



Uso de Imágenes Hemisféricas para la Reconstrucción 3d

Use of Hemispheric Images for 3d Reconstruction



Oña Vilatuña, María Belén¹, Campuzano Nieto Gonzalo Bayardo¹

1. Universidad de Cuenca, Cuenca

mabe-1994@hotmail.com

DOI:



Resumen

Las imágenes omnidireccionales tienen usos cada vez más amplios en diferentes industrias, desde la moda y el comercio hasta la construcción 3D, debido a que contienen más información que una fotografía común, y a que logran capturar el mundo con una visión omnidireccional en una sola imagen. Este artículo describe una metodología para la reconstrucción 3D a partir de imágenes hemisféricas adquiridas mediante una lente fisheye. Se revisa el fundamento algebraico y ecuaciones

necesarias, así como los diferentes métodos y herramientas para llevar a cabo una correcta reconstrucción.

Palabras clave: *Imágenes hemisféricas, reconstrucción 3d, innovación, omnidireccionales*

Abstract

Omnidirectional images have increasingly wide uses in different industries, from fashion and commerce to 3D construction, because they contain more information than an ordinary photograph, and because they capture the world with an omnidirectional view in a single image. This paper describes a methodology for 3D reconstruction from hemispherical images acquired using a fisheye lens. The algebraic foundation and necessary equations are reviewed, as well as the different methods and tools to carry out a correct reconstruction.

Key words: *spherical photometry, imaging, collinearity, coplanarity*

Introducción

Debido a varias ventajas que las imágenes omnidireccionales nos proporcionan, principalmente las relacionadas con su amplio campo de visión, el uso de estas se ha convertido en una práctica común para la creación de entornos virtuales en 3D; un ejemplo de esto es la técnica de Fotogrametría Esférica que fue desarrollada hace más de una década por Gabriele Fangi, y que se convirtió en una práctica común para la documentación. Esta técnica utiliza imágenes panorámicas que permiten una mayor comprensión del objeto, que mejoran aún más debido a la alta resolución de la imagen. Dicha imagen se mapea en el plano cartográfico usando una proyección equirectangular, necesario para efectuar su posterior análisis. Este artículo presenta una alternativa al uso de imágenes panorámicas para la reconstrucción 3D, basada en la Fotogrametría Esférica, cuya diferencia consiste en que utilizaremos imágenes hemisféricas proporcionadas por una lente ojo de pez o fisheye, que trabaja directamente con la imagen circular resultante y evita la necesidad de utilizar una proyección equirectangular, reduciendo de este modo, el tiempo de análisis de las imágenes.

1. Fotogrametría Esférica

La Técnica Fotogrametría Esférica usa imágenes panorámicas que pueden ser adquiridas a través de un conjunto de imágenes parcialmente superpuestas desde un punto de vista único con una cámara digital que gira alrededor de su centro de perspectiva. Las imágenes se unen y finalmente, el panorama resultante se mapea en el plano cartográfico usando una proyección equirectangular [4]

$$x = r.\vartheta; \quad y = r.\varphi \quad (1)$$

Donde ϑ es la longitud, φ es el complemento de la latitud y r es el radio de la esfera; con los ángulos expresados en radianes. Tal representación no es conforme, ni equivalente. Los polos de la esfera están representados por dos segmentos de igual longitud a la circunferencia de la esfera, y por lo tanto, el Ecuador y los polos tienen la misma longitud. La altura del mapa es igual al desarrollo de un meridiano. De tal representación se pueden dibujar los ángulos de dirección de la línea proyectiva. Conociendo la extensión, se deriva el radio de la esfera generadora. [3]

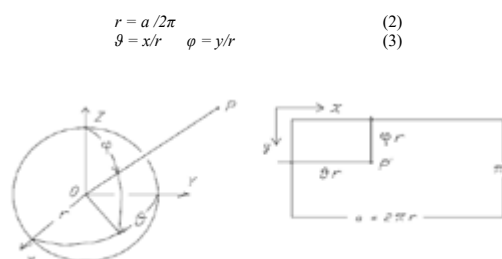


Figura 1 La proyección de latitud-longitud. Relación entre las coordenadas esféricas y la coordenada de la imagen esférica [3]

Estos ángulos y el radio de la esfera generadora son los mismos que un teodolito mediría, salvo dos diferencias: la primera es la precisión alcanzada; y la segunda es que, si bien el teodolito se establece con su principal eje vertical, en el caso de la esfera, no es posible hacer el eje principal suficientemente vertical. Por esta razón, es necesario corregir dos ángulos de rotación alrededor de los ejes horizontales; esta operación es equivalente a un compensador biaxial de un teodolito. [1]

1.1. Las ecuaciones de colinealidad para la fotogrametría esférica

Entre el centro de proyección, el punto de imagen y el punto del objeto, se escriben las ecuaciones de colinealidad, ecuaciones corregidas para tener en cuenta la verticalidad perdida del eje principal.

