

ESTUDO DOS PARÂMETROS INFLUENTES NA CALIBRAÇÃO DE UMA CÂMERA CCD: UMA ABORDAGEM PRÁTICA

Olga Regina Pereira Bellon e Clésio Luis Tozzi

DCA / FEE / UNICAMP

Caixa Postal 6001 - 13081 - Campinas - SP

Resumo: Apresenta-se um estudo a respeito dos principais parâmetros influentes na calibração de uma câmera CCD. Descreve-se, sumariamente, a teoria necessária para o entendimento da calibração, bem como um conjunto de experimentos realizados e uma análise sucinta dos resultados obtidos.

1. INTRODUÇÃO

A calibração da câmera é uma etapa essencial quando se deseja conhecer a localização de objetos no espaço tridimensional, pois dela irá depender todo o bom funcionamento do sistema, independente do método utilizado para a localização.

Calibrar uma câmera significa determinar a correspondência entre os pontos do plano de imagem e os pontos no espaço tridimensional. A teoria necessária para o seu entendimento pode ser encontrada em /WINT87/ e /BALL82/, sendo aqui sumariamente apresentada.

Neste trabalho será dada atenção ao estudo de alguns parâmetros influentes na calibração de uma câmera CCD, a saber, distância câmera/pontos de calibração, escolha dos pixels (picture element) correspondentes aos pontos de calibração e iluminação. Diversos testes foram realizados, sendo seus resultados aqui apresentados.

Finalmente, é feita uma análise dos resultados obtidos, bem como uma breve discussão a respeito das soluções encontradas para reduzir a influência dos parâmetros citados.

2. A CALIBRAÇÃO DA CÂMERA

O objetivo na calibração é determinar a correspondência entre pontos no espaço 3-D e pontos no plano de imagem da câmera. Com este intuito, e de acordo com o modelo da figura 2.1, pode-se observar que devem ser executadas uma série de transformações (relativas a mudança de referenciais e

perspectiva), descritas a seguir.

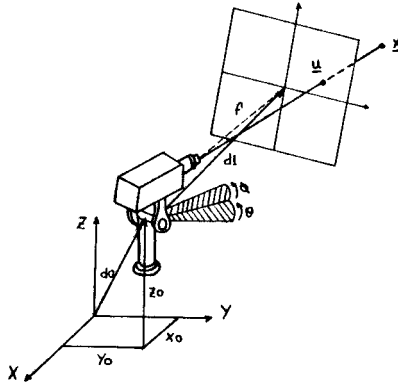


Fig. 2.1- Modelo indicando os dois sistemas de coordenadas. (/BELL89/)

- T: exprime a translação d_0 entre o referencial global e o referencial localizado na articulação do suporte da câmera
- R: exprime a rotação entre o referencial global e o referencial do plano de imagem
- G: exprime o deslocamento d_1 entre a articulação do suporte da câmera e o plano de imagem
- P: exprime a transformação de perspectiva

Assim, pode-se definir a transformação 3D/2D por

$$x \text{ T.R.G.P} = u$$

Como resultado final de tais transformações obter-se-á uma matriz, aqui chamada matriz de transformação, cujos coeficientes incluem os parâmetros da câmera (distância focal, abertura, posição no espaço, etc) que afetam as transformações de perspectiva. Logo, a matriz de transformação pode ser escrita como

$$\text{T.R.G.P} = C$$

Observa-se, então, que a matriz C poderia ser obtida pela simples multiplicação das matrizes T , R , G e P . Porém, os parâmetros inclusos em tais matrizes (ângulos, distâncias, etc) são de difícil medição, tornando-se usual

a determinação da matriz de transformação pelo método denominado "Calibração da Câmera".

Calibrar uma câmera consiste em se obter os elementos da matriz de transformação através de um conjunto de pontos aqui chamados "pontos de calibração". Entende-se como ponto de calibração aquele cujas coordenadas no espaço 3D, bem como sua projeção no plano de imagem, são conhecidas. O número de pontos de calibração necessários para a obtenção da matriz de transformação deve ser de pelo menos 6, como será mostrado a seguir, podendo-se também utilizar um número ainda maior.

