

A INFLUÊNCIA DAS INJUNÇÕES DE ORIENTAÇÃO RELATIVA NA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DUAL DE CÂMARAS DIGITAIS

Influence of relative orientation constraints in two-head digital camera calibration

WIMERSON SANCHES BAZAN^{1,2}
ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI¹
MAURICIO GALO¹
ROBERTO DA SILVA RUY^{1,3}

UNESP – Universidade Estadual Paulista

¹ PPGCC - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
Rua Roberto Simonsen 305, CEP 19060-900 Presidente Prudente, SP

{tomaseli, galo}@fct.unesp.br

² Santiago & Cintra Consultoria

wimerson@sccon.com.br

³ Engemap Geoinformação

roberto@engemap.com.br

RESUMO

Os sistemas de aquisição de imagens baseados em arranjos de câmeras digitais de quadro, tais como os sistemas DMC, UltraCam, dentre outros, são alternativas que possibilitam um maior recobrimento da área imageada em comparação a uma única câmera. Nestes sistemas as câmeras são montadas em suportes rígidos, podendo-se, então, admitir que a posição relativa entre as câmeras mantém-se estável durante a etapa de aquisição, sendo esta uma restrição que pode ser incorporada ao processo de calibração. Este tipo de injunção pode ser justificado uma vez que a estimativa dos elementos de orientação relativa, em função dos parâmetros de orientação exterior ajustados, apresenta variações significativamente maiores que as variações físicas esperadas, por conta da propagação de erros no ajustamento. Para resolver este problema, propõe-se neste trabalho a calibração simultânea de duas câmeras, fixando-se, por meio de injunções, os elementos de orientação relativa, isto é, a matriz de rotação relativa e a distância entre os centros perspectivos das câmeras, admitindo-se que a estrutura de suporte das câmeras seja estável. Foram realizados

experimentos de calibração com imagens coletadas por um arranjo composto por duas câmeras digitais *Hasselblad H2D*, sem e com o uso das injunções mencionadas. Os resultados mostraram que a introdução das injunções de orientação relativa permite melhores resultados que a calibração individual de cada câmera, desde que sejam coletadas imagens em condições geométricas favoráveis.

Palavras-chave: Calibração de Câmeras Digitais; Calibração de um Sistema Multicâmeras; Fototriangulação com Parâmetros Adicionais; Injunções de Orientação relativa; Fotogrametria Digital.

ABSTRACT

Image acquisition systems based on multi-head arrangement of digital frame cameras, such as the commercial systems DMC, UltraCam, besides others, are attractive alternatives enabling larger imaging area when compared to a single frame camera. Considering that in these systems, cameras are tightly attached to an external mount, it is assumed that relative position and orientation between cameras are stable during image acquisition and, consequently, these constraint can be included in the calibration step. This constraint is acceptable because estimates of the relative orientation (RO) parameters between cameras, from previously estimated exterior orientation parameters, present higher and significant deviations than the expected physical variations, due to error propagation. In order to solve this problem, this work presents an approach based on simultaneous calibration of two or more cameras using constraints that state that the relative rotation matrix and the distance between the cameras head are stable. Experiments with images acquired by an arrangement of two *Hasselblad H2D* cameras were accomplished, without and with the mentioned constraints. The experiments showed that the calibration process with RO constraints allows better results than the approach based on single camera calibration, provided that the estimation has included only images with good target distribution.

Keywords: Digital Camera Calibration; Multi-Camera System Calibration; Bundle Adjustment with Additional Parameters; Relative Orientation Constraints; Digital Photogrammetry.

1. INTRODUÇÃO

As câmeras métricas têm por finalidade fornecer imagens fotográficas com geometria conhecida, o que permite a correta reconstrução do feixe de raios perspectivos, sendo essa uma das condições que tornam possível o processo de calibração e a determinação dos parâmetros geométricos que participam do modelo matemático que relaciona um objeto no espaço real com a sua imagem fotografada (ANDRADE, 2003).

Calibrar uma câmera significa encontrar um conjunto de parâmetros de OI - orientação interior (BROWN, 1966) e seus respectivos desvios-padrão, que inclui a

modelagem das distorções provocadas pelo sistema de lentes da câmara e que pode ser feita usando tanto feições pontuais (ANDRADE e OLIVAS, 1981; TOMMASELLI e TOZZI, 1990; GALO, 1993; MITISHITA e OLIVAS, 2001; MACHADO et al, 2003; ANDRADE, 2003) quanto retas (PRESCOTT e MCLEAN, 1997; HABIB et al, 2002; HABIB e MORGAN, 2003; TELLES e TOMMASELLI, 2005).

Os recentes desenvolvimentos de sensores eletrônicos à base de silício e das câmaras digitais, no que diz respeito ao aumento da resolução e à redução de custos, têm tornado cada vez mais atrativa a utilização destes equipamentos nas tarefas de levantamento fotogramétrico e mapeamento (HABIB e MORGAN, 2003). Além destas vantagens, a reutilização da mídia de gravação e a possibilidade de se fazer a avaliação da imagem em tempo real, são fatores que também contribuem para o aumento do uso dos sensores digitais em Fotogrametria, o que fica evidente pelo número de sensores digitais disponíveis no mercado, com diferentes soluções e geometrias.

Outro problema a ser considerado, diz respeito à pequena área de cobertura dos sensores digitais de quadro, atualmente disponíveis. Existem no mercado três tecnologias destinadas à solução deste problema: as câmaras baseadas nos sensores tri-lineares, podendo-se citar, as câmaras ADS-40 (*Leica Geosystems - Hexagon*), HRSC-A, HRSC-AX e HRSC-AXW (desenvolvidas pelo Centro Alemão de Pesquisas Espaciais - DLR); a configuração modular de câmaras matriciais convergentes como, por exemplo, os sistemas DMC (*ZI Imaging*) e, finalmente, os sistemas matriciais com câmaras verticais, como a DIMAC (*Dimac Systems*) e a UltraCam_D, UltraCam_X e mais recentemente a UltraCam_L (*Microsoft Vexcel*).

Como exemplo de calibração de algumas das câmaras mencionadas pode-se citar o trabalho de Doerstel et al (2002) no qual é descrito o procedimento usado para a câmara DMC. A determinação dos parâmetros de OI é feita de modo independente para cada câmara, na etapa de calibração e, posteriormente, é feita a determinação dos ângulos entre as câmaras, em um ajustamento por feixes de raios. No trabalho de Kröpfl et al (2004) é descrito o procedimento para o caso da câmara UltraCam_D.

O desenvolvimento de alternativas de menor custo, quando comparadas com os sistemas comerciais supracitados, foi investigado no Projeto ARMOD (TOMMASELLI et al, 2004), resultando posteriormente no sistema SAAPI - Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-Processamento de Imagens, descrito por Ruy et al (2007) e que considera um arranjo de câmaras digitais convergentes, de modo que as imagens podem ser retificadas e mosaicadas para formar uma única imagem, ou processadas isoladamente.

Quando se trata da calibração de um sistema com esta característica, ou seja, composto por duas câmaras, deve-se incluir não somente os parâmetros de orientação interior de ambas as câmaras, mas também os elementos de orientação relativa (OR), como destaca Zhuang (1995). Estes elementos são importantes, tanto para a análise da estabilidade física do arranjo de câmaras, quanto para algumas tarefas

fotogramétricas, como, por exemplo, a retificação e fusão das imagens convergentes. Este problema é análogo ao problema de calibração de estereocâmaras, com pequenas variações na configuração geométrica.

Bazan et al (2007) apresentaram uma abordagem baseada na calibração seqüencial das câmaras que compõem o arranjo dual, seguida do cálculo dos elementos de OR, a partir dos parâmetros de orientação exterior de ambas as câmaras. No entanto, esta abordagem não se revelou uma estratégia adequada, tendo-se verificado experimentalmente que as variações nos parâmetros de OR foram significativamente maiores que as variações físicas esperadas, o que justifica o desenvolvimento de um processo mais rigoroso.

