



**LABORATÓRIO DE ÓPTICA E MECÂNICA EXPERIMENTAL**

## **RELATÓRIO INTERNO**

*Método de Calibração de Câmaras*

*Proposto por Zhang*

Maria Cândida F. S. P. Coelho

João Manuel R. S. Tavares

Setembro de 2003

## RESUMO

O presente relatório tem como principal objectivo descrever, resumidamente, o método e o *software* de calibração proposto por *Zhang*, facilitando a sua posterior utilização. Assim, o relatório é constituído por três secções: na primeira, é feita uma pequena introdução ao método de calibração proposto; na segunda, são apresentados os parâmetros de calibração a estimar e a classe na qual o método se insere; e na terceira e última secção, são descritas as funções implementadas no *software* que permitem a calibração de uma câmara e a correcção de imagens com distorção.

## **ABSTRACT**

The main goal of the present report is to briefly describe the calibration method and software proposed by *Zhang*, facilitating its posterior use. Thus, this report is constituted by three sections: in the first one, a small introduction to the considered calibration method is presented; in the second, the calibration parameters to be estimated and the class in which the method fits are indicated; and in the third and last section, are described the implemented functions that allow cameras calibration and distorted images correction.

## ÍNDICE

<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>5</b>
<b>2 - CLASSIFICAÇÃO DO MÉTODO .....</b>	<b>5</b>
<b>3 - <i>SOFTWARE</i> DE CALIBRAÇÃO DESENVOLVIDO POR <i>ZHANG</i> .....</b>	<b>6</b>
3.1 - Calibração de uma câmara.....	6
3.2 - Correção da distorção radial da lente.....	8
<b>4 - REFERÊNCIAS .....</b>	<b>9</b>
<b>ANEXO: PARÂMETROS <math>\alpha</math>, <math>\beta</math>, <math>\gamma</math>.....</b>	<b>10</b>

## 1 - INTRODUÇÃO

O método de calibração de câmaras proposto por *Zhang* é um método simples, que não necessita de um grande conhecimento de geometria 3D e de Visão por Computador. Este método apresenta um *setup* de fácil aplicação e de custo baixo, que requer apenas que a câmara observe um padrão planar com diferentes (pelo menos duas) orientações/posições<sup>1</sup>, podendo ambos moverem-se livremente. O método proposto consiste na determinação de uma solução analítica (“*closed-form solution*”) que permite obter uma aproximação inicial dos parâmetros intrínsecos/extrínsecos da câmara, seguida de um refinamento não-linear baseado no critério de *Máxima Verosimilhança*. Finalmente, é incluído no modelo a distorção radial da lente, dadas as soluções analítica e não-linear.

## 2 - CLASSIFICAÇÃO DO MÉTODO

Este método de calibração está inserido nas técnicas de múltiplos-passos e utiliza: no primeiro passo, aproximação linear para determinação de uma solução analítica; no segundo passo, estimação da distorção radial da lente (dois termos); e, no terceiro passo, otimização não-linear de todos os parâmetros utilizando o critério de *Máxima Verosimilhança* (Fig. 1).

