

RECONSTRUÇÃO AUTOMÁTICA DE ESTEREOMODELOS A PARTIR DE PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO DIRETA DO SENSOR

*Automatic Stereo Model Reconstruction Using Directly Measured Orientation
Parameters*

ROBERTO DA SILVA RUY
ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI

Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Cartografia
Rua Roberto Simonsen 305 CEP 19060-900 Presidente Prudente, SP, Brasil
{rroy, tomaseli}@prudente.unesp.br

RESUMO

Com a disponibilidade de câmaras digitais, dados de posicionamento por satélites (GPS) e sistemas inerciais (INS), tornaram-se possíveis novas aplicações que envolvem a obtenção de produtos cartográficos com requisitos de resposta rápida, como a defesa civil e o monitoramento de desastres ambientais. Tais aplicações necessitam de informações georreferenciadas com características de rapidez e confiabilidade, que podem ser obtidas pela técnica fotogramétrica digital, apoiada pelos sensores que fornecem orientação direta da câmara. Todavia, os parâmetros fornecidos pelos sensores de orientação direta utilizados para mapeamento não possuem a acurácia necessária para eliminar totalmente a paralaxe vertical do modelo e, por conseguinte, a visualização estereoscópica da cena fica prejudicada. Para resolver este problema, propôs-se uma metodologia que é baseada na compatibilização dos parâmetros de orientação direta, mediante um modelo de coplanaridade modificado. Após a compatibilização dos parâmetros de orientação exterior (OE), as imagens são normalizadas por meio de uma reamostragem epipolar, com intuito de proporcionar uma melhor visualização estereoscópica da cena e auxiliar o processo de correspondência de imagens, confinando as entidades conjugadas em uma mesma linha nas imagens. Neste contexto, módulos computacionais foram desenvolvidos em linguagem C++ para a geração totalmente automática de estereomodelos em quase tempo real. Experimentos com dados

simulados e reais foram conduzidos e os resultados comprovam a eficácia da metodologia adotada.

Palavras chave: Fotogrametria Digital, Georreferenciamento Direto, Injunção de Coplanaridade.

ABSTRACT

With the availability of digital cameras, satellite positioning systems (GPS) and inertial navigation systems (INS), new applications such as fast cartography and real time environmental monitoring became feasible. Such applications require georeferenced information with characteristics of speed and reliability that can be obtained by digital photogrammetry, using additional data from sensors of direct orientation. Although, the parameters supplied by the sensors are under the required accuracy to eliminate the vertical parallax in the model. To solve this problem, the methodology proposed in this project is based on the reprocessing of the orientation parameters supplied by the sensors, using a modified coplanarity model. After the EO parameters refinement, using the modified coplanarity model, the images are normalized through an epipolar resampling, in order to provide a comfortable stereoscopic visualization of the model, since vertical parallax is eliminated, and to aid the matching process, since the conjugate entities are confined to the same row. In order to test the proposed approach, computational programs were developed in C++ language, enabling the full automatic generation of estereomodelos in almost real time. Some preliminary experiments with simulated and real data were performed and the results showed that this methodology is efficient.

Keywords: Digital Photogrammetry, Direct-Georeferencing, Coplanarity Constrains.

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com os avanços da Fotogrametria digital, os aplicativos de processamento e análise de dados tornam-se cada vez mais eficientes do ponto de vista econômico, visto que grande parte das etapas envolvidas no processo pode ser automatizada. A orientação automática de imagens está relacionada neste contexto, onde é possível reduzir consideravelmente o tempo gasto no processo de mapeamento, além de evitar erros provenientes de operadores humanos.

Aliado a isso, o advento das câmaras digitais, do posicionamento por satélites (GPS) e por sistemas inerciais (INS), possibilitaram a realização de mapeamento com maior flexibilidade e rapidez. Neste sentido, surgiram novas aplicações a partir da disponibilidade destas tecnologias. A defesa civil e a análise de desastres naturais e antrópicos necessitam de produtos cartográficos com maior eficiência, uma vez que estas situações requerem informações cartográficas acuradas e periódicas.

A geração automática de estereomodelos se baseia na automatização rápida da orientação de imagens digitais a partir de dados de vôo e parâmetros de posição e

atitude fornecidos pelos sensores de posicionamento por satélites (GPS) e de navegação inercial (INS). Conforme mostrado na literatura (MOSTAFA & SCHWARZ, 2001; COLOMINA, 1999 e BRZEZINSKA, 1999), os parâmetros provenientes destes sensores de orientação utilizados para mapeamento não possuem acurácia desejável à total eliminação da paralaxe vertical (py) do modelo formado. Sendo assim, a visualização estereoscópica da cena fica prejudicada.

Neste sentido, este trabalho apresenta uma abordagem que é baseada na compatibilização (“refinamento”) dos parâmetros de orientação exterior, determinados pelos sensores de bordo (GPS+INS), por meio de um modelo de coplanaridade modificado, mediante um ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados. Diversos experimentos com dados simulados e reais foram realizados e alguns destes estão apresentados neste trabalho.

