

MEDIÇÃO AUTOMÁTICA DE PONTOS PARA CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS

JULIO KIYOSHI HASEGAWA
MAURICIO GALO

Universidade Estadual Paulista - Unesp
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT
Departamento de Cartografia, Presidente Prudente - SP
{hasegawa, galo}@fct.unesp.br

RESUMO - O processo de calibração pode ser realizado a partir de métodos de laboratório ou métodos de campo. Nos métodos de campo, abordado neste trabalho, ocorre a necessidade de fazer a medição de vários pontos em um conjunto de imagens, a fim de gerar uma redundância de observações, permitindo a adequada modelagem e a obtenção de resultados confiáveis. Neste sentido, a atividade de medição desses pontos em todas essas imagens é um processo cansativo, dispendioso, e, por conseguinte pode acarretar erros grosseiros. Assim, este trabalho busca a automação do processo de calibração, obtendo assim uma maior rapidez e melhor precisão na coleta das coordenadas. Para tanto, foi utilizado um campo de teste nas dependências da FCT-UNESP, no qual foram dispostos dois grupos distintos de alvos, representando os pontos de apoio. Cinco alvos foram pintados na cor vermelha, e os restantes dos alvos foram pintados com um círculo de cor branca sobre um fundo preto. Os alvos vermelhos são utilizados como pontos de apoio para a resseção fotogramétrica e os pretos e brancos são utilizados como pontos de apoio para a calibração das câmaras digitais. Para validar o processo foram realizados alguns experimentos, cujos resultados indicam melhor precisão e a diminuição do tempo de aquisição dos pontos para calibrar as câmaras digitais, quando comparado ao processo manual de aquisição das coordenadas.

ABSTRACT - The Camera calibration process can be carried through from methods of laboratory or field. In the methods of field, the aim of this paper, it occurs to the necessity of if measuring some points in a set of images, in order to generate a redundancy of observations, allowing the adequate modeling and it allows accuracy results. In this way, the measurement of these points in all these images is a tiring, expensive process, and, therefore it can cause gross errors. In this work searches the automation of the calibration process, thus getting a bigger rapidity and better precision in the collection of the coordinates. This way, a field of test in the dependences of the FCT-UNESP was used, in which two distinct groups of targets had been made use, representing the control points. Five targets had been painted in the red color, and the remains of the targets had been painted with a circle of white color on a deep black color. The red targets are used as control points for the photogrammetric resection and the black and whites targets are used as control points for the calibration of the digital cameras. To validate the process some experiments had been carried through, whose resulted they indicate the better accuracy and the reduction of the time of acquisition of the points to calibrate the digital chambers in relation ships to manual observations.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de câmaras digitais em aplicações métricas tem simplificado e aumentado a agilidade e versatilidade na geração dos produtos cartográficos. A geração desses produtos com as câmaras digitais são possíveis devido à constituição dos sensores digitais na forma matricial, que possibilita a determinação dos elementos de orientação interior, sem a necessidade das marcas fiduciais, uma vez que o sistema de coordenadas de tela é solidário ao sensor digital.

Os elementos de orientação interior, determinados no processo de calibração, habilitam a câmara digital (não métrica) para aplicações métricas de forma a gerar

produtos cartográficos de com qualidade geométrica aceitável para diversas aplicações.

O processo de calibração tem por finalidade determinar os parâmetros intrínsecos da câmara. Os métodos de calibração são classicamente agrupados de duas formas: laboratório e campo (ANDRADE, 2003). Nos métodos de Laboratório são utilizados equipamentos especiais como goniômetros e multicolimadores e são normalmente realizados pelos fabricantes. Nos métodos de campo são utilizados modelos matemáticos que parametrizam os erros sistemáticos, e para tanto utilizam como observações as coordenadas dos pontos presentes nas imagens, além de pontos de controle, sendo montado e resolvido um sistema superabundante de equações onde

normalmente é utilizado o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) para a solução.

As imagens utilizadas para a calibração devem ser provenientes de uma área com vários pontos de apoio, bem distribuídos, cujas coordenadas tridimensionais devem ser medidas com precisão. O que se observa em uma operação de calibração, é a necessidade de aquisição de várias imagens a fim de gerar redundâncias de observações.

Para tanto, os pontos imageados devem ser medidos para compor as observações no processo de ajustamento. Esses pontos são utilizados como pontos de apoio, de verificação ou de passagem no processamento, realizados a partir de medidas feitas sobre imagens tomadas de várias posições, de forma a atender as exigências requeridas.