Recorrendo-se à formulação homogênea tem-se que:

$$(x, y, z, 1) C = (u, v, t)$$

Assim,

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u & v & t \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} u &= xC_{11} + yC_{21} + zC_{31} + C_{41} \\ v &= xC_{12} + yC_{22} + zC_{32} + C_{42} \\ t &= xC_{13} + yC_{23} + zC_{33} + C_{43} \end{aligned}$$

Lembrando que

$$\begin{aligned} u - Ut &= 0 \\ v - Vt &= 0 \end{aligned}$$

e substituindo nas expressões de u , v e t obtém-se, para cada ponto, duas equações:

$$xC_{11} + yC_{21} + zC_{31} + C_{41} - UxC_{13} - UyC_{23} - UzC_{33} - UC_{43} = 0$$

$$yC_{12} + yC_{22} + zC_{32} + C_{42} - VxC_{13} - VyC_{23} - VzC_{33} - VC_{43} = 0$$

O parâmetro C_{43} , devido à formulação homogênea, pode ter o seu valor arbitrado em 1. Restam assim onze incógnitas a calcular, o que justifica o uso de $5^{1/2}$ pontos conhecidos para determinar completamente os parâmetros da matriz de transformação.

As equações acima podem ser arranjadas de modo a formar, para um número "n" de pontos de calibração, um sistema como o mostrado a seguir.

$$\begin{bmatrix}
 x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -U_1x_1 & -U_1y_1 & -U_1z_1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -V_1x_1 & -V_1y_1 & -V_1z_1 \\
 x_2 & y_2 & z_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -U_2x_2 & -U_2y_2 & -U_2z_2 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & z_2 & 1 & . & . & . \\
 . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\
 . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\
 . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\
 . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\
 . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\
 x_n & y_n & z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -U_nx_n & -U_ny_n & -U_nz_n \\
 0 & 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & z_n & 1 & -V_nx_n & -V_ny_n & -V_nz_n
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 C_{11} \\
 C_{21} \\
 C_{31} \\
 C_{41} \\
 C_{12} \\
 C_{22} \\
 C_{32} \\
 C_{42} \\
 C_{13} \\
 C_{23} \\
 C_{33}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 U_1 \\
 V_1 \\
 U_2 \\
 V_2 \\
 . \\
 . \\
 . \\
 . \\
 . \\
 U_n \\
 V_n
 \end{bmatrix}$$

AC = B

Pode-se observar que se o número de pontos de calibração for maior do que $5^{1/2}$ tornar-se-á necessário o uso de uma solução para C que minimize o erro médio quadrático, podendo ser usada a técnica conhecida como Pseudo-inversa, /BEN-74/ e /BOUL71/, que apresenta a seguinte solução final:

$$C = (A^T A)^{-1} A^T B = A^\dagger B$$

onde A^\dagger é denominada a pseudo inversa de A.

3. O MÉTODO UTILIZADO PARA DETERMINAR A LOCALIZAÇÃO DOS OBJETOS NO ESPAÇO 3-D

Vários métodos podem ser aplicados para determinar a localização de objetos no espaço 3-D (/CORR83/), utilizando-se uma ou mais câmeras. O método implementado utiliza uma só câmera. Neste ponto convém ressaltar que este tipo de enfoque tem sido alvo de inúmeras pesquisas, visto a facilidade de implementação que apresentam quando comparados aos métodos baseados em estereoscopia, onde são encontradas dificuldades na determinação da correspondência entre as duas imagens (/GRIM86/ e /CHEN89/). Na realização deste método os objetos foram restritos a poliedros com dimensões definidas. Esta singularidade, aliada ao conhecimento da transformação de perspectiva inversa (plano de imagem da câmera / espaço 3-D) permite a localização tridimensional de objetos a partir da identificação de três vértices do mesmo. Um modelo para a situação está representado na figura a seguir.

