

Uma Solução Recursiva para a Resseção Espacial

Aluir Porfírio Dal Poz, *UNESP Presidente Prudente*

France Michel Ferreira, *UNESP Presidente Prudente*

- 1 Introdução
- 2 Resseção Espacial Usando o IEKF
- 3 Resultados e Discussão
- 4 Conclusões
- 5 Agradecimentos
- 6 Referências Bibliográficas

Resumo

1 Introdução

Nos últimos anos, um considerável avanço tem sido obtido na automação da orientação de fotografias aéreas digitalizadas. As orientações interior e relativa foram incorporadas em sistemas fotogramétricos digitais comercialmente disponíveis. Os métodos normalmente utilizados são baseados na correlação por área, cujo princípio básico é o estabelecimento de correspondência entre janelas de pixels de um estereopar de imagens.

A situação é diferente quando se trata da orientação absoluta. Embora alguns métodos tenham sido propostos recentemente (Haala/Vosselman 1992; Schickler 1992; Läbe/Ellenbeck 1996; Drewniok/Rohr 1996; Dal Poz/Tommaselli 1996), com razoável sucesso, mas em situações particulares, uma solução geral não está ainda disponível. O método proposto por Dal Poz/Tommaselli (1998) apresenta várias características peculiares, sendo que duas delas são o uso exclusivo de feições retas como apoio de campo e a implementação de um processo de estimação recursivo, baseado no IEKF. As feições retas usadas no método são cruzamentos de estrada, arestas de edificações, etc. É comum a intersecção destas entidades definirem pontos nos espaços objeto e imagem. Portanto, pontos de apoio podem ser introduzidos facilmente no processo de orientação absoluta (ou resseção espacial) automática desenvolvido. Isto poderá agilizar a convergência do processo de estimação usando o IEKF. Dessa forma, à medida que cada correspondência entre pontos ou entre feições retas vai sendo automaticamente detectada, a mesma é processada pelo IEKF. Em outras palavras, os parâmetros de orientação exterior da fotografia aérea digitalizada são estimados recursivamente pelo IEKF usando pontos e feições retas como controle de campo. Em vista do exposto, o principal objetivo deste artigo é a apresentação de uma solução recursiva para o problema de resseção espacial, usando o IEKF e pontos como controle de campo, bem como a apresentação e a discussão dos resultados práticos, baseados em dados simulados.

A seção 2 apresentará a metodologia para realizar a resseção espacial usando o IEKF e pontos como controle de campo. Os resultados obtidos com dados simulados serão apresentados e discutidos na seção 3. A seção 4 apresentará as principais conclusões.

2 Resseção Espacial Usando o IEKF

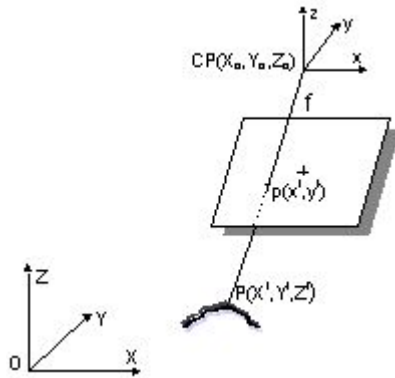


Figura 1:
Princípio de colinearidade

Como já foi mencionado, a solução a ser apresentada para a resseção espacial baseia-se nas equações de colinearidade e no IEKF.

Se os erros sistemáticos que afetam uma fotografia aérea, tais como a refração e as distorções das lentes, forem desconsiderados, então o centro perspectivo (CP), o ponto-imagem (p) e seu correspondente ponto-objeto (P) são colineares. Este conceito é conhecido como princípio de colinearidade, sendo usualmente expresso pelas conhecidas equações de colinearidade (Ghosh 1987; Lugnani 1987):