A qualidade da calibração é dependente da pela precisão da observação dos pontos na imagem. Caso as medidas sejam feitas manualmente a precisão obtida normalmente é da ordem de um pixel, no caso de medida baseadas em algoritmos matemáticos pode-se determiná-las com uma precisão de subpixel. Ainda, devido a grande quantidade de pontos a serem observados a possibilidade de cometer erros grosseiros é grande e desta forma, medidas automáticas ou monitoradas são de fundamental importância para agilizar e dar maior confiabilidade ao processo de calibração, permitindo inclusive a calibração das câmaras com maior frequência.

Neste sentido, com a crescente demanda em calibração de câmaras digitais (não métricas) foi implantado um campo de testes nas dependências da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT-Unesp) mediante auxílio do CNPq, por meio do projeto CNPq nº 481047/2004-2 (GALO et al, 2004), que simula o processo de “campos mistos”, ou seja, alguns pontos de apoio numa região plana e alguns com um certo desnível (simulando uma região montanhosa).

Desta forma, este trabalho tem como objetivo desenvolver um procedimento automático de medição das coordenadas de tela dos pontos de apoio, voltado para a realização da calibração, obtendo assim uma maior rapidez e melhor precisão na coleta dos pontos.

2 FUNDAMENTAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia de calibração automática de câmaras digitais adotadas se baseia em três etapas. Na primeira etapa são determinados automaticamente os elementos de orientação exterior de cada imagem capturada, tendo como base apenas os cinco pontos vermelhos. Estes pontos são localizados utilizando-se da diferença entre os canais de cores (R-G), binarizada com limiar pré-definido, seguida da determinação do centro de massa destes pontos, bem como da aplicação da resseção fotogramétrica, determinando-se assim os elementos de orientação exterior (OE) de cada imagem.

A segunda etapa consiste no cálculo das fotocoordenadas dos demais pontos de apoio com as

equações de colinearidade, fazendo-se a estimativa das coordenadas de cada ponto no espaço imagem, a partir dos parâmetros de OE e das coordenadas dos pontos do campo de calibração, no espaço objeto, possibilitando a determinação das coordenadas de tela desses pontos. Essas coordenadas de tela calculada são apenas aproximadas devido aos erros de orientação (OE) e sistemáticos não modelados.

Na terceira etapa as coordenadas reais dos pontos na imagem são calculadas a partir das coordenadas aproximadas obtidas na etapa anterior, sendo usado o centro de massa.

Por fim, medidos os pontos imagem e conhecidas às posições aproximadas das câmaras faz-se o processo de calibração propriamente dito, onde as coordenadas calculadas nos módulos anteriores são utilizadas para determinação dos parâmetros de calibração de câmaras digitais.

2.1 Câmaras Digitais

Em câmaras digitais os filmes (negativos) que devem ser processados quimicamente, são substituídos por sensores eletrônicos, que são circuitos integrados compostos por dois componentes básicos: pixels – pequenas áreas individuais que convertem luz em elétrons; e circuitos de saída que convertem o sinal em corrente elétrica. Esses sensores são montados em forma matricial nas câmaras de quadro, permitindo que cada pixel grave individualmente e simultaneamente a imagem capturada quando o obturador é aberto, semelhante à exposição de um filme (KODAK, 2008).

Atualmente existem, basicamente, dois tipos de sensores utilizados em câmaras digitais, os sensores CCD e CMOS. O sensor CCD (*charge-coupled device*) ou Dispositivo de Carga Acoplado são compostos de elementos discretos de imagem em silício, que recebem a intensidade luminosa e transmite-o ao circuito integrado. O sensor CMOS, semiconductor de metal-óxido complementar é uma alternativa ao CCD. Os sensores CMOSs apresentam baixo consumo de energia e chip com maior funcionalidade. Além disso, os sensores CMOS possuem uma propriedade exclusiva que simplifica as operações de geração de imagens: dentro de cada pixel, a carga de elétrons criada quando a luz atinge o fotodiodo é convertida diretamente em uma voltagem utilizável. Por essa razão, o processo de leitura é feito através de amplificadores e transistores CMOS tradicionais. Isso permite recursos exclusivos, como leitura de região de interesse e sub-amostragem diretamente no chip (KODAK, 2007).

Independentemente do tipo (CCD ou CMOS) de sensor utilizado nas câmaras de quadros, as imagens geradas guardam a mesma disposição matricial, que caracteriza ou materializa a posição dos pontos na imagem, possibilitando assim medidas precisa para aplicações métricas.

2.2 Resseção Espacial

O mapeamento entre um ponto no espaço objeto $P(X', Y', Z')$ e na imagem $p(x', y')$, e vice-versa, é possível se os elementos de orientação exterior são conhecidos. O modelo matemático utilizado é a equação de colinearidade, que são deduzidas com base na condição de que: centro perspectivo, ponto imagem e ponto objeto pertencem a uma reta. A Figura 1 ilustra a condição de colinearidade.

