

O MODELO DOS PARÂMETROS ADICIONAIS COM FEIÇÕES CIRCULARES COMO CONTROLE NA RESSEÇÃO ESPACIAL

Cláudia Regina Grégio d'Arce Filetti
Dept. de de Enga. Civil - UEM
filett@dec.uem.br
Quintino Dalmolin
Depto. de Geomática - CT/UFPR
dalmolin@geoc.ufpr.br

RESUMO

A eficiência das feições pontuais para referenciar o sistema tridimensional de coordenadas do espaço objeto em fotogrametria é mundialmente conhecida. No entanto, a identificação destas feições na imagem fotográfica é bastante dificultada quando se leva em consideração a escala das mesmas tomadas a grandes altitudes ou mesmo imagens de satélite. Várias pesquisas foram realizadas com sucesso, no sentido de adequar modelos matemáticos com feições lineares com o objetivo de substituir as feições pontuais no controle fotogramétrico. Este trabalho apresenta o desenvolvimento do Modelo Matemático dos Parâmetros Adicionais com feições circulares como controle e realiza testes para recuperar os parâmetros de resseção espacial de uma única fotografia.

ABSTRACT

The efficiency of pontual entities in order to refer the triangulation coordinate system of the object space in Photogrammetry is well known. In the meantime, the identification of these entities in the photographic image is very difficult when considering the scale of the photographs taken from hight altitude or in sattelite images. Many sucessful research was realized in order to adequate to mathematical model whith linear entities for substituting the pontual entities in Photogrammetric control. This paper presents a development of the mathematical model of the additional parameters whith a circular entity as control and realize tests for determinity the parameters of the space resection in one only photograph.

1. INTRODUÇÃO

Bol. Ciênc. Geod., Curitiba, v. 4, p.3-13, 1999.

Desde o surgimento do processo fotogramétrico como meio de confecção de bases cartográficas adotou-se um conjunto de pontos do espaço objeto com coordenadas conhecidas para referenciar as imagens fotográficas ao sistema de terreno. Para tanto é necessário que estes pontos tenham suas imagens perfeitamente nítidas e visíveis nas fotografias a fim de que se possa mensurar com segurança as fotocoordenadas com a exatidão desejada para atender as especificações pré-estabelecidas do trabalho. Esta última premissa, infelizmente, nem sempre pode ser atendida quando se utiliza imagens de escala pequena como por exemplo, imagens obtidas a partir de satélites artificiais.

O trabalho intitulado "Using Digital Entities as Control", desenvolvido pelo professor LUGNANI, 1980 provou que esta dificuldade poderia ser totalmente superada com o uso de feições lineares retas como controle ao invés de pontos, pela facilidade de serem visualizadas na imagem e também de não requererem a tal correspondência ponto a ponto para a orientação da fatografias no espaço. Outros autores como MASRY, 1981; SOUZA, 1982; TOMMASELLI, 1988; CASTREGUINI, 1989; e ARAKI, 1990 testaram várias situações e comprovaram a eficiência e facilidade na aplicação das entidades. MULAWA & MIKHAIL, 1988; desenvolveram modelos fotogramétricos que combinam as equações de Colinearidade com feições lineares retas e não retas como controle para referenciar as imagens ao espaço objeto. Assim a não necessidade de correspondência ponto a ponto trouxe uma série de aspectos favoráveis como: o relacionamento funcional entre feições imagem e feições objeto deixou de ser problema devido a facilidade de identificação do controle; a possibilidade de criação de uma biblioteca de feições como controle que permitiria o acesso automático para a orientação de fotografias temporais, além da perenidade das feições ao longo do tempo.

O propósito deste trabalho é desenvolver matematicamente o modelo dos Parâmetros Adicionais com o uso de feições circulares como controle e testá-lo para a recuperação dos parâmetros de orientação exterior de uma fotografia singular. Isto é, realizar a resseção espacial de uma única fotografia com as feições circulares como controle.