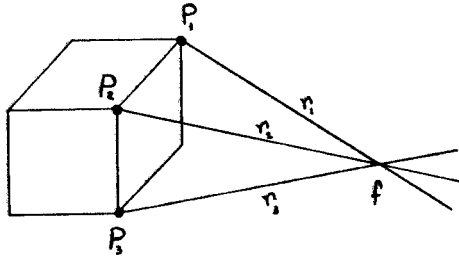


Fig. 3.1- Modelo indicando o objeto com três vértices identificados. /BELL90/

De acordo com a notação utilizada na figura 3.1, pode-se tomar o problema com base em três tópicos principais:

(i) após a calibração da câmera tem-se que a relação $p = C.P$ fica totalmente determinada, onde P é um ponto no espaço 3-D, p é a projeção do ponto no plano de imagem da câmera e C é uma matriz de transformação (3-D/2-D);

(ii) os parâmetros das retas r_1 , r_2 e r_3 , que são concorrentes no foco da câmera e passam, respectivamente, pelos pontos $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$ e $P_3(x_3, y_3, z_3)$, podem ser obtidos através da transformação de perspectiva inversa (/BELL89/) utilizando-se os parâmetros da matriz C de calibração. Observa-se que a transformação de perspectiva inversa não define completamente um ponto no espaço 3-D e sim a equação de uma reta, significando que vários pontos no espaço 3-D apresentam a mesma projeção no plano de imagem da câmera;

(iii) as distâncias $d_1 = P_1P_2$, $d_2 = P_1P_3$ e $d_3 = P_2P_3$ são conhecidas, visto que as dimensões dos objetos também o são.

Assim, o problema se resume em determinar os pontos P_1 , P_2 e P_3 que satisfaçam as condições definidas em (i), (ii) e (iii), e pode ser equacionado da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} x_1 &= a_{11} \cdot t_1 + b_{11} \\ y_1 &= a_{12} \cdot t_1 + b_{12} \\ z_1 &= a_{13} \cdot t_1 + b_{13} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}x_2 &= a_{21} \cdot t_2 + b_{21} \\y_2 &= a_{22} \cdot t_2 + b_{22} \\z_2 &= a_{23} \cdot t_2 + b_{23}\end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}x_3 &= a_{31} \cdot t_3 + b_{31} \\y_3 &= a_{32} \cdot t_3 + b_{32} \\z_3 &= a_{33} \cdot t_3 + b_{33}\end{aligned} \quad (3)$$

$$d_1^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 \quad (4)$$

$$d_2^2 = (x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2 \quad (5)$$

$$d_3^2 = (x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2 \quad (6)$$

Deseja-se determinar as coordenadas dos pontos P_1 , P_2 e P_3 a partir dos valores de a_{ij} e b_{ij} (derivados a partir da matriz de calibração) e d , d e d (definidos pelas dimensões do objeto).

A solução é obtida determinando-se os valores de t_1 , t_2 e t_3 pela substituição das equações (1), (2) e (3) nas equações (4), (5) e (6), gerando assim o seguinte sistema de equações não lineares:

$$C_{11} t_1^2 + C_{12} t_1^2 - C_{13} t_1 t_2 + C_{14} t_1 + C_{15} t_2 + C_{16} = 0 \quad (7)$$

$$C_{21} t_1^2 + C_{22} t_1^2 - C_{23} t_1 t_3 + C_{24} t_1 + C_{25} t_3 + C_{26} = 0 \quad (8)$$

$$C_{31} t_1^2 + C_{32} t_2^2 - C_{33} t_2 t_3 + C_{34} t_2 + C_{35} t_3 + C_{36} = 0 \quad (9)$$

Sabe-se que tal sistema pode ser resolvido pelo método de Newton para solução de equações não lineares, onde devem ser dados valores iniciais para t_1 , t_2 e t_3 . Verifica-se, porém, que o sistema pode apresentar mais de uma solução e neste caso, para as aplicações em visão computacional, é necessário o conhecimento de todas as soluções do sistema para, então, se selecionar a mais provável considerando critérios adequados à aplicação.

