

## UTILIZAÇÃO DE PONTOS E RETAS PARA A CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS DIGITAIS.

José Marcato Junior, Antonio Maria Garcia Tommaselli, Maurício Galo. - Engenharia Cartográfica - Departamento de Cartografia – Universidade Estadual Paulista – Campus de Presidente Prudente.

Uma câmara consiste em um plano imagem com um dispositivo fotosensível e um conjunto de lentes que realizam uma projeção do espaço objeto para o espaço imagem. No entanto, essa transformação não pode ser modelada perfeitamente por equações projetivas, pelo fato de ocorrerem distorções. Assim, o processo de calibração de câmaras torna-se de grande importância, uma vez que possibilita a modelagem dessas distorções, aproximando-as do valor real (CLARKE; FRYER, 1998).

Os métodos mais comuns de calibração utilizam feições do tipo ponto para relacionar o espaço imagem com o espaço objeto. No entanto, existem outros métodos que, ao invés de utilizar pontos para relacionar os espaços envolvidos, são baseados em feições lineares.

Cabe ressaltar, que existem algumas vantagens no uso de feições lineares, entre as quais pode-se citar a facilidade em sua detecção em imagens digitais e a simplicidade para realizar o processo de vetorização (TOMMASELLI, 1993). Procurando valer-se dessas vantagens, Telles (2004) desenvolveu o programa CPEq (Calibração com o modelo dos Planos Equivalentes), o qual realiza a calibração utilizando linhas retas, e Bazan (2005) implementou um programa para extração de feições lineares com precisão subpixel.

Neste trabalho, pretende-se apresentar os resultados obtidos utilizando-se os programas anteriormente citados, para realizar a extração de feições lineares com precisão subpixel, as quais foram empregadas para realizar o processo de calibração. Além disso, foram desenvolvidas ferramentas, entre as quais se pode citar a de recorte de imagens, a fim de otimizar o processo de extração de feições lineares. Pretende-se ainda, apresentar e discutir os resultados da calibração da câmara Sony DSC-R1 tanto com o programa CC (GALO, 1993) que utiliza pontos, quanto com o programa CPEq (TELLES, 2004) que utiliza feição retas.

O modelo baseado em linha retas, desenvolvido por Telles (2004), se baseia no modelo dos Planos Equivalentes (TOMMASELLI, 1993). Para a criação do modelo partiu-se de quatro vetores, sendo dois deles pertencentes a uma reta no espaço imagem e dois pertencentes à reta homóloga no espaço objeto. Os vetores pertencentes ao espaço imagem foram definidos a partir de dois pontos quaisquer,  $p_1$  e  $p_2$ , com coordenadas  $(x_1, y_1, -c)$  e  $(x_2, y_2, -c)$ , resultando nos vetores no espaço imagem como:  $(x_2 - x_1, y_2 - y_1, 0)$  e  $(x_1, y_1, -c)$ . Logo, o vetor normal ao plano pertencente ao espaço imagem (ver Figura 1) será o produto vetorial entre os vetores  $(x_2 - x_1, y_2 - y_1, 0)$  e  $(x_1, y_1, -c)$ .

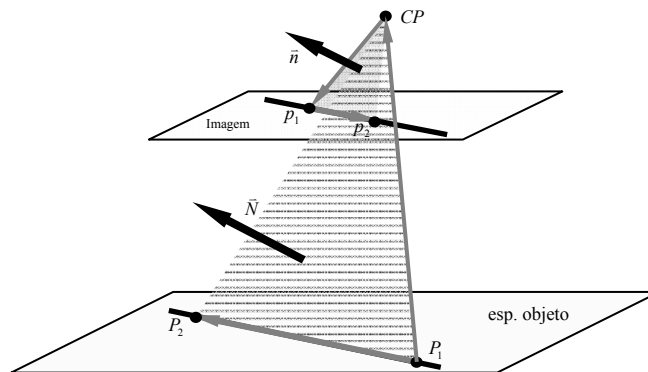


Figura 1 - Vetores normais em relação aos planos de interpretação no espaço imagem e objeto

Partindo-se do mesmo princípio mostrado anteriormente, foram adotados dois pontos no espaço objeto,  $P_1$  e  $P_2$  com coordenadas  $(X_1, Y_1, Z_1)$  e  $(X_2, Y_2, Z_2)$ , respectivamente, pertencentes à reta homóloga podendo-se definir os vetores:  $(X_2 - X_1, Y_2 - Y_1, Z_2 - Z_1)$  e  $(X_1 - X_0, Y_1 - Y_0, Z_1 - Z_0)$ . Da mesma forma o vetor  $\vec{N}$ , perpendicular ao plano do espaço objeto, foi definido pelo produto vetorial entre os vetores  $(X_2 - X_1, Y_2 - Y_1, Z_2 - Z_1)$  e  $(X_1 - X_0, Y_1 - Y_0, Z_1 - Z_0)$ .