Dada una imagen esférica con centro $\mathbf{O} = [X_0, Y_0, Z_0]^T$ y radio r

Un punto $P [X, Y, Z]^T$ a una distancia $d = \sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2}$ que desde el centro de la esfera tiene coordenadas $[X^*, Y^*, Z^*]^T$ en el sistema de referencia esférico, que puede derivar de sus coordenadas esféricas (d, ϑ, φ) mediante las siguientes relaciones: [4]

$$\begin{aligned} X^* &= d \cdot \sin \varphi \cdot \sin \vartheta \\ Y^* &= d \cdot \sin \varphi \cdot \cos \vartheta \\ Z^* &= d \cdot \cos \varphi \end{aligned} \quad (4)$$

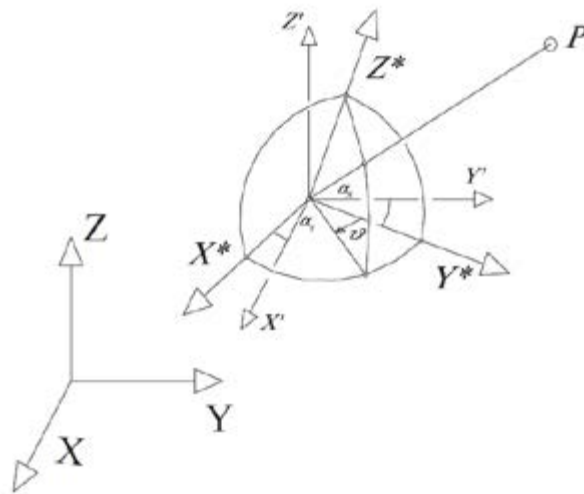


Figura 2 El punto de objeto P , el sistema esférico y el sistema terrestre, es un sistema centrado en el centro de la esfera y con su eje Z' , paralelo al eje Z del sistema terrestre. Dicho sistema tiene que estar orientado en un ángulo ϑ_0 . [4]

Transformar el sistema de referencia esférico al terrestre es posible, en primer lugar, gracias a la alineación de Z^* con Z . Se realiza teniendo en cuenta los ángulos de corrección α_x y α_y . En

segundo lugar, se resuelve la rotación alrededor del eje Z , introduciendo el ángulo de rotación esférica. [4]

$$\begin{bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{bmatrix} = \Delta R(\alpha_x, \alpha_y) \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \Delta R(\alpha_x, \alpha_y) \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d \sin \varphi \sin \vartheta \\ d \sin \varphi \cos \vartheta \\ d \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (5)$$

donde $[X', Y', Z']^T$ son las coordenadas de P en el sistema de referencia terrestre transferido al centro de la esfera y $\Delta R(\alpha_x, \alpha_y)$.

Es una rotación cuasi-ortogonal matriz:

$$\Delta R(\alpha_x, \alpha_y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & d\alpha_y \\ 0 & 1 & -d\alpha_x \\ -d\alpha_y & d\alpha_x & 1 \end{bmatrix}$$

Dividiendo la primera fila de la ecuación (5) por la segunda se obtiene la primera ecuación.

$$\theta = \theta_0 + \arctan\left(\frac{(X-X_0)+d\alpha_y(Z-Z_0)}{(Y-Y_0)-d\alpha_x(Z-Z_0)}\right) \quad (6a)$$

la segunda ecuación φ , se obtiene dividiendo la ecuación (5) por d .

$$\varphi = \arccos\left(\frac{d\alpha_y(X-X_0)+d\alpha_x(Y-Y_0)+(Z-Z_0)}{d}\right) \quad (6b)$$

Estas son las ecuaciones de colinealidad [4]

1.2. La condición de coplanaridad

En la fotogrametría clásica, la ecuación de coplanaridad nos dice que los dos rayos proyectivos a un punto P y la base óptica b tienen que estar en el mismo plano epipolar.

De manera similar, la geometría epipolar de las imágenes esféricas se da mediante una ecuación

de coplanaridad y describe la relación geométrica entre los puntos correspondientes en un par de imágenes. Más específicamente, la intersección entre dos imágenes dadas y el plano epipolar, definido por el centro de las dos imágenes y un punto de objeto P, representa la línea epipolar. [4]

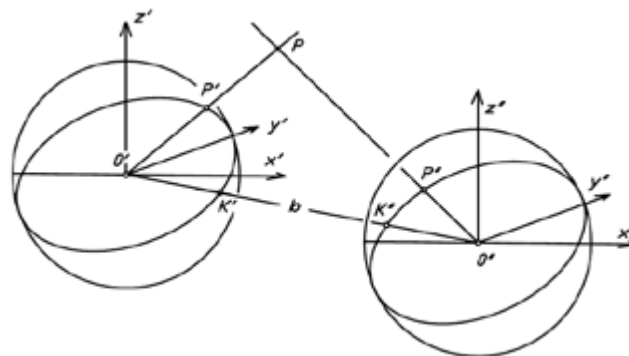


Figura 3 Coplanaridad de dos panoramas esféricos [4]

Dadas las coordenadas esféricas de un punto P_0 , adquirido a partir de las coordenadas de la imagen, las coordenadas correspondientes se obtienen por:

$$X = r \cdot \sin\varphi \cdot \sin\theta \quad Y = r \cdot \sin\varphi \cdot \cos\theta \quad Z = r \cdot \sin\varphi \quad (7)$$

donde r es el radio, φ es el complemento de latitud y θ es la longitud. La ecuación del plano que pasa por O_1 , O_2 y P_0 se puede expresar como:

$$Z = aX + bY + cZ$$

donde a , b y c son cosenos de dirección del plano. Sustituyendo Z en la tercera expresión de la ecuación (7) se obtiene la expresión de la ecuación epipolar:

$$\varphi = \arctan\left(-\frac{c}{a \cdot \sin(\theta) + b \cdot \cos(\theta)}\right) \quad (8)$$