Para solucionar este problema, apresenta-se neste trabalho um método para calibração do sistema dual de câmaras digitais, a partir de um ajustamento simultâneo dos parâmetros de OI de ambas as câmaras que compõem o sistema, fazendo uso de injunções de OR entre as câmaras, considerando a hipótese de que as câmaras se mantêm fixas no arranjo, ao longo da etapa de aquisição das imagens. Com base nos experimentos realizados e discutidos são apresentadas as vantagens e as desvantagens da restrição imposta.

2. CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS

Conceituando-se genericamente, um processo de calibração trata da atribuição de valores às propriedades que descrevem o caráter métrico de um sistema de medida, bem como à qualidade desta estimação (MERCHANT, 1979). Para o caso das câmaras digitais, o processo de calibração deve incluir o seguinte conjunto de parâmetros de orientação interior (OI):

- f - Distância focal gaussiana equivalente da câmara;
- x_0 e y_0 - Coordenadas do ponto principal no sistema da imagem;
- K_1 , K_2 e K_3 - Parâmetros de distorção radial simétrica;
- P_1 e P_2 - Parâmetros de distorção descentrada;
- A e B - Coeficientes de afinidade.

A distância focal gaussiana equivalente é aquela que satisfaz a equação das lentes, podendo ser alterada para balancear a curva de distorção, dando origem à distância focal calibrada. As coordenadas x_0 e y_0 representam a posição do ponto principal com relação a uma referencial materializado na imagem: no caso das câmaras analógicas é o sistema fiducial e no caso das câmaras digitais é o sistema imagem derivado das coordenadas imagem (coluna, linha) podendo ter a origem no centro do quadro (matriz de sensores) ou no canto superior esquerdo.

A distorção radial simétrica é definida como sendo a componente simétrica da distorção que ocorre radialmente, a partir do ponto principal (WOLF e DEWITT, 2000). Esta distorção é resultante da dificuldade dos fabricantes em produzir lentes com curvatura perfeita (ANDRADE, 2003), podendo ser modelada através dos seguintes polinômios:

$$\begin{aligned}\delta x_r &= (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 \dots)(x - x_0) \\ \delta y_r &= (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 \dots)(y - y_0)\end{aligned}\quad (1)$$

onde δx_r e δy_r são componentes da distorção radial simétrica para um ponto de coordenadas (x, y) e r é a distância radial deste ponto ao ponto principal (x_0, y_0) .

A distorção descentrada é provocada pela impossibilidade do fabricante em realizar um alinhamento perfeito dos eixos ópticos das lentes que compõem o sistema óptico, sendo composta pelas componentes tangencial e radial assimétrica. O modelo desta distorção foi apresentado originalmente por Conrady em 1919 e Modificado por Brown (1966), sendo expresso por:

$$\begin{aligned}\delta x_d &= P_1[r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2P_2(x - x_0)(y - y_0) \\ \delta y_d &= 2P_1(x - x_0)(y - y_0) + P_2[r^2 + 2(y - y_0)^2]\end{aligned}\quad (2)$$

onde δx_d e δy_d representam o efeito da distorção descentrada nas coordenadas (x, y) de um ponto na imagem.

Os parâmetros de afinidade permitem a modelagem da não ortogonalidade e diferença de escala entre os eixos x e y do sistema de coordenadas da imagem, caso estes efeitos ocorram (MONIWA, 1972; GALO, 1993). Tommaselli e Alves (2001) citam que nas modernas câmaras digitais a forma do pixel é geralmente quadrada, apresentando a mesma escala em x e y . Se houver diferença nas dimensões do pixel em x e y e esta diferença não for fornecida pelo fabricante da câmera, o fator de escala em x absorverá essa diferença. Este efeito pode ser parametrizado por diferentes modelos, como o proposto por Moniwa (1972), para o caso das câmaras analógicas não métricas, e que pode ser também utilizado para câmaras digitais (TOMMASELLI e TOZZI, 1990; GALO, 2003). Outro modelo, apresentado por Habib e Morgan (2003), e que foi adotado neste trabalho, é expresso por:

$$\begin{aligned}\delta x_a &= A(x - x_0) + B(y - y_0) \\ \delta y_a &= A(y - y_0)\end{aligned}\quad (3)$$

onde A e B , representam os parâmetros de afinidade.

O método de calibração de câmaras por feixes de raios baseia-se no uso das equações de colinearidade, incluindo, ainda, a estimativa dos parâmetros de orientação exterior (OE). Já os métodos de laboratório permitem uma solução apenas para determinação da distância focal gaussiana equivalente, posição do ponto principal e distorção radial simétrica e exigem equipamentos ópticos especiais, sendo normalmente adotados pelas empresas que fabricam as câmaras. Os parâmetros de OE são constituídos por k , φ , ω , X_0 , Y_0 e Z_0 onde:

- k , φ e ω - Rotações entre os referenciais do espaço objeto e imagem;
- X_0 , Y_0 e Z_0 - Coordenadas do centro perspectivo da câmera (CP) no referencial do espaço objeto.

Os ângulos k , φ , ω permitem o cálculo da matriz de rotação que é aplicada na transformação do sistema de coordenadas do espaço objeto para um sistema paralelo ao sistema fotogramétrico do espaço imagem.

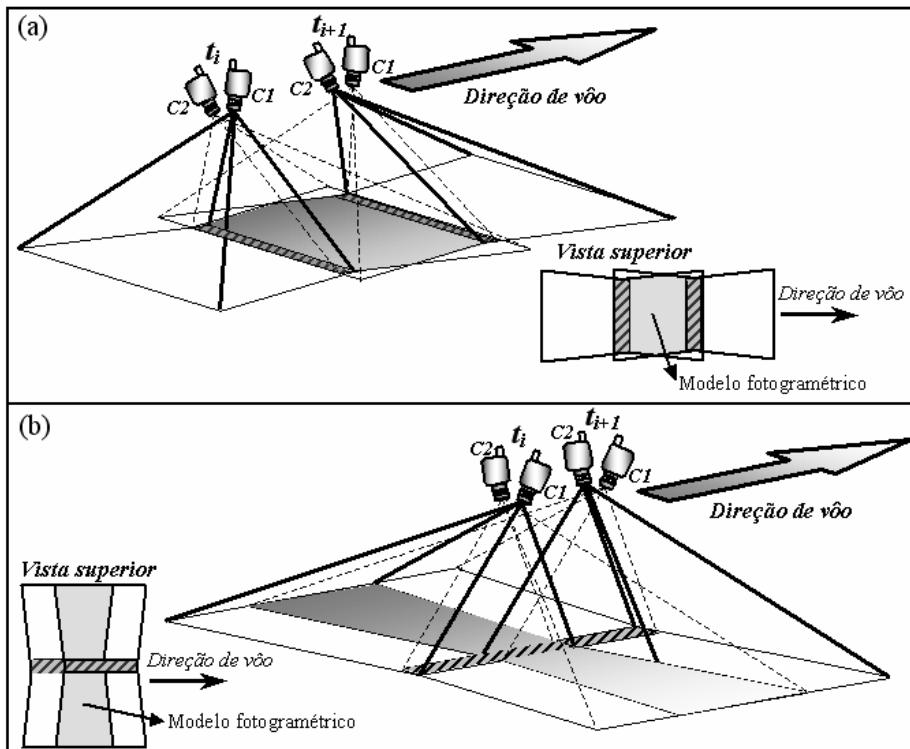
Para detalhes adicionais sobre os métodos de calibração de câmaras as seguintes referências são sugeridas: ANDRADE (2003), CLARKE e FRYER (1998), CRAMER (2004) e MIKHAIL et al (2001).

3. DESCRIÇÃO DO SAAPI (SISTEMA AEROTRANSPORTADO DE AQUISIÇÃO E PÓS-PROCESSAMENTO DE IMAGENS)

O sistema SAAPI - Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-Processamento de Imagens, descrito em (RUY et al, 2007), foi desenvolvido para permitir a aquisição de imagens digitais georeferenciadas, possuindo algumas configurações básicas, dependendo do número e inclinação das câmaras. As imagens utilizadas neste trabalho foram tomadas com a configuração dual oblíqua, na qual duas câmaras digitais *Hasselblad* de médio formato (22 Mpixel) são posicionadas de modo oblíquo.

