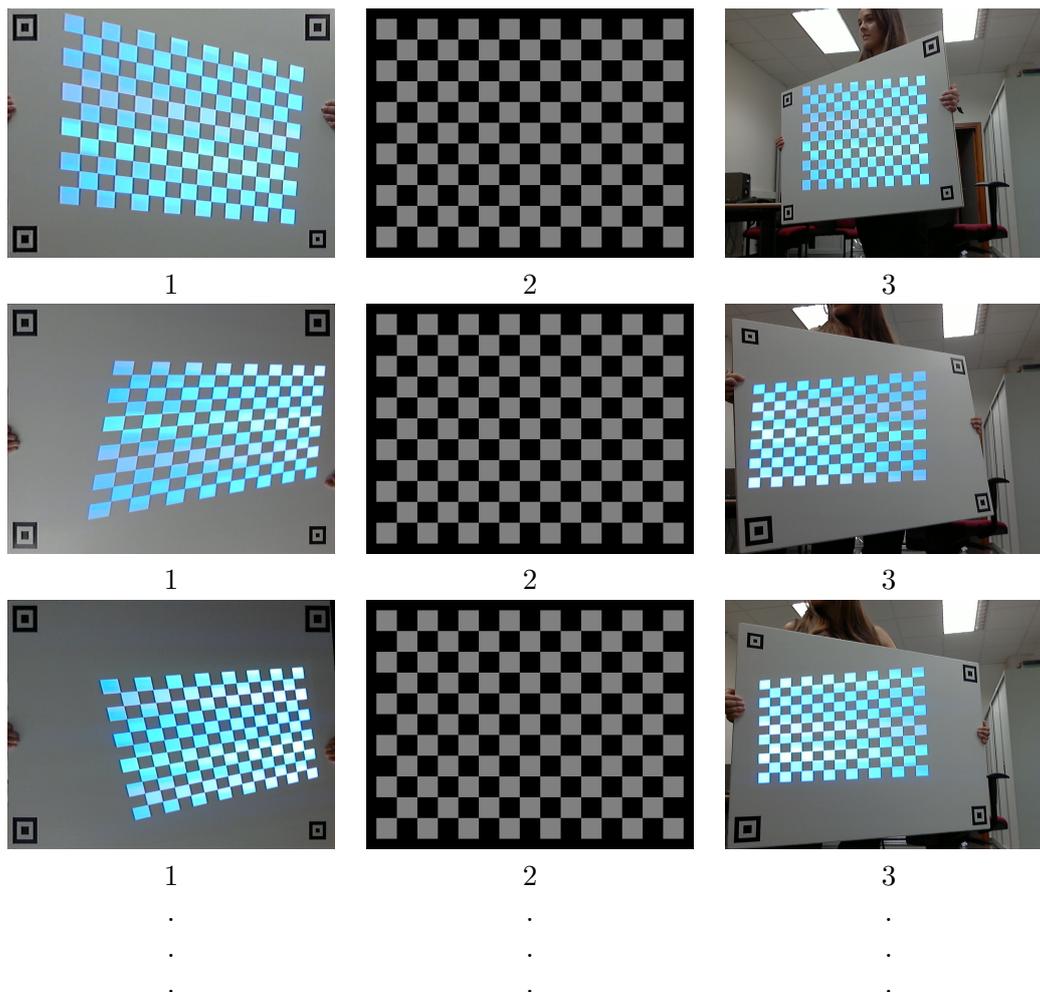


Figura 5.2: Parámetros de entrada de la función *stereoCalibrate* para la calibración del escáner.

Finalmente, con estos tres parámetros de entrada y con los parámetros intrínsecos de la cámara (calculados anteriormente) la función *stereoCalibrate* devuelve el vector de traslación y la matriz de rotación.

Como aspecto práctico, se debe destacar que esta función, además de los parámetros extrínsecos de las dos cámaras, también obtiene los intrínsecos, que va refinando y actualizando en cada iteración. Ahora bien, en el caso del escáner debemos fijar los parámetros intrínsecos, de lo contrario, los puntos 3D del espacio deberían ser modificados cada iteración, ya que éstos dependen a su vez de los parámetros intrínsecos.