$$\begin{aligned} x^j &= -f \cdot \frac{r_{11} \cdot (X^j - X_0) + r_{12} \cdot (Y^j - Y_0) + r_{13} \cdot (Z^j - Z_0)}{r_{31} \cdot (X^j - X_0) + r_{32} \cdot (Y^j - Y_0) + r_{33} \cdot (Z^j - Z_0)} \\ y^j &= -f \cdot \frac{r_{21} \cdot (X^j - X_0) + r_{22} \cdot (Y^j - Y_0) + r_{23} \cdot (Z^j - Z_0)}{r_{31} \cdot (X^j - X_0) + r_{32} \cdot (Y^j - Y_0) + r_{33} \cdot (Z^j - Z_0)} \end{aligned} \quad (1)$$

onde,

- $[X^j \ Y^j \ Z^j]^T$ são as coordenadas de um ponto P no referencial do espaço-objeto (OXYZ);
-
- $[x^j \ y^j]^T$ são as coordenadas do ponto p, imagem de P, no referencial do espaço-imagem (CPxyz);
-
- $[X_0 \ Y_0 \ Z_0]^T$ são as coordenadas do centro perspectivo (CP) no referencial do espaço-objeto;
-
- f é a distância focal; e
-
- r_{ij} , $1 \leq i \leq 3$ e $1 \leq j \leq 3$, são os elementos da matriz de rotação R, definida pelo triplo produto matricial $R_z(k) \cdot R_y(f) \cdot R_x(w)$, onde k, f e w são os ângulos de rotação entre os referenciais dos espaços imagem e objeto.

Será apresentado, a seguir, um resumo simplificado do IEKF, válido para sistemas estáticos, procurando paralelamente adaptá-lo para aplicação no problema em questão. O leitor interessado em maiores detalhes do IEKF pode consultar uma vasta literatura sobre o assunto, incluindo Jazwinski (1970) e Gelb (1974).

A equação de medida ou de observação é usualmente expressa na forma:

$$z_k = h(x_k) + n_k, k = 1, \dots \quad (2)$$

onde:

- z_k é o k-ésimo vetor de observações ou medidas;
- n_k é o vetor dos ruídos das observações z_k , com média zero e matriz de covariância R_k ;
- x_k é o vetor dos parâmetros ou de estado;
- h é um modelo matemático ligando o vetor dos parâmetros (x_k) com o vetor de medidas (z_k).

No problema de resseção espacial, o modelo matemático (h) é a equação 1. Supondo-se as coordenadas dos pontos de apoio "livres de erro" e as correspondentes do espaço imagem quantidades observáveis, pode-se rescrever as equações de colinearidade concisamente, na forma:

$$\begin{aligned} x^j &= G_1(x_k) + n_1 \\ y^j &= G_2(x_k) + n_2 \end{aligned} \quad (3)$$

onde:

- $x_k^T = [k, f, w, X_o, Y_o, Z_o]$ é vetor dos parâmetros, composto pelos parâmetros de orientação exterior;
- x^j e y^j são as fotocoordenadas de um ponto qualquer, sendo as observações ou medidas;
- G_1 e G_2 são as funções do modelo matemático (eq. 1); e
- n_1 e n_2 são os ruídos das medidas x^j e y^j , com matriz de covariância R_k .

Comparando-se as equações 2 e 3, conclui-se que:

- $z_k^T = [x^j \ y^j]$;
- $h(x_k)^T = [G_1(x_k) \ G_2(x_k)]$; e
- $n_k^T = [n_1 \ n_2]$.

Portanto, para o caso que está sendo analisado, os vetores z_k , $h(x_k)$ e n_k são da ordem de 2×1 . Por outro lado, o vetor dos parâmetros (x_k) é da ordem de 6×1 .