Assim como no modelo dos planos equivalentes, os planos definidos no espaço imagem e objeto devem ser paralelos. Para isto basta admitir um fator de escala entre as componentes do vetor normal, pois os vetores não precisam ter necessariamente a mesma norma, e multiplicar o vetor normal ao plano no espaço pela matriz de rotação. As Equações 1 apresentam o modelo matemático desenvolvido.

$$\begin{aligned} (x_2 y_1 - x_1 y_2) (r_{11} N_1 + r_{12} N_2 + r_{13} N_3) + c \Delta y_{12} (r_{31} N_1 + r_{32} N_2 + r_{33} N_3) &= 0 \\ (x_2 y_1 - x_1 y_2) (r_{21} N_1 + r_{22} N_2 + r_{23} N_3) - c \Delta x_{12} (r_{31} N_1 + r_{32} N_2 + r_{33} N_3) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Finalmente, basta inserir as equações que modelam as distorções:

$$x = x' - x_0 + \bar{x}(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2 \bar{x} \bar{y} \quad (2)$$

$$y = y' - y_0 + \bar{y}(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2P_1 \bar{x} \bar{y} \quad (3)$$

Após a coleta das imagens do campo de calibração de câmaras da UNESP - FCT, foi realizada a medição tanto de pontos quanto de retas para realizar a calibração da câmara Sony DSC-R1. Para a medição de pontos utilizou-se da ferramenta que calcula o centro de massa de alvos, presente no programa MID - Monocomparador de Imagens Digitais - desenvolvido por Reiss (2003). Já para a medição de retas utilizou-se o programa desenvolvido por Bazan (2005), o qual realiza o ajuste de uma superfície cilíndrica.

Cabe ressaltar, que esse programa realiza a extração somente em um único segmento de reta. Assim, com o intuito de otimizar o processo de extração de feições lineares com precisão subpixel, foi desenvolvido, em linguagem C++, no ambiente de programação *Borland C++ Builder*, um programa, baseado no princípio da representação normal e paramétrica da reta, que percorre a reta imagem realizando recortes sucessivos e calculando as coordenadas dos pontos do segmento de reta com precisão subpixel.

Foram realizados alguns experimentos variando tanto o número de imagens quanto o número de pontos de apoio. No primeiro experimento, foi realizado a calibração utilizando tanto o programa CC (GALO, 1993) com pontos, quanto com o programa CPEq (TELLES, 2004) utilizando retas. Foram utilizadas 8 (oito) imagens, 15 (quinze) pontos de apoio e 15 (quinze) retas de apoio.

Tabela1 – Resultados da calibração usando o programa CC e o programa CPEq (08 imagens).

Parâmetros	Valor ajustado (Programa CC)	Desvio Padrão estimado	Valor Ajustado (Programa CPEq)	Desvio Padrão estimado
<b>f (mm)</b>	26,1678	1,51E-02	26,2110	2,39E-02
<b>x<sub>0</sub> (mm)</b>	0,0291	3,76E-03	0,0470	7,73E-03
<b>y<sub>0</sub> (mm)</b>	0,0436	4,95E-03	0,0832	6,57E-03
<b>K<sub>1</sub> (mm)</b>	1,09E-04	1,36E-06	1,06E-04	2,36E-06
<b>κ (rad)</b>	-5,08E-02	1,31E-04	-5,21E-02	2,13E-04
<b>φ (rad)</b>	3,96E-01	-2,34E-04	3,96E-01	5,67E-04
<b>ω(rad)</b>	1,20E-01	3,67E-04	1,21E-01	6,98E-04
<b>X<sub>0</sub> (m)</b>	110,109	5,06E-03	110,134	9,88E-03
<b>Y<sub>0</sub> (m)</b>	401,230	4,32E-03	401,225	8,61E-03
<b>Z<sub>0</sub> (m)</b>	13,301	7,09E-03	13,317	1,12E-02
<b>Informações</b>	Número de iterações: 5		Número de iterações: 6	
	Graus de liberdade: 150		Graus de liberdade: 146	
	Qui-quadrado: 3,92		Qui-quadrado: 31,714	

Ao utilizar o mesmo número de pontos e retas (15 pontos e 15 retas), procurou-se realizar a calibração de forma a se ter os mesmos graus de liberdade para ambos os métodos. No entanto, após uma primeira análise do vetor dos resíduos, foi realizada a exclusão tanto de alguns pontos quanto de algumas retas que possuíam resíduos superiores a 0,005 mm (aproximadamente meio pixel). Assim, pode-se verificar por meio da Tabela 1, que nesse experimento os graus de liberdade em ambos os métodos foram ligeiramente diferentes. Para o teste qui-quadrado a hipótese básica não foi rejeitada com grau de significância de até 0,995 para ambos os processamentos.