2. Geometría de una imagen hemisférica

La geometría de una imagen tomada con una lente ojo de pez no cumple con la proyección de perspectiva central, donde el ángulo de incidencia del rayo desde un determinado punto de objeto será igual al ángulo entre el rayo y el eje óptico, dentro del espacio de la imagen (Figura 4a). Las cámaras ojo de pez tienen lentes con una función de proyección

diferente y siguen el modelo de cámara omnidireccional. La proyección de ojo de pez se basa en el principio de que, en el caso ideal, la distancia entre un punto de imagen y el punto principal depende del ángulo de incidencia del rayo, desde el punto del objeto correspondiente (Figura 4b).

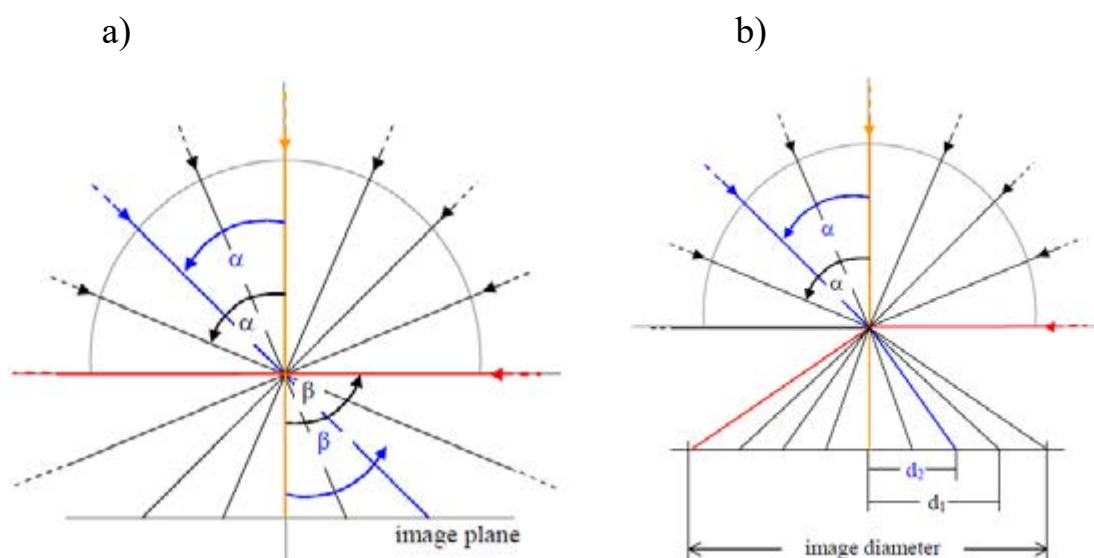


Figura 4 a) Proyección de perspectiva central. b) Proyección de ojo de pez [7]

La proyección se puede definir en un mapeo de un punto 3D a un punto 2D, en el plano de la imagen del modelo. Cada rayo atraviesa el centro de proyección e interseca la esfera de la imagen, que determina la dirección del rayo [2]. Para un lente de 180° , se proyecta un rayo de punto de objeto con un ángulo incidente de 90° en el borde exterior de la imagen circular (Figura 2), lo que significa que el punto de la imagen resultante tiene la distancia máxima del eje óptico. La relación entre la distancia resultante del punto de imagen y el ángulo de incidencia es constante para toda

la imagen [7], por lo que, la siguiente ecuación resulta básica para la proyección de ojo de pez:

$$\frac{\alpha}{r} = \frac{90^\circ}{R} \quad \text{Donde } r = \sqrt{x'^2 + y'^2} \quad (9)$$

donde α = ángulo de incidencia

r = distancia entre el punto de imagen y el eje óptico

R = radio de la imagen

x' , y' = coordenadas de la imagen

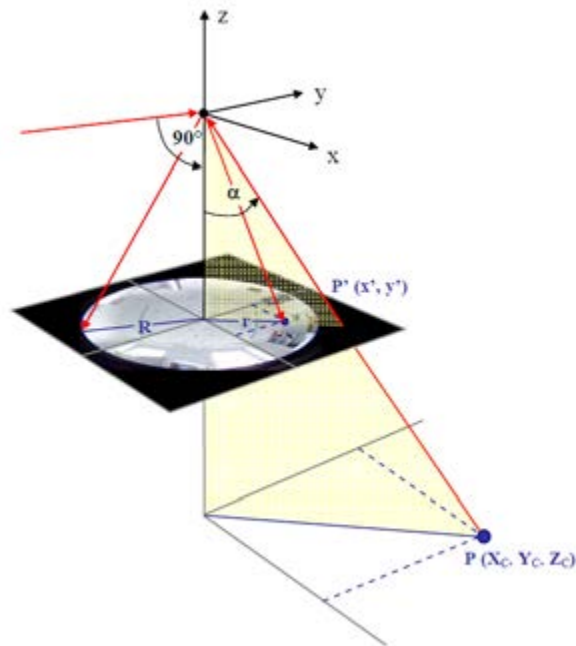


Figura 5 Relación entre el punto de objeto y el punto de imagen [7].