Visto que a solução obtida, dentro do conjunto possível de soluções, é determinada pela escolha dos valores iniciais de t_1 , t_2 e t_3 , é necessário a determinação de um conjunto de soluções iniciais que garanta a obtenção de todas as soluções possíveis.

Das equações (7) e (9) tem-se que as variáveis t_1 e t_3 podem ser escritas como função de t_2 . Estas equações podem ser resolvidas para t_2 , determinando-se sua faixa de variação que resulta em valores reais para t_1 e t_3 . Variando-se o valor de t_2 em incrementos fixos determina-se os valores de t_1 e t_3 correspondentes e o erro na solução do sistema, tomando-se os pontos de erro mínimo como condição inicial na solução do sistema definido pelas equações (7), (8) e (9).

A partir de informações relacionadas com a possível posição do objeto no espaço de trabalho, condições de iluminação que resultam em diferentes distribuições dos níveis de cinza pelas faces do objeto ou outras informações disponíveis é possível determinar a localização do objeto com alta taxa de acerto.

4. ESTUDO DOS PARÂMETROS INFLUENTES NA CALIBRAÇÃO

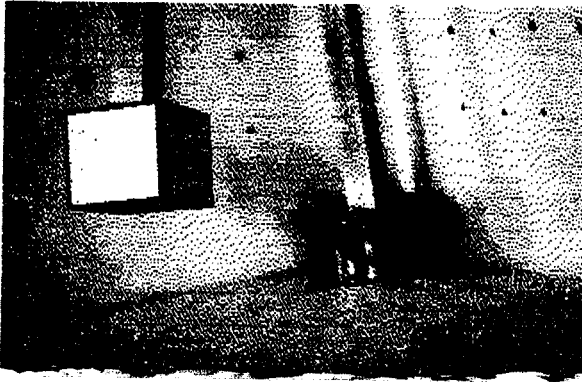
Nesta seção será mostrada a influência de alguns parâmetros relativos a calibração de uma câmera. Os resultados foram obtidos a partir da implementação do método apresentado na seção anterior.

4.1 INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA CÂMERA/PONTOS DE CALIBRAÇÃO

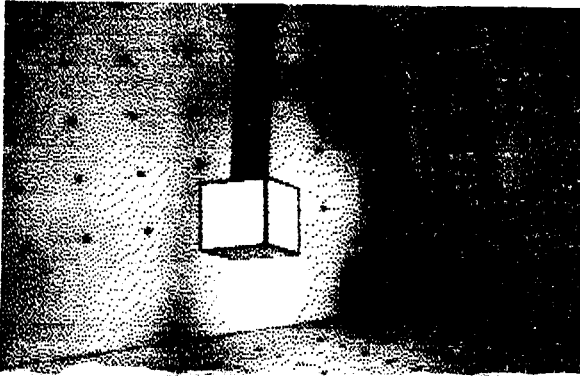
Um dos principais problemas encontrados na calibração é o fato de um ponto de calibração ser representado por mais de um pixel no plano de imagem. Este efeito pode ser comprovado ao se comparar os resultados obtidos em três situações diferentes, mostradas na figura 4.1, cujos dados podem ser vistos na tabela 4.1.

Tabela 4.1- Valores obtidos na aplicação do método descrito às diferentes matrizes de calibração.

cm	x_1	y_1	z_1	x_2	y_2	z_2	x_3	y_3	z_3
posição real	26.5	21.5	15.0	27.0	22.5	10.5	25.5	23.5	10.0
caso (a)	27.7	24.1	13.8	28.0	23.9	8.9	22.9	20.6	8.6
caso (b)	27.1	19.3	16.0	26.6	21.4	10.9	24.2	21.9	9.7
caso (c)	26.5	21.5	15.5	27.2	22.2	10.5	25.1	22.9	10.0



(a)



(b)



(c)

Fig.4.1- Imagens digitalizadas de uma mesma cena para a câmera em três posições diferentes. (a) foco = (42.1,115.7,15.2); (b)foco = (57.3,137.6,24.8); (c) foco = (65.5,181.2,40.6).