2. O MODELO DOS PARÂMETROS ADICIONAIS COM FEIÇÕES CIRCULARES COMO CONTROLE

2.1 DESCRIÇÃO DA FEIÇÃO CIRCULAR

No espaço tridimensional, uma feição circular pode ser definida como a interseção de uma esfera com um plano que contém o centro da mesma, como mostra a figura 1.[03]

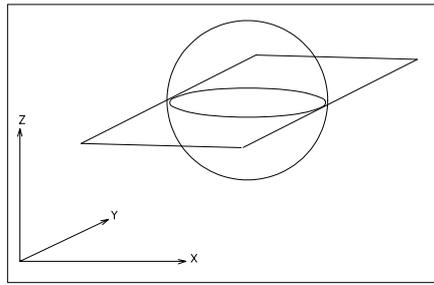


Fig. 1 - Definição de uma Feição Linear Circular no Espaço

A Fig.2 representa a projeção da interseção da esfera com o plano, na qual, o ponto P está contido na feição linear circular. Este ponto deve satisfazer as duas equações de observação abaixo:

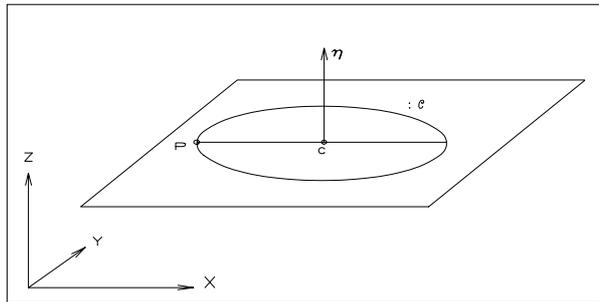


Fig 2.Descrição da Feição Linear Circular
Fonte: MULAWA & MIKHAIL, 1988

$$\|P - C\| = r \quad (1)$$

$$(P - C) \cdot \eta = 0 \quad (2)$$

onde:

$\|P-C\|$ é a distância euclidiana entre P e C;

P é um ponto qualquer sobre a feição linear circular;

C é o centro da feição linear circular;

η é a normal ao plano que contém a feição linear circular e;

r é o raio da feição linear circular.

A equação 2, é a condição necessária e suficiente para que um ponto P pertença ao plano que contém a feição linear circular. Como o comprimento do vetor η não afeta a condição acima, será tratado como um vetor unitário. Então:

$$\|\eta\| = 1 \quad (3)$$

Desta maneira, a forma padrão da feição circular pode ser escrita como sendo a circunferência de centro C e raio r :

$$\{C, \eta, r / \|\eta\| = 1\} \quad (3a)$$

A circunferência descrita por C , η e r acima, apresenta 7 parâmetros incógnitos (X_c , Y_c , Z_c , X_η , Y_η , Z_η e r) e de acordo com as equações (1) e (2), são necessários no mínimo 3 pontos sobre esta circunferência para determiná-los, estabelecendo-se um sistema com 7 equações a 7 parâmetros, lembrando que o produto vetorial entre 2 vetores é um terceiro vetor ortogonal a eles.

Considerando a fig.3 abaixo, na qual se representa por "a" o vetor formado pelos pontos $P1$ e $P2$ e por "b" o vetor formado pelos pontos $P1$ e $P3$, tem-se:

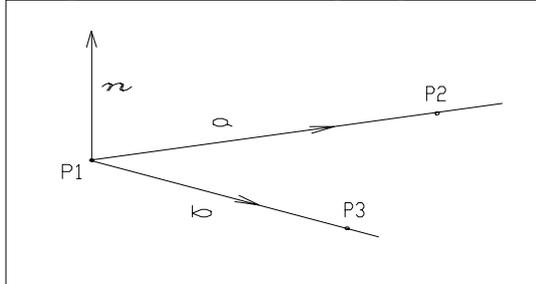


Fig. 3 Vetores "a" e "b"

$$a = (P2 - P1) \quad (4)$$

$$b = (P3 - P1) \quad (5)$$

O vetor normal η na mesma figura será:

$$\eta = a \times b \quad (6)$$

ou equivalentemente:

$$\eta = (a_2 b_3 - a_3 b_2) i + (a_3 b_1 - a_1 b_3) j + (a_1 b_2 - a_2 b_1) k \quad (7)$$

onde

a_1 , a_2 e a_3 são as componentes do vetor a ;

b_1 , b_2 e b_3 são as componentes do vetor b , assim descritos:

$$a_1 = XP2 - XP1;$$

$$a_2 = YP2 - YP1;$$

$$a_3 = ZP2 - ZP1;$$

$$b_1 = XP3 - XP1;$$

$$b_2 = YP3 - YP1;$$

$$b_3 = ZP3 - ZP1.$$

A condição de unicidade de η será satisfeita pela divisão do mesmo pela sua norma, cujo sentido, no modelo é indiferente:

$$X\eta = (a_2 b_3 - a_3 b_2) / (X\eta + Y\eta + Z\eta) \quad (8)$$

$$Y\eta = (a_3 b_1 - a_1 b_3) / (X\eta + Y\eta + Z\eta) \quad (9)$$

$$Z\eta = (a_1 b_2 - a_2 b_1) / (X\eta + Y\eta + Z\eta) \quad (10)$$

Com o vetor η calculado, o modelo passará a ter então, 4 parâmetros descritores, X_c , Y_c , Z_c e r , que necessitam serem determinados através das equações de observação (1) e (2).

2.2 MODELO DOS PARÂMETROS ADICIONAIS PARA FEIÇÕES CIRCULARES

O modelo dos parâmetros adicionais consiste em associar as Equações de Colinearidade [05], com as equações de observação que definem a circunferência como representadas abaixo.

$$x = -f \frac{m_{11}(XP - X_o) + m_{12}(YP - Y_o) + m_{13}(ZP - Z_o)}{m_{31}(XP - X_o) + m_{32}(YP - Y_o) + m_{33}(ZP - Z_o)} \quad (11)$$

$$y = -f \frac{m_{21}(XP - X_o) + m_{22}(YP - Y_o) + m_{23}(ZP - Z_o)}{m_{31}(XP - X_o) + m_{32}(YP - Y_o) + m_{33}(ZP - Z_o)}$$

$$\|P - C\| = r$$

$$(P - C) \cdot \eta = 0$$

O modelo matemático funcional como mostrado acima, não evita a tradicional correspondência ponto a ponto. Entretanto, este problema pode ser contornado lançando-se mão da reta formada pelo ponto P, sobre a feição, pelo CP (Centro de Projecção) e pelo vetor direção da reta ρ , como mostrado na figura 4.

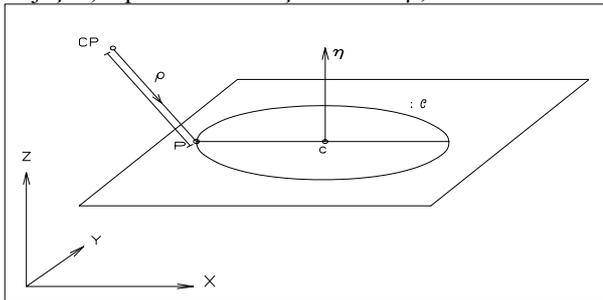


Fig. 4. Reta formada pelo Centro Perspectivo, pelo Vetor Direção ρ e pelo Ponto P sobre a Feição
Fonte: MULAWA&MIKHAIL, 1988.

A equação paramétrica da reta acima citada é dada por:

$$XP = X_0 + s X_\rho \quad (12)$$

$$YP = Y_0 + s Y_\rho \quad (13)$$

$$ZP = Z_0 + s Z_\rho \quad (14)$$

Substituindo as equações (12), (13) e (14) nas equações (1), (2) e (11) tem-se:

$$x - f \frac{m_{11} X_\rho + m_{12} Y_\rho + m_{13} Z_\rho}{m_{31} X_\rho + m_{32} Y_\rho + m_{33} Z_\rho} = 0 \quad (15)$$

$$y - f \frac{m_{21} X_\rho + m_{22} Y_\rho + m_{23} Z_\rho}{m_{31} X_\rho + m_{32} Y_\rho + m_{33} Z_\rho} = 0$$

$$(X_0 + s X_\rho - X_c)^2 + (Y_0 + s Y_\rho - Y_c)^2 + (Z_0 + s Z_\rho - Z_c)^2 - r^2 = 0 \quad (16)$$

$$(X_0 + s X_\rho - X_c) X_\eta + (Y_0 + s Y_\rho - Y_c) Y_\eta + (Z_0 + s Z_\rho - Z_c) Z_\eta = 0 \quad (17)$$

onde:

ρ é função das fotocoordenadas observadas (x,y) pré-refinadas, da distância focal "f" e da matriz de rotação $M(\kappa, \phi, \omega)$ e s um escalar como representados abaixo:

$$\rho = M' [x \ y \ -f]' \quad (18)$$

$$s = -(CP - C) \eta / (\rho \cdot \eta) \quad (19)$$

Ao leitor que desejar em detalhes a dedução do modelo matemático funcional dos Parâmetros Adicionais acima pode encontrá-lo em D'ARCE, 1995.