Como $h(x_k)$ não é linear, há a necessidade de linearizá-lo e, conseqüentemente, de fazer iterações. A equação que permite estimar o vetor dos parâmetros (x_k) iterativamente, usando-se a medida disponível (z_k), é dada por:

$$h_{i+1} = x_{k-1} + k_{k,xk} \times [z_k - h(h_i) - M_{k,hi} \times (x_{k-1} - h_i)] \quad (4)$$

onde:

- h_i é denominado iterador, sendo uma estimativa de x_k na i-ésima iteração;
- x_{k-1} é a estimativa obtida com a medida anterior (z_{k-1});
- $k_{k,xk} = P_{k-1} \times M_{k,hi}^T \times (M_{k,hi} \times P_{k-1} \times M_{k,hi}^T + R_k)^{-1}$ é a matriz ganhos de Kalman;
- R_k é a matriz de covariância da medida z_k ;
- P_{k-1} é a matriz de covariância de x_{k-1} ; e

- $M_{k,\eta_i} = \left. \frac{\partial h(x_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k = \eta_i}$ é a matriz de derivadas parciais das equações de colinearidade, calculadas no ponto η_i .

A figura 2 mostra como o processo de estimação é realizado. Os principais objetivos são as estimativas do vetor de estado (x_k) e da respectiva matriz de covariância (P_k). Esta última é também denominada matriz variância-covariância.

Como mostra a figura 2, no início do processo, isto é, antes da introdução da primeira medida, são necessários o vetor de parâmetros aproximados (x_0) e respectiva matriz de covariância (P_0). O processo de estimação inicia-se com a introdução do primeiro ponto, sendo realizado através de $z_1^T = [x^1, y^1]$ e da respectiva matriz de covariância R_1 . No início de cada ciclo de iteração ($i=1$), o iterador inicial (h_i) é igual à estimativa do vetor de parâmetros, obtida com a medida anterior (z_{k-1}), isto é, $h_i = x_{k-1}$ ou, no início do processo, $h_i = x_0$. Cada iteração tem a seguinte seqüência (figura 2):

- cálculo da matriz de ganhos ($k_{k,xk}$);
- cálculo do iterador h_{i+1} ; e
- teste de convergência, quando se verifica se $|h_{i+1} - h_i|$ é menor que um limiar pré-definido, onde $| \cdot |$ significa módulo.

Esta seqüência é repetida até que se verifique a convergência. Quando isto ocorrer, o vetor de estado (x_k) é adotado como sendo o último valor do iterador h_{i+1} e a matriz de covariância de estado (P_k) é calculada através da expressão:

$$P_k = (I - k_{k,xk} \times M_{k,xk}) \times P_{k-1} \times (I - k_{k,xk} \times M_{k,xk})^T + k_{k,xk} \times R_k \times k_{k,xk}^T \quad (5)$$

onde, $M_{k,xk}$ é calculada no ponto $x_k = h_{i+1}$ e $k_{k,xk}$ é calculada em função de $M_{k,xk}$.