2 GEORREFERENCIAMENTO DIRETO

O georreferenciamento direto, ou orientação direta do sensor, consiste na determinação dos parâmetros de orientação exterior da câmara no instante de cada exposição fotográfica, durante a trajetória de voo. Isso é possível por meio da integração entre os sistemas de posicionamento por satélites (GPS – “*Global Positioning System*”) e os sistemas de navegação inercial (INS – “*Inertial Navigation System*”). Fundamentalmente, o GPS é usado a bordo da aeronave para a determinação das coordenadas dos CP’s (Centros Perspectivos) da câmara durante as exposições fotográficas. No caso dos sistemas inerciais, a Unidade de Medida Inercial (IMU), composta por acelerômetros, giroscópios e sensores auxiliares de calibração, é responsável por fornecer continuamente a atitude do sensor ao longo da trajetória de voo.

Neste contexto, a integração GPS/INS pode ser usada como uma ferramenta poderosa. O sistema inercial pode complementar o rastreamento GPS fornecendo as informações de posição inicial e de velocidade após a perda de sinal do receptor. Mesmo quando a visibilidade dos satélites é insuficiente, o INS pode fornecer informações contínuas de trajetória. Por outro lado, o bom rendimento do sistema de posicionamento GPS pode suplementar o sistema de navegação inercial por meio da estimação acurada do comportamento de seus erros ao longo do tempo. Estes erros estão relacionados ao problema de deriva das componentes de trajetória, inerente aos sistemas inerciais usados para mapeamento. Os erros internos do INS são modelados como desvios nos giros e deslocamentos nos acelerômetros, e podem ser corrigidos pelo método de filtragem Kalman, integrando as informações de posição provenientes do GPS. (CRAMER & STALLMANN, 2001).

O principal objetivo do georreferenciamento direto, ou seja, determinação direta dos parâmetros de orientação exterior, é o de minimizar, ou mesmo eliminar a necessidade de pontos de controle para a orientação das imagens. Em outras palavras, os parâmetros de orientação exterior serão estimados diretamente por sensores de bordo, e não por meio de uma aerotriangulação usando os pontos de

controle disponíveis. O fato é que o método que independe da disponibilidade de pontos de controle tem vantagens econômicas, principalmente em áreas de acesso restrito.

A orientação e posição fornecidas pelo módulo GPS/INS são fisicamente separadas da câmara, sendo que translações e rotações estão presentes e devem ser consideradas. Em geral, o deslocamento entre a antena GPS, o centro da unidade de medida inercial e o centro perspectivo da câmara são medidos *a priori* e as correspondentes translações são consideradas durante os processamentos dos dados. Dessa forma, a informação de posição final fornecida pelo GPS/INS refere-se diretamente ao centro perspectivo da câmara. Com base na Figura 1, a equação geral para o georreferenciamento direto, que transforma as coordenadas referenciadas ao sistema fotogramétrico (P) para o correspondente sistema cartesiano terrestre local (L) é dada por (CRAMER & STALLMANN, 2001):

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix}_L = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}_L + \lambda * R_B^L(\omega, \varphi, \kappa) * \Delta R_P^B(\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa) * \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix}_P \quad (1)$$

com:

$r_i^L = (X_p, Y_p, Z_p)_L$: vetor com as coordenadas de um ponto, referenciadas ao sistema cartesiano terrestre local;

$r_i^P = (x_p, y_p, -f)_P$: vetor com as coordenadas de um ponto no sistema fotogramétrico;

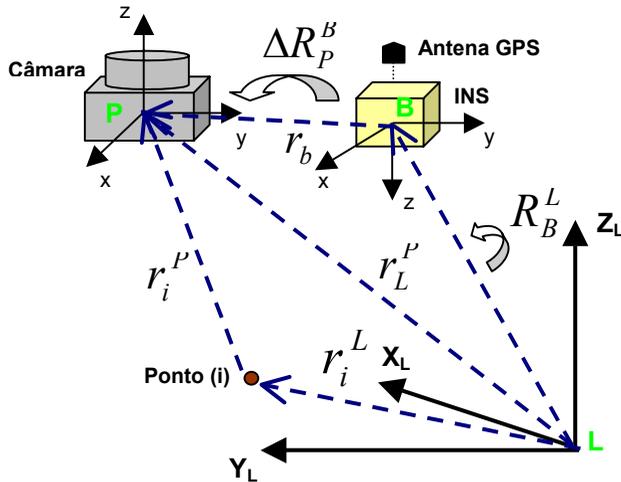
$r_L^P = (X_0, Y_0, Z_0)_L$: vetor correspondente à translação entre o sistema fotogramétrico (P) e o sistema cartesiano terrestre local (L);

λ : fator de escala;

R_B^L : matriz de rotação entre o sistema definido pelo sensor inercial (B - *body-frame*) e o sistema cartesiano terrestre local (L);

ΔR_P^B : função de não alinhamento (matriz de rotação) entre o sistema fotogramétrico (P) e o sistema definido pelo sensor inercial (B). Esta rotação é necessária visto que as medidas dos ângulos de rotação referem-se ao sistema definido pelo sistema inercial (B) e não ao sistema fotogramétrico (P). Apesar de um primeiro alinhamento entre os sistemas ser realizado durante a instalação dos sensores, pequenos desvios permanecem e devem ser compensados numericamente.

Figura 1: Elementos do georreferenciamento direto.



Um dos grandes problemas na orientação de imagens é o sistema de calibração, pois quaisquer discrepâncias entre o modelo matemático adotado e a realidade física durante a formação da imagem causam erros na determinação de pontos no espaço objeto. No caso do georreferenciamento direto o modelo de geometria interna da câmara é fundamental, visto que o sistema GPS/INS fornece medidas diretas da posição e orientação física da câmara durante a exposição.