3. Definición de ecuaciones para la fotogrametría hemisférica

La Figura 3 nos muestra la relación que existe entre dos imágenes hemisféricas y un punto P en el espacio, teniendo en cuenta que el origen del

sistema se encuentra en el centro de la imagen 1. Haciendo uso de la técnica de triangulación, se obtendrán las coordenadas 3D del punto [6].

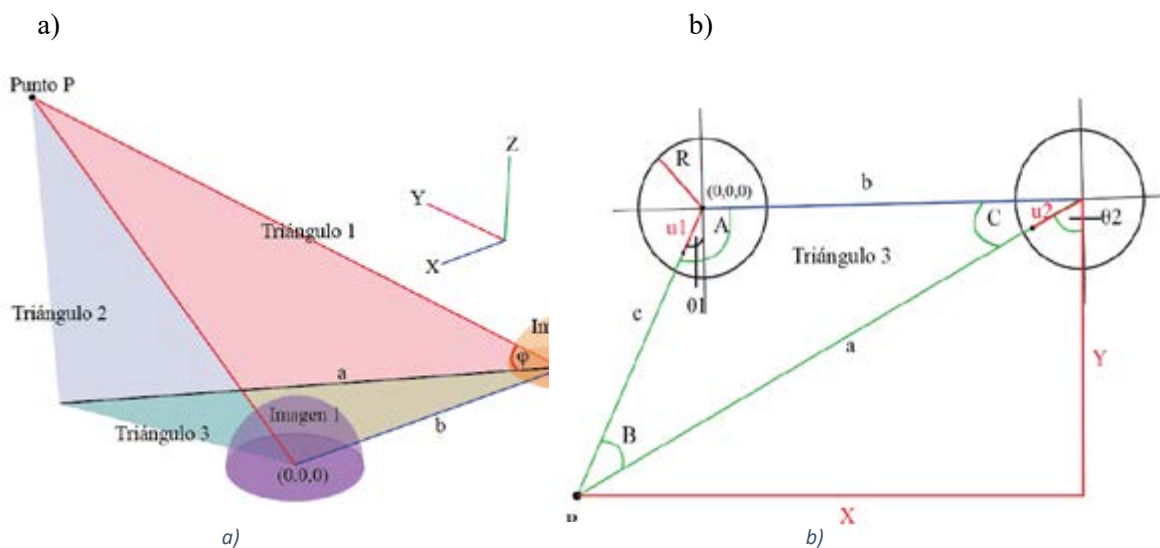


Figura 6 a) Relación de dos imágenes hemisféricas. b) Vista inferior.

donde:

R = radio del círculo

$u1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$ = distancia entre el punto de imagen y el eje óptico de la imagen 1

$u2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$ = distancia entre el punto de imagen y el eje óptico de la imagen 2

b = distancia entre el centro de las dos imágenes.

Cabe resaltar que el valor b es el que definirá las unidades de las coordenadas resultantes, ya sean metros, centímetros u otra unidad.

B y C , y para obtenerlos, primero, es necesario calcular tanto $\theta1$ como $\theta2$ que son los ángulos que se forman entre $u1$, $u2$ y el eje Y de cada imagen, por lo que tendremos:

Para obtener las coordenadas (X , Y , Z) del punto P , se necesita conocer el valor de los ángulos A ,

$$\theta1 = \arctan \frac{x_1}{y_1} \qquad \theta2 = \arctan \frac{x_2}{y_2}$$

Conociendo $\theta1$ y $\theta2$ se calculan los valores de A , B , C y sus respectivos lados, usando la ley de senos.

$$\begin{aligned} A &= 90 + \theta1 \\ C &= 90 - \theta2 \\ B &= 180 - A - C \\ a &= \frac{b \sin A}{\sin B} \qquad c = \frac{b \sin C}{\sin B} \end{aligned}$$

Haciendo uso de la trigonometría se puede calcular las coordenadas X y Y del punto 3D:

$$X = a \sin(\theta2)$$

$$Y = a \cos(\theta2)$$

Antes de calcular Z , es necesario saber el valor del ángulo φ , ángulo que se forma entre el punto P y el centro de la imagen 2 (ver Figura 3).

$$\varphi = \arccos \frac{u2}{R}$$

Obteniendo φ , podemos decir que:

$$Z = a \tan \varphi$$

4. Definición de todos los casos

Estas relaciones variarían dependiendo de la posición en que se encuentre el punto P y su determinada proyección en cada una de las imágenes, por lo que se han determinado seis posibles casos. En

primer lugar, hay que conocer el centro de imagen hemisférica en coordenadas de píxel que estará determinada por los parámetros de calibración de la cámara (Oña Vilatuña, 2019).