## Capítulo 6

# Resultados

Una vez obtenidos los parámetros intrínsecos y extrínsecos, es necesario estudiar los resultados, analizar si son o no coherentes y finalmente escoger aquellos que sean más precisos y tengan un error más bajo.

### 6.1. Parámetros intrínsecos de la cámara

La matriz de parámetros intrínsecos de la cámara, que se ha obtenido para una resolución de 1280x960, es la siguiente:

$$M_{cam} = \begin{pmatrix} f_{xcam} & 0 & c_{xcam} \\ 0 & f_{ycam} & c_{ycam} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1410,35 & 0 & 649,91 \\ 0 & 1402,07 & 491,23 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

Con estos datos, una de las características que se pueden obtener son los ángulos en azimut y elevación del campo de visión de la cámara. De este modo, se puede comprobar si coinciden o no con lo esperado.

Por tanto, sabiendo que la resolución es 1280x960 y aplicando trigonometría (véase Figura 6.1 y Figura 6.2) se puede obtener  $\beta$  y  $\varphi$ , que son el ángulo en azimut y en elevación del campo de visión de la cámara, respectivamente.

$$\beta_1 = \text{atan}\left(\frac{c_{xcam} - 0}{f_{xcam}}\right) \simeq 24,7^\circ \quad \beta_2 = \text{atan}\left(\frac{1280 - c_{xcam}}{f_{xcam}}\right) \simeq 24,1^\circ \quad \beta = \beta_1 + \beta_2 \simeq 48,8^\circ \quad (6.2)$$

$$\varphi_1 = \text{atan}\left(\frac{c_{ycam} - 0}{f_{ycam}}\right) \simeq 19,3^\circ \quad \varphi_2 = \text{atan}\left(\frac{960 - c_{ycam}}{f_{ycam}}\right) \simeq 18,5^\circ \quad \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \simeq 37,8^\circ \quad (6.3)$$

Finalmente, se obtiene que el ángulo en azimut es  $48,8^\circ$  y el ángulo en elevación es  $37,8^\circ$ , resultado que parece coherente. Nótese que el centro de proyección se encuentra aproximadamente en el medio de la imagen, ya que como podemos observar  $c_x$  es la mitad de 1280 y  $c_y$  es la mitad de 960.

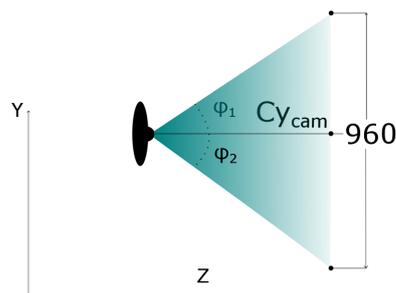
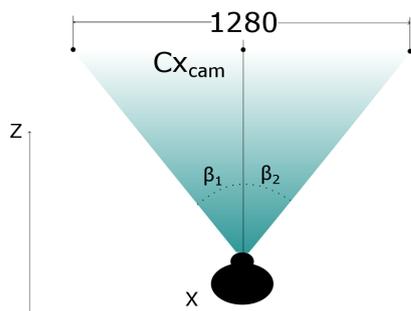


Figura 6.1: Ángulo de la cámara en azimut.      Figura 6.2: Ángulo de la cámara en elevación.

En cuanto a la distorsión, se ha observado que es muy pequeña, basta comprobar que las rectas en el mundo real se transforman en rectas en la imagen.

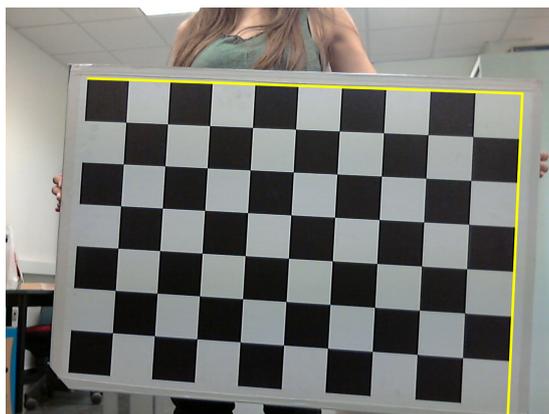


Figura 6.3: Test de distorsión.