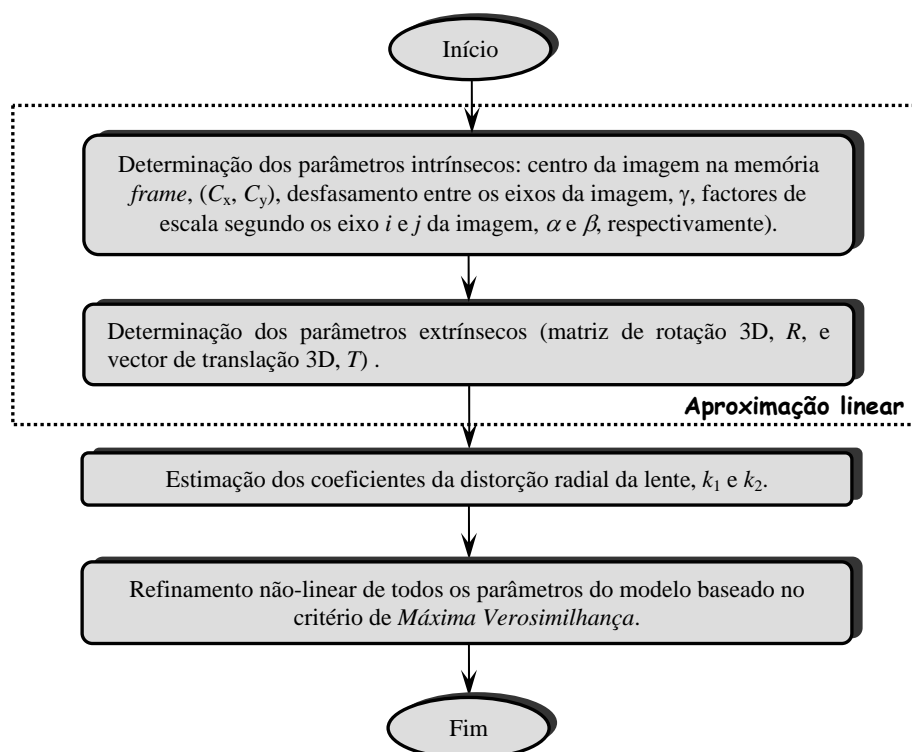


Figura 1 - Esquema do método de calibração proposto por Zhang.

<sup>1</sup>As matrizes de rotação observadas quando se adquirem duas imagens do padrão planar têm de ser independentes (não pode existir uma translação pura), de outra forma não fornecem restrições adicionais necessárias à aplicação do método.

### 3 - SOFTWARE DE CALIBRAÇÃO DESENVOLVIDO POR ZHANG

O *software* desenvolvido por *Zhang* para calibração de câmaras permite: estimar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos de uma câmara considerando ou não distorção radial da lente (secção 3.1), e corrigir essa distorção dados os parâmetros da câmara e a imagem original (secção 3.2). Este *software* foi desenvolvido para os sistemas operativos *Microsoft Windows* e é executável por linha de comando (*Command Prompt*). Este método de calibração de câmaras está implementado no *OPENCV* distribuído pela *Intel* (disponível em <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary>) e em ambiente *Microsoft Visual C++* (disponível em <http://www.tjhsst.edu/~eherbst/techlab/>).

#### 3.1 - Calibração de uma câmara

##### 3.1.1 - Parâmetros de entrada:

- **ModelFile** - nome do ficheiro de entrada (formato de texto) que contém as coordenadas 3D no referencial mundo dos pontos de calibração. Na *Fig. 2* é apresentado um exemplo desse ficheiro em que os pontos de calibração são as coordenadas dos vértices de vários quadrados;
- **ImageDataFile1, ImageDataFile2, <... >** - nome dos ficheiros de entrada (formato de texto) que contém as coordenadas 2D imagem na memória *frame* dos pontos de calibração (*Fig. 4*).

Quadrado:							
Vértice 1		Vértice 2		Vértice 3		Vértice 4	
$X_w$	$Y_w$	$X_w$	$Y_w$	$X_w$	$Y_w$	$X_w$	$Y_w$
0	-0.5	0.5	-0.5	0.5	0	0	0
0.888889	-0.5	1.38889	-0.5	1.38889	0	0.888889	0
1.77778	-0.5	2.27778	-0.5	2.27778	0	1.77778	0
2.66667	-0.5	3.16667	-0.5	3.16667	0	2.66667	0
3.55556	-0.5	4.05556	-0.5	4.05556	0	3.55556	0
....							
2.66667	-6.72222	3.16667	-6.72222	3.16667	-6.22222	2.66667	-6.22222
3.55556	-6.72222	4.05556	-6.72222	4.05556	-6.22222	3.55556	-6.22222
4.44444	-6.72222	4.94444	-6.72222	4.94444	-6.22222	4.44444	-6.22222
5.33333	-6.72222	5.83333	-6.72222	5.83333	-6.22222	5.33333	-6.22222
6.22222	-6.72222	6.72222	-6.72222	6.72222	-6.22222	6.22222	-6.22222

Figura 2 – Exemplo de um ficheiro de entrada (.txt) da implementação do método de Zhang, que contém as coordenadas 3D dos pontos de calibração (eixo Z do referencial mundo é igual a zero). Para melhor compreensão dos dados foram adicionadas as três primeiras linhas (não fazem parte do ficheiro).