Os parâmetros de orientação exterior fornecidos pelos sensores de orientação direta da câmara (GPS+INS) têm acurácia dependente do tipo de sistema utilizado. A seguir, são apresentados alguns resultados de experimentos realizados com três sistemas disponíveis no mercado:

- Experimentos realizados por Cramer e Schade (1995) com o sensor inercial de baixo custo (aproximadamente 33 mil reais) *Motionpak* (BEI/Systron Donner), integrado a um receptor GPS *Ashtech 3DF*, resultaram em dados com qualidade de: 20' para o ângulo ω , 3' para φ e 2' para κ ;
- Sistema APPLANIX POS/DG310, composto por um GPS de dupla frequência Novatel Millennium e um sistema inercial IMU Litton LR 86: parâmetros de orientação exterior com acurácia de 0,1-0,2m para as coordenadas do CP e 7"-15" para os ângulos de atitude (CRAMER et al, 1999);
- Segundo Mostafa e Hutton (2001), em experimentos realizados com o sistema de navegação *POS/ACTM*, da APPLANIX, os parâmetros resultantes apresentaram acurácia em torno de 0,3m para as coordenadas do CP e 2-4' para os parâmetros de atitude da câmara.

Embora os sistemas GPS e INS tenham custos elevados para as empresas de mapeamento, diversas são as vantagens oferecidas por esta integração durante a realização do voo (TOMMASELLI, 2001):

- Permitem a determinação mais rápida dos parâmetros de orientação exterior, pois a etapa de aerotriangulação pode ser eliminada ou inteiramente automatizada;
- Eliminam as limitações de trajetória do voo, não sendo obrigatória a montagem de um bloco, o que permite aplicações como monitoramento de linhas de transmissão, projetos de estradas e outros;
- Mesmo no caso de ser realizada a Aerotriangulação, os algoritmos de correlação funcionarão com melhor rendimento;

3 METODOLOGIA

Este trabalho apresenta uma abordagem desenvolvida para a compatibilização (“refinamento”) dos parâmetros de orientação exterior das imagens do estereopar, estimados pelos sensores de orientação direta (GPS/INS). Isso porque os parâmetros de orientação direta não têm a acurácia necessária à total formação do modelo e, conseqüentemente, o modelo apresenta um valor residual de paralaxe vertical, que prejudica a visualização estereoscópica da cena.

Para a compatibilização dos parâmetros de orientação exterior alguns pontos de passagem são medidos no modelo, a partir de uma abordagem para a identificação automática de pontos homólogos desenvolvida. Com estes pontos medidos no modelo, os parâmetros de orientação exterior são compatibilizados num ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Neste processo, os parâmetros foram “refinados” para eliminar a paralaxe vertical do modelo. Por fim, as imagens são normalizadas (Reamostragem Epipolar), a partir dos parâmetros de orientação exterior compatibilizados, para proporcionar a visualização estereoscópica do modelo sem paralaxe, além de auxiliar o processo de correspondência de imagens, confinando as entidades homólogas na mesma linha nas imagens.

3.1 Identificação automática de pontos homólogos

No processo de compatibilização dos parâmetros de orientação exterior, pelo Método dos Mínimos Quadrados, é necessário medir apenas um ponto para ajustar os parâmetros, uma vez que os doze parâmetros de orientação exterior são tratados como injunções de peso, relativo a qualidade da determinação pelos sensores de orientação direta. Todavia um número mais significativo de pontos traz mais confiabilidade ao processo, uma vez que pontos identificados incorretamente podem ser eliminados por meio de uma análise dos resíduos das observações ao final do ajustamento.

Neste trabalho, o que caracteriza a identificação dos pontos de passagem é a total automação do processo. Neste contexto, foi desenvolvida uma metodologia para a definição da janela de referência, foi adaptado o método de redução do

espaço de busca em linhas epipolares, além de utilizadas as técnicas de correlação por área para a estimação das posições homólogas.

3.1.1 Definição automática das janelas de referência

As janelas de referência são definidas de forma automática e, conseqüentemente, a área de superposição do modelo deve ser determinada. Para isto, as posições homólogas dos extremos da imagem da direita são determinadas na imagem da esquerda, usando a técnica de redução do espaço de busca em linhas epipolares (ver SCHENK, 1999) e os métodos de correlação por área (Correlação ao nível de pixel e pelo MMQ – Seção 3.1.2). O processo de busca em linhas epipolares utiliza a geometria epipolar para reduzir o espaço de busca nas linhas epipolares das imagens, a partir das equações de colinearidade, dos parâmetros de orientação exterior das imagens e de um conhecimento aproximado da altitude média da região (Ex: MDT global). Como os parâmetros de OE foram estimados pelos sensores de orientação direta e, sendo assim, consistem de parâmetros “aproximados”, este método foi adaptado de tal modo a gerar uma janela de busca em torno da linha epipolar. Nesta janela, os algoritmos de correlação por área são aplicados para estimar as posições correspondentes aos extremos da imagem da esquerda, definindo os limites da área de superposição.

Com a área de superposição determinada, as janelas de referência podem ser definidas. O tamanho da janela de referência é definido a priori por um arquivo de configuração. Neste arquivo é ainda definido o número de pontos de passagem a serem medidos automaticamente no modelo. Ao definir cada janela de referência sobre o modelo é realizada uma pré-análise da região de correlação, com o intuito de aumentar a robustez do processo, evitando regiões problemáticas (homogêneas). Esta análise *a priori* é realizada pelo cálculo da matriz variância-covariância das componentes de translação radiométrica das áreas de correlação da imagem de referência, a partir de uma medida de correlação teoricamente correta (COSTA et al, 2003). Como se trata de uma abordagem automática, este coeficiente foi experimentalmente definido como 0,8.