As imagens podem ser adquiridas simultaneamente, de tal forma que as câmaras registram áreas adjacentes do terreno (Figura 1a), ou transversais à linha de vôo, com a vantagem, neste caso, de reduzir à metade o número de faixas (Figura 1b). Na Figura 1a, os modelos fotogramétricos são formados pelas imagens obtidas pela câmera 2 (C2) no instante t_i e a câmera 1 (C1) no instante t_{i+1} , de modo que toda a área imageada pelos sensores seja aproximadamente a mesma. Se o imageamento for transversal à linha de vôo (Figura 1b), o modelo será formado por imagens subseqüentes da mesma câmera com sobreposição determinada pelo intervalo entre as exposições.

Figura 1 - Aquisição das imagens pelo arranjo de câmeras convergentes do sistema SAAPI.

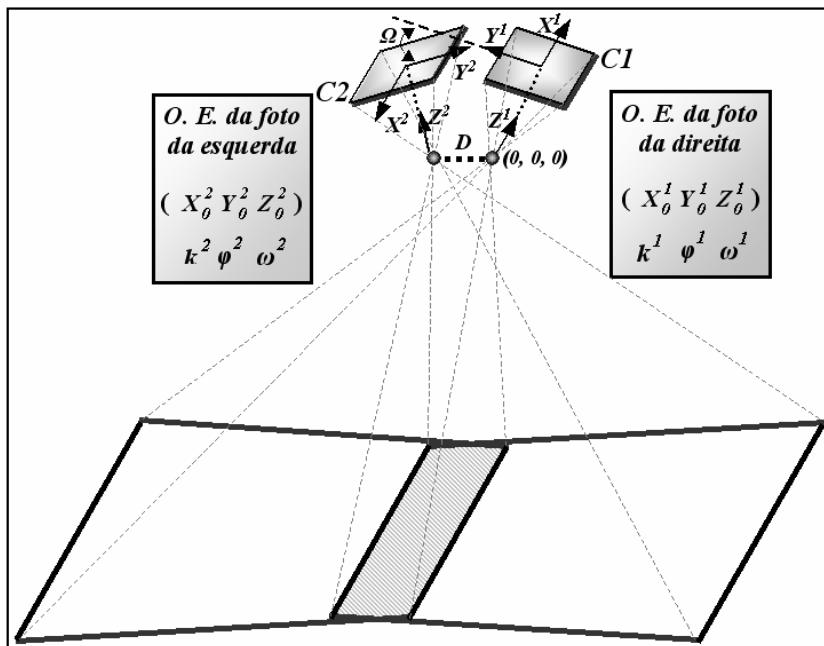


Fonte: Adaptado de Ruy et al (2007)

3.1 Geometria do arranjo dual

A Figura 2 ilustra o arranjo de câmeras dual, bem como alguns elementos considerados no método de calibração apresentado neste trabalho. Os elementos K , Φ e Ω são os ângulos de OR considerando o sistema de referência da câmera 1 (da direita) como origem e D é a distância Euclidiana entre os CPs. Os ângulos Ω , Φ e K apresentam valores nominais de -36° , 0° e 180° , respectivamente, para o sistema estudado neste trabalho.

Figura 2 - Geometria do arranjo dual.



Adaptado de Bazan (2008)

A matriz de OR entre as câmaras 1 e 2 pode ser calculada em função das matrizes de rotação das duas câmaras por:

$$R_R = R_1 (R_2)^{-1} \quad (4)$$

sendo

- R_R - Matriz de orientação relativa, correspondente às rotações (K, Φ, Ω) ;
- R_1 e $(R_2)^{-1}$ - Matriz de rotação da câmara 1 ($\kappa^1, \phi^1, \omega^1$), e inversa da matriz de rotação da câmara 2 ($\kappa^2, \phi^2, \omega^2$).

A partir das coordenadas do CP da câmara 1 e 2, ou seja: (X_0^I, Y_0^I, Z_0^I) e (X_0^2, Y_0^2, Z_0^2) , pode-se calcular a distância Euclidiana entre os CPs por:

$$D = \sqrt{(X_0^2 - X_0^I)^2 + (Y_0^2 - Y_0^I)^2 + (Z_0^2 - Z_0^I)^2} \quad (5)$$

3.2 Método para calibração do sistema dual

O modelo funcional fundamental baseia-se nas Equações de Colinearidade, com parâmetros adicionais, dadas por:

$$\begin{aligned} x_F - x_0 - \Delta x + f \frac{M}{Q} &= 0 \\ y_F - y_0 - \Delta y + f \frac{N}{Q} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

onde:

- (x_F, y_F) - Coordenadas medidas no referencial com origem no centro da imagem;
- $\Delta x = \delta x_r + \delta x_d + \delta x_a$ e $\Delta y = \delta y_r + \delta y_d + \delta y_a$;
- $M = m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)$;
- $N = m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)$;
- $Q = m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)$;

com m_{ij} sendo os elementos da matriz de rotação obtida em função das rotações κ , φ e ω , e $(\Delta x, \Delta y)$ as componentes em x e y do modelo de erros adotado na correção dos efeitos sistemáticos do sistema óptico.

Além do modelo dado pelas Equações 6 são incluídas equações adicionais de injunções dadas pelas Equações 9 a 12, escritas a partir das restrições 7 e 8. As Equações 7 e 8 se baseiam na condição de que a matriz de rotação relativa e a distância entre os CPs se mantém fixos, e portanto, os valores calculados pelas Equações 4 e 5, para os instantes i e $i+1$, podem ser considerados iguais, ou seja:

$$R_R^i - R_R^{i+1} = 0 \quad (7)$$

$$D_i^2 - D_{i+1}^2 = 0 \quad (8)$$

com:

$$R_R^i = \begin{bmatrix} (r_{11}^I r_{11}^2 + r_{12}^I r_{12}^2 + r_{13}^I r_{13}^2) & (r_{11}^I r_{21}^2 + r_{12}^I r_{22}^2 + r_{13}^I r_{23}^2) & (r_{11}^I r_{31}^2 + r_{12}^I r_{32}^2 + r_{13}^I r_{33}^2) \\ (r_{21}^I r_{11}^2 + r_{22}^I r_{12}^2 + r_{23}^I r_{13}^2) & (r_{21}^I r_{21}^2 + r_{22}^I r_{22}^2 + r_{23}^I r_{23}^2) & (r_{21}^I r_{31}^2 + r_{22}^I r_{32}^2 + r_{23}^I r_{33}^2) \\ (r_{31}^I r_{11}^2 + r_{32}^I r_{12}^2 + r_{33}^I r_{13}^2) & (r_{31}^I r_{21}^2 + r_{32}^I r_{22}^2 + r_{33}^I r_{23}^2) & (r_{31}^I r_{31}^2 + r_{32}^I r_{32}^2 + r_{33}^I r_{33}^2) \end{bmatrix}^{(i)} ,$$

sendo

- $r_{\text{linha } \text{coluna}}^{\text{câmara}}$ - Elementos das matrizes de rotação das câmaras 1 e 2;
- R_R^i - Matriz de rotação relativa no instante i .