Por tanto, para la calibración de la cámara, se asume que la distorsión es nula, con lo que se reducen los parámetros a minimizar, y se mejoran los resultados.

## 6.2. Parámetros intrínsecos del proyector

El proyector que se ha calibrado trabaja a una resolución de 1024x768. Para la calibración del proyector se han obtenido cuatro resultados diferentes, usando los dos tipos de marcadores y los dos patrones proyectados.

Es importante antes de empezar con la calibración del proyector, enfocar a la distancia que se quiere situar el objeto a escanear, ya que una vez calibrado el proyector no se podrá mover ni el foco ni el zoom. Cambiar el foco o el zoom implica invalidar la calibración. A continuación, se muestran las cuatro matrices de parámetros intrínsecos del proyector que han sido obtenidas en cada caso:

1. Marcadores QR con patrón de círculos proyectado.

$$M_{proy} = \begin{pmatrix} f_{xproy} & 0 & c_{xproy} \\ 0 & f_{yproy} & c_{yproy} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2413,30 & 0 & 504,73 \\ 0 & 2397,53 & 766,48 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

2. Marcadores rojos con patrón de círculos proyectado.

$$M_{proy} = \begin{pmatrix} f_{xproy} & 0 & c_{xproy} \\ 0 & f_{yproy} & c_{yproy} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2402,08 & 0 & 509,99 \\ 0 & 2388,50 & 727,02 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

3. Marcadores QR con patrón de tablero ajedrez proyectado.

$$M_{proy} = \begin{pmatrix} f_{xproy} & 0 & c_{xproy} \\ 0 & f_{yproy} & c_{yproy} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2318,42 & 0 & 490,83 \\ 0 & 2334,22 & 757,72 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.6)$$

4. Marcadores rojos con patrón de tablero ajedrez proyectado.

$$M_{proy} = \begin{pmatrix} f_{xproy} & 0 & c_{xproy} \\ 0 & f_{yproy} & c_{yproy} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2435,25 & 0 & 518,07 \\ 0 & 2420,71 & 735,29 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.7)$$

Se puede observar que los resultados obtenidos no son idénticos. Para tratar de estimar cuál es mejor, la función *calibrateCamera* devuelve el error de reproyección. Como se puede ver en el Cuadro 6.1 el error más bajo se obtiene con los marcadores QR y el patrón de círculos proyectado, consideraremos por tanto que los resultados más precisos son estos.

Casos	Error RMS
1	0.811978
2	0.817406
3	2.8895
4	2.47834

Cuadro 6.1: Error medio cuadrático.

Por este motivo, para estimar el ángulo en azimut y en elevación del proyector, elegiremos la distancia focal y el centro de proyección obtenidos con los marcadores QR y el patrón de círculos proyectado.

$$\Psi_1 = \operatorname{atan}\left(\frac{c_{xproy} - 0}{f_{xproy}}\right) \simeq 11,81^\circ \quad \Psi_2 = \operatorname{atan}\left(\frac{1024 - c_{xproy}}{f_{xproy}}\right) \simeq 12,14^\circ \quad \Psi = \Psi_1 + \Psi_2 \simeq 23,95^\circ \quad (6.8)$$

$$\theta_1 = \operatorname{atan}\left(\frac{c_{yproy} - 0}{f_{yproy}}\right) \simeq 17,73^\circ \quad \theta_2 = \operatorname{atan}\left(\frac{768 - c_{yproy}}{f_{yproy}}\right) \simeq 0,04^\circ \quad \theta = \theta_1 + \theta_2 \simeq 17,77^\circ \quad (6.9)$$