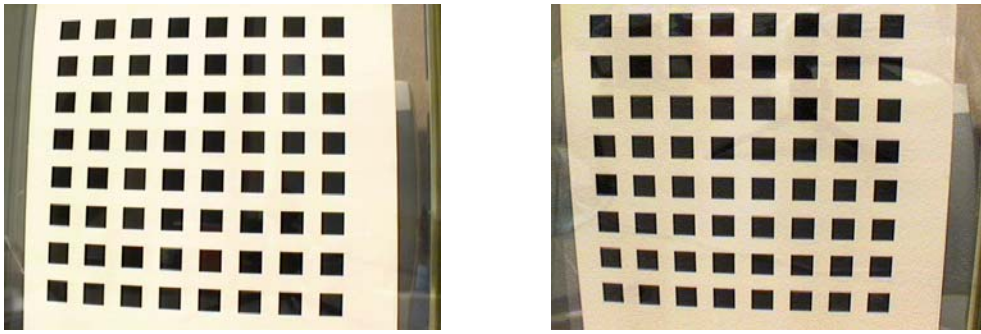


Figura 3 – Imagens adquiridas por uma câmara com orientações distintas. As coordenadas 2D dos vértices dos quadrados são os pontos de calibração na memória frame a serem utilizados pela implementação.

Quadrado:							
Vértice 1		Vértice 2		Vértice 3		Vértice 4	
I	J	I	J	I	J	I	J
63.43921044061	405.5767976684	92.4627014167	407.4556539075	91.80636571669	438.6576508540	62.58724663945	436.2884421212
116.2803553042	409.1785833324	146.450270096	410.9232175606	145.6115365739	442.5588539245	115.4621289243	440.2901448311
170.8326968376	412.4603813083	201.848741676	414.3669733915	201.0728234256	446.1786800590	169.9694854760	444.0421082670
226.8684678464	415.8660937726	258.877500247	417.2222366669	258.0879886273	449.4164088145	226.0553704310	447.6506825567
284.3904968109	418.5256156019	317.018179452	419.9879376056	316.1712829180	452.3706948520	283.5861111501	450.9388521872
342.9473487862	420.8686269181	376.124556280	422.3172738779	375.2486315425	454.8351472215	342.1840598520	453.6168480341
402.3786597601	423.0391036991	435.729564896	424.2094044786	434.9842265290	456.8888709008	401.4553642367	455.9696204207
...							
134.6306229879	22.61581743258	163.494410256	21.67125186025	161.5574838572	50.49984983220	132.4315103172	51.21217702660
187.1249252740	20.95504911622	216.675210544	20.30411968651	215.0438676007	49.46007509282	185.0018807397	50.02127396914
240.9165999666	19.80372478225	271.330878651	19.12826253252	269.9083155576	48.58731916715	239.2069709255	48.99785244231
295.9948347437	18.78111909293	326.993329867	18.46896861919	325.8087109253	48.09948571686	294.5326210707	48.45749239278
351.9209900118	18.26130021351	383.418492990	18.06838345680	382.6677477731	47.95264840826	350.9172860020	48.04757384310
408.5261061592	17.99128802948	440.323109121	18.11972354100	440.0088794597	48.06368484279	407.8801970148	48.20685086921
465.6562142405	18.20751641371	497.268015049	18.38533394813	497.3887395771	48.52478019078	465.3893833602	48.30739787254

Figura 4 – Exemplo de um ficheiro de entrada (.txt) da implementação do método de Zhang, que contém as coordenadas 2D na memória frame dos pontos de calibração. Para melhor compreensão dos dados foram adicionadas as três primeiras linhas (não fazem parte do ficheiro).

**Nota:** Os vértices dos quadrados apresentados nas imagens da Fig. 3 são detectados através da intersecção de linhas rectas ajustadas a cada quadrado e as suas coordenadas são guardadas em ficheiros de texto (Fig. 4) para serem utilizados como parâmetros de entrada da implementação do método de Zhang (o software utilizado para a detecção dos pontos de calibração não foi disponibilizado, nem referenciado, no trabalho publicado por Zhang).