Com base na Equação 7, que relaciona as matrizes de rotação relativas nos instantes i e $i+1$, podem ser obtidas três equações linearmente independentes, dadas por:

$$G_1 = (r_{21}^I r_{11}^2 + r_{22}^I r_{12}^2 + r_{23}^I r_{13}^2)^{(i)} - (r_{21}^I r_{11}^2 + r_{22}^I r_{12}^2 + r_{23}^I r_{13}^2)^{(i+1)} = 0 \quad (9)$$

$$G_2 = (r_{31}^I r_{11}^2 + r_{32}^I r_{12}^2 + r_{33}^I r_{13}^2)^{(i)} - (r_{31}^I r_{11}^2 + r_{32}^I r_{12}^2 + r_{33}^I r_{13}^2)^{(i+1)} = 0 \quad (10)$$

$$G_3 = (r_{31}^I r_{21}^2 + r_{32}^I r_{22}^2 + r_{33}^I r_{23}^2)^{(i)} - (r_{31}^I r_{21}^2 + r_{32}^I r_{22}^2 + r_{33}^I r_{23}^2)^{(i+1)} = 0 \quad (11)$$

A partir da Equação 8, que relaciona a distância entre os CPs nos instantes i e $i+1$, obtém-se uma quarta equação:

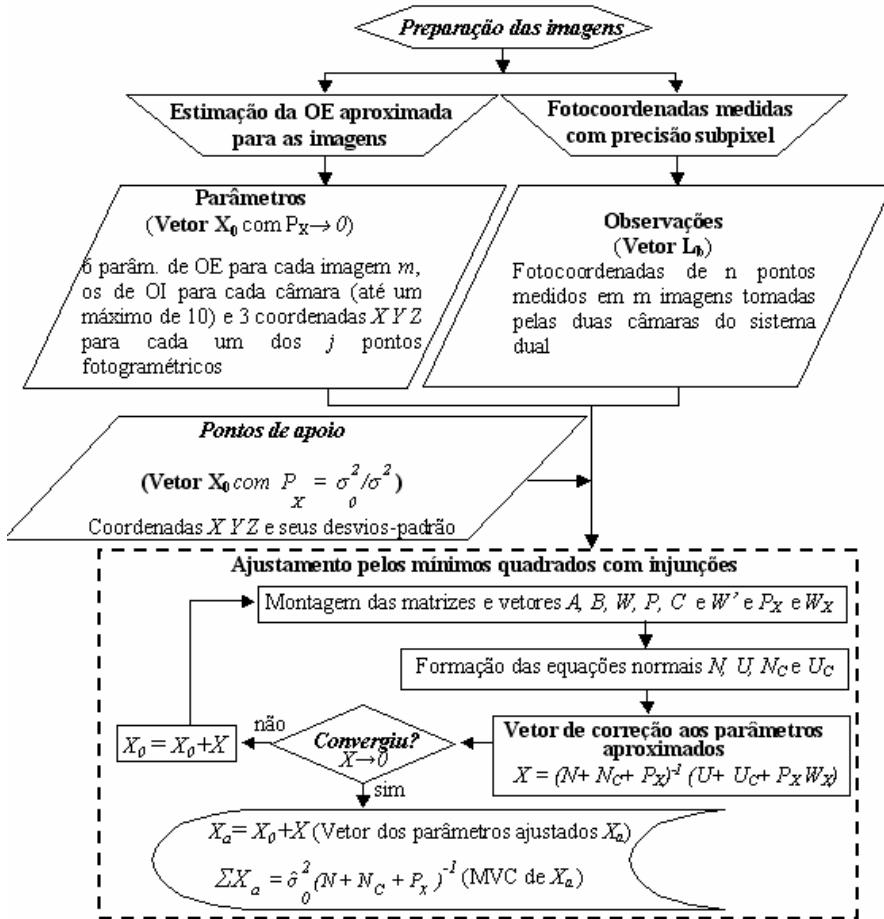
$$G_4 = (X_0^{2(i)} - X_0^{I(i)})^2 + (Y_0^{2(i)} - Y_0^{I(i)})^2 + (Z_0^{2(i)} - Z_0^{I(i)})^2 - (X_0^{2(i+1)} - X_0^{I(i+1)})^2 - (Y_0^{2(i+1)} - Y_0^{I(i+1)})^2 - (Z_0^{2(i+1)} - Z_0^{I(i+1)})^2 = 0 \quad (12)$$

As equações de injunções apresentadas nesta seção foram implementadas como funções na linguagem de programação C/C++ e incorporadas ao programa CMC – Calibração Multi-Câmaras (RUY et al, 2007). O fluxograma da Figura 3 mostra, de forma sintética, o processo de calibração considerando as equações de injunções apresentadas e o Método dos Mínimos Quadrados. Detalhes adicionais sobre o MMQ podem ser obtidos em Mikhail e Ackerman (1976) e Gemael (1994) e sobre a solução proposta em Bazan (2008).

Conforme mencionado anteriormente, as injunções funcionais de OR contribuem com o processo de ajustamento por meio da matriz N_C e vetor U_C (ver Figura 3) que são formados a partir das Equações 9, 10, 11 e 12.

Além das injunções relativas, podem ser usadas injunções de peso em quaisquer dos parâmetros, considerando o valor conhecido a priori do parâmetro e sua variância ($\sigma_{X_i}^2$), resultando em um peso: $P_{X_i} = \sigma_0^2 / \sigma_{X_i}^2$, sendo σ_0^2 , a variância de uma observação de peso unitário.

Figura 3 - Fluxograma do processo de calibração pelo método proposto.



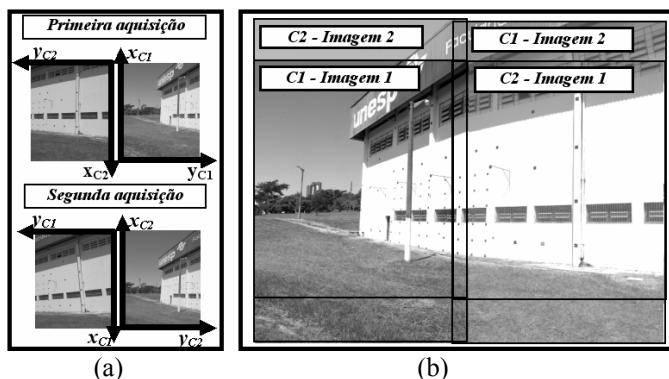
4. EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os experimentos apresentados nesta seção permitirão avaliar os resultados da calibração do sistema dual de câmeras digitais pelo método proposto. Os experimentos das Seções 4.1 e 4.2 utilizaram um total de 29 imagens. O primeiro experimento trata da calibração sem o uso de injunções de OR. O segundo considera o uso destas injunções, admitindo que as câmeras estão rigidamente fixadas no arranjo que as comporta.

Para os experimentos realizados foram adquiridas imagens do Campo de Calibração da UNESP/FCT, composto por uma parede externa do Ginásio de Esportes onde são disponíveis 83 pontos sinalizados, sendo 54 deles levantados por técnicas topográficas (GUARDIÀ et al., 1999). Das 29 imagens utilizadas, 14 foram adquiridas pela câmara 1 e 15 pela câmara 2, sendo que 13 delas foram coletadas no mesmo instante, formando pares. As coletas foram realizadas a partir de 4 estações e para cada estação, realizou-se 4 aquisições, com o arranjo de câmaras sendo rotacionado em 90° no sentido horário, a partir da primeira aquisição com rotação de 0°.

Devido às dimensões do campo de calibração, ao ângulo de cobertura das câmaras e a distância hiperfocal, algumas das imagens apresentaram enquadramento deficiente do campo de calibração com uma quantidade pequena de alvos, sendo alguns deles mal distribuídos. Optou-se por manter estas imagens a fim de avaliar a resposta do sistema a estas características, como discutido em Bazan (2008). A Figura 4 mostra parte das imagens utilizadas, adquiridas pelas câmaras 1 e 2, onde é possível ver o enquadramento do campo de calibração.

Figura 4 – (a) Alguns dos pares de imagens obtidas com o arranjo dual e; (b) distribuição dos pontos do campo de calibração para um bloco de 4 imagens.



Uma vez adquiridas as imagens pôde-se medir 1005 pontos, que resultaram em 2010 observações (fotocoordenadas x e y para cada ponto). Um total de 422 parâmetros foi considerado sendo: 6 parâmetros de OE por imagem ($6 \times 29 = 174$); 3 coordenadas X, Y e Z para cada ponto do espaço objeto ($3 \times 76 = 228$); e 10 parâmetros de OI por câmara ($10 \times 2 = 20$). A medição das coordenadas foi feita usando o aplicativo MID (REISS e TOMMASELLI, 2003) sendo medidas as coordenadas com qualidade subpixel.