Analizando los resultados, se observa que mientras en la cámara el centro óptico está aproximadamente en el centro de la imagen, en el proyector en azimuth está centrado, pero en elevación se encuentra en la parte inferior de la imagen. Consecuentemente, se observa que el ángulo en elevación desde el centro hacia abajo es prácticamente  $0^\circ$ . Por tanto, el esquema de los ángulos del proyector quedaría como se muestra en la Figura 6.4 y en la Figura 6.5:

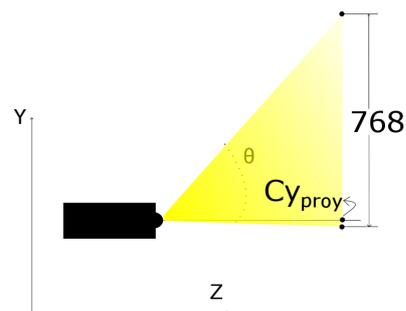
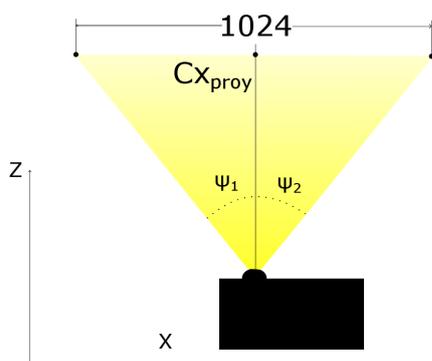


Figura 6.4: Ángulo del proyector en azimuth.      Figura 6.5: Ángulo del proyector en elevación.

Finalmente, conociendo el campo de visión de la cámara y el ángulo de proyección del proyector, tanto en azimuth como en elevación, se puede encontrar el área donde deberá situarse el objeto que se desea escanear.

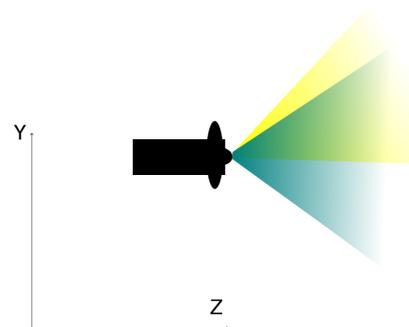
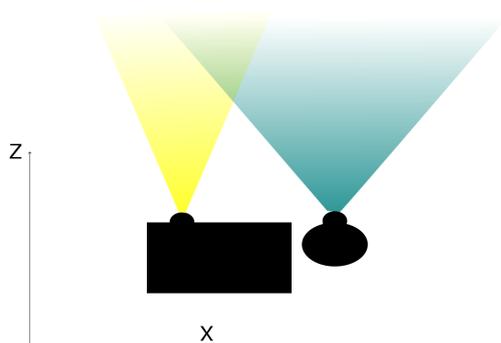


Figura 6.6: Ángulo en azimuth del proyector y de la cámara.      Figura 6.7: Ángulo en elevación del proyector y de la cámara.

Tal y como se observa en la Figura 6.6 y en la Figura 6.7 el objeto deberá situarse en la zona verde. Para conseguir aumentar esta área, la cámara ha sido girada hacia la izquierda y un poco inclinada hacia arriba, tal y como se muestra en la Figura 6.8.

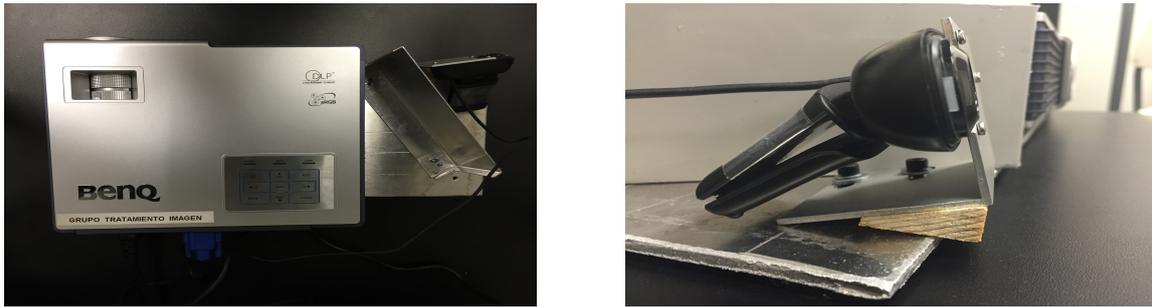


Figura 6.8: Posición de la cámara y del proyector.