4.2. INFLUÊNCIA DA ESCOLHA DOS PIXELS CORRESPONDENTES

Retornado ao fato de que um ponto de calibração, geralmente, corresponde a mais de um pixel no plano de imagem, deve-se considerar a influência que a escolha de um determinado pixel para a correspondência pode acarretar. Na tabela 4.3 pode-se observar os valores encontrados para duas situações. Em ambas foi utilizada a mesma cena e os mesmos pontos de calibração, diferenciando-se apenas na escolha dos pixels correspondentes. Deve-se ressaltar que a variação nas coordenadas dos pixels nunca excede três unidades, podendo ser nas direções norte, sul, leste ou oeste.

4.3. INFLUÊNCIA DA ILUMINAÇÃO

O tipo de iluminação utilizada no ambiente de trabalho exerce, também, grande influência na solução final do problema, principalmente em se tratando de câmeras CCD, onde o efeito "blooming" é bem pronunciado (/ANGU85/). Assim, uma iluminação inadequada pode interferir ao ponto de confundir as informações contidas na cena, impossibilitando o bom funcionamento do sistema.

5. CONCLUSÕES

Várias soluções podem ser apresentadas para atenuar os problemas encontrados na calibração, devendo-se inicialmente procurar controlar o ambiente de trabalho, escolhendo uma iluminação adequada para o caso em questão.

Os problemas ligados a distância câmera/pontos de calibração sugerem que se deva trabalhar com a câmera a distâncias suficientemente grandes, de modo que cada ponto de calibração seja formado apenas por um pixel. Na prática esta técnica muitas vezes não pode ser aplicada, pois ela restringe o espaço de trabalho. A solução encontrada utiliza um técnica de processamento de imagens conhecida como afinamento ("thinning"), de modo que os pixels correspondentes a cada ponto de calibração fiquem reduzidos a apenas o pixel central. Deste modo, fica eliminado também o problema da correspondência dos pixels.

REFERÊNCIAS

- ANGU'85 Jose Maria Angulo e Rafael Inigo,(1985). **Vision Artificial por Computador**, Paraninfo S.A.
- BALL'82 Dana Harry Ballard e Christopher M.Brown,(1982). **Computer Vision** Prentice Hall, Inc.
- BELL'89 Olga Regina Pereira Bellon e Clésio Luis Tozzi, (1989). "O Método da Tranformação de Perspectiva para o Reconhecimento e Localização de Objetos Tridimensionais". **Anais do I ERAI**, vol.1, Rob. 49-55.
- BELL'90 Olga Regina Pereira Bellon e Clésio Luis Tozzi, (1990). "Um Método para Determinar a Localização de Objetos no Espaço 3-D Utilizando Informações Referentes ao Modelo Geométrico". **I Workshop de Aspectos Matemáticos de Visão Computacional e Processamento de Imagens**", IMPA, Rio de Janeiro.
- BEN-'74 A. Ben-Israel e T.N.E. Greville, (1974) . **Generalized Inverse: Theory and Aplications**, Wiley, New York.
- BOUL'71 T.L.Boullion e P.L.Odell, (1971).**Generalized Inverses Matrices**, Wiley, New York.
- CHEN'89 Z. Chen, D. Tseng e J. Lin, (1989). "A Simple Algorithm for 3-D Position Determination Using a Single Calibration Object". **Pattern Recognition**, vol.22, No.2, pp.173-187.
- CORR'83 Márcia B. Correia, (1983). **Contribution A La Localisation D'Objets Poliedriques Par Stereovision En Robotique**. Tese de doutorado Institut National Politechnique de Toulouse.
- GRIM'86 W.E.L. Grimson, (1986). "Computacional Experiments with a Feature Based Stereo Algorithm". **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, vol. PAMI-7, No.1, January.
- WINT'87 Paul Wintz e Rafael C. Gonzalez, (1987). "Digital Image Processing", Addison-Wesley Publishing Company, Inc.