### 3.1.2 - Parâmetros de saída (Fig. 5):

- $\alpha$  (alpha) - factor de escala da imagem na memória frame segundo o eixo  $i$ ;
- $\beta$  (beta) - factor de escala na imagem na memória frame segundo o eixo  $j$ ;

- $\gamma$  (*gamma*) - parâmetro que descreve o desfasamento entre os dois eixos da imagem (numa câmara ideal o valor deste parâmetro é 0, que corresponde a um ângulo de  $90^\circ$  entre os dois eixos da imagem);
- $(C_x, C_y)$  - centro da imagem na memória *frame*;
- $k_1, k_2$  - primeiros dois coeficientes da série infinita que representa a distorção radial da lente;
- $R_1, T_1; R_2, T_2; < \dots >$  - matriz de rotação 3D e vector de translação 3D estimados para os dados dos ficheiros: *ImageDataFile1*, *ImageDataFile2*, *< ... >*.

```

830.469 -6.50323e-026 830.242 307.032 206.551 ( $\alpha, \gamma, \beta, C_x, C_y$ )

-0.226881 0.193933 ( $k_1, k_2$ )

      (ImageDataFile1)
0.993025 -0.0258774 0.115033      ( $r_{11}, r_{12}, r_{13}$ )
0.0138109 0.994431 0.104481      ( $r_{21}, r_{22}, r_{23}$ )
-0.117096 -0.102163 0.987852      ( $r_{31}, r_{32}, r_{33}$ )
-3.88683 3.65306 12.7527          ( $t_x, t_y, t_z$ )

      (ImageDataFile2)
0.997534 -0.00525723 0.0699907      ( $r_{11}, r_{12}, r_{13}$ )
0.0175977 0.984073 -0.176892      ( $r_{21}, r_{22}, r_{23}$ )
-0.067946 0.177687 0.981739      ( $r_{31}, r_{32}, r_{33}$ )
-3.76473 3.77003 13.1569          ( $t_x, t_y, t_z$ )
    
```

Figura 5 – Exemplo do conteúdo do ficheiro de saída da implementação do método de Zhang. Parâmetros intrínsecos e extrínsecos estimados por esse método. Para melhor compreensão dos dados foram adicionados, entre parênteses, o parâmetro a que corresponde cada valor (não fazem parte do ficheiro).

## 3.2 - Correção da distorção radial da lente

### 3.2.1 - Parâmetros de entrada:

- **OriginalImage** - nome do ficheiro de entrada (formato de imagem) que contém as coordenadas 2D na memória *frame* distorcidas (Fig. 3);
- **CalibrationFile** - nome do ficheiro de entrada (formato de texto) que contém os parâmetros da câmara estimados (Fig. 5).

### 3.2.2 - Parâmetros de saída:

- **UndistortedImage** - nome do ficheiro de saída (formato de imagem) que contém a imagem não distorcida (Fig. 6).



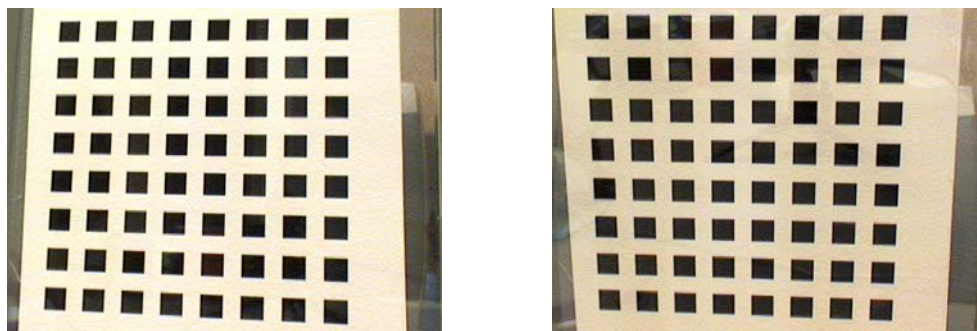


Figura 6 – Imagens não distorcidas obtidas a partir da implementação desenvolvida por Zhang, tendo como parâmetros de entrada as imagens apresentadas na Fig. 3 e os parâmetros da câmara.