A determinação dos elementos de orientação exterior pode ser realizada de várias formas, quando se processa com uma única foto o procedimento e denominado de resseção espacial (LUGNANI, 1987).

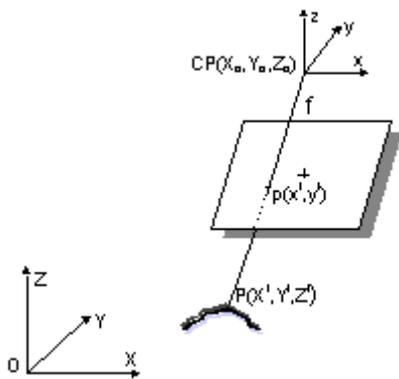


Figura 01 – Princípio de colinearidade.

As equações de colinearidade podem ser escritas por:

$$x = -f \frac{m_{11}(X - X_{cp}) + m_{12}(Y - Y_{cp}) + m_{13}(Z - Z_{cp})}{m_{31}(X - X_{cp}) + m_{32}(Y - Y_{cp}) + m_{33}(Z - Z_{cp})} \quad (1)$$

$$y = -f \frac{m_{21}(X - X_{cp}) + m_{22}(Y - Y_{cp}) + m_{23}(Z - Z_{cp})}{m_{31}(X - X_{cp}) + m_{32}(Y - Y_{cp}) + m_{33}(Z - Z_{cp})} \quad (2)$$

onde:

- x, y - são as fotocoordenadas de um ponto imagem;
- f - distância focal;
- X, Y, Z - coordenadas do ponto P no espaço objeto;
- X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp} - coordenadas do centro perspectivo;
- m_{ij} - elementos da matriz de rotação.

2.3 Calibração de Câmaras Digitais

A calibração pode ser entendida como sendo um procedimento para determinação de um conjunto de parâmetros inerentes à câmara, os quais permitem a reconstituição do feixe perspectivo que deu origem à imagem (GALO, 2003).

As equações de colinearidade fornecem o mais satisfatório vínculo geométrico entre espaço-objeto e

espaço-imagem, e se baseia na condição de que os três pontos (centro perspectivo, ponto imagem e ponto objeto) pertencem à mesma reta. As equações de colinearidade consideram as coordenadas dos pontos no espaço imagem, isenta das distorções provocadas pelo sistema de lentes.

A formulação para correção dos erros sistemáticos, provocados pelas distorções das lentes, nas coordenadas da imagem pode ser escrita introduzindo-se funções matemáticas que modelam os prováveis erros, conforme a Equação 03.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (03)$$

onde:

- x', y' coordenadas do ponto no sistema fiducial;
- x_0, y_0 coordenadas do ponto principal no sistema fiducial;
- e
- $\Delta x, \Delta y$ modelos de erro para as coordenadas x e y , respectivamente.

O modelo de erro ($\Delta x, \Delta y$) considera-se três componentes: a distorção radial simétrica, a distorção descentrada e os parâmetros de afinidade (GALO et al, 2003).

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx_r \\ dy_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx_d \\ dy_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx_a \\ dy_a \end{bmatrix} \quad (04)$$

$$dx_r = (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)(x' - x_0) \quad (05)$$

$$dy_r = (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)(y' - y_0) \quad (06)$$

$$dx_d = P_1(r^2 + 2(x' - x_0)^2) + 2P_2(x' - x_0)(y' - y_0) \quad (07)$$

$$dy_d = 2P_1(x' - x_0)(y' - y_0) + P_2(r^2 + 2(y' - y_0)^2) \quad (08)$$

$$\delta x_a = A(x' - x_0) \quad (09)$$

$$\delta y_a = B(x' - x_0) \quad (10)$$

$$r^2 = (x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2,$$

onde, k_1, k_2, k_3 são os coeficientes de distorção radial da lente; P_1, P_2 são os coeficientes de distorção descentrada e A e B são os parâmetros de afinidade (MONIWA, 1972; TOMMASELLI e TOZZI, 1990).

2.4 Decomposição das Bandas RGB

Geralmente uma imagem digital é armazenada em 3 bandas (RGB), na qual cada uma dela varia de 0 (mais escuro) a 255 (mais claro). Desta forma, pode-se decompor as três bandas R, G e B, gerando novas imagens em tons de cinza contendo apenas uma banda isolada (R, G ou B). A decomposição entre bandas tem várias (com algumas manipulações) aplicações em processamento de imagens, principalmente em problemas de detecção de objetos.

A diferença entre as bandas pode ser utilizada, para detectar e identificar tipos de objetos de uma cena por ter maior ou menor contraste em uma determinada banda. O algoritmo para realizar essa diferença pode ser escrito:

$$D(i,j) = I'(i,j) - I(i,j) \quad (11)$$

onde: $D(i,j)$ é a imagem da diferença; $I'(i,j)$ é a intensidade do pixel da imagem 1; e $I(i,j)$ é a intensidade do pixel da imagem 2.