Os critérios de rejeição para as regiões problemáticas foram estabelecidos por meio de experimentos práticos, apresentados em Ruy (2004). Caso a região amostrada pela janela de referência seja considerada problemática, a janela é deslocada em três pixels na direção horizontal. Este processo é repetido até que a área de correlação seja considerada adequada, de acordo com os critérios definidos. Este processo minimiza a ocorrência de falsas correlações ou de correlações redundantes.

3.1.2 Métodos de correspondência de imagens

Para a identificação dos pontos homólogos no modelo foram utilizadas as técnicas de correlação baseada em área. A estimação do ponto homólogo na janela de busca é feita inicialmente ao nível de pixel, a partir de uma convolução da janela

de pesquisa sobre a janela de busca, com base na função de covariância cruzada normalizada (KRAUS, 1993).

Para a estimação da posição do ponto homólogo ao nível subpixel é adotado o princípio de correspondência pelo Método dos Mínimos Quadrados. Este método visa minimizar a diferença dos níveis de cinza entre as janelas de referência e janela de pesquisa, onde as diferenças geométricas e radiométricas entre as janelas são os parâmetros a serem determinados num processo de ajustamento. Neste sentido, a posição e a forma da janela de pesquisa são ajustados de tal modo que a diferença dos níveis de cinza entre as janelas seja mínimo. Maiores detalhes sobre este processo são encontrados em Gruen (1996).

3.2 Compatibilização dos parâmetros de orientação exterior

Para garantir a formação do estereomodelo sem paralaxe foi utilizada a injunção de coplanaridade. (MIKHAIL, 2001). Como os parâmetros de orientação exterior foram previamente determinados pelos sensores de orientação direta (GPS+INS), o modelo de coplanaridade foi reescrito (eq. 2) em função dos doze parâmetros de orientação exterior (Posições do CP e ângulos de atitude das imagens). No modelo de coplanaridade original as fotos são orientadas uma em relação à outra num referencial arbitrário da foto da esquerda. No caso desta abordagem, o modelo é tratado de forma diferente, sendo que os parâmetros de orientação exterior são explícitos na equação e compatibilizados pela injunção de coplanaridade num sistema de referência terrestre, no qual estes parâmetros foram determinados.

$$\begin{aligned} & (X_D^{CP} - X_E^{CP}) * (v_E \cdot w_D - v_D \cdot w_E) + (Y_D^{CP} - Y_E^{CP}) * (u_D \cdot w_E - u_E \cdot w_D) + (Z_D^{CP} - Z_E^{CP}) * \\ & (u_E \cdot v_D - u_D \cdot v_E) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

com:

$$\begin{bmatrix} u_E \\ v_E \\ w_E \end{bmatrix} = M_E^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}_E, \quad \begin{bmatrix} u_D \\ v_D \\ w_D \end{bmatrix} = M_D^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}_D \quad (3)$$

onde:

$(X_E^{CP}, Y_E^{CP}, Z_E^{CP})$: coordenadas do centro perspectivo da foto da esquerda no referencial de terreno;

$(X_D^{CP}, Y_D^{CP}, Z_D^{CP})$: coordenadas do centro perspectivo da foto da direita no referencial de terreno;

M_E : matriz de rotação da foto da esquerda;

M_D : matriz de rotação da foto da direita;

$(x, y, -f)_E$: coordenadas do ponto da foto da esquerda no sistema fotogramétrico;

$(x, y, -f)_D$: coordenadas do ponto da foto da direita no sistema fotogramétrico.

Os parâmetros de orientação exterior são compatibilizados num ajustamento

pelo Método dos Mínimos Quadrados. Como no modelo de coplanaridade apresentado equação 2, tanto os parâmetros como os valores observados são ligados por uma função não explícita e não linear, o método usado para compatibilizar os parâmetros de orientação exterior foi o Método Combinado iterativo com injunções, apresentado em Mikhail (1976).

Neste trabalho, o modelo de coplanaridade foi adaptado de modo que os doze parâmetros de orientação exterior ($X_E^{CP}, Y_E^{CP}, Z_E^{CP}, \omega_E, \varphi_E, \kappa_E, X_D^{CP}, Y_D^{CP}, Z_D^{CP}, \omega_D, \varphi_D, \kappa_D$) sejam tratados com injunções de peso, relativas à qualidade de sua determinação, ou seja, os desvios-padrão dos parâmetros são definidos pelo nível de acurácia dos sensores de orientação direta. Os valores observados correspondem as fotocoordenadas dos pontos de passagem identificados automaticamente no modelo (Seção 3.1), com desvio-padrão considerado equivalente a metade do tamanho do pixel, uma vez que foi usada a estimação subpixel pelo MMQ.

Para a estimação dos parâmetros de orientação exterior das imagens que compõem o estereopar, tem-se o modelo matemático baseado na injunção de coplanaridade, apresentado na equação 2. Sendo o modelo representado por uma equação para cada ponto medido nas imagens, tem-se:

$$r = n_p, \quad n = 4 * n_p, \quad s = u = 12$$

- Número de equações (r) = número de pontos medidos no modelo (n_p);
- Número de observações (n) = 4 * número de pontos medidos no modelo (n_p);
- Número de injunções (s) = número de parâmetros (u) = 12.