O critério de convergência adotado foi de 0,0000004, que representa $0,1''$ expresso em radianos, para que se possa garantir também a convergência dos

valores angulares no ajustamento. Adotou-se para variância da observação de peso unitário a priori o valor de 0,00002025 mm², que corresponde a um desvio padrão de 0,5 pixel nas medidas das fotocoordenadas.

4.1 Calibração do sistema dual sem injunções de orientação relativa

Este experimento apresenta os resultados da calibração simultânea das câmaras que compõem o sistema dual, mas ainda sem o uso das injunções de OR. Do total de 76 pontos no espaço objeto, 49 eram de apoio e 27 fotogramétricos. A variância da observação de peso unitário a *posteriori* foi de $\hat{\sigma}^2 = 5 \times 10^{-7}$ mm² ($\hat{\sigma}_0 \sim 1/13$ pixel)

pixel) e após a realização do teste χ^2 a hipótese de que as variâncias *a priori* e a *posteriori* são iguais (hipótese nula) não foi rejeitada a um nível de confiança de 95%, sendo o ajustamento aceito. A Tabela 1 fornece os parâmetros de OI estimados e seus respectivos desvios-padrão.

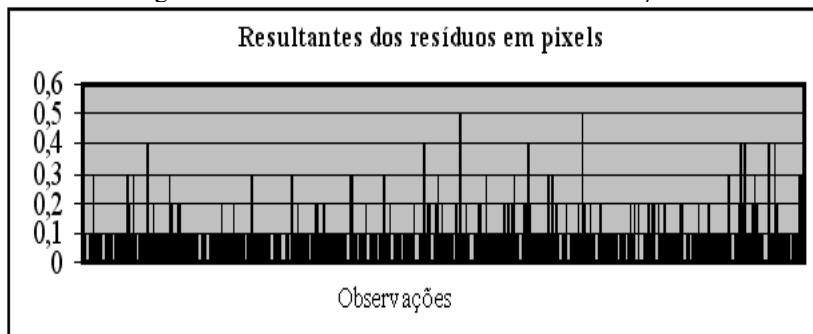
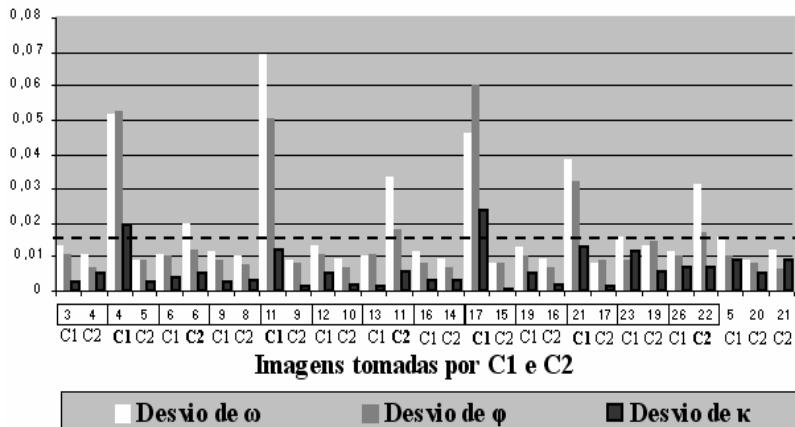
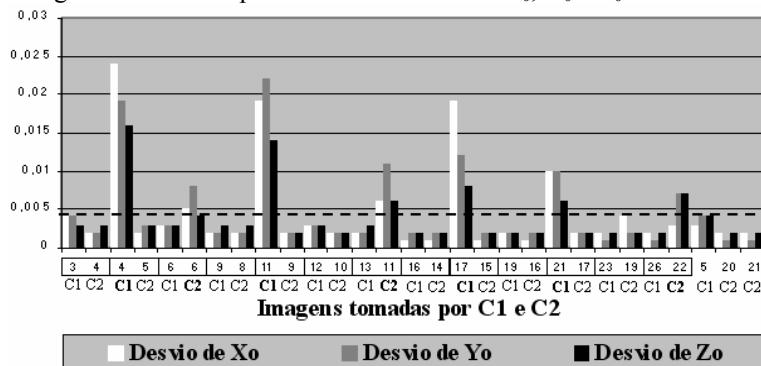
Tabela 1 – Parâmetros de orientação interior calibrados.

	CÂMARA 1	CÂMARA 2
f (mm)±σ	50,070±0,0060 (0,67 pixels)	50,124±0,0059 (0,66 pixels)
x₀ (mm)±σ	-0,287±0,0085 (0,95 pixels)	-0,665±0,0067 (0,75 pixels)
y₀ (mm)±σ	-0,054±0,0076 (0,85 pixels)	-0,276±0,0058 (0,64 pixels)
K₁(mm⁻²)±σ	0,288x10 ⁻⁰⁴ ±0,420x10 ⁻⁰⁶	-0,285x10 ⁻⁰⁴ ±0,290x10 ⁻⁰⁶
K₂(mm⁻⁴)±σ	0,141x10 ⁻⁰⁷ ±0,193x10 ⁻⁰⁸	0,107x10 ⁻⁰⁷ ±0,121x10 ⁻⁰⁸
K₃(mm⁻⁶)±σ	-0,200x10 ⁻¹¹ ±0,300x10 ⁻¹¹	0,700x10 ⁻¹¹ ±0,200x10 ⁻¹¹
P₁(mm⁻¹)±σ	0,218x10 ⁻⁰⁵ ±0,104x10 ⁻⁰⁵	0,832x10 ⁻⁰⁶ ±0,801x10 ⁻⁰⁶
P₂(mm⁻¹)±σ	-0,327x10 ⁻⁰⁶ ±0,114x10 ⁻⁰⁵	-0,600x10 ⁻⁰⁵ ±0,768x10 ⁻⁰⁶
A±σ	-0,174x10 ⁻⁰⁴ ±0,186x10 ⁻⁰⁴	0,647x10 ⁻⁰⁵ ±0,105x10 ⁻⁰⁴
B±σ	-0,576x10 ⁻⁰⁴ ±0,233x10 ⁻⁰⁴	-0,573x10 ⁻⁰⁴ ±0,140x10 ⁻⁰⁴

Percebe-se pela Tabela 1 que os parâmetros K₃, P₁, P₂, A e B, apresentaram desvios-padrão com a mesma ordem de grandeza destes parâmetros, tanto para a câmara 1 quanto para a câmara 2. Uma vez que a discussão central do trabalho se concentra na avaliação da influência das injunções de OR optou-se por manter todos os parâmetros de OI. Esta opção baseia-se em experimentos adicionais, não tratados neste artigo, no qual se observou que a inclusão de todos os parâmetros de OI é importante para corrigir pequenos erros sistemáticos ocorridos nos extremos das imagens quando da fusão dos pares de imagens do sistema dual.

A Figura 5 apresenta o gráfico das resultantes dos resíduos (ou magnitude dos resíduos) das observações após a calibração do sistema dual.

Figura 5 - Resultantes dos resíduos das observações.

Figura 6 - Desvios-padrão dos ângulos ω , ϕ , κ em graus decimais.Figura 7 - Desvios-padrão das coordenadas X_0 , Y_0 e Z_0 em metros.

Pela Figura 5, verifica-se que todas as observações apresentaram a resultante dos resíduos menores ou iguais a 0,5 pixel. Os desvios-padrão dos ângulos ω , ϕ , k e das coordenadas X_0 , Y_0 e Z_0 são apresentados, respectivamente, pelos gráficos da Figura 6 e 7.

A partir da análise das Figuras 6 e 7, verifica-se que os desvios-padrão dos elementos de OE ajustados são significativamente maiores (no caso da imagem 4 da câmara 1, quase 5 vezes maior) para as imagens que apresentaram deficiências quanto à quantidade e distribuição dos alvos. A Tabela 2 apresenta os elementos de OR, calculados a partir das Equações 5, para cada par, bem como seus valores médios e respectivos desvios-padrão. Os valores angulares são apresentados em graus sexagesimais e as distâncias entre os CPs em centímetros.

