# Un nuevo método de Calibración de cámaras de líneas (Line scan).

Carlos A. Luna, Manuel Mazo, José L. Lázaro, Haidee Sarmiento y Juan Vázquez

Universidad de Alcalá. España. carl\_luna@yahoo.es, mazo@depeca.uah.es

*Resumen* — En este trabajo se presenta un método novedoso de calibración de cámaras de línea. En este método se utiliza un patrón de calibración formado por dos planos a diferentes profundidades, en cada uno de los cuales se han dibujado rectas que forman dos rectángulos con una de sus diagonales. A partir de la geometría del patrón y de la línea captada por el *line scan*, se calculan las coordenadas 3D de los puntos correspondientes a las rectas del patrón captados por el *line scan*. Con estas coordenadas se obtienen mediante un procedimiento estándar de calibración los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara de línea. En el trabajo se muestra dicho procedimiento de calibración y los resultados obtenidos con el mismo.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe un creciente uso de los *line* scan en diferentes aplicaciones entre las que se encuentran: la industria automotriz, la construcción y restauración de edificios, la bioingeniería, los sistemas de vigilancia y los ferrocarriles, [1]-[4].

A pesar de este amplio uso de los line scan, a diferencia de las cámaras de área o matriciales, en la bibliografía consultada aparece escasa información sobre la calibración de las mismas. En [5] se propone un método de calibración multi-línea (no se debe llamar multi-imagen, ya que cada imagen está formada por una línea) para calcular los parámetros extrínsecos y las coordenadas del punto de intersección del eje óptico con la línea imagen (centro óptico). Para ello utilizan un patrón de calibración de un sólo plano, con tres rectas paralelas y una inclinada 45<sup>0</sup> respecto a las otras. En este método los autores determinan, de forma indirecta, 8 parámetros de calibración que representan la posición geométrica de la cámara de línea respecto al patrón y a partir de los cuales se pueden obtener las matrices de rotación y traslación. En esta propuesta de calibración realizada en [5], es necesario desplazar al patrón con incrementos conocidos para cada línea imagen utilizada en la calibración. Esto hace que los resultados de la calibración dependan de la exactitud con la que se conozcan dichos desplazamientos.

En este trabajo se presenta un método de calibración en el que no es necesario conocer la posición del patrón de calibración. El mismo está estructurado de la siguiente forma: primeramente se describe el método propuesto, seguidamente se muestran los resultados obtenidos para un *line scan* de 2048 píxeles y finalmente se exponen las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

#### II. MÉTODO DE CALIBRACIÓN PROPUESTO

En esta nueva propuesta, como patrón se ha utilizado una estructura geométrica similar a la que se muestra en la ver Fig 1. La misma está formada por dos pantallas planas ( $\Pi_{sup}$  y  $\Pi_{inf}$ ), paralelas entre si y separadas una distancia  $d_p$ . Estas pantallas son de fondo blanco y en cada una de ellas se han dibujado unas rectas ( $L_1$ ,  $L_2$ , ....,  $L_{10}$ ) que forman dos rectángulos y con una de sus diagonales.



Fig. 1. Patrón utilizado en el proceso de calibración del line scan.

Se ha elegido este tipo de patrón debido a que de forma sencilla se pueden obtener las coordenadas  $(X_i, Y_i, Z_i)$  de los puntos negros, correspondientes a las rectas, que son captados por el *line scan*. Además, se obtiene una buena robustez del sistema frente a los

errores de cuantificación cometidos en la selección de los centros de dichos puntos.

El método de calibración propuesto consta de dos pasos:

- 1. A partir de la línea captada con el *line scan* y la geometría del patrón, se obtienen las coordenadas  $(X_i, Y_i, Z_i)$  de los puntos  $(\mathbf{P}_i)$  correspondientes a las rectas del patrón.
- 2. Con las coordenadas de los diferentes puntos  $P_i$ y sus correspondientes valores en la línea captada por el *line scan*, se obtienen, mediante un método tradicional de calibración los parámetros intrínsecos (distancia focal *f* y el punto principal ( $u_0$ ,  $v_0$ )) y extrínsecos del line scan.

A. Obtención de las coordenadas de los puntos  $M_{ai}$  del patrón, capturados por el line scan

El la Fig. 2 se muestra, de forma esquemática, la vista frontal del patrón utilizado y la línea capturada por el *line scan* (binarizada). Del patrón son conocidas todas las dimensiones y por tanto son conocidas las ecuaciones de las rectas  $L_{is}$  (ver Fig. 1).

El patrón se debe ubicar de forma tal que el *line scan* capture todas las rectas y que éstas ocupen la mayor zona posible de la línea capturada. Una forma sencilla de lograr esta posición es hacer coincidir el píxel central del sensor con el escalón del patrón. Esto se hace para aprovechar al máximo el campo visual del *line scan*.