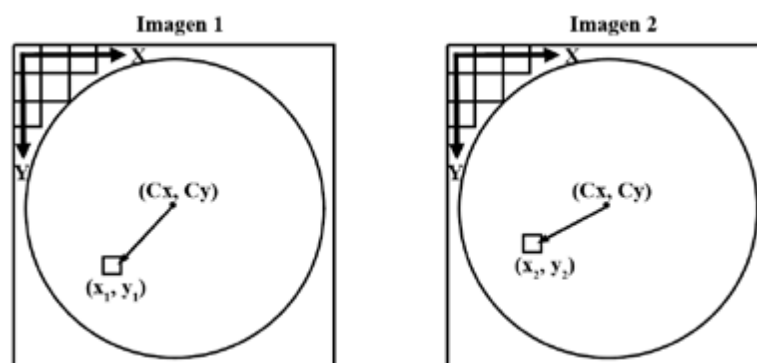


Figura 7 Representación en píxeles de cada imagen

Tabla 1. Análisis de cada uno de los posibles casos

Nº de caso	Condiciones a cumplir	Representación de la coordenada 3D (X, Y, Z)
1	Si $(x_1 < Cx) \ \& \ (y_1 < Cy) \ \& \ (x_2 < Cx) \ \& \ (y_2 < Cy)$	$(-(X-b), Y, Z)$
2	Si $(x_1 > Cx) \ \& \ (y_1 < Cy) \ \& \ (x_2 > Cx) \ \& \ (y_2 < Cy)$	(X, Y, Z)
3	Si $(x_1 < Cx) \ \& \ (y_1 > Cy) \ \& \ (x_2 < Cx) \ \& \ (y_2 > Cy)$	$(-(X-b), -Y, Z)$
4	Si $(x_1 > Cx) \ \& \ (y_1 > Cy) \ \& \ (x_2 > Cx) \ \& \ (y_2 > Cy)$.	$(X, -Y, Z)$
5	Si $(x_1 > Cx) \ \& \ (y_1 < Cy) \ \& \ (x_2 < Cx) \ \& \ (y_2 < Cy)$.	(X, Y, Z)
6	Si $(x_1 > Cx) \ \& \ (y_1 > Cy) \ \& \ (x_2 < Cx) \ \& \ (y_2 > Cy)$.	$(X, -Y, Z)$

Un ejemplo del caso 3, lo tenemos representado en la Figura 3 y su posterior análisis.

5. Simulación el Cinema 4D

Antes de trabajar con imágenes obtenidas desde una cámara hemisférica, se realizó una prueba para verificar el correcto funcionamiento del análisis para la obtención de coordenadas 3D de un punto

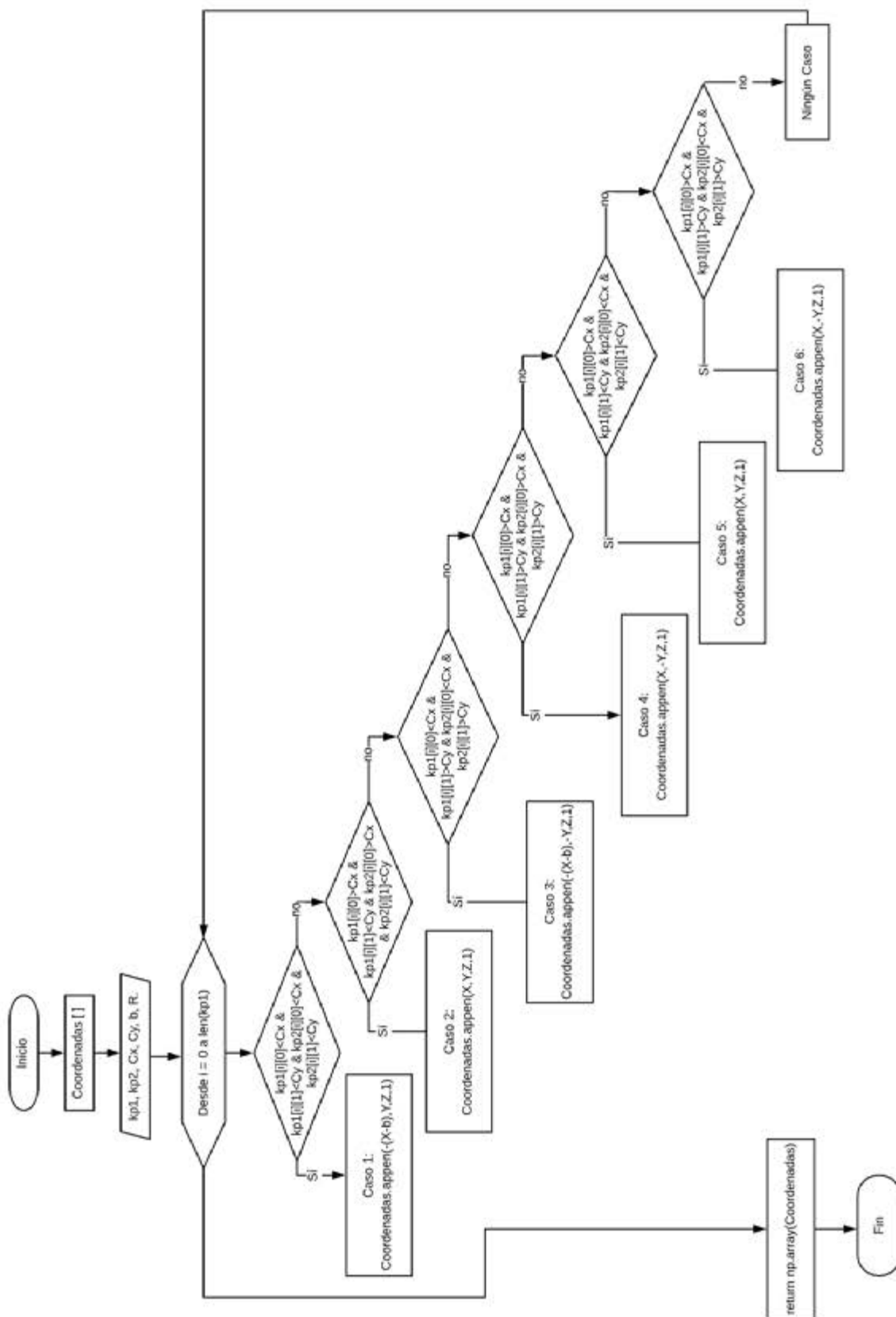
P. Haciendo uso del programa Cinema 4D, se hizo un modelado simulando las condiciones anteriormente expuestas (Figura 3). A continuación, se observa la tabla de resultados de esta prueba.