2.5 Geração de Imagem Binária

Os métodos de geração de imagens binárias são freqüentemente classificados em globais ou locais. Os métodos globais são geralmente baseados no histograma de níveis de cinza onde através da adoção de um único valor de corte no nível de cinza, que opera em toda a imagem utilizada, separa as regiões de forma que somente duas cores prevaleçam, o preto e o branco. Os métodos locais adotam parâmetros que operam em regiões limitadas da imagem, variando de região para região da imagem.

Além disso, a geração de imagens binárias podem ser manuais ou automáticos, se exigem ou não a interferência do usuário para a escolha dos parâmetros no seu processamento.

Genericamente, pode-se gerar uma imagem binária segundo o algoritmo apresentado pela Equação 12,

$$b(i,j) = \begin{cases} 0 & \text{se } I(i,j) \leq \tau \\ 1 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (12)$$

onde: $b(i,j)$ é a imagem binária; $I(i,j)$ é a intensidade do pixel da imagem; e τ um limiar pré-estabelecido.

2.6 Cálculo do Centro de Massa

O centro de massa de um sistema de partículas é um ponto onde se supõe estar concentrada toda a massa e onde se considera aplicada a resultante das forças que atuam nesse sistema (JAIN et al, 1995).

A representação pelo centro de massa é um modelo simplificado que reduz um objeto extenso a uma só partícula ou ponto material. Em alguns casos, a representação de um objeto pelo seu centro de massa não retira sua exatidão, ou seja, o centro de massa de um objeto possui a mesma posição de um objeto, substituindo apenas sua extensão por um ponto unívoco.

Quando se trata do centro de massa de uma parte de uma imagem, esse é determinado de acordo com a posição e respectivo valor do nível de cinza do ponto, ou seja, a centro de massa de uma imagem é o centro geométrico da mesma e esse deve vir dotado do valor de brilho referente a essa posição. As Equações (13), ilustram o cálculo citado (JAIN et al, 1995).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n x \cdot g(x,y)}{\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n g(x,y)} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n y \cdot g(x,y)}{\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n g(x,y)} \quad (13)$$

onde: x, y é a posição do pixel na imagem; $g(x,y)$ é o valor de brilho na posição (x,y) ; e \bar{x}, \bar{y} é a posição encontrada para o centro de massa.

3 METODOLOGIA APLICADA

O procedimento de medição automática de pontos de apoio para calibração de câmaras digitais foi desenvolvido em duas fases distintas, todas com o máximo de automação possível. A primeira fase, onde os elementos de orientação exterior são determinados, utiliza cinco alvos de cor vermelha (detectados automaticamente), e distribuídos estrategicamente no campo de teste para garantir boa distribuição e um mínimo de pontos de apoio em qualquer situação de aquisição.

A segunda fase, determinação das coordenadas de tela dos pontos de apoio, os alvos são brancos com fundo preto. Esses alvos serão utilizados na calibração da câmara. A determinação de coordenadas de tela dos pontos de interesse para a calibração é obtida com as equações de colinearidade (na forma direta), pois as coordenadas do espaço objeto e os elementos de orientação exterior são conhecidos. No entanto, essas coordenadas estimadas não coincidem com os pontos imageado, devido aos erros sistemáticos (não corrigidos), imprecisão nos elementos de orientação exterior e outros fatores. Para que as medidas ocorram nos pontos imageados, há a necessidade de aplicar métodos alternativos para encontrar o ponto. Neste caso, foi definida uma região na vizinhança do ponto estimado na segunda fase, gerando uma subimagem que foi binarizada e usada para estimar o centro de massa nos pontos correspondentes ao alvo de interesse.

3.1 Resseção Fotogramétrica Automática

A resseção fotogramétrica é um método indireto de determinação dos elementos de orientação exterior, cujos parâmetros definem a posição espacial e a atitude de uma imagem em relação ao sistema de coordenadas cartesianas geodésicas, ou local, conforme a conveniência.

Baseado nas condições do método e tendo como premissa a detecção automática dos pontos de apoio, optou-se por colocar cinco pontos de apoio de cor vermelha no campo de teste da FCT/Unesp. Esse arranjo de pontos vermelhos é apresentado na Figura 02.

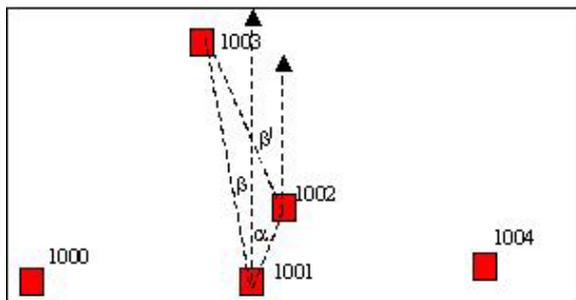


Figura 02 – Disposição e numeração dos pontos de orientação.