Fig. 2. Vista frontal del patrón de calibración y línea captada por el line scan.

En lo que sigue se va a considerar que la relación entre los segmentos  $L_{bj}$  y  $L_{aj}$  sobre el patrón es aproximadamente igual a la relación de sus proyecciones en la línea captada (1). La coordenada sobre la línea imagen del *line scan* se identificará por v la proyección del punto  $\mathbf{P}_i$  capturado se identificará por  $v_i$ . En [6] se demostró mediante simulaciones que, aunque (1) no se cumpla con precisión, el error en la obtención de los parámetros extrínsecos es despreciable.

$$\frac{L_{bj}}{L_{ai}} \cong \frac{\Delta v_{bj}}{\Delta v_{ai}} \tag{1}$$

donde, j = 1, 2, 3, 4 y  $\Delta v_{bj}$  y  $\Delta v_{aj}$  son las proyecciones en la línea imagen de los segmentos  $L_{bj}$  y  $L_{aj}$ .

Para cada uno de los valores de  $v_i$  correspondientes a un punto de una recta del patrón ( $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \ldots, \mathbf{P}_{10}$ ), se calculan sus coordenadas  $\mathbf{P}_i$ . Estas coordenadas vienen dadas por las ecuaciones que se muestran en la Tabla I.

		$\mathbf{P}_i$		
l	Ĵ	X <sub>i</sub>	$Y_i$	$Z_i$
		142	h	
2, 4	$\frac{i}{2}$	$\frac{\frac{W_p}{L_{bj}}}{\frac{L_{aj}}{L_{aj}}} + 1$	$h_p \cdot (j-1) + \frac{n_p}{\frac{L_{bj}}{L_{aj}} + 1}$	0
1, 3, 5	$\frac{i}{2}$	$x_2 + \frac{x_4 - x_2}{y_4 - y_2} (y_i - y_2)$	$h_p \cdot \frac{(i-1)}{2}$	0
7, 9	$\frac{i-1}{2}$	$\frac{w_p}{\frac{L_{bj}}{L_{aj}} + 1}$	$h_{pc} + \overline{h_p \cdot (\frac{i-3}{2})} + \frac{\overline{h_p}}{\frac{L_{bj}}{L_{aj}} + 1}$	$d_p$
6, 8, 10	$\frac{i-1}{2}$	$x_7 + \frac{x_9 - x_7}{y_9 - y_7} \cdot (y_i - y_7)$	$h_{pc} + h_p \cdot (\frac{i}{2} - 1)$	$d_p$

TABLA I Ecuaciones para determinar las coordenadas de los puntos  $\mathbf{P}_i$ .

Una vez obtenidas las coordenadas  $\mathbf{P}_i$ , el siguiente paso es obtener los parámetros de calibración del *scan line*.

# B. Calculo de los parámetros de calibración

La obtención de los parámetros de calibración se puede realizar por los métodos clásicos que se basan en el modelo de cámara *pine-hole* [7]-[9]. Para el caso de las cámaras matriciales se tiene:

$$\begin{cases} u + e_u = u_0 + \frac{do_x}{du} + f_x \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + T_x}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + T_z} \\ v + e_v = v_0 + \frac{do_y}{dv} + f_y \frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + T_y}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + T_z} \end{cases}$$
(2)

donde:

• 
$$f_x = \frac{f}{du} \text{ y } f_y = \frac{f}{dv}.$$

- *du* y *dv* son las dimensiones de un píxel en lo ejes x e y, respectivamente.
- $e_u y e_v$  son los errores en la detección de u y v, respectivamente.
- $r_{xx}$  son los parámetros de la matriz de rotación.
- *T<sub>x</sub>*, *T<sub>y</sub>* y *T<sub>z</sub>* son las componentes del vector de traslación del origen de coordenadas del *line scan* respecto al sistema de coordenadas del patrón
- (u<sub>0</sub>, v<sub>0</sub>) es el punto principal que representa las coordenadas (en píxeles) del punto de intersección del eje óptico de la cámara con el plano imagen.
- do<sub>x</sub> y do<sub>y</sub> son las componentes de distorsión óptica de la lente, que se pueden dividir en dos

partes, distorsión radial y distorsión tangencial, [8], [10], [11].