Tabla2. Resultado de prueba con Cinema 4D

Coordenadas	X	Y	Z
Coordenadas reales	200	250	400
Coordenadas obtenidas mediante el código	197.95	251.05	399.12

6. Algoritmo para la obtención de puntos 3D

Tomando en cuenta que kp1 y kp2 representan el Array de coordenadas de puntos correspondientes de cada una de las dos imágenes.



7. Imágenes a utilizar

Las imágenes que se utilizarán para realizar la reconstrucción 3D serán las proporcionadas por la cámara del teléfono móvil LG K8, que cuenta con una resolución máxima de 13MP. A esta cámara

se le colocará el universal clip lens, un accesorio para celular que consiste en un lente ojo de pez que se fija a la cámara del teléfono móvil por medio de una pinza.



Figura 8 Fotografías tomadas con el universal clip lens.

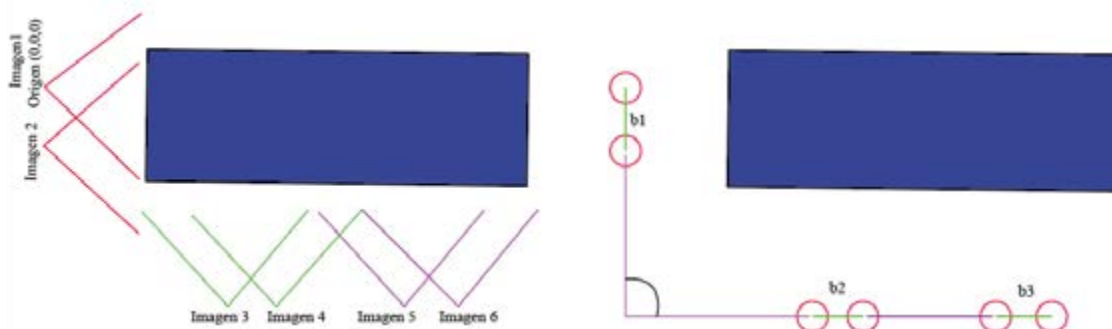


Figura 9. Posición de cámara en cada fotografía

Para lograr la reconstrucción de un determinado objeto o como en este caso, un edificio, es necesario tener dos fotografías del punto de estudio; la segunda fotografía debe ser tomada a la misma altura y de manera paralela a la posición de la primera (Figura 6) y tomando en cuenta el valor b , que será dato de entrada del algoritmo realizado.

8. Correspondencia de puntos

Los puntos correspondientes son aquellos que representan una proyección del mismo punto físico

en el espacio 3D. Se puede definir tres formas de identificar puntos correspondientes:

Brute-Force Matcher

Es un método de OpenCv que toma el descriptor de una característica en el primer conjunto y se combina con todas las demás características en el segundo conjunto. Utilizando algunos cálculos de distancia se devolverá el más cercano.

Matriz fundamental

Una de las propiedades de la matriz fundamental es la igualdad para puntos correspondientes: $x'^T Fx=0$, donde, x' representa al punto clave de la primera imagen y x , al punto clave de la segunda imagen. Si estos son correspondientes, la ecuación dará como resultado 0 [5].

OpenCv

Haciendo uso de las herramientas que proporciona la librería de OpenCv, se desarrolla un algoritmo que permite la elección puntual de los puntos clave de cada imagen, dando un click en el punto que se considere esencial. Estas coordenadas en pixeles deben ser guardadas en un array que será pasado como entrada del algoritmo para determinar los puntos 3D del objeto de estudio. Además se establecerán algoritmos tanto para la rotación como para la traslación de la nube, de ser necesario.

9. Nube de puntos 3D

Luego de tener la nueva nube de puntos 3D, haciendo uso del algoritmo desarrollado, se procede a la representación de los mismos en una gráfica en tercera dimensión. Para esto, hacemos uso de Python y la biblioteca Matplotlib. A continuación, siguiendo estos pasos.