## 4 - REFERÊNCIAS

**Z. Zhang** - A Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11):1330-1334, 2000.

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

**OPENCV** - Intel Open Computer Vision Library. <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary>, 2001

**E. Herbst** - Camera Calibration by Corners Detection. <http://www.tjhsst.edu/~eherbst/techlab/>, 2003

O método de calibração proposto, o *software* desenvolvido e as experiências realizadas por Zhang estão disponíveis na seguinte página da Web: <http://research.microsoft.com/~zhang/Calib>

## ANEXO: PARÂMETROS $\alpha, \beta, \gamma$

### A.1 - MÉTODO *PIN HOLE*

Um ponto  $P_w$ , no sistema de coordenadas 3D mundo, é transformado num ponto  $P_i$ , no sistema de coordenadas 2D imagem na memória *frame*, por uma transformação geométrica  $C$ , ou seja,  $P_{(u,v)} = C \cdot P_{(x_w, y_w, z_w)}$ , ou ainda,

$$\begin{bmatrix} w \cdot u \\ w \cdot v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{x1} & 0 & C_x & 0 \\ 0 & d_{y1} & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = C \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

com  $d_{x1} = s_x \cdot d_x^{-1} \cdot f$  e  $d_{y1} = d_y^{-1} \cdot f$ ,

onde  $R$  é a matriz de rotação 3D,  $T$  é o vector de translação 3D,  $f$  é a distância focal efectiva,  $(C_x, C_y)$  são as coordenadas discretas do centro óptico na memória *frame*,  $s_x$  é factor de incerteza horizontal (que neste modelo tem o valor um) e  $d_x$  e  $d_y$  são as distâncias entre centros dos elementos sensores vizinhos segundo as direcções  $X$  e  $Y$ , respectivamente.

### A.2 - APROXIMAÇÃO LINEAR DO MÉTODO DE ZHANG

Um ponto 2D é definido como  $m = [u; v]^T$ . Um ponto 3D é definido como  $M = [X; Y; Z]^T$ . É usado  $\tilde{x}$  para representar as coordenadas homogéneas desses pontos:  $\tilde{m} = [u; v; 1]^T$  e  $\tilde{M} = [X; Y; Z; 1]^T$ . Considerando um modelo ideal para a câmara (modelo *Pin Hole*): a relação entre um ponto 3D,  $M$ , e a sua projecção na imagem,  $m$ , é dada por:

$$s\tilde{m} = A[R \ T]\tilde{M}, \quad (2)$$

onde  $s$  é um factor de escala arbitrário e  $A$ , designada matriz dos parâmetros intrínsecos da câmara, é dada por:

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & C_x \\ 0 & \beta & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

onde,  $\alpha$  e  $\beta$  são os factores de escala da imagem na memória *frame* segundo os eixos  $u$  e  $v$ , respectivamente, e  $\gamma$  é o parâmetro que descreve o desfasamento entre estes dois eixos (eixos da imagem na memória *frame*).

### A.3 - RELAÇÃO ENTRE OS DOIS MÉTODOS

Observando as equações (1) e (2) de cada um dos métodos verifica-se que se trata da mesma transformação, assim conclui-se que,

$$\alpha = d_x^{-1} \cdot f ,$$

$$\beta = d_y^{-1} \cdot f ,$$

e

$$\gamma = 0 ,$$

pois o método *Pin Hole* não considera qualquer desfasamentos entre os eixos  $u$  e  $v$  da imagem na memória *frame* (modelo perfeito: o ângulo entre os eixos  $u$  e  $v$  da imagem é de  $90^\circ \Rightarrow \gamma = 0$ ).

Note-se que, no método de *Zhang*, a determinação da distância focal efectiva,  $f$ , é realizada após o refinamento não-linear de todos os parâmetros do modelo (com distorção radial da lente) e conhecendo os parâmetros da câmara  $d_x$  ou  $d_y$ , normalmente fornecidos pelo fabricante. O seu valor é obtido directamente do parâmetro  $\beta$  ou, indirectamente, do parâmetro  $\alpha$ .