

Determinación de los parámetros de orientación interior de una cámara digital no métrica

Determination of interior orientation parameters of a non-metric digital camera

Jauregui, Luís*; Jauregui, Manuel; Chacón, Leira y Vilchez, José
Instituto de Fotogrametría, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes
Mérida 5101, Venezuela
iluis@ula.ve*

Resumen

El proceso inicial de un levantamiento fotogramétrico es el de calibración de la cámara, el cual consiste en la determinación de sus parámetros de orientación interior. Este proceso se realiza para cada cámara métrica fabricada, sea aérea o terrestre, en bancos de laboratorio de la compañía que la manufactura. La calibración de laboratorio constituyó hasta hace poco la diferencia fundamental entre las cámaras métricas utilizadas en fotogrametría, y las cámaras no métricas de uso común. El perfeccionamiento de la tecnología de la imagen digital junto con el surgimiento de la visión por computadora, hicieron posible reemplazar los costosos bancos de laboratorio por programas de computación para determinar los parámetros de orientación interior, haciendo uso de las ecuaciones proyectivas. El presente trabajo describe el proceso de calibración de una cámara no métrica por el método de la Transformación Lineal Directa (TLD), para su uso en levantamientos fotogramétricos, aéreos y terrestres

Palabras clave: cámara digital no-métrica, calibración, TLD, fotogrametría.

Abstract

The initial process of a photogrammetric survey is the calibration of the camera, which consists in determining its interior orientation parameters. This process is performed for each metric camera produced, aerial or terrestrial on the laboratory benches of the manufacturing company. Until recently, the laboratory calibration constituted the fundamental difference between the metric cameras used in photogrammetric, and the non-metric cameras commonly used. Improvements in digital imaging technology along with the emergence of computer vision, made possible to replace costly laboratory benches by computer programs to determine the interior orientation parameter using the projective equations. This paper describes the calibration of a non-metric camera by the Direct Linear Transformation (DLT) method, for its use in aerial or terrestrial photogrammetric surveys.

Key words: non-metric digital camera, calibration, DLT, photogrammetry.

1 Introducción

En un proyecto fotogramétrico, la calibración de la cámara constituye la primera actividad a realizar, la cual consiste en determinar los parámetros de orientación interior de la toma de imágenes fotográficas: distancia focal, coordenadas del punto principal, y distorsiones radial y tangencial. Estos parámetros afectan la formación de imagen, y por consiguiente, la reconstrucción del modelo 3D.

La calibración de la cámara es un proceso minucioso que se realiza para cada cámara, en bancos de laboratorio de la compañía que la manufactura, y sus resultados son

utilizados en la restitución fotogramétrica.

El surgimiento de las cámaras digitales permitió reemplazar los costosos bancos de laboratorio por programas basados en las ecuaciones proyectivas, dado el carácter numérico de la imagen digital, donde cada elemento que conforma la imagen (píxel) puede ser considerado como un punto con coordenadas x,y conocidas, producto de la proyección de un punto X,Y del mundo real. La aplicación de las ecuaciones proyectivas permite determinar los parámetros de orientación, los cuales son:

- Posición del centro de la imagen.
- Distancia focal.

- Factores de escala diferentes para los pixeles de las columnas y de las filas. (los pixeles no son cuadrados necesariamente).
- Factor de razón de aspecto.
- Distorsión radial y tangencial de las lentes.

La visión por computadora o visión artificial fue una de las primeras disciplinas en hacer uso de la cámara digital, dada la necesidad de procesar las imágenes inmediatamente después de ser captadas, en aplicaciones de robótica o de identificación de objetos. Para ello, se desarrollaron los métodos de calibración de cámara digital utilizados actualmente tales como el método de Zhang (1999), o de Tsai (1987), y otros desarrollados específicamente para el campo de la fotogrametría, tales como el método de la Transformación Lineal Directa (TLD), propuesto por Abdel-Aziz y Karara, 1971 (en la bibliografía internacional se le conoce con la sigla DLT por Direct Linear Transformation). Me-

dante la TLD se puede resolver un sistema de ecuaciones lineales, para determinar la orientación de una imagen sin tener que introducir valores iniciales aproximados.