A seguir, com o objetivo de verificar quais parâmetros de orientação interior fornecem melhores resultados, foi feito um teste, em que se calcularam os parâmetros de orientação exterior tendo como injeção os parâmetros de orientação interior, bem como as coordenadas dos pontos de controle. Nesse processo foram utilizadas duas imagens convergentes e foram selecionados quatro pontos de controle bem distribuídos em ambas as imagens, os quais foram usados como apoio para

solucionar a orientação exterior. Além disso, para realizar a verificação, foram utilizados mais 10 (dez) pontos independentes. Utilizando o programa CC, para realizar o procedimento de orientação, e os valores dos parâmetros de orientação interior ajustados tanto pelo programa CC quanto pelo programa CPEq, foi possível calcular as coordenadas dos pontos de verificação no espaço objeto. Na Tabela 2 são apresentadas as estatísticas (média dos erros, desvio padrão dos erros e erro médio quadrático) para as coordenadas dos pontos de verificação no espaço objeto.

Tabela 2 – Média dos erros, desvio padrão e erro médio quadrático, referentes às coordenada dos pontos de verificação usando dois grupos diferentes de parâmetros de OI.

Coordenadas	Média dos erros		Desvio padrão dos erros		Erro médio quadrático	
	CC(pontos)	CPEq(retas)	CC(pontos)	CPEq(retas)	CC(pontos)	CPEq(retas)
X	0,00019	0,00040	0,00133	0,00133	0,00135	0,00139
Y	-0,00030	-0,00016	0,00106	0,00116	0,00110	0,00118
Z	0,00067	0,00053	0,00207	0,00210	0,00218	0,00217

A partir da Tabela 2 pode-se concluir que ambos os métodos proporcionam resultados similares. Cabe destacar, que o método utilizando pontos proporcionou resultados um pouco melhores com relação às coordenadas X e Y, em comparação com o método utilizando retas. Isto significa que ambos os conjuntos de parâmetros de orientação, mostrados na Tabela 1, proporcionam resultados similares.

No segundo experimento também foram utilizados 15 (quinze) pontos de apoio e 15(quinze) retas de apoio, mas somente 4(quatro) imagens. Na Tabela 3, são apresentados os valores dos parâmetros de orientação interior e exterior, referentes à primeira imagem, ajustados por ambos os aplicativos.

Tabela 3 – Resultados da calibração usando o programa CC e o programa CPEq (04 imagens).

Parâmetros	Valor ajustado (Programa CC)	Desvio Padrão estimado	Valor ajustado (Programa CPEq)	Desvio Padrão estimado
<b>f (mm)</b>	26,1669	4,87E-02	26,1669	5,80E-02
<b>x<sub>0</sub> (mm)</b>	0,0152	8,73E-03	0,0602	1,51E-02
<b>y<sub>0</sub> (mm)</b>	0,0271	1,09E-02	0,0696	1,19E-02
<b>K1 (mm)</b>	1,00E-04	3,23E-06	1,06E-04	4,62E-06
<b>κ (rad)</b>	-5,06E-02	2,08E-04	-5,20E-02	2,70E-04
<b>φ (rad)</b>	3,97E-01	3,24E-04	3,96E-01	7,19E-04
<b>ω(rad)</b>	1,19E-01	5,22E-04	1,21E-01	1,03E-03
<b>X<sub>0</sub> (m)</b>	110,106	1,20E-02	110,120	1,75E-02
<b>Y<sub>0</sub> (m)</b>	401,229	5,00E-03	401,219	1,20E-02
<b>Z<sub>0</sub> (m)</b>	13,309	2,42E-02	13,296	2,68E-02
<b>Informações</b>	Número de iterações: 4		Número de iterações: 6	
	Graus de liberdade: 76		Graus de liberdade: 72	
	Qui-quadrado: 2,20		Qui-quadrado: 12,390	

Para o teste qui-quadrado a hipótese básica não foi rejeitada com grau de significância de até 0,995 para ambos os resultados (obtidos pelo programa CC com pontos e CPEq com retas).

Na Tabela 4 são apresentados os valores das correlações existentes entre alguns pares de parâmetros ajustados, utilizando tanto o programa CPEq com retas quanto o programa CC com pontos.