En lo que se refiere a la influencia de las distorsiones ópticas, si se considera a un *line scan* como la línea central (u = 0) de una cámara matricial, se puede asumir que la distorsión óptica es pequeña y despreciarla. También se asume que  $f_x = f_y$ , ya que el valor real de  $f_x$ , generalmente carece de utilidad en la práctica. Entonces (2) se puede rescribir:

$$\begin{cases} 0 + e_u = u_0 + f_x \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + T_x}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + T_z} = P(\mathbf{\Phi}) \\ v + e_v = v_0 + f_y \frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + T_y}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + T_z} = Q(\mathbf{\Phi}) \end{cases}$$
(3)

donde,  $\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} u_0, v_{0,fx}, T_x, T_y, T_z, \alpha, \beta, \gamma \end{bmatrix}^T$  es un vector que contiene 3 parámetros intrínsecos (característicos de la cámara y la lente) y 6 parámetros extrínsecos (posición geométrica relativa entre el patrón y la cámara). El sistemas de ecuaciones que se forma a partir (3) de los 10 puntos correspondientes a las 10 rectas del patrón tiene 20 ecuaciones.

Dado que  $P(\Phi)$  y  $Q(\Phi)$  son funciones no lineales de  $\Phi$ , la solución hay que llevarla a cabo utilizando métodos no lineales de optimización [7]-[9]. El método aproximado de solución por mínimos cuadrados permite determinar  $\Phi$ , minimizando el error en la medida de las coordenadas (u, v). Este es un método recursivo, con el cual es posible hacer una estimación de un vector residual  $V(\Phi)$  y reutilizarlo en cada iteración hasta lograr la precisión deseada.

Rescribiendo (3) en forma matricial:

$$\begin{pmatrix} e_u \\ e_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P(\mathbf{\Phi}) - u \\ Q(\mathbf{\Phi}) - v \end{pmatrix} = \mathbf{V}(\mathbf{\Phi})$$
(4)

El vector de residuos de error  $V(\Phi)$  es un vector donde las coordenadas vienen dadas en píxeles y que representa para cada imagen la diferencia entre la posición del punto/píxel detectado y la reproyección del punto tridimensional del patrón reconstruido.

Linealizando (4) por el método de Newton-Raphton se obtiene:

$$\mathbf{V}(\mathbf{\Phi}) = \mathbf{V}(\mathbf{\Phi}_0) - \frac{\partial \mathbf{V}(\mathbf{\Phi})}{\partial \mathbf{\Phi}} \cdot \Delta \mathbf{\Phi}$$
 (5)

Haciendo  $\mathbf{V}_0 = \mathbf{V}(\mathbf{\Phi}_0)$  y  $\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{V}(\mathbf{\Phi})}{\partial \mathbf{\Phi}}$ ,

los incrementos del vector de los parámetros vienen dados por:

$$\Delta \mathbf{\Phi} = (\mathbf{J}^T \cdot \mathbf{J})^{-1} (\mathbf{J}^T \cdot \mathbf{V}_0)$$
(6)

que Para determinar las coordenadas  $v_i$ se corresponden con el centro de cada punto correspondiente a las líneas de la marca, capturado por el line scan, se ha implementado un algoritmo que reduce los efectos de los cambios de iluminación. En el mismo, cada vez que se detecta un pico negativo de intensidad, se selecciona el píxel con menor intensidad  $v_{i,\min}$  y a este valor se le suma un incremento que depende intensidad de la luminosa  $(I(v_{i,\min-1}), I(v_{i,\min+1}))$  de los píxeles adyacentes. Este incremento se calcula utilizando el siguiente criterio:

- Si  $I(v_{i,\min-1}) = I(v_{i,\min+1}) \rightarrow v_i = v_{i,\min}$ (7)
- Si  $I(v_{i,\min-1}) < I(v_{i,\min+1}) \rightarrow$

$$v_{i} = v_{i,\min} + \frac{I(v_{i,\min-1}) - I(v_{i,\min+1})}{2 \cdot \left[I(v_{i,\min+1}) - I(v_{i,\min})\right]}$$
(8)

• Si 
$$I(v_{i,\min-1}) > I(v_{i,\min+1}) \rightarrow$$
  
 $v_i = v_{i,\min} + \frac{I(v_{i,\min-1}) - I(v_{i,\min+1})}{2 \cdot [I(v_{i,\min-1}) - I(v_{i,\min})]}$  (9)

Se ha considerado que un píxel pertenece a un pico negativo siempre que se cumpla que:

$$I(v_i) \le \frac{I(v_{i-w-1}) + I(v_{i+w+1})}{2} \cdot T$$
(10)

donde, 2w+1 es número máximo de píxeles que corresponden a una línea de la marca y *T* es un valor constante que se determina de forma empírica. Este valor viene dado por la diferencia entre la intensidad de los píxeles pertenecientes a las rectas del patrón y los que se corresponden con el fondo. En este trabajo se escogió T = 0.8, lo que supone que un píxel pertenece a una recta siempre que su intensidad sea un 20% menor que la intensidad del fondo.