Verifica-se pela Tabela 2, que os ângulos de OR médios apresentaram um desvio padrão entre 1' e 2'. Já a distância média entre os CPs apresentou um desvio padrão de quase 6 mm. Estes desvios são considerados acentuados, uma vez que as câmeras são fixadas por um sistema rígido e considerado fisicamente estável. Isso permite concluir que esta abordagem não é satisfatória para o caso estudado. Sendo assim, o próximo experimento apresenta o processamento da calibração, considerando desta vez o uso de injunções de OR entre as câmeras, conforme modelo apresentado na Seção 3.2.

Tabela 2 - Elementos de OR calculados para cada aquisição e seus valores médios

Par de imagens (C1 e C2)	Ω	Φ	K	Distância entre CPs (cm)
3 4	-36° 42' 20,7"	-0° 23' 05,9"	179° 04' 00,4"	11,813
4 5	-36° 42' 50,4"	-0° 23' 49,1"	179° 03' 57,9"	10,042
6 6	-36° 42' 31,9"	-0° 24' 23,6"	179° 03' 39,6"	10,983
9 8	-36° 39' 32,9"	-0° 23' 18,5"	179° 06' 07,7"	10,048
11 9	-36° 42' 58,7"	-0° 23' 56,2"	179° 03' 01,0"	9,903
12 10	-36° 40' 19,6"	-0° 24' 41,8"	179° 02' 26,7"	10,169
13 11	-36° 41' 5,3"	-0° 25' 54,6"	179° 03' 18,8"	10,157
16 14	-36° 41' 8,9"	-0° 24' 39,8"	179° 03' 45,1"	10,864
17 15	-36° 44' 8,7"	-0° 28' 36,3"	179° 01' 40,8"	10,944
19 16	-36° 39' 34,0"	-0° 24' 48,1"	179° 02' 12,7"	10,202
21 17	-36° 44' 2,9"	-0° 23' 0,9"	179° 04' 36,5"	10,957
23 19	-36° 41' 32,4"	-0° 24' 12,9"	179° 03' 04,9"	11,188
26 22	-36° 41' 15,2"	-0° 24' 15,5"	179° 04' 41,9"	10,464
Média	-36° 41' 47,8"	-0° 24' 31,0"	179° 03' 34,9"	10,595
$\pm\sigma$	$\pm 0^{\circ} 01' 30,7''$	$\pm 0^{\circ} 01' 27,5''$	$\pm 0^{\circ} 01' 10,5''$	$\pm 0,573$

4.2 Calibração do sistema dual com injunções de orientação relativa

Este experimento considera 48 injunções adicionais ($4 \times n^o$ de pares - 1), já que do total de imagens, 13 delas foram tomadas por ambas as câmaras num mesmo instante. Deste modo, para cada duas aquisições é possível desenvolver 4 equações de injunções (Equações 9 a 12). O número de graus de liberdade aumentou de 1735 para 1783 e a variância da observação de peso unitário *a posteriori* foi de $13 \times 10^{-7} \text{ mm}^2$ ($\hat{\sigma}_0 \sim 1/9 \text{ pixel}$), sendo este valor maior do que o obtido no experimento anterior.

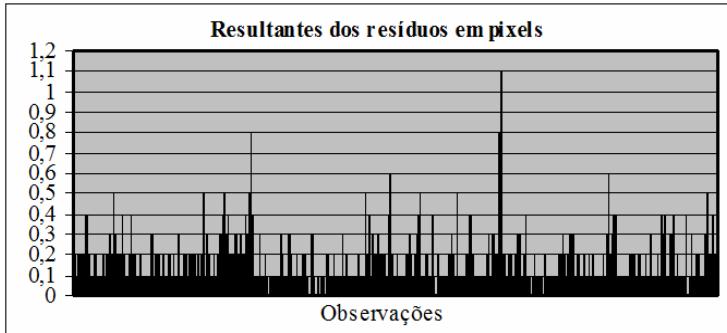
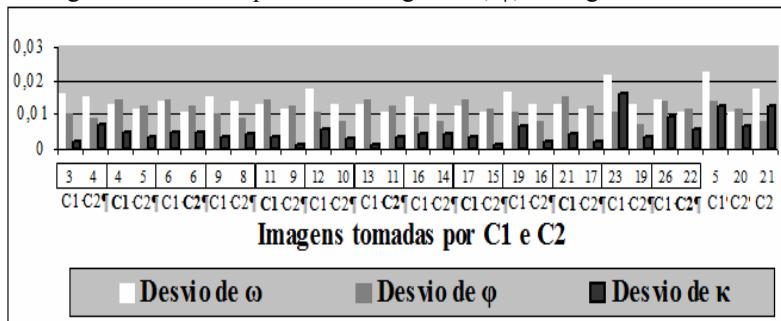
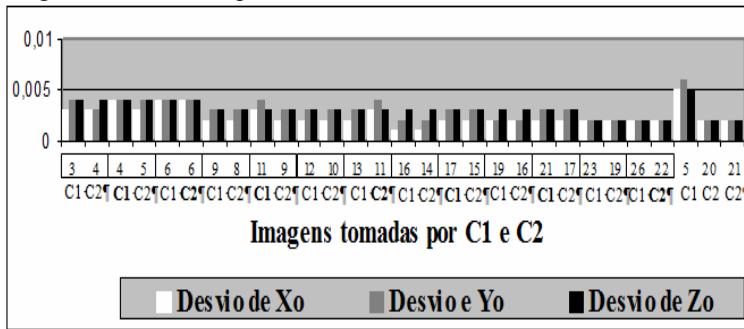
O aumento da variância *a posteriori* está associado à restrição imposta pelas injunções, que impedem que os parâmetros de OE variem livremente, fazendo com que os resíduos aumentem devido à propagação de erros nas observações ajustadas. Considerando o mesmo nível de confiança do experimento anterior e o mesmo teste estatístico, o ajustamento também foi aceito. A Tabela 3 apresenta os parâmetros de OI das câmaras, e respectivos desvios-padrão.

As resultantes dos resíduos nas fotocoordenadas são apresentadas na Figura 8. Os desvios-padrão dos parâmetros de OE estimados podem ser visualizados pelas Figuras 9 e 10. Os elementos de OR, juntamente com seus valores médios e respectivos desvios-padrão, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 3 - Parâmetros de orientação interior calibrados.

	CÂMARA 1	CÂMARA 2
f (mm)$\pm\sigma$	$50,138 \pm 0,0076$ (0,84 pixels)	$50,080 \pm 0,0079$ (0,88 pixels)
x₀ (mm)$\pm\sigma$	$-0,264 \pm 0,0116$ (1,29 pixels)	$-0,671 \pm 0,0092$ (1,02 pixels)
y₀ (mm)$\pm\sigma$	$0,058 \pm 0,0095$ (1,06 pixels)	$-0,277 \pm 0,0070$ (0,78 pixels)
K₁(mm⁻²)$\pm\sigma$	$-0,269 \times 10^{-04} \pm 0,470 \times 10^{-06}$	$-0,279 \times 10^{-04} \pm 0,370 \times 10^{-06}$
K₂(mm⁻⁴)$\pm\sigma$	$0,203 \times 10^{-08} \pm 0,174 \times 10^{-08}$	$0,809 \times 10^{-08} \pm 0,145 \times 10^{-08}$
K₃(mm⁻⁶)$\pm\sigma$	$0,220 \times 10^{-10} \pm 0,200 \times 10^{-11}$	$0,100 \times 10^{-10} \pm 0,200 \times 10^{-11}$
P₁(mm⁻¹)$\pm\sigma$	$0,436 \times 10^{-05} \pm 0,145 \times 10^{-05}$	$0,256 \times 10^{-05} \pm 0,114 \times 10^{-05}$
P₂(mm⁻¹)$\pm\sigma$	$0,356 \times 10^{-05} \pm 0,149 \times 10^{-05}$	$-0,349 \times 10^{-05} \pm 0,101 \times 10^{-05}$
A$\pm\sigma$	$-0,121 \times 10^{-03} \pm 0,248 \times 10^{-04}$	$0,386 \times 10^{-04} \pm 0,146 \times 10^{-04}$
B$\pm\sigma$	$-0,599 \times 10^{-04} \pm 0,303 \times 10^{-04}$	$-0,164 \times 10^{-04} \pm 0,192 \times 10^{-04}$

Figura 8 – Resultantes dos resíduos das observações.