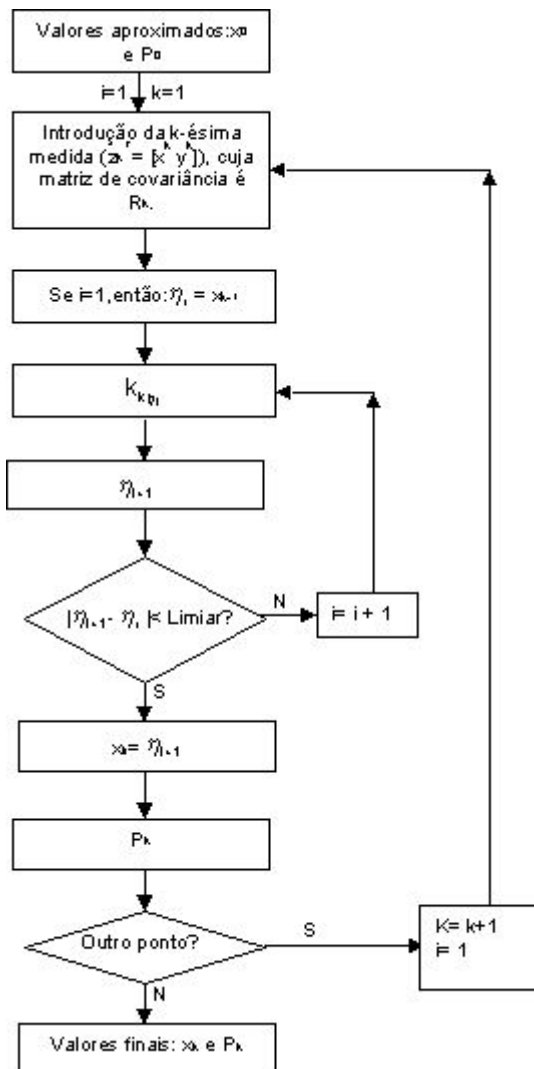


Figura 2:
Resseção espacial usando o IEKF

O ciclo de cálculo acima descrito é repetido para cada ponto medido na fotografia aérea (figura 2). Entretanto, o processo pode ser interrompido quando, por exemplo, o traço da matriz de covariância P_k estabilizar-se. Quando isto ocorrer, dizemos que o filtro convergiu, isto é, não adianta introduzir novas medidas, pois não será obtida nenhuma melhoria nas estimativas de x_k e P_k .

3 Resultados e Discussão

O método descrito na seção anterior foi implementado computacionalmente usando-se a linguagem IDL 5.1. Para testar o método, foi simulada uma fotografia aérea na escala aproximada de 1:10000, contendo 19 pontos (tabela 1).

Número do Ponto	Espaço - Objeto			Espaço - Imagem	
	X,m	Y,m	Z,m	x,mm	y,mm
1	2166.6	611.8	12.0	-115.257	52.765

2	2116.0	391.0	13.0	-109.878	76.666
3	1692.8	179.4	14.0	-64.161	99.640
4	694.6	184.0	15.0	43.904	99.213
5	1646.8	248.4	12.0	-59.102	92.026
6	1964.2	202.4	13.0	-93.459	97.080
7	335.8	326.6	14.0	82.713	83.709
8	128.8	717.6	12.0	104.948	41.321
9	124.2	910.8	13.0	105.547	20.463
10	128.8	1094.8	13.0	105.035	0.553
11	920.0	1421.4	13.0	109.014	-34.751
12	110.4	1485.8	12.0	106.937	-41.690
13	138.0	1734.2	12.0	103.961	-68.530
14	230.0	2033.2	12.0	94.026	-100.859
15	653.2	1669.8	12.0	48.282	-61.570
16	1702.0	1743.4	13.0	-65.108	-69.583
17	717.6	786.6	13.0	41.358	33.889
18	1600.8	795.8	14.0	-54.194	32.921
19	1131.6	1288.0	13.0	-3.407	-20.333

Os principais passos da simulação foram:

- geração de 19 pontos no espaço - objeto, adequadamente distribuídos (tabela 1);
- transformação dos 19 pontos do espaço-objeto para o espaço-imagem, usando-se a equação de colinearidade e os seguintes valores para os parâmetros de orientação exterior e interior:
- - 0° para os ângulos de orientação da câmera, 1100m para as translações X_0 e Y_0 e 1400m para a translação Z_0 ; e
- - 150mm para a focal da câmera.
- introdução de erros aleatórios nas fotocoordenadas geradas no passo anterior, com desvios-padrão de 5mm, cujo resultado é apresentado nas 2 últimas colunas da tabela 1.

As fotocoordenadas dos pontos gerados não receberam erros sistemáticos - deformação do filme, deslocamento do ponto principal, distorções das lentes e refração fotogramétrica.

Foi adotado o seguinte vetor de estado inicial:

$$x_0^T = [0.052rd \ -0.052rd \ 0.052rd \ 1150m \ 1150m \ 1450m] \quad (6)$$

onde, 0.052rd eqüivale à aproximadamente 3°.