## III. RESULTADOS PRÁCTICOS

Con el objetivo de disminuir los errores de cuantificación ocurridos en la selección de los puntos correspondientes a las rectas del patrón, en el cálculo de los parámetros de calibración, se han escogido los valores medios para una secuencia de 500 líneas. En la Fig. 3 se muestra en forma de imagen la secuencia de líneas utilizada. Esta secuencia fue capturada con una óptica de 100 *mm*, utilizando un *line scan* de 2048 píxeles.

En la calibración de este *line scan* se ha utilizado un patrón, cuyas dimensiones son (ver Fig. 1 y Fig. 2):  $w_p = 20 \text{ cm}$ ,  $h_p = 4 \text{ cm}$  y  $h_{pc} = 1 \text{ cm}$ ,  $d_p = 10.8 \text{ cm}$ . En la Tabla II se muestran los valores medios y la desviación estándar para cada parámetro.



Fig. 3. Imagen que contiene las 500 líneas utilizadas para obtener los parámetros de calibración del line scan.

TABLA II
VALOR MEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR OBTENIDAS EN LA ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE
CALIBRACIÓN DE UN <i>LINE SCAN</i> PARA UNA SECUENCIA DE 500 LÍNEAS.

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar
a, grados	-4.75635	3.13 x 10 <sup>-3</sup>
$\beta$ , grados	-1.54796	3.53 x 10 <sup>-2</sup>
γ, grados	37.81150	1.76 x 10 <sup>-2</sup>
$T_x, m$	0.02764	1.62 x 10 <sup>-3</sup>
$T_y, m$	0.49349	1.69 x 10 <sup>-4</sup>
$T_z, m$	0.06532	7.11 x 10 <sup>-4</sup>
f,mm	100.38	6.27 x 10 <sup>-2</sup>
<i>v<sub>o</sub></i> , píxeles	9.12	0.23
$u_0$ , píxeles	1039.41	0.19

### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un método de calibración de *line scans* usando un patrón que está formado por dos planos. Los resultados prácticos obtenidos demuestran que el mismo es válido para la óptica utilizada. No obstante, es necesario realizar experimentos con ópticas de grandes angulares (p.ej. del tipo ojo de pez). También se recomienda hacer pruebas con un número mayor de rectas en el patrón con el objetivo de mejorar los resultados.

#### REFERENCIAS

- Hirahara, K.; Ikeuchi, K.; "Detection of street-parking vehicles using line scan camera and scanning laser range sensor"; IEEE Intelligent Vehicles Symposium. pp. 656-661, June 2003.
- [2] Kataoka, K.; Osawa, T.; Ozawa, S.; Wakabayashi, K.; Arakawa, K.; "3D Building Façade Model Reconstruction Using Parallel Images Acquired by Line Scan Cameras"; IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2005), vol. 1, pp. 1009-1012, Sept. 2005.
- [3] Hirahara, K.; Ikeuchi, K.; "Extraction of vehicle image from panoramic street-image"; IEEE Intelligent Vehicles Symposium. pp. 656-661, June 2004.
- [4] Luna, C. A.; Mazo, M.; Lázaro, J. L.; Palazuelos, S. E.; Vázquez, J. F.; Hierrezuelo, L.; Santiso, E.; García, J. J.; Jiménez, J. A.; "Attenuation of the vibration effects in a 3D coordinates measurement system installed in a

railway car"; IEEE Intelligent Vehicles Symposium IV'04. Parma. Italy, Jun. 2004.

- [5] Radu Horaud, Roger Mohr, and Boguslaw Lorecki; "On Single-Scanline Camera Calibration", IEEE Trans. on Robobtics and Automation. Vol. 9, No. 1, pp. 71-75, Feb. 1993.
- [6] C. A. Luna, M. Mazo, J. L. Lázaro, J. F. Vázquez, J. Ureña, S. E. Palazuelos, J. J. García, F.Espinosa, E. Santiso; "Method to measure the rotation angles in vibrating systems"; IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol.55, No. 2, pag. 232-239. Feb. 2006.
- [7] Lavest, J. M.; Rives, G. and Rousseau, J. T.; "3D We ReallyNeed an Accurate Calibratión Pattern to Achieve a Reliable Camera Calibration?"; ECCV'1998, Vol. 1, pp. 158-174, Freibrug, Germany, June 2004.
- [8] Heikkilä, J.; "Geometric Camera Calibration Using Circular Control Points"; IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 10, pp. 1066-1077, Oct 2000.
- [9] Gardel, A.; Lázaro, J. L. And Lavest J. M.; "Camera Auto-Calibration with Virtual Patterns"; Proceeding of the ETFA 2003, Lisboa, Sept. 2003.
- [10] Janne Heikkilä and Olli Silvén; "A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction"; Infotech Oulu and Department of Electrical Engineering. University of Oulu. FIN-90570. Oulu, Finland, 1997.
- [11] Zhengyou Zhang; "Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations"; Microsoft Research, One MicrosoftWay, Redmond, WA 98052-6399, USA, 1999.