En este artículo se describe la calibración de una cámara digital no métrica usando el método de la Transformación Lineal Directa, a través de un programa desarrollado en el Instituto de Fotogrametría de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes.

2 Transformación Lineal Directa (TLD)

Todo método de calibración de cámara analógica o digital, se fundamenta en el principio de la proyección central; si puntos comunes del objeto y de la imagen están representados por vectores homogéneos, entonces la proyección central es una transformación lineal, tal como se ilustra en la Fig. 1.

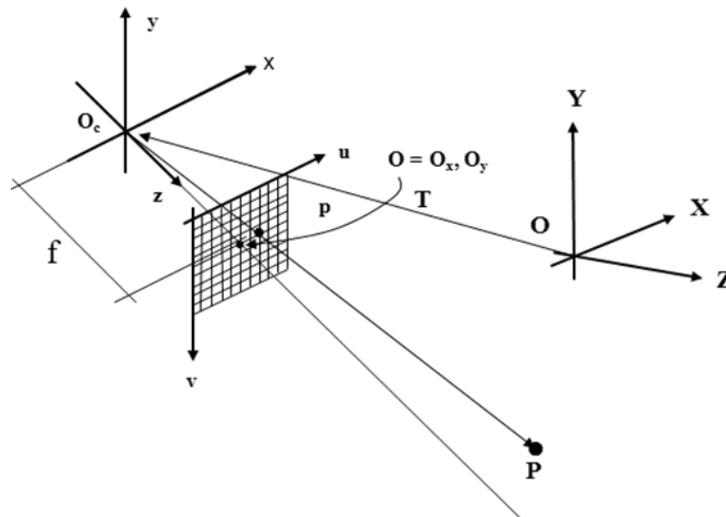


Fig. 1. Proyección Central

Las ecuaciones de la TLD relacionan las coordenadas objeto (X,Y,Z) con las coordenadas imagen (x,y) (Mikhail, 2001), mediante la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde:

- X, Y: Coordenadas del punto P, en el sistema X,Y.
- x,y: Coordenadas del punto P en el sistema x,y
- m_{ij} : Coeficientes de la matriz de transformación (para $i=1,2,3$ y $j=1,2,3,4$).

Para simplificar la notación, la matriz M se divide por el coeficiente m_{34} y se renombra como L. Esto es:

$$\frac{1}{m_{34}} M = \begin{bmatrix} \frac{m_{11}}{m_{34}} & \frac{m_{12}}{m_{34}} & \frac{m_{13}}{m_{34}} & \frac{m_{14}}{m_{34}} \\ \frac{m_{21}}{m_{34}} & \frac{m_{22}}{m_{34}} & \frac{m_{23}}{m_{34}} & \frac{m_{24}}{m_{34}} \\ \frac{m_{31}}{m_{34}} & \frac{m_{32}}{m_{34}} & \frac{m_{33}}{m_{34}} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$L = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 & L_4 \\ L_5 & L_6 & L_7 & L_8 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Dado que la cámara no se encuentra en el origen de coordenadas, las ecuaciones de la TLD (Ec. 1), pueden expresarse como sigue:

$$x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (4)$$

$$y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (5)$$

Donde:

X, Y: Coordenadas del punto P, en el sistema de coordenadas reales.

x,y: Coordenadas del punto P en el sistema de coordenadas imagen.

$L_1, L_2, L_3, L_5, L_6, L_7, L_9, L_{10}, L_{11}$: Coeficientes de rotación.

L_4, L_8 : Coeficientes de desplazamientos en X y en Y.

A partir de las Ec. 1 y las coordenadas reales (X_i, Y_i), y de imagen (x_i, y_i) de n puntos de control ($i=1,2, \dots, n$), pueden determinarse los parámetros L_k , ($k=1, \dots, 11$) mediante las ecuaciones siguientes:

$$AL = X \quad (6)$$

Donde, la matriz A es

$$\begin{bmatrix} X_i & Y_i & Z_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_i X_i & -x_i Y_i & -x_i Z_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_i & Y_i & Z_i & 1 & -y_i X_i & -y_i Y_i & -y_i Z_i \\ \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_n X_n & -x_n Y_n & -x_n Z_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -y_n X_n & -y_n Y_n & -y_n Z_n \end{bmatrix}$$