Considerando os parâmetros aproximados de orientação exterior estatisticamente independentes e, também, os erros introduzidos neles, a matriz de covariância inicial adotada foi diagonal e dada por:

$$\text{Diag}(P_0)^T = [(0.052rd)^2 (0.052rd)^2 (0.052rd)^2 (50m)^2 (50m)^2 (50m)^2] \quad (7)$$

onde, $\text{Diag}(P_0)$ representa a diagonal da matriz P_0 .

Como os erros introduzidos nas fotocoordenadas foram iguais para todos os pontos ($s_x = s_y = 5\text{mm}$), então a matriz de covariância de medida (R_k) será também igual para todos eles, isto é:

$$R_k = \begin{bmatrix} (5 \cdot 10^{-6} \text{m})^2 & 0 \\ 0 & (5 \cdot 10^{-6} \text{m})^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

onde, $1 \leq k \leq 19$.

A tabela 2 mostra o resultado do processamento após a introdução do 19º ponto. A última coluna mostra os erros verdadeiros dos parâmetros de orientação exterior, isto é, a diferença entre os valores estimados pelo IEKF e os respectivos valores verdadeiros usados na simulação da foto. Chama a atenção o fato de os desvios-padrão dos parâmetros de orientação exterior serem menores que os erros verdadeiros, o que não é desejável. Uma possível causa seria o uso de desvios-padrão incorretos para as fotocoordenadas geradas artificialmente.

	VALORES ESTIMADOS		ERROS VERDADEIROS PARA OS PARÂMETROS ESTIMADOS
	PARÂMETROS	DESVIOS-PADRÃO	
k	28"	5"	28"
f	-18"	12"	-18"
w	-20"	14"	-20"
X_0 (m)	1099.887	0.107	-0.113
Y_0 (m)	1100.262	0.107	0.262
Z_0 (m)	1400.078	0.034	0.078

As figuras 3 e 4 mostram como evoluiu a convergência do IEKF, à medida que os pontos eram processados, sendo que a primeira figura refere-se às coordenadas do CP e a outra aos ângulos de rotação da câmera. Em ambas as figuras as abscissas correspondem aos pontos sendo processados e as ordenadas aos erros verdadeiros calculados após a introdução de cada ponto.

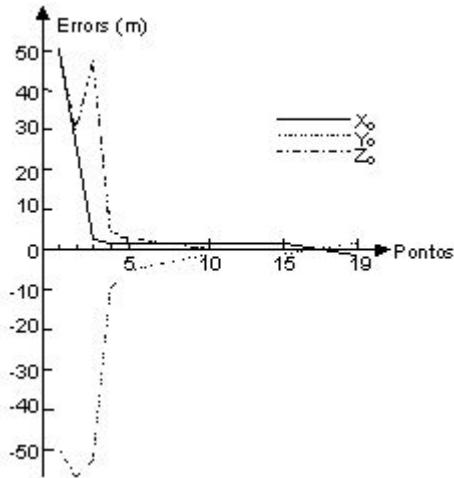


Figura 3:
Análise de convergência para as coordenadas do CP

Analisando-se a figura 3, verifica-se que o IEKF iniciou a convergência após a introdução do 4º ponto, coincidindo com o momento que foram processados mais observações (8) que parâmetros (6). É importante lembrar que uma solução "batch" pelo MMQ somente seria possível com, no mínimo, 4 pontos. Observa-se também que:

- o parâmetro X_0 convergiu primeiro; e
- após o processamento do 5º ponto, praticamente se estabilizaram as coordenadas estimadas do CP.

A análise da figura 4 conduz às conclusões semelhantes ao verificado na figura 3, notando-se que agora é a rotação f que convergiu primeiro.