Figura 9 - Desvios-padrão dos ângulos ω , φ , κ em graus decimais.Figura 10 - Desvios-padrão das coordenadas X_0 , Y_0 e Z_0 em metros.

Pela Tabela 3, percebe-se um pequeno aumento nos desvios-padrão estimados dos parâmetros de OI com relação àqueles estimados no experimento anterior (Tabela 1). A Figura 8 mostra que parte dos resíduos que antes se apresentavam em

torno de 0,1 pixel (e máximo de 0,5 pixel), pela Figura 5, passaram a apresentar valores próximos de 0,2 pixel (e máximo de 1,1 pixel). Além disso, alguns resíduos foram maiores que 0,5 pixel, ao contrário do que se verificou para o experimento anterior (na Figura 5).

Por outro lado, as Figuras 9 e 10 mostram que os desvios-padrão dos parâmetros de OE reduziram significativamente em relação àqueles apresentados pelas Figuras 6 e 7 do experimento anterior. Percebe-se ainda, que estes desvios apresentaram mesma magnitude e os desvios dos ângulos e das coordenadas são de no máximo 0,020 graus e 0,006 m, respectivamente.

Tabela 4- Elementos de OR calculados para cada aquisição e seus valores médios.

Par de imagens (C1 e C2)	Ω	Φ	K	Distância entre CPs (cm)
3 4	-36° 46' 51,28"	-0° 22' 28,38"	179° 4' 0,55"	11,813
4 5	-36° 46' 51,35"	-0° 22' 28,38"	179° 4' 0,56"	10,042
6 6	-36° 46' 51,40"	-0° 22' 28,37"	179° 4' 0,56"	10,983
9 8	-36° 46' 51,44"	-0° 22' 28,37"	179° 4' 0,57"	10,048
11 9	-36° 46' 51,54"	-0° 22' 28,36"	179° 4' 0,54"	9,903
12 10	-36° 46' 51,63"	-0° 22' 28,36"	179° 4' 0,51"	10,169
13 11	-36° 46' 51,72"	-0° 22' 28,36"	179° 4' 0,49"	10,157
16 14	-36° 46' 51,80"	-0° 22' 28,36"	179° 4' 0,47"	10,864
17 15	-36° 46' 51,84"	-0° 22' 28,36"	179° 4' 0,47"	10,944
19 16	-36° 46' 51,87"	-0° 22' 28,36"	179° 4' 0,46"	10,202
21 17	-36° 46' 51,92"	-0° 22' 28,37"	179° 4' 0,47"	10,957
23 19	-36° 46' 51,90"	-0° 22' 28,38"	179° 4' 0,48"	11,188
26 22	-36° 46' 51,92"	-0° 22' 28,39"	179° 4' 0,48"	10,464
Média	-36° 46' 51,66"	-0° 22' 28,37"	179° 4' 0,51"	11,251
$\pm\sigma$	$\pm 0^{\circ} 0' 0,24''$	$\pm 0^{\circ} 0' 0,01''$	$\pm 0^{\circ} 0' 0,04''$	$\pm 0,006$

Estes resultados indicam que os parâmetros de OE estimados no experimento anterior absorviam erros que neste experimento passaram a ser propagados para os outros parâmetros estimados. Esta propagação ocorreu em função da rigidez admitida para a estrutura física do arranjo, onde foram atribuídas variações de 1" e 1mm, para os ângulos e distância entre os CPs, respectivamente.

Como se pôde verificar, os elementos de OR se apresentaram de acordo com o que se esperava, admitindo-se as câmaras rigidamente estáveis dentro do arranjo, ou seja, apresentaram desvios menores do que 1" e 1mm, para os ângulos médios e

distância média entre os CPs, respectivamente. Verifica-se, ainda, que a distância média entre os CPs estimada neste experimento foi mais acurada do que aquela calculada no primeiro, já que a discrepância entre esta distância (Tabela 4) e a distância entre os CPs medida com um paquímetro, com base em informações técnicas do fabricante, foi de 1,31 mm ($D_{média} - D_{paquímetro} = 11,251 - 11,120 = 0,131\text{cm}$).

Deste modo, percebe-se a vantagem em se usar estas injunções de OR dado que alguns erros não são absorvidos pelos parâmetros de OE estimados, sendo obtidas estimativas mais realistas.

4.3 Análise dos resultados

Para a avaliação dos resultados alcançados com o método proposto foram realizados dois experimentos de calibração, apresentados nas Seções 4.1 e 4.2, para que se pudesse testar o resultado da calibração do sistema sem e com o uso de injunções de OR, respectivamente.

Sem o uso de injunções, observou-se que alguns dos parâmetros de OE estimados no primeiro experimento apresentaram desvios que chegavam a 4° para os ângulos e 2,4 cm para as coordenadas dos CPs (Figuras 6 e 7). Neste mesmo experimento, os elementos de OR médios (Tabela 2) apresentaram seus desvios em torno de 1,5° para os ângulos e 6 mm para a distância entre os CPs.

No segundo experimento, os desvios-padrão dos parâmetros de OE que se apresentavam elevados sofreram uma redução por conta das injunções de OR. Os gráficos das Figuras 9 e 10 mostraram que os desvios dos elementos angulares foram de no máximo 1° para os ângulos e 5 mm para as coordenadas do CP. Neste experimento, os elementos de OR médios apresentaram desvios-padrão menores que 1° para os ângulos e 1 mm para a distância entre os CPs (Tabela 4). A diferença entre esta distância média e aquela medida com o paquímetro (que foi de 1,31mm) indicou que os elementos de OR estimados foram acurados.

Fazendo uma análise mais geral do procedimento proposto pode-se destacar que a inclusão de injunções adicionais visa a imposição de uma condição física envolvendo a posição e orientação relativas entre as câmaras do sistema dual. Estas injunções são factíveis, devido à rigidez da estrutura que fixa as câmaras, diferente do que ocorre em alguns sistemas que utilizam pares de câmaras, como exemplo o sistema usado por Espinhosa et al (2008).

Em termos de desvantagem, mas que no fundo é inerente efetivamente ao ajustamento, se refere à ponderação efetuada nas equações de injunção 9 a 12. Admitir que estas quatro (4) equações sejam iguais a zero, com desvio-padrão nulo, equivale a assumir que o sistema é totalmente rígido, o que na prática pode não ser realista. Portanto, o único aspecto que pode ser visto como desvantagem se refere ao cuidado que deve-se ter ao aplicar as injunções, que pode resultar em situações não realísticas.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme mencionado, a abordagem apresentada por Bazan et al (2007), que se baseia na calibração individual das câmaras seguida do cálculo dos parâmetros de OR não se revelou uma estratégia adequada, já que as variações estimadas nos parâmetros de OR foram significativamente maiores que as variações físicas esperadas. Como exemplo, os desvios-padrão destes elementos variaram de 0,7cm a 1,2cm para a distância entre os CPs, e 6' a 8' para os elementos angulares, o que justificou o desenvolvimento de um método para a calibração simultânea de todos os parâmetros de ambas as câmaras, fazendo uso de injunções baseadas na estabilidade da OR entre as duas câmaras que compõem o arranjo.

Com base nos resultados destacados na Seção 4.3 e nos experimentos realizados, observa-se que a redução dos desvios-padrão dos parâmetros de OE que se apresentavam acentuados por conta das deficiências quanto ao número e distribuição dos alvos em algumas imagens, fez com que este erro fosse propagado para os outros parâmetros do ajustamento, o que refletiu também no aumento dos resíduos das observações.

Mediante estas considerações, e nas análises apresentadas, pode-se concluir que o método proposto, baseado na calibração simultânea dos parâmetros de ambas as câmaras, fazendo uso de injunções de OR, é recomendado, uma vez que as variâncias obtidas para os parâmetros de OR são mais realistas. Isto se justifica, pois as câmaras que compõem o sistema dual são fixadas a uma estrutura metálica rígida que as mantém fixas, mas que pode estar sujeita a pequenas variações decorrentes de vibrações e gradientes de temperatura, por exemplo.