Tendo $S = r + s - u$ graus de liberdade, é necessária pelo menos uma equação para a estimação pelos Mínimos Quadrados, uma vez que os doze parâmetros de orientação exterior são tratados como injunções de peso.

3.3 Reamostragem Epipolar

Após a compatibilização dos parâmetros de orientação exterior, as imagens são normalizadas pelo processo de Reamostragem Epipolar, que visa reamostrar as imagens de acordo com a geometria epipolar, de modo que os eixos ópticos se tornem paralelos e as feições correlatas confinadas na mesma linha nas imagens. Isso possibilita a visualização estereoscópica do modelo sem paralaxe, além de auxiliar o processo de correlação automática, tornando o espaço de busca unidimensional.

A transformação das imagens originais para as imagens normalizadas pode ser conduzida em duas etapas: as imagens são transformadas para suas posições verticais e; a partir das imagens verticais, conduz-se a transformação para a posição normalizada.

A transformação da imagem original para a correspondente posição vertical envolve três rotações, a partir da matriz de rotação inversa dos elementos de orientação exterior.

A transformação para as posições normalizadas envolve rotações das imagens verticais em relação à base (B), sendo a matriz de rotação da base determinada pelas direções espaciais da base no espaço objeto (MIKHAIL, 2001). Neste método estão envolvidos processos de reamostragem das imagens e, conseqüentemente, interpolações de valores de brilhos dos pixels transformados. Neste trabalho foi adotado o método de interpolação bilinear, por proporcionar bons resultados a um custo computacional relativamente baixo. Maiores detalhes sobre a Reamostragem Epipolar podem ser encontrados em Schenk (1999) e Mikhail et al (2001).

4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

4.1 Experimentos com dados simulados

Os experimentos com dados simulados foram realizados com intuito de verificar o comportamento dos parâmetros de orientação exterior com o processo de ajustamento e as variações das paralaxes verticais do modelo antes e depois de tal processo. Foram realizados diversos experimentos, dentre os quais foram selecionados alguns para serem apresentados neste trabalho.

Os parâmetros de orientação direta foram simulados a partir de valores definidos teoricamente como verdadeiros (Tabela 1), introduzindo erros randômicos com desvios-padrão variados, de acordo com os experimentos realizados.

Tabela 1. Parâmetros de orientação exterior, definidos como verdadeiros nos experimentos simulados.

Parâmetros OE	Valores verdadeiros
$X_0^{Esq} (m)$	0
$Y_0^{Esq} (m)$	0
$Z_0^{Esq} (m)$	1175
$\omega^{Esq} (^\circ)$	0
$\varphi^{Esq} (^\circ)$	0
$\kappa^{Esq} (^\circ)$	0
$X_0^{Dir} (m)$	350
$Y_0^{Dir} (m)$	0
$Z_0^{Dir} (m)$	1175
$\omega^{Dir} (^\circ)$	0
$\varphi^{Dir} (^\circ)$	0
$\kappa^{Dir} (^\circ)$	0

Neste mesmo contexto foram simulados os valores observados (fotocoordenadas), gerados a partir da equação de colinearidade, introduzindo-se

erros randômicos com distribuição normal e desvio padrão de um pixel, para simular as medidas por correlação. Foram considerados 6 pontos como valores observados, posicionados de forma similar aos pontos de “Grubber”. A Tabela 2 traz as fotocoordenadas consideradas verdadeiras e as fotocoordenadas degradadas dos pontos observados.

Tabela 2. Coordenadas de imagem ideais e degradadas para os pontos observados.

Pont o	Fotocoordenadas verdadeiras				Fotocoordenadas degradadas			
	Foto da esquerda		Foto da direita		Foto da esquerda		Foto da direita	
	x(mm)	y(mm)	x(mm)	y(mm)	x(mm)	y(mm)	x(mm)	y(mm)
1	0,0000	0,0000	-14,0000	0,0000	0,0267	-0,0020	-13,9778	-0,0006
2	14,0000	0,0000	0,0000	0,0000	14,0000	0,0005	0,0396	0,0323
3	0,0000	14,0000	-14,0000	14,0000	0,0091	14,0557	-13,9866	14,0339
4	14,0000	14,0000	0,0000	14,0000	13,9948	13,9996	0,0123	14,0089
5	0,0000	-14,0000	-14,0000	-14,0000	0,0267	-14,0111	-13,9916	-13,9670
6	14,0000	-14,0000	0,0000	-14,0000	13,9749	-14,0122	-0,0248	-13,9983

Para a realização dos experimentos simulados foi considerada uma altura de vôo de 1175m, escala da imagem 1:25000, distância focal de 47mm e tamanho do pixel de 0,023mm.

A seguir estão apresentados alguns experimentos simulados realizados, mostrando nas tabelas os valores do Erro Médio Quadrático (EMQ) dos erros verdadeiros nos parâmetros de orientação exterior, além dos valores médios das paralaxes verticais do modelo, antes e depois do ajustamento. Os erros verdadeiros são calculados com base nos parâmetros definidos como verdadeiros na Tabela 1. Para estimar as paralaxes verticais do modelo são calculadas as coordenadas (Y) no espaço objeto dos pontos medidos nas imagens, por meio da equação de colinearidade inversa e dos parâmetros de orientação exterior de cada imagem. Considerando a escala da foto, a paralaxe do modelo é obtida pela discrepância entre as coordenadas (Y) calculadas a partir das duas imagens.