3. APLICAÇÃO DO MODELO DOS PARÂMETROS ADICIONAIS À RESSEÇÃO ESPACIAL

A resseção espacial em fotogrametria consiste na recuperação dos parâmetros de orientação exterior (posição e situação) das imagens fotográficas em relação a um referencial, isto é, determina-se as coordenadas do centro perspectivo (X_0, Y_0, Z_0) e os ângulos de orientação do sistema fotogramétrico em relação ao referencial de terreno (κ, ϕ, ω) [04]. Para o presente trabalho particularizou-se a aplicação do Modelo dos Parâmetros Adicionais utilizando como controle feições circulares para uma fotografia isolada.

Os parâmetros da resseção espacial foram recuperados através da aplicação das equações de observação (15), (16) e (17). Entretanto, para facilitar a programação do modelo, determinou-se previamente os descritores das feições lineares circulares através das equações de observação (1) e (2).

As equações de observação que descrevem as feições circulares (1) e (2) bem como as equações de observação do modelo dos parâmetros adicionais (15), (16) e (17) são funções de observações e parâmetros simultaneamente, ou seja:

$$F(La, Xa) = 0 \quad (20)$$

sendo:

La - vetor das observações ajustadas e;

Xa - vetor dos parâmetros ajustados.

A solução do problema se deu através da aplicação do Método dos Mínimos Quadrados com o modelo implícito, no qual as funções F foram linearizadas através da expansão de Taylor negligenciando os termos de segunda ordem e superiores, obtendo-se :

$$A X + B V + W = 0 \quad (21)$$

no qual,

X é o vetor das correções aos parâmetros aproximados;

A é a matriz das derivadas parciais das funções F em relação aos parâmetros ajustados no ponto aproximado;

B é a matriz das derivadas parciais das funções F em relação às observações no ponto observado;

W é o vetor erro de fechamento das equações de condição e;

V é o vetor dos resíduos.

Admitindo como Xo o vetor dos parâmetros aproximados no ajustamento a solução da equação (21) é:

$$X = -(A^T M^{-1} A)^{-1} A^T M^{-1} W \quad (22)$$

Com

$$M = B P^{-1} B^T \quad (23) \text{ e;}$$

$$Xa = Xo + X \quad (24).$$

4. TESTES E RESULTADOS

Um estudo, onde o modelo matemático pudesse ser analisado sem a influência dos erros observacionais foi idealizado. Gerou-se uma fotografia sintética com 12 feições circulares como representada na configuração abaixo através de uma simulação matemática. As coordenadas de terreno X e Y dos pontos de terreno que geraram as feições foram considerados isentos de erros.

Às coordenadas Z foram atribuídos valores aleatórios dentro do intervalo de 200 a 600 metros, e para a determinação dos descritores das feições circulares, escolheu-se três pontos sobre cada feição que a gerou. A figura 5 mostra algumas das configurações usadas.