Para detectar automaticamente os alvos vermelhos foram realizados vários testes (MALAVAZI, 2007), fazendo a decomposição das bandas (R, G, B) e aplicando a diferença entre duas bandas. A diferença entre os canais R e G foi a que melhor destacou os alvos vermelhos.

A imagem da diferença (R – G) foi binarizada e o centro de massa de cada alvo foi determinado, utilizando o algoritmo de crescimento de regiões.

A disposição dos cinco pontos vermelhos apresentados na Figura 02 tem como objetivo atender ao algoritmo de identificação utilizado. A identificação dos pontos foi realizada, inicialmente, determinando-se dois pontos mais próximos, que podem ser identificados na região central da Figura 02 (pontos 1001 e 1002). A identificação (rotulação) dos dois pontos e do terceiro ponto (1003 - vermelho central superior) é realizada pelo alinhamento entre os três pontos (1001, 1002 e 1003). Esse alinhamento pode ser definido pela diferença angular entre as direções formadas pelos dois pontos próximos (ângulo α) e pelo terceiro ponto, com um dos dois próximos (ângulo β ou β'), que deve ser próximo de 0° ou 180° , pois os pontos 1001 e 1002 ainda não foram rotulados.

Com os três pontos centrais identificados, a determinação dos outros, ou o outro (pelo menos um deles – 1000 ou 1004 - deve aparecer na imagem), basta fazer o produto vetorial. As Figuras 03a e 03b ilustram os dois casos dos produtos vetoriais.

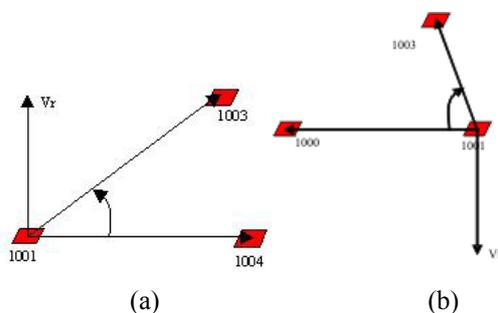


Figura 03 – Produto vetorial dextrógiro (a) e levógiro (b).

Na Figura 03a, o produto vetorial dos vetores formados pelos pontos 1001-1003 e 1001-1004, gera um vetor perpendicular ao plano que os contém, cuja direção resultante é apontada num dado sentido. Na Figura 03b a mesma analogia pode ser estabelecida, considerando agora os vetores formados pelos pontos 1001-1003 e 1001-1000, gerando um vetor resultante com sentido oposto ao anterior.

O processamento para a determinação dos elementos de orientação exterior é realizado utilizando-se das observações realizadas na imagem (pontos vermelhos identificados automaticamente), transformadas para o sistema fotogramétrico (sem correção dos erros sistemáticos), com as coordenadas dos pontos de apoio no espaço objeto e os valores aproximados dos elementos de orientação exterior.

3.2 Determinação Automática dos Pontos de Apoio para a Calibração

As observações dos pontos de apoio, de modo automático, são realizadas, em duas etapas distintas.

Na primeira, determinam-se as fotocoordenadas dos pontos de apoio, com base nas equações de colinearidade (equações 1 e 2), conhecendo-se:

- a distância focal nominal da câmara;
- coordenadas X, Y e Z dos pontos de apoio;
- seis elementos de orientação exterior.

Na segunda, devido a não coincidência dos pontos calculados com a sua verdadeira posição, define-se uma sub-imagem que é binarizada e no qual a posição do ponto é determinada com a precisão de subpixel com o algoritmo de centro de massa.

Na primeira etapa, os pontos calculados não coincidem com as suas verdadeiras posições na imagem, devido aos erros de orientação, aos valores nominais usados para a distância focal e as distorções da lente, entre outros fatores. Desta forma, alguns pontos calculados podem estar afastados da sua verdadeira posição, principalmente, nas bordas das imagens. Nesses casos, recursos para pontaria manual na região onde se encontra o ponto foram desenvolvidos, podendo ser determinado com precisão subpixel (algoritmo de centro de massa) ou gerando uma imagem ampliada para pontaria manual.

Ainda foi implementado um recurso para reprocessar os pontos de modo automático (centro de massa) com máscara menor (definido em função do tamanho inicial). Esse recurso foi incluído para solucionar problemas de resultados incorretos produzidos por mais de uma região homogêneas na sub-imagem semelhantes ao alvo, devido a sua dimensão.