- 1) se crea la figura con: `fig = plt.figure()`
- 2) se crea el plano 3D: `ax1 = fig.add_subplot(111, projection='3d')`
- 3) es necesario tener un array con cada coordenada por separado
- 4) agregamos los puntos en el plano 3D con el método `scatter`: `ax1.scatter(x, y, z, c='g', marker='o')`. El valor de 'g' representa el color con el que se dibujarán los puntos.

10. Resultados

Antes de obtener las coordenadas 3D de los puntos del edificio, es necesario tener los vectores con los puntos correspondientes de las dos imágenes analizadas, por este motivo, se realizaron pruebas con cada una de las opciones presentadas.

Método Basics of Brute-Force Matcher

Para usar este algoritmo como parámetros de entrada no solo nos pide los puntos clave de las dos imágenes sino también los descriptores de estos puntos, por esta razón, el método para la identificación de puntos clave utilizado será el método *ORB*. Al ejecutar este algoritmo, el resultado será el siguiente:

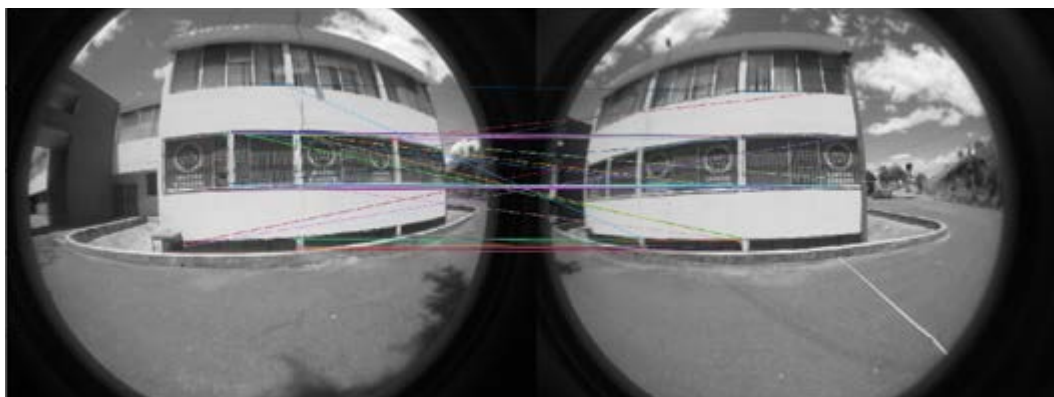


Figura 10 Resultado algoritmo Brute Force Matcher

En la imagen resultante de este algoritmo, une con una línea los puntos que considera son correspondientes. Como se puede observar, existen varios puntos considerados correspondientes que en realidad no lo son. Además, las correspondencias encontradas no serán suficientes para la creación de una nube de puntos apta para la reconstrucción 3D, ya que no se han tomado ni siquiera las

esquinas más importantes de la edificación. Por esta razón, se considera que el Método Brute Force Matcher no nos proporciona los datos necesarios para la creación de la nube de puntos.

Correspondencia de puntos haciendo uso de la matriz fundamental

Para calcular la matriz fundamental se hace uso de la ecuación: $F = [K't] \times K'RK^{-1}$, siendo R la matriz de rotación y t , el vector de traslación:

$$R = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix}, R \text{ es igual a la identidad cuando no exista ninguna rotación,}$$

$$t = [6.22 \quad 0.0 \quad 0.0], \text{ traslación en el eje } x.$$

Como resultado tenemos que la matriz fundamental de las dos primeras imágenes tomadas es:

$$F = \begin{bmatrix} 3148.99 & 0.0 & 3887.22 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}$$

Se ha verificado que la determinante de esta matriz sea igual a cero. La matriz fundamental obtenida posee solo dos valores debido a que $K=K'$, además, que al tratarse de las dos primeras imágenes tomadas, no existió rotación en la cámara, solo una traslación de 6.22 m en el eje X.

Una vez obtenida la matriz fundamental, se hizo uso de la igualdad: $x'^T Fx=0$, para determinar los puntos correspondientes.

Al analizar la igualdad para puntos correspondientes, comparando cada punto clave de la primera imagen con todos los puntos clave de la segunda, se observó que el resultado obtenido no fue para nada cercano a cero, tal como nos pide la igualdad. Por esta razón se decidió escoger manualmente puntos correspondientes de ambas imágenes y verificar si la igualdad se cumple. A continuación, se muestra una tabla con el valor de la igualdad para los 4 primeros puntos correspondientes escogidos.

Tabla2. Resultados del producto: $x'^T Fx$, con puntos correspondientes

x	x'	$x'^T Fx$
(396.77 , 74.6)	(159.59 , 193.18)	77732.7523
(700.79 , 57.35)	(323.46 , 106.94)	232811.5424
(1009.12 , 167.31)	(748.22 , 83.22)	768968.3046
(394.62 , 115.56)	(153.13 , 229.84)	86989.471

A pesar de que los puntos escogidos eran correspondientes entre sí, el resultado del producto $x'^T Fx$ en todos los casos, fue un número extremadamente grande. Este resultado se dio debido a que este análisis se lo realizó para imágenes planas y no para imágenes hemisféricas que presentan una distorsión significativa.