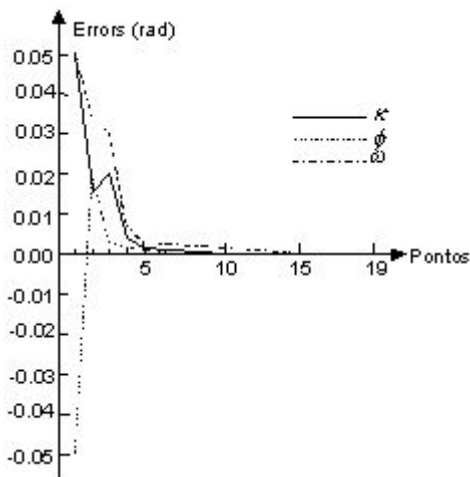


Figura 4:
Análise de convergência para os ângulos de rotação da câmera

4 Conclusões

Este artigo apresentou uma solução recursiva para o problema de resseção espacial, usando-se o IEKF e pontos como controle de campo. A principal motivação para o desenvolvimento dessa solução foi a introdução de pontos de apoio num processo de orientação absoluta automática, baseado em apenas feições retas como controle de campo,

pois possibilitará um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis de apoio de campo e, também, a agilização da convergência do processo de orientação.

O experimento realizado baseou-se em dados simulados e teve por objetivo uma avaliação preliminar do método. A discussão dos resultados obtidos permitiram concluir, preliminarmente, que o método funciona satisfatoriamente. Entretanto, será necessário investigar melhor porque as precisões dos parâmetros de orientação exterior foram melhores que os respectivos erros verdadeiros.

Visando melhor conhecer o comportamento do método, serão realizados vários outros experimentos com dados artificiais, como, por exemplo, em situações envolvendo geometrias deficientes e erros sistemáticos e grosseiros. A avaliação final do método será realizada usando dados reais.

5 Agradecimentos

Esta pesquisa é parte integrante de um projeto de pesquisa maior, amplamente apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), na forma de Auxílio à Pesquisa - processo no. 96/11741-4. O co-autor France Michel Ferreira é bolsista de Iniciação Científica da FAPESP - processo no. 97/01061-9.

6 Referências Bibliográficas

- Dal Poz, A. P; Tommaselli, A. M. G.: Strategy to Detect Ground Control in Digital Images. In.: Spie's
- Annual International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Control - Conference Automatic Target Recognition VIII, Orlando-EUA, April 13-17, 1998, Proceedings, Orlando, SPIE, 1998.
- Drewniok, D.; Rohr, K.: Automatic Exterior Orientation of Images in Urban Environment. In.: International
- Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, Viena, July 9-19, 1996, Proceedings, Viena, ISPRS, 1996.
- Gelb, A.: Applied Optimal Estimation, The MIT PRESS, 1982.
- Ghosh, S. K.: Analytical Photogrammetry, Laval University, 1987.
- Haala, N.; Vosselman, G.: Recognition of Road and River Patterns by Relational Matching. In.:
- International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, Washington, July 1992, Proceedings, Washington, ISPRS, 1992.
- Jazwinski, A. H.: Stochastic Processes and Filtering Theory, Academic Press, INC., 1970.
- Läbe, T.; Ellenbeck, K. H.: 3D-Wireframe Models as Ground Points for the Automatic Exterior
- Orientation. In.: International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, Viena, July 9-19, 1996, Proceedings, Viena, ISPRS, 1996.
- Lugnani, J. B.: Introdução à Fototriangulação, UFPr, Curitiba 1987.
- Schickler, W.: Feature Matching for Outer Orientation of Single Images Using 3-D Wireframe
- Controlpoints, In.: International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, Washington, July 1992, Proceedings, Washington, ISPRS, 1992.
- Tommaselli, A. M. G. ; Tozzi, C. L.: A Recursive Approach to Space Resection Using Straight Lines, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 62, 1996.

Autores

Prof. Dr. Aluir Porfirio Dal Poz
UNESP - Departamento de Cartografia
19060-900 Presidente Prudente SP -
Brasil
aluir@stetnet.com.br

France Michel Ferreira
UNESP - Departamento de
Cartografia
Bolsista de Iniciação Científica da
FAPESP
19060-900 Presidente Prudente SP -
Brasil

GEODÉSIA *online* · 1 / 1999 · [ISSN 1415-1111]
Revista da Comissão Brasileira de Geodésia