Experimento simulado 1

Para a realização do experimento 1 foi adotado um nível de acurácia para os parâmetros de orientação exterior compatível com a qualidade dos parâmetros fornecidos pelos sensores de orientação direta de nível de exatidão médio. Os desvios-padrão adotados neste experimento para os parâmetros de orientação exterior foram: 0,5m para as coordenadas do CP e 10' para os ângulos de rotação. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos no experimento 1.

Tabela 3. Experimento 1: Erro Médio Quadrático (EMQ) dos erros verdadeiros nos parâmetros de orientação exterior e paralaxes verticais médias do modelo, antes e depois do ajustamento.

	Antes	Depois
$EMQ_{CP}(m)$	0,3005	0,3097
$EMQ_{\hat{\Delta}ng}(\text{°})$	0,1090	0,0774
<hr/>		
<i>Paralaxe vertical antes (mm)</i>	0,2056	
<i>Paralaxe vertical depois (mm)</i>	0,0015	

Como pode ser visto pelos valores do Erro Médio Quadrático apresentados na Tabela 3, as coordenadas do CP permaneceram praticamente estáveis (Antes: $EMQ_{CP} = 0,3005m$; Depois: $EMQ_{CP} = 0,3097m$), mostrando que o nível de acurácia original é satisfatório para a formação do modelo. Contudo, os ângulos de rotação convergiram para valores mais próximos dos definidos como verdadeiros (Antes: $EMQ_{\hat{\Delta}ng} = 0,1090\text{°}$; Depois: $EMQ_{\hat{\Delta}ng} = 0,0774\text{°}$), minimizando a paralaxe vertical do modelo de 0,2056mm (9 pixels) para 0,0015mm (0,065 pixel).

Experimento simulado 2

Neste experimento os ângulos de rotação foram mais degradados, quando comparados ao experimento 2, a fim de verificar sua influência nos resultados. Os desvios-padrão adotados foram: 0,5m para as coordenadas do CP e 20' para os ângulos de rotação. A Tabela 4 traz os resultados obtidos a partir do experimento 2.

Tabela 4. Experimento 2: Erro Médio Quadrático (EMQ) dos erros verdadeiros nos parâmetros de orientação exterior e paralaxes verticais médias do modelo, antes e depois do ajustamento.

	Antes	Depois
$EMQ_{CP}(m)$	0,3008	0,3032
$EMQ_{\hat{\Delta}ng}(\text{°})$	0,1993	0,1562
<hr/>		
<i>Paralaxe vertical antes (mm)</i>	0,3290	
<i>Paralaxe vertical depois (mm)</i>	0,0038	

O que se pode notar neste experimento é que os ângulos de rotação não convergiram para valores tão próximos dos valores verdadeiros, quando comparados aos obtidos no experimento 1 (Experimento 1: $EMQ_{\hat{\Delta}ng} = 0,0774\text{°}$; Experimento 2: $EMQ_{\hat{\Delta}ng} = 0,1562\text{°}$). Além disto, a paralaxe vertical do modelo não foi reduzida a um valor mínimo como no experimento 1 (0,0015mm – 0,0065 pixel), mas, mesmo assim, o valor resultante é bem inferior a um pixel (0,0038mm 0,17 pixel).

Experimento simulado 3

No experimento 3 a degradação mais acentuada foi introduzida nas coordenadas do CP e não nos ângulos de rotação. Isso visa verificar a influência dos valores de posição nos resultados. Os desvios-padrão adotados foram: 1,0m para as coordenadas do CP e 10' para os ângulos de rotação. Na Tabela 5 pode-se verificar os resultados obtidos com a realização do experimento 3.

Tabela 5. Experimento 3: Erro Médio Quadrático (EMQ) dos erros verdadeiros nos parâmetros de orientação exterior e paralaxes verticais médias do modelo, antes e depois do ajustamento.

	Antes	Depois
<i>EMQ_{CP} (m)</i>	0,4088	0,4538
<i>EMQ_{âng} (°)</i>	0,1108	0,0734
<i>Paralaxe vertical antes (mm)</i>		0,2140
<i>Paralaxe vertical depois (mm)</i>		0,0022

Com a realização do experimento 6 pôde-se notar que a influência das discrepâncias nas coordenadas do CP não foi tão significativa quanto as discrepâncias nos ângulos de rotação, mostrados no experimento anterior, sendo que a paralaxe do modelo foi minimizada a 0,0022mm (0,095 pixel). Esta mesma conclusão poderá ser verificada mais adiante, no cálculo das coordenadas de pontos no espaço objeto.

Para verificar a qualidade dos dados em processos de mapeamento pode-se calcular as coordenadas de pontos no espaço objeto e compara-las com as coordenadas de controle obtidas a partir dos dados ideais. Como se dispõe dos parâmetros de orientação exterior e de fotocoordenadas medidas nas imagens, as coordenadas de pontos no espaço objeto podem ser calculadas por intersecção fotogramétrica (Maiores detalhes em TOMMASELLI, 2001). A Tabela 6 mostra os valores do Erro Médio Quadrático para as coordenadas no espaço objeto, calculadas para os pontos considerados, com base nos parâmetros de cada um dos experimentos simulados realizados.

Tabela 6. Erros Médios Quadráticos das coordenadas no espaço objeto, para os experimentos simulados.