4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Foram realizados alguns experimentos para validar o processo de orientação das imagens e outros para validar a metodologia de aquisição automática dos pontos de apoio e um experimento completo de calibração da

câmara digital Sony DSC – R1 de 10,3 Mega Pixels. A Figura 04 ilustra a disposição dos pontos de apoio (vermelho) para a resseção fotogramétrica, os pontos de apoio (preto) para calibração de câmaras e o sistema de coordenadas cartesianas plano retangular.



Figura 04 – Sistema de coordenadas cartesianas e pontos de orientação (vermelhos) e pontos de calibração (preto).

4.1 Determinação Automática dos Elementos de Orientação Exterior

Para a validação dessa etapa foram utilizadas seis imagens obtidas do campo de testes da FCT/Unesp, ilustradas nas Figuras 05a – 5f.

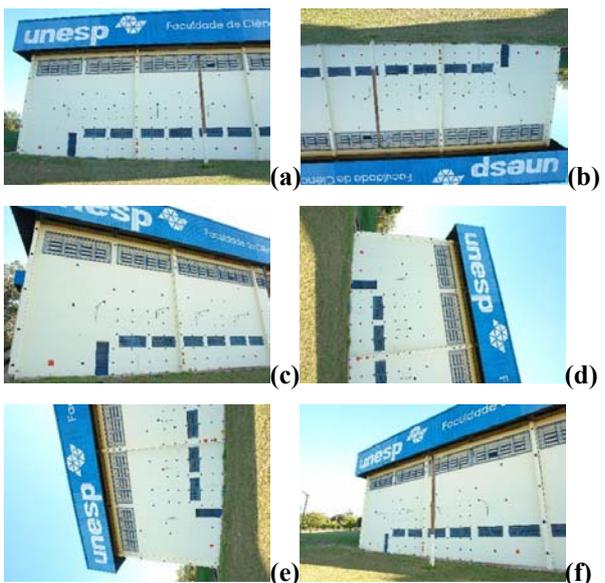


Figura 05 – Imagens do campo de calibração tomadas a partir de diferentes pontos de vista.

Foram utilizadas as 6 imagens da Figura 05 para validar o procedimento de determinação automática dos pontos de apoio de orientação. Para tanto um limiar de 80 foi aplicado para a geração da imagem binarizada da diferença da banda R e G. Uma das imagens preta e branca gerada é apresentada na Figura 06.



Figura 06 – Imagem binária gerada com limiar 80 das diferenças entre as bandas R e G da imagem da Figura 05a.

Verifica-se na imagem apresentada na Figura 06 que várias regiões que não correspondem aos pontos de apoio são definidos, provocando erros de identificação. Para eliminar essa inconsistência foi estabelecido um limiar mínimo (neste caso 300) de quantidade de pixel para que fosse identificado como um ponto de apoio.

4.2 Determinação Automática dos Pontos de Apoio para Calibração.

Nesta etapa, são calculadas as fotocoordenadas dos pontos de apoio (preto e branco), a partir das equações de colinearidade, conhecendo-se os elementos de orientação exterior e as coordenadas dos pontos de apoio no sistema de coordenadas do espaço objeto.

As fotocoordenadas são transformadas para o sistema de coordenadas da imagem (i, j) por:

$$i = \frac{x}{T_{px}} + \frac{T_w - 1}{2} \quad j = \frac{T_h - 1}{2} - \frac{y}{T_{py}} \quad (14)$$

onde: T_w é o número de linhas da imagem; T_h é o número de colunas da imagem e T_{px} e T_{py} o tamanho do pixel nas direções x e y respectivamente.

As coordenadas (i, j) da Equação 14 são isentas de erros, não correspondendo a sua posição real na imagem. No entanto, elas estão próximas da verdadeira posição. Para que a observação do ponto seja efetivada a seqüência a seguir foi aplicada:

- define-se uma sub-imagem em torno do ponto calculado;
- binariza-se a sub-imagem – limiar = 126;
- definem-se as regiões (R) com crescimento de regiões iniciando pelo 1º pixel branco, e para cada região encontrada verifica-se a quantidade de pixel para classifica-lo como ponto de apoio, segundo o critério:

$$Q_p = \frac{T_a \cdot T_a}{GSD \cdot GSD} \quad (15)$$

onde: Q_p – quantidade de pixel; T_a é o tamanho do alvo no terreno; e GSD o tamanho do pixel no terreno.

A região R será aceita se:

$$0,5 * Q_p \leq R \leq 1,5 * Q_p$$

- cálculo do centro de massa da região encontrada.

Experimentos com as seis imagens da Figura 05 foram realizados. Nas imagens a, b, c e f a taxa de sucesso foi na ordem de 70% (em torno de 106 pontos de um total de 330). Geralmente, os pontos observados erroneamente ficavam nas bordas das imagens, indicando que a posição calculada estava fora da janela de busca. Alguns pontos não foram identificados por oclusões parciais. As imagens da Figura 07 ilustram algumas situações que ocorreram na determinação.