### 6.3. Parámetros extrínsecos

En esta parte, se analizarán los parámetros extrínsecos. Tal y como se ha explicado, vienen definidos por la matriz de rotación y el vector de traslación. Estos parámetros posibilitan encontrar la matriz de transformación, que permite pasar de un punto 3D en el sistema de coordenadas del proyector al sistema de coordenadas de la cámara.

$$P_{cam} = MP_{proy}, \quad \begin{pmatrix} x_{cam} \\ y_{cam} \\ z_{cam} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{proy} \\ y_{proy} \\ z_{proy} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.10)$$

Como se ha explicado, se han obtenido cuatro resultados diferentes de parámetros intrínsecos, consecuentemente se tienen cuatro matrices de transformación:

1. Marcadores QR con patrón de círculos proyectado

$$M = \begin{pmatrix} 0,9873 & 0,0422 & 0,1534 & -310,9943 \\ -0,0633 & 0,9888 & 0,1352 & 14,7977 \\ -0,1460 & -0,1432 & 0,9789 & 12,4701 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.11)$$

2. Marcadores rojos con patrón de círculos proyectado.

$$M = \begin{pmatrix} 0,9873 & 0,0455 & 0,1521 & -310,1180 \\ -0,0646 & 0,9904 & 0,1225 & 15,0835 \\ -0,1451 & -0,1308 & 0,9807 & 10,3016 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.12)$$

3. Marcadores QR con patrón de tablero ajedrez proyectado.

$$M = \begin{pmatrix} 0,9880 & 0,0461 & 0,1475 & -308,8409 \\ -0,0646 & 0,9902 & 0,1236 & 14,5135 \\ -0,1403 & -0,1316 & 0,9813 & 3,9671 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.13)$$

## 4. Marcadores rojos con patrón de tablero ajedrez proyectado.

$$M = \begin{pmatrix} 0,9872 & 0,045 & 0,1527 & -308,2313 \\ -0,0645 & 0,9902 & 0,1240 & 14,7685 \\ -0,1456 & -0,1323 & 0,9805 & -2,85508 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.14)$$

Se puede observar que las matrices de transformación tampoco son idénticas. La función *stereoCalibrate* también devuelve el error de reproyección, y como se puede observar en el Cuadro 6.2, el error más bajo se obtiene también con los marcadores QR y el patrón de círculos proyectado.

Caso	Error RMS
1	0.586588
2	0.616518
3	2.05217
4	1.75695

Cuadro 6.2: Error medio cuadrático.

Para comprobar si el resultado es coherente se ha decidido analizar la distancia entre el centro óptico del proyector y el de la cámara. Se debe tener en cuenta, que no se puede saber dónde está exactamente el centro óptico, y por tanto, la distancia medida manualmente es simplemente una aproximación. Como se puede observar en la Figura 6.9, la distancia medida manualmente es de 310mm. Asimismo, en la Figura 6.10 la distancia estimada, en el caso de los marcadores QR y patrón de círculos proyectados (véase Ecuación 6.11), es 310.9943mm. Por tanto, la distancia medida y la estimada coinciden aproximadamente.

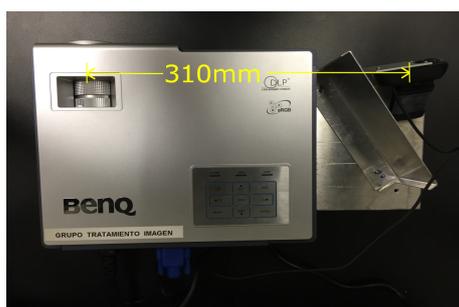


Figura 6.9: Distancia medida manualmente.



Figura 6.10: Distancia estimada (marcadores QR y patrón de círculos proyectados).