la matriz L es:

$$[L_1 \ L_2 \ L_3 \ L_4 \ L_5 \ L_6 \ L_7 \ L_8 \ L_9 \ L_{10} \ L_{11}]^T$$

y la matriz X es:

$$[x_1 \ y_1 \ \dots \ x_n \ y_n]^T$$

Resolviendo las. Ec. 6 a través de mínimos cuadrados, se tiene la siguiente expresión:

$$L = (A^T A)^{-1} A^T X$$

Una vez conocidos los parámetros L_k , se pueden determinar f_x y f_y que representan la distancia focal de la cámara sobre los ejes x e y, respectivamente y las coordenadas del centro de proyección son x_0, y_0 , mediante las expresiones si-

guientes:

$$x_0 = \frac{(L_1 L_9 + L_2 L_{10} + L_3 L_{11})}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} \quad (8)$$

$$y_0 = \frac{(L_5 L_9 + L_6 L_{10} + L_7 L_{11})}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} \quad (9)$$

$$f_x^2 = \frac{(x_0 L_9 - L_1)^2 + (x_0 L_{10} - L_2)^2 + (x_0 L_{11} - L_3)^2}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} \quad (10)$$

$$f_y^2 = \frac{(y_0 L_9 - L_5)^2 + (y_0 L_{10} - L_6)^2 + (y_0 L_{11} - L_7)^2}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} \quad (11)$$

Partiendo de las ecuaciones anteriores se desarrolló el programa CALCAM en Matlab para realizar la calibración de una cámara digital no métrica usando TLD.

3 Aplicación práctica

Para ilustrar el proceso de la calibración se utilizó una cámara digital no métrica, cuyas características se describen a continuación:

Modelo: Sony Cyber-shot DSC-W1

Total de pixeles: 5.255.000

Total de pixeles efectivos: 5.090.000

2592 pixeles horizontales

1944 pixeles verticales.

Formato de imagen: jpeg.

Objetivo: Carl Zeiss Vario-Tessar $f = 7.9 - 23.7$ F2.8 - 5.2

Zoom óptico 3X.

CCD: 9.04 mm (tipo 1/1.8") filtro RGB.

Con este modelo de cámara se hicieron varias tomas fotográficas del pasillo del Instituto de Fotogrametría de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes. Estas imágenes permitieron establecer referencias nítidas e inequívocas en las intersecciones de los bloques sin frisar. De las intersecciones escogidas como puntos de referencia, se midieron tanto las coordenadas imagen (pixeles) de estos puntos, como sus coordenadas reales (cm), colocando el origen (0,0,0) en la pared del fondo (Fig. 2). Los resultados de estas mediciones se muestran en la Tabla 1.



Fig. 2. Pasillo del Instituto de Fotogrametría de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, lugar donde se realizaron las mediciones

Tabla 1: Coordenadas reales e imagen de los puntos.

Punto	x (píxeles)	y (píxeles)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	1235	2090	0	0	144
2	1240	1603	0	103	144
3	1236	1502	0	124	144
4	1422	1588	0	124	350
5	1421	1750	0	103	350
6	1412	2459	0	0	350
7	499	2353	132	0	300
8	574	2158	132	0	107
9	572	1630	132	102	197
10	578	1481	132	130	197

Las mediciones fueron procesadas con el programa de calibración mediante TLD, CALCAM, obteniéndose los siguientes resultados:

$$\begin{aligned}
 L_1 &= -4,34054880171 \\
 L_2 &= -0,05422770394 \\
 L_3 &= -1,72246256621 \\
 L_4 &= 1.469,90078714163 \\
 L_5 &= -0,22270089191 \\
 L_6 &= -4,26890561040 \\
 L_7 &= -0,95701291758 \\
 L_8 &= 1.211,55213897027 \\
 L_9 &= 0,00009548538 \\
 L_{10} &= 0,00014348081 \\
 L_{11} &= 0,00142664117
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_0 &= 1.394,50 \text{ píxeles (Posición horizontal del centro de proyección sobre el sensor).} \\
 y_0 &= 968,08 \text{ píxeles (Posición vertical del centro de proyección sobre el sensor).} \\
 f_x &= 2.935,5 \text{ píxeles (Distancia focal en } x \text{).} \\
 f_y &= 2.890,6 \text{ píxeles (Distancia focal en } y \text{).} \\
 \sigma_x &= \sigma_y = 11,3230 \text{ píxeles.}
 \end{aligned}$$