Sugere-se para trabalhos futuros analisar o efeito de outros fatores e a realização de experimentos adicionais com diferentes ponderações nas equações de OR, bem como experimentos onde são avaliados os efeitos das injunções propostas neste trabalho na estimativa das coordenadas 3D.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio ao projeto na forma de uma bolsa de Mestrado do primeiro autor, e pelo apoio aos projetos ARMOD - Automação dos processos de Reconstrução e orientação de MODElos usando imagens digitais (Processo 472322/04-4) e Implantação de um campo de teste para a calibração de câmaras digitais (Processo 481047/2004-2).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, J. B. de *Fotogrametria*. Curitiba: SBEE, 2003. 274 p.
- ANDRADE, J. B. de; OLIVAS, M. A. A. Calibração de Câmaras Aerofotogramétricas. *Boletim da Universidade Federal do Paraná*, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Geodésia nº. 26, Curitiba, 1981.
- BAZAN, W. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; RUY, R. S. Calibração de um sistema dual câmaras digitais convergentes. In: II Simpósio Brasileiro de

- Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2007, Presidente Prudente. *Anais...* Presidente Prudente. 2007.
- BAZAN, W. S. *Calibração de um Sistema Dual de Câmaras Digitais*. 2008. Dissertação (Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
- BROWN, D. C. Decentering distortion of lenses. *Photogrammetric Engineering*, v. 32, n. 3, p. 444-462, may 1966.
- CLARKE, T. A.; FRYER, J. G. The development of camera calibration methods and models. *Photogrammetric Record*, v.16, n. 91, p. 51-66, apr. 1998.
- CRAMER, M. *EuroSDR network on digital camera calibration*. Institute of photogrammetry, University of Stuttgart, Final Report, oct. 2004. Disponível em: <<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/eurosdr/EuroSDR-Phase1-Report.pdf>>. Acesso em: 02 jul. 2007.
- DOERSTEL, C. ZEITLER, W. JACOBSEN, K. Geometric calibration of the DMC: method and results. ISPRS Commission I / Pecora 15 Conference Proceedings. In: *International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing* (34) Part 1 Com I, pp 324 – 333, Denver 2002.
- ESPINHOSA, D. R. S. ; SILVA, J. F. C. da ; GALO, M. Efeitos da injunção de base nas orientações interior e exterior e nas coordenadas do espaço objeto em imagens obtidas com a estéreo vídeo-câmera de um sistema móvel de mapeamento. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 14, p. 504-522, 2008.
- GALO, M. *Calibração e aplicação de câmaras digitais*. 1993. 151 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- GUARDIA, M. C.; REISS, M. L. L.; SILVA, R. A. C. *Levantamento topográfico usando o Sistema Móvel de Mapeamento Digital*. Trabalho de Graduação, Engenharia Cartográfica, Unesp - FCT, Presidente Prudente, 1999. 111 p. Orientadores: João Fernando Custódio da Silva e Paulo de Oliveira Camargo.
- GMAEL, C. *Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas*. Curitiba: Ed. UFPR, 1994. 319p.
- HABIB, A.; MORGAN, M.; LEE, Y. Bundle adjustment with self-calibration using straight lines. *Photogrammetric Record*, v. 17, n. 100, p. 635-650, oct. 2002.
- HABIB, A.; MORGAN, M.; LEE, Y. Bundle Adjustment with Self-Calibration using Straight Lines. *Journal of Photogrammetric Record*, 17(100): 635-650, 2002.
- HABIB, A.; MORGAN, M. Automatic calibration of low-cost digital cameras. *Journal of Optical Engineering*, v. 42, n. 4, p. 948-955, apr. 2003.
- KRÖPFL, K.; KRUCK, E.; GRUBER, M. Geometric calibration of the digital large format aerial camera UltraCamD. In.: *ISPRS Symposium Istanbul*, Comm. I, WG I/2. 2004.
- LUGNANI, J. B. *Introdução à fototriangulação*. Curitiba: Imprensa Universitária da UFPR, 1987. 134p.

- MACHADO, A. M. L.; MITISHITA, E. A.; SANTOS Jr., R. de L.; BARBOSA, F. P. Verificação da estabilidade geométrica dos parâmetros de calibração de uma câmara digital de pequeno formato Sony DSC-F717. In: Mitishita, Edson Aparecido. (Org.). *Série em Ciências Geodésicas – Novos Desenvolvimentos em Ciências Geodésicas - 2003*. Curitiba, 2003, v. 3, p. 292-309. ISBN: 85-88783-04-05.
- MERCHANT, D. C. *Analytical photogrammetry: theory and practice*. Notes Revised from Earlier Edition Printed in 1973, The Ohio State University, Ohio State. 1979.
- MIKHAIL, E. M.; ACKERMAN, F. *Observations and least squares*. New York: A Dun-Donnelley Publisher, 1976. 497p.
- MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J.S.; McGLONE, J. C. *Introduction to Modern Photogrammetry*. New York: John Wiley & Sons, 2001. 479 p.
- MITISHITA, E. A.; OLIVAS, M. A. A. Calibração de câmaras aerofotogramétricas a partir de aerofotos digitalizadas. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 7, nº 1, p. 64-76, 2001.
- MONIWA, H. *Analytical camera calibration for close-range photogrammetry*. Thesis, New Brunswick, Master of Science, University of New Brunswick, 104p., 1972.
- PREScott, B.; MCLEAN G. I. Line Base Correction of Radial Lens Distortion. In: *Graphical Models and Image Processing*. Vol. 59, nº 1, pp. 39-47, 1997.
- 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, v. 9, n. 1, p.1-21, 2003.
- RUy, R. da S.; TOMMASELLI, A. G.; HASEGAWA, J. K.; GALO, M.; IMAI, N. N.; CAMARGO, P. de O. SAAPI: a lightweight airborne image acquisition system: design and preliminary tests. In: *Proceedings of the 7th Geomatic Week – High resolution sensors and their applications*, 2007, Barcelona, February 20th to 23rd. p. 1-8.
- SHORTIS, M. R.; ROBSON, S.; BEYER, H. A. Principal point behavior and calibration parameter models for Kodak DCS cameras. *Photogrammetric Record*, v.16, n. 92, p. 165-186, oct. 1998.
- TELLES, S. S. S; TOMMASELLI, A. M. G. Um modelo matemático para calibração de câmaras baseado em linhas retas. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 57, n.3, 2005.
- TOMMASELLI, A. M. G.; TOZZI, C. L. *Técnicas de calibração de câmaras em visão computacional*, Jornada EPUSP/IEEE em Computação Visual, Dezembro, 1990.
- TOMMASELLI, A. M. G.; ALVES, A. O. *Calibração de uma estereocâmera baseada em vídeo: uma avaliação experimental*. 30 anos da pós-graduação em ciências geodésicas no Brasil In: *Séries em Ciências Geodésicas*. Curitiba: Ed. UFPR, 2001. v. 1. p. 199-213.

- TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; HASEGAWA, J.K.; CAMARGO, P.O.; IMAI, N.N. *Automação dos processos de Reconstrução e orientação de MODElos usando imagens digitais (ARMOD)*. Projeto de pesquisa financiado pelo CNPq. Edital Universal (aprovado em março de 2005). 2004.
- ZHUANG, H. A self-calibration approach to extrinsic parameter estimation of stereo cameras. *Robotics and Autonomous Systems*, v.15, p. 189-197, feb. 1995.
- WOLF, P. R.; GHILANI, C. D. *Adjustment computations: Statistics and least squares in surveying and GIS*. Wiley Series in Surveying and Boundary Control. New York, 1997. 600 p.
- WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. *Elements of photogrammetry, with applications in GIS*. 3.ed. Singapore: McGraw-Hill, 2000. 608 p.

(Recebido em agosto de 2008. Aceito em junho de 2009).