	Antes do ajustamento			Após o ajustamento		
	$EMQ_x(m)$	$EMQ_y(m)$	$EMQ_z(m)$	$EMQ_x(m)$	$EMQ_y(m)$	$EMQ_z(m)$
Experimento 1	1,278	1,6538	9,106	1,585	0,357	0,854
Experimento 2	2,417	4,067	20,062	2,884	2,03	6,751
Experimento 3	1,446	1,753	9,535	1,547	0,443	1,153

Com os valores mostrados na Tabela 6 pode-se tirar algumas conclusões. O experimento 1 mostrou que com as proporções de degradação condizentes com a qualidade dos parâmetros fornecidos pelos sensores de orientação de baixo custo (0,5m para as coordenadas do CP e 10° para os ângulos de rotação), é possível minimizar a paralaxe residual do modelo (Tabela 3) e realizar medidas de qualidade, conforme segue apresentado na Tabela 6.

Os experimentos 2 e 3 foram realizados para verificar separadamente a influência da qualidade das coordenadas do CP e dos ângulos de rotação nos resultados. Os valores apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6 mostraram que a variação na qualidade dos valores dos ângulos de rotação foi mais significativa nos resultados que a variabilidade nas coordenadas do CP.

Outros experimentos simulados que verificam a influência dos parâmetros de orientação exterior sobre as informações de terreno podem ser encontrados em Tommaselli (2001).

4.2 Experimentos com dados reais

Num conjunto de experimentos seguintes foi utilizado um par de imagens digitais coletadas com a câmara digital KODAK DCS420. Estas imagens foram obtidas da área do campus da FCT/UNESP em Presidente Prudente na escala 1:25000, com uma altura de vôo de 1175m, distância focal nominal de 47mm, resolução da imagem 1524 x 1012 pixels e tamanho do pixel de 0,023mm, considerando uma área de imageamento equivalente a um filme de 35mm.

Este par de imagens digitais foi fototriangulado no Sistema Fotogramétrico Digital *Socet Set* (LHSystem), utilizando pontos de passagem medidos automaticamente no modelo e cinco pontos de controle coletados em campo com acurácia centimétrica, usando um receptor GPS *ASTECH Z12*. Os valores do Erro Médio Quadrático (EMQ) nas coordenadas dos pontos de verificação se encontram na primeira linha da Tabela 7. Pode-se notar que a componente altimétrica possui um erro mais acentuado (próximo de 3m), em virtude da geometria da câmara e da ausência de valores calibrados.

Para simular a determinação direta por sensores embarcados (GPS+INS), os parâmetros de orientação exterior das imagens trianguladas foram degradados, introduzindo-se erros randômicos com desvios padrão de 0.8m para as coordenadas

do CP (X_0 , Y_0 , Z_0) e $10'$ para os ângulos de rotação (Ω , Φ , κ), simulando um sensor de médio custo. Os valores observados (fotocoordenadas) foram medidos automaticamente nas imagens. Foi adotado um valor de desvio-padrão para as observações de 0,5 pixel, empiricamente estabelecido em virtude da determinação subpixel pelo MMQ. Foram medidos nove pontos no modelo, mas dois pontos foram eliminados na análise de resíduos do ajustamento, devido aos resíduos serem superiores a 0,5 pixel.

Um conjunto de experimentos com este nível de exatidão foi conduzido. A Tabela 7 apresenta os valores do Erro Médio Quadrático (EMQ) para cinco pontos de verificação em três etapas: após a aerotriangulação no *Socet Set*; para os parâmetros de orientação exterior degradados (antes do ajustamento) e; após o refinamento dos parâmetros de orientação exterior. Além disso, são apresentados os valores de paralaxe vertical (py) média do modelo nestas três situações citadas anteriormente.

Tabela 7. Erro Médio Quadrático (EMQ) dos pontos de verificação e valores de paralaxe vertical do modelo para os experimentos realizados.

	EMQX(m)	EMQY(m)	EMQZ(m)	py (mm)
Após a aerotriangulação	0,76	0,88	2,89	0,0152
Antes (parâmetros degradados)	3,10	4,23	11,44	0,1190
Depois (parâmetros refinados)	3,06	2,73	4,10	0,0129

Com a realização destes experimentos constatou-se a eficácia da metodologia abordada, com a redução da paralaxe vertical do modelo de 0,119mm (5,18 pixels) para 0,0129mm (0,56 pixel), que é inferior à paralaxe residual do modelo após o processo de aerotriangulação, que foi de 0,0152mm (0,66 pixel).

Na análise da exatidão dos pontos de verificação observou-se que houve uma redução do erro altimétrico do modelo, porém não houve uma melhora significativa na acurácia planimétrica do modelo (Ver Tabela 7). Este erro nas coordenadas de pontos no espaço objeto pode estar relacionado ao uso de valores nominais nos parâmetros de orientação interior da câmara, uma vez que a câmara não foi previamente calibrada.

Como o modelo de coplanaridade independe de informações de terreno, o nível de exatidão das coordenadas de pontos no espaço objeto dependerá da acurácia dos parâmetros de orientação interna e externa das imagens.

Para verificar visualmente o efeito da paralaxe em y , a Figura 2 mostra a magnitude das paralaxes verticais numa porção do modelo, antes e depois da compatibilização dos parâmetros de orientação exterior. Estas imagens, apresentadas na Figura 2, foram obtidas a partir do recurso de visualização estereoscópica do sistema fotogramétrico digital *Socet Set*.