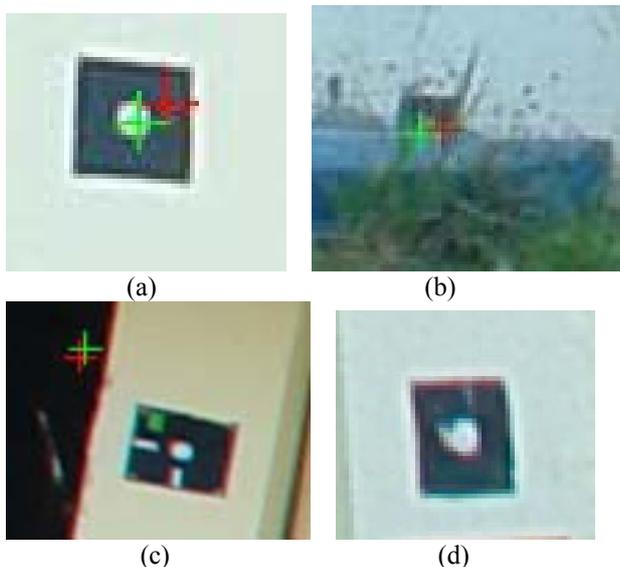


Figura 07 – Exemplos de pontos determinados automaticamente: a) ponto identificado corretamente; b) erro de identificação devido a oclusão parcial do ponto; c) erro de identificação devido ao erro de posição; e d) mancha no alvo;

Nas imagens d e e da Figura 08, todos os pontos foram identificados erroneamente devido ao erro de orientação. Isso foi constatado repetindo-se o processo de orientação com mais pontos de apoio, inserindo alguns pontos de calibração medidos manualmente. Em seguida, os pontos de apoio para calibração foram medidos automaticamente, resultado que levou a uma taxa de 57% de identificação correta. A Figura 08 ilustra os dois casos citados, identificação errônea dos pontos de apoio (em 8a) e, identificação correta de alguns pontos (em 8b), proporcionado pela melhora nos elementos de orientação exterior. Essa orientação foi realizada utilizando além dos pontos de orientação (pontos vermelhos), alguns pontos de apoio de calibração (alvos preto e branco), medidos manualmente.

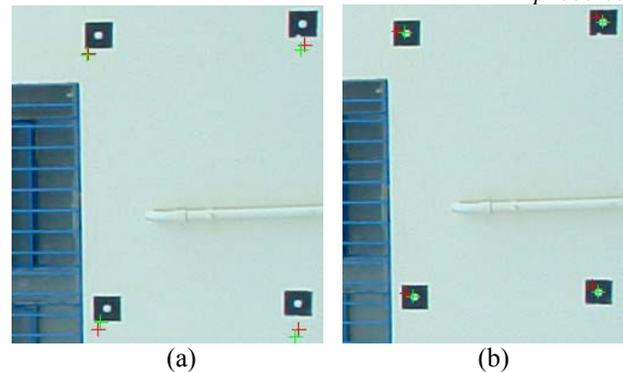


Figura 08 – região da imagem com pontos identificados automaticamente: a) imagem orientada somente com pontos vermelhos; b) imagem orientada com pontos vermelhos e alguns alvos adicionais (calibração).

4.3 Processamento da calibração de câmaras

A calibração da câmara foi realizada usando o aplicativo Calibração de Câmaras (GALO, 1993). Para fins de calibração foi considerada que as imagens tivessem o mesmo formato da obtida com câmara de 35 mm (quadro focal de 36 x 24 mm). Assim, a distância focal nominal foi de 28,00mm com pixel de 0,009mm.

O campo de teste tem 86 pontos de apoio, nos quais 54 pontos tiveram as suas coordenadas medidas por métodos topográficos, resultando em um desvio padrão médio de ±3mm por coordenada. Os pontos restantes foram determinados por fototriangulação cuja precisão obtida foi de ±5 mm.

Foram realizados dois experimentos de calibração da câmara, uma com observações realizadas manualmente e outra automaticamente. A Tabela 01 apresenta os resultados obtidos nestes experimentos:

Tabela 01 – Parâmetros de orientação interior obtidos com medições automáticas e manuais.