A fin de comprobar la calidad de Los valores obtenidos mediante el programa desarrollado CALCAM, se compararon éstos con los obtenidos mediante el programa *Camera Calibration Toolbox*, creado por Jean-Yves Bouguet, el cual hace uso de un blanco plano, al estilo de un tablero de ajedrez, para realizar la calibración por homografías. Los resultados obtenidos para la misma cámara utilizada, son los siguientes:

$$\begin{aligned}
 f_x &= 3076.44499 \text{ píxeles} \\
 f_y &= 3046.36171 \text{ píxeles} \\
 x_0 &= 1323.45917 \text{ píxeles} \\
 y_0 &= 868.81874 \text{ píxeles}
 \end{aligned}$$

4 Conclusiones

La Transformación Lineal Directa (TLD) se presenta como un método para la calibración de cámaras digitales accesible, debido a la simplicidad del proceso de cálculo. Sin embargo, su campo de aplicación se limita a situaciones donde la precisión requerida no sea muy elevada, como ocurre en muchos casos de levantamientos arqueológicos y arquitectónicos. Al comparar los resultados obtenidos en

este trabajo con la calibración mediante homografías, considerado éste último como uno de los métodos más exactos de calibración digital, se verifica que la diferencia no sobrepasa el límite máximo de diferencia entre distintos métodos de calibración de cámaras digitales, el cual tiene el límite práctico de 10%.

Referencias bibliográficas

Abdel-Aziz y Karara H M, 1971, .Direct linear transformation from computation coordinate into object-space coordinate. Symposium on Close-Range Photogrammetry of American Society for Photogrammetry (ASP), Falls Church, VA. pp 1-18.

Aracena P D et al, 2005, Comparación de técnicas de calibración de cámaras digitales, Ciencia e Ingeniería, Vol 13, No. 1, Universidad de Tarapaca, Arica, Chile pp 57-67.

Bouguet J Y, Camera Calibration Toolbox for Matlab. Se encuentra en el sitio <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/> . Fecha de consulta 18 noviembre 2011.

Mikhail E, 200, .Introduction to Modern Photogrammetry. John Wiley & Sons, Inc. New York.

Tsai R Y, 1987, A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision. IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol 3 No. 4, pp 323-344.

Zhang Z, 1999, Flexible Camera Calibration By Viewing-Plane From Unknown Orientations. International Conference on Computer Vision (ICCV'99), Corfu, Greece, pp. 666-673, September 1999.

Recibido: 22 de enero de 2012

Revisado: 20 octubre de 2012

Jauregui Olázabal, Luís María: Profesor Titular del Instituto de Fotogrametría - Facultad de Ingeniería- ULA. Ingeniero Civil - DESS en Teledetección, CNES, Paris Francia. Línea de Investigación: Fotogrametría Digital, Modelaje del Terreno y Teledetección.

Jauregui Olázabal, Manuel: Profesor Titular del Instituto de Fotogrametría - Facultad de Ingeniería- ULA. Ingeniero Civil - MSc en Fotogrametría en ITC Holanda Línea de Investigación: Fotogrametría Digital y Modelaje del Terreno. Correo electrónico: manuel@ula.ve.

Chacón, Leira Margarita: Profesora Titular del Instituto de Fotogrametría - Facultad de Ingeniería ULA. Ingeniero de Sistemas - MSc en Visualización, Visión y Ambientes Virtuales Línea de Investigación: Fotogrametría Digital y Modelaje del Terreno. Correo electrónico: leirac@ula.ve

Vilchez Villalobos, José Gabriel: Profesor Titular del Instituto de Fotogrametría - Facultad de Ingeniería- ULA. Ingeniero Geodesta - MSc en Ingeniería Geodésica Línea de Investigación: Fotogrametría Digital, Modelaje del Terreno y Teledetección. Correo electrónico: vilchez@ula.ve.