Tabela 4 – Comparação entre as correlações obtidas pelo programa CC e pelo programa CPEq.

	X <sub>0</sub> / f	Z <sub>0</sub> / f	X <sub>0</sub> / Z <sub>0</sub>	Y <sub>0</sub> / ω	Y <sub>0</sub> / κ
<b>Pontos (CC)</b>	0,96	0,98	0,92	-0,58	-0,77
<b>Retas (CPEq)</b>	0,94	0,96	0,87	-0,89	-0,72

A partir dos resultados apresentados na tabela anterior verificou-se que algumas correlações entre os parâmetros no modelo usando retas se apresentaram inferiores (de 2 a 5 pontos percentuais) quando comparados com o modelo de colinearidade. Esse é o caso da correlação existente entre a

distância focal com  $X_0$  e com  $Z_0$ , de  $X_0$  com  $Z_0$  e de kapa ( $\kappa$ ) com  $Y_0$ . No entanto, cabe destacar, que a correlação entre  $Y_0$  e  $\omega$  se apresentou-se maior (21 pontos percentuais) no método usando retas.

Assim como no experimento anterior, foram calculadas as estatísticas (média dos erros, desvio padrão dos erros e erro médio quadrático) para as coordenadas dos pontos de verificação no espaço objeto, após a orientação de um par de imagens com os parâmetros de OI estimados por ambos os métodos.

Tabela 5 – Média dos erros, desvio padrão e erro médio quadrático, referente a cada coordenada.

Coordenadas	Média dos erros		Desvio padrão dos erros		Erro médio quadrático	
	CC(pontos)	CPEq(retas)	CC(pontos)	CPEq(retas)	CC(pontos)	CPEq(retas)
<b>X (m)</b>	0,00026	0,00040	0,00151	0,00132	0,00153	0,00138
<b>Y (m)</b>	-0,00037	-0,00009	0,00135	0,00102	0,00145	0,00102
<b>Z (m)</b>	0,00060	0,00046	0,00216	0,00210	0,00224	0,00215

Pode-se notar pela Tabela 5, que tanto o desvio padrão quanto o erro médio quadrático, referentes ao método utilizando retas, se apresentam com valores menores comparativamente ao método utilizando pontos. Assim, é possível concluir que o método utilizando retas, neste caso, proporcionou resultados ligeiramente melhores em comparação com o de pontos.

Cabe ressaltar que na calibração utilizou-se apenas o parâmetro K1, pois os demais parâmetros de distorção ótica não possuem influência significativa para a câmara utilizada.

A partir da realização dos experimentos verificou-se que o método que utiliza retas, desenvolvido por Telles (2004), se mostrou equivalente ao método que utiliza pontos. No entanto, cabe ressaltar que no segundo experimento (com 4 imagens) o método baseado em linhas retas proporcionou resultados ligeiramente melhores em comparação com o método que utiliza pontos. Verificou-se, ainda, que algumas correlações, referentes aos parâmetros estimados pelo método que utiliza retas, apresentaram-se com valores inferiores (até 5 pontos percentuais), comparativamente às correlações, entre os mesmos parâmetros calculadas pelo método que utiliza pontos. Para outras combinações, entre  $Y_0$  e  $w$ , por exemplo, a correlação usando pontos foi 21 pontos percentuais inferior do que o caso usando retas.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se fazer um estudo detalhado a respeito das correlações existentes entre os parâmetros, gerados por ambos os métodos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAZAN, W. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M. Extração de feições retas e métodos de refinamento com precisão subpixel. In: CONGRESSO DE INICIACAO CIENTIFICA DA UNESP, 17., 2005, Presidente Prudente, S.P.. **Anais do CIC-Unesp**, 2005. v. 1. p. 1.

CLARKE, T. A.; FRYER, J. G. The Development of Camera Calibration Methods and Models. **Photogrammetric Record**, V. 16 (91), p.293-312, 1998.

GALO, M. **Estrutura de Dados do Programa de Calibração de Câmaras (CC)**. Publicação Interna do Departamento de Cartografia, UNESP/FCT, Presidente Prudente, 1998.

REISS, M. L. L.; TOMMASELLI, A. M. G. Orientação de Imagens sem Pontos de Apoio para Mensuração de Superfícies Planas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, Pr, v. 9, n. 1, p.1-21, 2003.

TELLES, S. S. de S. **Um modelo para calibração de câmaras baseado em linhas retas**. 2004. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2004.

TOMMASELLI, A. M. G. **Um método recursivo aplicado ao problema de localização em visão de máquina**. 1993, 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Unicamp, Campinas, 1993.

Bolsa: PIBIC/CNPq