Parâmetros	Medidas automáticas	
	f(mm)	+24,4346
x ₀ (mm)	+0,0865	±0,6660x10 ⁻⁰²
y ₀ (mm)	+0,0348	±0,1772x10 ⁻⁰¹
k ₁ (mm ⁻²)	-0,170374 x10 ⁻⁰³	±0,2247x10 ⁻⁰⁵
k ₂ (mm ⁻⁴)	+0,945412 x10 ⁻⁰⁷	±0,1340x10 ⁻⁰⁷
k ₃ (mm ⁻⁶)	+0,225161 x10 ⁻⁰⁹	±0,2753x10 ⁻¹⁰
p ₁ (mm ⁻¹)	+0,193063 x10 ⁻⁰⁴	±0,3198x10 ⁻⁰⁵
p ₂ (mm ⁻¹)	-0,103286 x10 ⁻⁰⁴	±0,1129x10 ⁻⁰⁴
	Medidas manuais	
f(mm)	+24,4339	±0,2767 x10 ⁻⁰¹
x ₀ (mm)	+0,0774	±0,8330 x10 ⁻⁰²
y ₀ (mm)	+0,0714	±0,2209 x10 ⁻⁰¹
k ₁ (mm ⁻²)	-0,173048 x10 ⁻⁰³	±0,2796 x10 ⁻⁰⁵
k ₂ (mm ⁻⁴)	+0,116293 x10 ⁻⁰⁶	±0,1664 x10 ⁻⁰⁷
k ₃ (mm ⁻⁶)	+0,177207 x10 ⁻⁰⁹	±0,3409 x10 ⁻¹⁰
p ₁ (mm ⁻¹)	+0,162305 x10 ⁻⁰⁴	±0,3996 x10 ⁻⁰⁵
p ₂ (mm ⁻¹)	+0,511085 x10 ⁻⁰⁵	±0,1408 x10 ⁻⁰⁴

Como era esperada, a precisão dos parâmetros ajustados nas medidas automática apresentam desvios padrão menores que as manuais.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho procurou desenvolver um procedimento automático de medição de pontos de apoio para calibração de câmaras digitais, focando na determinação subpixel dos pontos.

Pelos experimentos realizados verificou-se que há um ganho médio de 2,6 minutos nas medidas automáticas, comparadas com as manuais. Uma vez que as coordenadas dos pontos de apoio são conhecidas, deve-se destacar que no caso das medidas manuais, somente as pontarias dos pontos, sendo a identificação e o armazenamento é realizado automaticamente.

Para melhorar o processo de automação, os alvos preto e branco (apoio para calibração) devem estar sempre com bom contraste e evitar que haja oclusões. Ainda, recomenda-se que os pontos de orientação (vermelhos) devem ter um alvo destacado no seu centro, para possibilitar a sua identificação e melhorar a orientação.

Como vantagens deste procedimento de medição automática dos pontos de apoio pode-se citar, a rapidez, a eliminação dos prováveis erros grosseiros de identificação dos pontos e as medidas subpixel, melhorando significativamente os resultados da calibração e permitindo a realização de câmaras com maior frequência.

AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos ao Eng. Cart. Matheus Adriano Malavazzi, (bolsista de iniciação científica em 2006/2007), pela implementação de alguns algoritmos utilizados neste trabalho, bem como ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio ao Projeto APQ – 481047/2004-2.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. B. de. **Fotogrametria**, SBEE, Curitiba PR, 274p., 2003.

GALO, M. **Calibração e aplicação de Câmaras Digitais**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná- Dissertação de Mestrado, Curitiba, 151 pg, 1993.

GALO, M.; CAMARGO, P. O.; TOMMASELLI, A. M. G.; HASEGAWA, J. K. **Implantação de um campo de teste para a calibração de câmaras digitais (Relatório de pesquisa)**. UNESP – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2007.

JAIN, R.; KASTURI, R.; SCHUNCK, B. G. **Machine Vision**. New York: McGraw-Hill International Editions, Computer Science Series, 1995. 549p.

Kodak. Desenvolvido pela Kodak Profissional. Disponível em:

<http://www.kodak.com/global/pt/professional/products/cameras/dcsPro14n/cmos.jhtml?id=0.2.24.28.3.14.18.22.5&lc=pt> Visualizado em: 14 de Março de 2007.

Kodak. Desenvolvido pela Kodak. Disponível em: http://www.kodak.com/global/pt/corp/historyOfKodak/capturingAnImage_pt-br.jhtml Visualizado em: 21 de julho de 2008.

LUGNANI, J. B. **Introdução à fototriangulação**. Curitiba PR, 134p., 1987.

MALAVAZZI, M. A. **Medição Automática de Pontos para Calibração de Câmaras Digitais**. Relatório final de Bolsa de iniciação científica – IC/PIBIC, 2007.

MONIWA, H. **Analytical camera calibration for close-range photogrammetry**. Thesis, New Brunswick, Master of Science, University of New Brunswick, 104p., 1972.

TOMMASELLI, A. M. G.; TOZZI, C. L. Técnicas de calibração de câmaras em visão computacional. **Jornada EPUSP/IEEE em Computação Visual**, Dezembro, 1990.