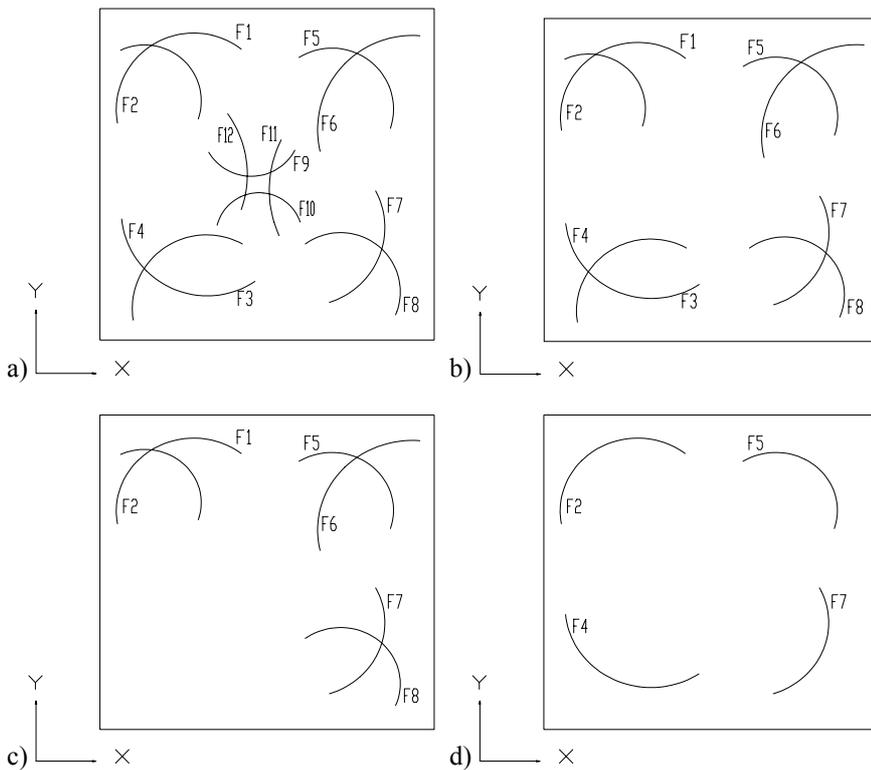


Fig.5 Configurações das Feições Lineares Circulares

As fotocoordenadas foram geradas através das Equações de Colinearidade (11) ligando pontos discretos do espaço imagem ao espaço objeto [05]. Os parâmetros utilizados para a geração da fotografia sintética na escala 1:8000 e distância focal 150mm foram :

$$\kappa = 0^\circ; \varphi = -1^\circ 30'; \omega = 1^\circ 30'; X_o = 1888,0; Y_o = 1408,0; e Z_o = 1600m.$$

As várias configurações acima foram testadas através de um programa de ajustamento de observações pelo método implícito utilizando as equações (15), (16) e (17) especialmente desenvolvido para recuperar os parâmetros da resseção espacial. Os resultados obtidos se encontram no quadro abaixo para cada situação acima.

QUADRO DE VALORES

Parâ	valor real	valores ajustados			
		a	b	c	d
K	.00000000	.00000000	.00000000	.00000000	.00000000
ϕ	-.02617993	-.02617992	-.02617992	-.02617992	-.02617992
ω	.02617993	.02617993	.02617993	.02617993	.02617999
Xo	1888.0	1888.0	1888.0	1888.0	1888.0
Yo	1408.0	1408.0	1408.0	1408.0	1408.0
Zo	1600.0	1600.0	1600.0	1600.0	1600.0

Como se pode notar, os parâmetros da resseção espacial foram perfeitamente recuperados para cada situação, o que mostra a eficiência do Modelo dos Parâmetros Adicionais com uso de Feições Circulares como alternativa para o controle fotogramétrico. Deve-se ressaltar que nestes experimentos, independente do número e da geometria na distribuição das feições nas configurações testadas, em nenhum dos casos o número de iterações para estabilizar a solução foi superior a 5.

5. CONCLUSÕES

Apesar da complexidade matemática na associação das Equações de Colinearidade com as equações das feições circulares, o Modelo dos Parâmetros Adicionais com Feições Circulares como controle no cálculo da resseção espacial apresentou excelente desempenho com convergência rápida na estabilização da solução. Os resultados provam a eficiência do modelo e a sua viabilidade na implementação sem prejuízo de tempo no processamento dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] D'ARCE, C. R. G. **Modelo Fotogramétrico com uso de Feições Lineares Retas e Circulares como Controle**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba-PR, 1995.
- [02] DAL POZ, A. P. **Um Sistema Fotogramétrico Voltado para a Exploração do Recurso de Feições Retas**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba-PR, 1991.
- [03] MULAWA, D. C. & MIKHAIL, E. M. **Photogrammetric treatment of Linear Features**. In.: Anais do 16th Internacional Congress of Photogrammetry and Remote Sensing, Kyoto, Japão, 1988.
- [04] TOMMASELLI, A. M. G. **Um Modelo Alternativo à Equação de Colinearidade Utilizando Feições Retas**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba-PR, 1988.
- [05] LUGNANI, J. B. **Introdução à Fototriangulação**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 1987.

(Recebido em 10/03/98. Aceito para publicação em 05/10/98.)