Algoritmo para seleccionar los puntos clave

Ya que se han calculado los puntos correspondientes de cada par de imágenes a analizar, además de

conocer las coordenadas del centro de la imagen, la distancia entre cada centro de imagen, la traslación y rotación realizada, es posible utilizar nuestro algoritmo para el cálculo de coordenadas 3D. Este algoritmo nos devuelve una nube de puntos con coordenadas (x, y, z) de cada par de imágenes, por lo que al final, tendremos 3 *arrays* de coordenadas 3D, los cuales serán representados en una gráfica tridimensional haciendo uso del método *scatter*. El resultado final de la nube de puntos es el siguiente:

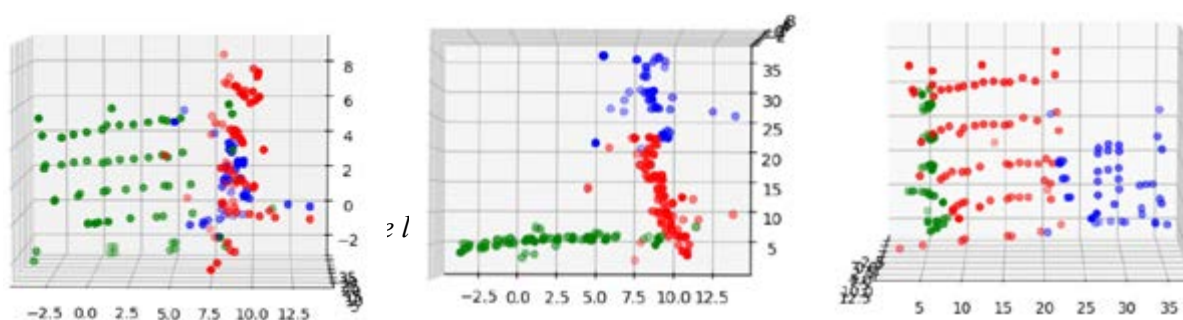


Figura 11 a)

b)

c)

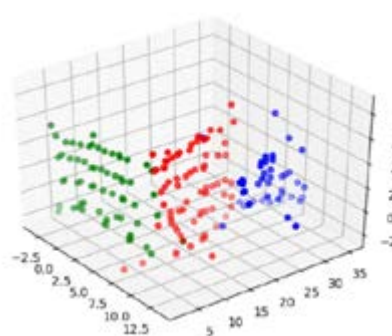


Figura 13 Comparación entre el edificio real, nube de puntos obtenida y mallado.

11. Mallado

Una vez que se ha obtenido la nube de puntos en coordenadas (x,y,z), se pasa esta información al

programa de código abierto MeshLab, que procesa y edita mallas triangulares en 3D.



Figura 14 Resultado del mallado de la nube de puntos.

12. Conclusiones

- Los escáneres tridimensionales que utilizan imágenes hemisféricas nos dan excelentes resultados en términos de velocidad, en la toma de imágenes, puesto que una sola fotografía nos proporciona mayor información.
- De la investigación realizada se concluyó que el Lenguaje de Programación Python utilizado para el procesamiento de imágenes omnidireccionales, con lente hemisférico, dio resultados favorables, en especial, la biblioteca de visión artificial de código abierto OpenCV.
- El método propuesto para componer una geometría tridimensional a partir de dos imágenes del mismo espacio, se ejecutó de forma exitosa previo a análisis de los posibles casos que se pudieran presentar. Este método demostró resultados satisfactorios a lo largo de las pruebas realizadas. Se puede realizar el proceso de escaneo 3D, utilizando cámaras de bajo costo.

13. Recomendaciones

- Se recomienda lograr la automatización para el cálculo de puntos correspondientes, ya que este es uno de los procesos más importantes y de mayor tiempo de análisis.

- Utilizar este algoritmo para la obtención de puntos tridimensionales con edificaciones preferiblemente rectas como edificios.

Bibliografía

- [1] Barazzetti, L., Fangi, G., Remondino, F., & Scaioni, M. (2010). Automation in Multi-Image Spherical Photogrammetry for 3D Architectural Reconstructions.
- [2] Beekmans, C., Schneider, J., Labe, T., Lenner, M., Stachniss, C., & Simmer, C. (2016). Cloud photogrammetry with dense stereo for fisheye cameras. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14231-14248.
- [3] D'Annibale, E., & Fangi, G. (2009). Interactive Modelling by projection of oriented Spherical Panorama - Ad Deir, Petra, Jordan.
- [4] Fangi, G., & Nardinocchi, C. (10 de September de 2013). PHOTOGAMMETRIC PROCESSING OF SPHERICAL. *The Photogrammetric Record*, XXVI-II(143), 293-311.
- [5] Mery, D. (14 de Agosto de 2004). *Visión por Computador*. Santiago, Chile.

- [6] Oña Vilatuña, M. (Octubre de 2019). Desarrollo de un prototipo de escáner óptico 3D montado en un UAV con cámara 360 utilizando fotogrametría. Tesis de grado. Quito, Pichinca, Ecuador.
- [7] Schwalbe, E. (s.f.). GEOMETRIC MODELLING AND CALIBRATION OF FISHEYE LENS CAMERA SYSTEMS. Alemania.

Recibido: 20 de febrero de 2022

Aprobado: 5 de mayo de 2022