Figura 2. Paralaxe vertical do modelo: (a) antes do refinamento dos parâmetros de orientação exterior, (b) após o refinamento e da reamostragem epipolar do par de imagens.



Com base na Figura 2, pode-se notar visualmente a minimização da paralaxe vertical do modelo. Na Figura 2a está representada uma porção do modelo cujos parâmetros de orientação exterior se encontravam degradados. Como pôde ser visto na Tabela 7, o valor de paralaxe neste caso era de aproximadamente 5 pixels, o que influenciou consideravelmente na visualização estereoscópica da cena (Figura 2a).

Já na Figura 2b, segue apresentada a mesma área do terreno, mas com os parâmetros de orientação exterior compatibilizados e com as imagens reamostradas, de acordo com a geometria epipolar. Neste caso pode-se notar que a paralaxe vertical do modelo foi praticamente eliminada (0,66 pixel – Tabela 7), o que proporcionou uma visualização estereoscópica mais confortável da cena.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a qualidade dos parâmetros fornecidos pelos sensores de bordo (GPS + INS), pôde-se constatar, através dos experimentos realizados, que a metodologia abordada é eficaz, reduzindo a paralaxe vertical do modelo a um valor insignificante para efeito de visualização.

Os experimentos com dados reais foram influenciados pelo uso de valores nominais nos parâmetros de orientação interior da câmara, prejudicando a qualidade das coordenadas de pontos no espaço objeto. Ainda assim, a paralaxe vertical do modelo foi praticamente eliminada, proporcionando uma melhoria significativa na visualização estereoscópica da cena (Figura 2).

Vale ressaltar que a metodologia adotada não trata da orientação absoluta do modelo, uma vez que o modelo de coplanaridade independe de informações de terreno. Com isso, a acurácia dos pontos no espaço objeto depende da qualidade dos parâmetros de orientação interna e externa das imagens.

Verificou-se pelos experimentos práticos realizados que a abordagem desenvolvida pode ser empregada em aplicações que requeiram informações cartográficas com requisitos de resposta rápida, como na segurança pública e na área ambiental, na qual é possível se obter modelos georreferenciados e sem paralaxe, em quase tempo real, para possíveis análises de desastres naturais e antrópicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRZEZINSKA, D. A. G. Direct Exterior Orientation Of Airborne Imagery with GPS/INS System: Performance Analysis. *Navigation*, Vol. 46, No. 4, p. 261-270, 1999.
- COLOMINA, I. GPS, INS and Aerial Triangulation: What is the Best Way for Operation Determination of Photogrammetric Image Orientation. *IAPRS*, vol. 32, Part. 3 – 2W5. p.121-130, München. September 8-10, 1999.
- COSTA, E. R.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M. Incorporação da Pré-Análise no Processo de Correspondência de Pontos em Fotogrametria Digital. *XXI Congresso Brasileiro de Cartografia*. Belo Horizonte, MG, 2003.
- CRAMER, M.; SCHADE, H. Orientation of Photogrammetric Sensors with an Integrated Multi-Antena GPS/Low-cost INS System. In: COLOMINA, I.; NAVARRO, J. *Integrated Sensor Orientation: theory, algorithms and systems*. Heidelberg: Wichmann, p.101-111, 1995.
- CRAMER, M.; STALLMANN, D. On the use of GPS/inertial Exterior Orientation Parameters in Airborne Photogrammetry, [2001].
- CRAMER, M.; STALLMANN, D.; HAALA, N. Using GPS/Inertial Exterior Orientation Measurements for Photogrammetric Point Determination. *ISPRS Workshop Com III.1: "Direct Versus Indirect Methods of Sensor Orientation"*. Barcelona, nov. 1999.
- GRUEN, A. Least Square Matching: a Fundamental Measurement Algorithm. In: ATKINSON, K. B. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Department of Photogrammetry and Surveying: University College London. Whittles Publishing, 1996.
- KRAUS, K. *Photogrammetry – Fundamentals and Standard Processes*. UMLER/BONN, vol. 1, 1993.
- MIKHAIL, E. M.; ACKERMAN, F. *Observations and Least Squares*. New York: IEP, 1976. 497p.
- MIKHAIL, E. M., BETHEL, J. S. MCGLONE, J. C. *Introduction to Modern Photogrammetry*. Inc. New York : John Wiley & Sons, 2001, 479p.
- MOSTAFA, M. M. R.; HUTTON, J. Direct Positioning and Orientation Systems How do They Work? What is the Attainable Accuracy? *ASPRS*, 2001.
- MOSTAFA, M. M. R.; SCHWARZ, K. P. Digital Image Georeferencing from a Multiple Camera System by GPS/INS. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 56, p. 1-12, 2001.

- RUY, R. S. Geração Automática de Estereomodelos a partir de Imagens Digitais Georreferenciadas. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- SCHENK, T. *Digital Photogrammetry*. The Ohio State University: TerraScience, volume 1, 1999.
- TOMMASELLI, A. M. G. Mapeamento com Câmaras Digitais: Análise de Requisitos e Experimentos. *XX Congresso Brasileiro de Cartografia*. Porto Alegre, RS, 2001.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam externar os sinceros agradecimentos à agência de fomento CAPES, pelo financiamento e apoio à pesquisa e; à FAPESP, pelos equipamentos e softwares financiados.

(Recebido em outubro/03. Aceito em maio/04.)