## Capítulo 7

# Conclusiones

En este documento se ha descrito el método utilizado para la calibración de un sistema ProCam, que consiste en un proyector y una cámara. El objetivo de este proyecto era obtener los parámetros intrínsecos y extrínsecos del sistema. Para conseguir unos resultados exitosos se han tenido que superar una serie de dificultades no documentadas hasta ahora, que han sido resueltas y citadas a lo largo del informe. Aún así deben ser destacadas:

- Se debe girar la cámara un poco hacia la izquierda y hacia arriba, para conseguir ampliar el área de interés, véase Figura 6.8.
- La cámara debe ser protegida del aire expulsado por el proyector. En este proyecto se ha utilizado una placa de metal para desviar el aire, véase Figura 1.1.
- Los patrones proyectados deben tener el fondo oscuro. Si se proyectan los patrones con el fondo blanco aparecen franjas de colores en las imágenes capturadas, véase Figura 4.9.
- Las funciones *findCirclesGrid* y *findChessboardCorners* necesitan un patrón con el fondo blanco Figura 3.8 y Figura 3.11.
- En el caso de los patrones de círculos deben tener un número de filas impar, véase Figura 3.11.
- El número de esquinas interiores y el número de círculos en la dirección horizontal y vertical deben ser especificados correctamente para conseguir una detección exitosa, véase Figura 3.10 y Figura 3.11.
- Para la obtención de los parámetros extrínsecos utilizando la función *stereoCalibrate*, previamente se deben calcular y fijar los parámetros intrínsecos.

En cuanto a las posibles mejoras, se podrían diseñar nuevos marcadores. Un posible diseño podría ser el siguiente: tres marcadores QR y en lugar del marcador QR pequeño, sustituirlo por uno de los utilizados en los marcadores rojos, pero de color negro, véase Figura 7.1. Tal vez, con este diseño la orientación sería detectada más fácilmente que con el marcador QR pequeño,

y consecuentemente se obtendrían unos resultados más precisos.

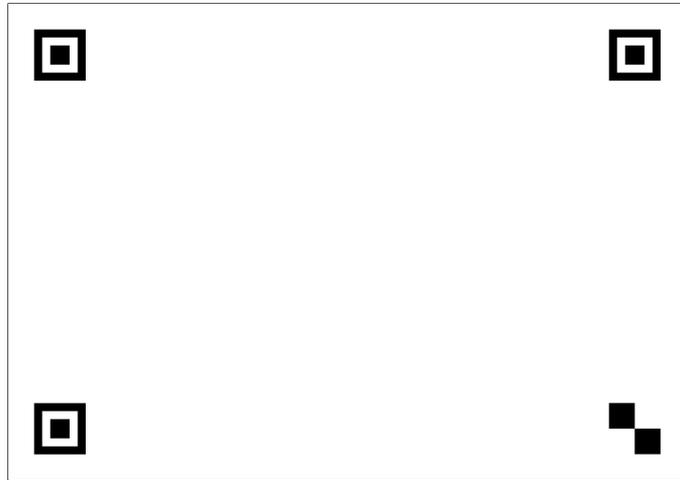


Figura 7.1: Tablero con marcadores de diferentes formas.

# Bibliografía

- [1] Hartley, Richard, and Andrew Zisserman. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press, 2003.
- [2] Bradski, Gary, and Adrian Kaehler. *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*. "O'Reilly Media, Inc.", 2008.
- [3] Lanman, Douglas, and Gabriel Taubin. "Build your own 3D scanner: 3D photography for beginners." *ACM SIGGRAPH 2009 Courses*. ACM, 2009.
- [4] Moreno, Daniel, and Gabriel Taubin. "Simple, accurate, and robust projector-camera calibration." *3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT), 2012 Second International Conference on*. IEEE, 2012.
- [5] Laganière, Robert. *OpenCV 2 Computer Vision Application Programming Cookbook: Over 50 recipes to master this library of programming functions for real-time computer vision*. Packt Publishing Ltd, 2011.
- [6] Falcao, Gabriel, Natalia Hurtos, and Joan Massich. "Plane-based calibration of a projector-camera system." *VIBOT master 9.1 (2008)*: 1-12.