

MARY ANGÉLICA DE AZEVEDO OLIVAS

CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS FOTOGRAMÉTRICAS

**APLICAÇÃO DOS MÉTODOS: Câmaras Convergentes e
Campos Mistos**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências.

CURITIBA — ABRIL — 1980

CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS FOTOGRAFÉTRICAS

Aplicação dos métodos: Câmaras Convergentes
e Campos Mistos

DISSERTAÇÃO


Apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências
Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências.

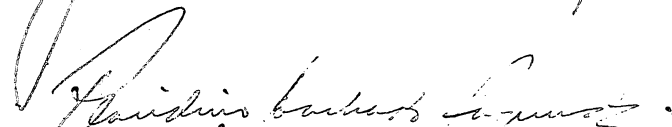
por


MARY ANGÉLICA DE AZEVEDO OLIVAS
Licenciada em Matemática

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
1980

BANCA EXAMINADORA


Ph.D. José Bittencourt de Andrade
ORIENTADOR


Prof. Placidino Machado Fagundes


Ms.C. Quintino Dalmolin

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. JOSÉ BITTENCOURT DE ANDRADE, pela excelente orientação, pelo interesse demonstrado durante a elaboração do trabalho e pela cessão dos programas computacionais aqui utilizados.

Ao Prof. Dr. CAMIL GEMAEL pela compreensão e constante estímulo.

À C.A.P.E.S. pelo apoio financeiro.

Ao Nelson, meu esposo, por seu apoio, incentivo e compreensão.

Às minhas filhas Michele e Melissa, que em muitos momentos foram sacrificadas para que este trabalho fosse concluído.

A todos aqueles que direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração desta pesquisa.

SÍNTESE

Calibração de câmaras fotogramétricas é ainda hoje, no Brasil, um tema pouco considerado pelos fotogrametristas.

O presente trabalho possui como finalidade principal, apre-sentar alguns resultados obtidos com a aplicação de dois métodos de campo específicos para calibração de câmaras:

- MÉTODO DOS CAMPOS MISTOS
- MÉTODO DAS CÂMARAS CONVERGENTES.

Visto que não foi possível a aplicação dos métodos em câma-ras reais, procuramos através de fotografias sintéticas, uma má-xima aproximação de situações concretas.

Como pode ser verificado pelos resultados alcançados, os métodos são eficientes e podem, sem muitas dificuldades, preen-cher a lacuna deixada pela falta de calibração de câmaras na fo-togrametria brasileira.

ABSTRACT

At the present time, the calibration of cameras is an activity that has been given little consideration by the photogrammetrists of Brazil.

The main purpose of this dissertation is to present some results which were obtained from the application of two specific methods of camera calibration. These methods were:

Method of Mixed Ranges

Self-calibration method.

Because it was not possible to apply these methods to actual cameras, an attempt was made to give a good approximation to real situations by creating digitally-simulated photographs.

The results that were obtained showed that both methods are satisfactory, and therefore that both could be used to fill the gap left by the lack of camera calibration in Brazil.

SUMÁRIO

	Página
Agradecimentos	iii
Síntese	iv
Abstract	v
Sumário	vi
1. INTRODUÇÃO	01
2. CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS FOTOGAMÉTRICAS	03
2.1. Breve Histórico do Desenvolvimento dos Proces- sos de Calibração	04
2.2. Conceito de Calibração	06
2.3. Calibração em Fotogrametria	08
2.4. Dados de Calibração de uma Câmara Fotogramé- trica	11
2.4.1. Certificado de Calibração	11
2.4.2. Distorção de Lentes Objetivas	11
2.4.3. Trabalho do Filme	13
3. DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS	16
3.1. Método dos Campos Mistos	17
3.1.1. Origem do Método	17
3.1.2. Descrição do Método	17
3.2. Método das Câmaras Convergentes	20
3.2.1. Origem do Método	20
3.2.2. Descrição do Método das Câmaras Convergentes ..	21

	Página
4.	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS 24
4.1.	Uso de Fotografias Sintéticas 25
4.2.	Obtenção de Fotografias Sintéticas 26
4.3.	Elaboração do Programa Computacional para Ob- tenção dos Dados de Calibração 28
4.4.	Experiências Realizadas com o Método das Câma- ras Convergentes 36
4.4.1.	Experiência nº 1 40
4.4.1.1.	Resultados obtidos 40
4.4.2.	Experiência nº 2 43
4.4.2.1.	Resultados obtidos 43
4.4.3.	Experiência nº 3 46
4.4.3.1.	Resultados obtidos 47
4.4.4.	Análise dos resultados 50
4.5.	Experiências Realizadas com o Método dos Cam- pos Mistos 53
4.5.1.	Experiência nº 4 53
4.5.1.1.	Obtenção de fotografias 53
4.5.1.2.	Calibração da Câmara 56
4.5.1.3.	Resultados obtidos 58
4.5.2.	Experiência nº 5 61
4.5.2.1.	Calibração da Câmara 64
4.5.2.2.	Resultados obtidos 66
4.5.3.	Análise dos Resultados 69
5.	CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO 71
5.1.	Sugestão para Certificado de Calibração 71

	Página.
6. CONCLUSÕES	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
APÊNDICE	80
Programa 1	81
Programa 2	83

INTRODUÇÃO

Como se sabe, as câmaras fotogramétricas antes de serem comercializadas, são submetidas a uma calibração e os dados obtidos acompanham-nas obrigatoriamente.

Todavia, a calibração efetuada pela fábrica é feita através de métodos de laboratório, em condições diversas de temperatura, pressão, posição, etc., daquelas em que a câmara irá funcionar na prática. Isto, por si só, já justificaria uma outra calibração.

Além, disto, o uso da câmara determina uma modificação nas suas constantes de calibração, fazendo-se necessário que, periodicamente estas sejam reavaliadas.

O motivo deste trabalho prende-se ao fato de que, tanto em fotogrametria analítica, como em fotogrametria analógica, os dados de calibração são fundamentais.

No Brasil, apenas a empresa "Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul S.A." utiliza um método de laboratório para calibração de câmaras. Infelizmente, o trabalho é restrito às câmaras de uso da própria empresa.

Nestas condições, os demais usuários de câmaras fotogramétricas vêem-se obrigados a usa-las descalibradas por dois motivos:

- o alto custo para remetê-las ao exterior;
- o tempo que teriam que prescindir da câmara.

Como os mais recentes trabalhos publicados sobre o assun-

to, têm mostrado a importância da calibração não apenas da câmara isoladamente, mas de todo o sistema envolvido em um vôo fotográfico, detivemo-nos então nos métodos de campo.

A importância da utilização de um sistema de mensuração calibrado pode ser observada quando a tarefa, a ser executada, requer alta precisão, como por exemplo, a extensão ou densificação de controle geodésico, através da aerotriangulação.

Com o intuito de colaborar para o aperfeiçoamento da Fotogrametria em nosso país, estudamos dois métodos de campo para calibração de câmaras fotogramétricas.

Procuramos neste trabalho expô-los com minúcias, apresentando ainda alguns dos resultados obtidos em calibrações simuladas.

2. CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS FOTOGAMÉTRICAS

2.1. BREVE HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DOS PROCESSOS DE CALIBRAÇÃO.

A palavra calibrar vem do Árabe *gālib*.

Sua forma na língua portuguesa foi copiada do vocábulo italiano *calibro*, acrescido do sufixo "ar".

Originaram-se, então, as formas derivadas, como *calibração*, *calibragem*, etc.

A calibração de câmaras, surgiu da necessidade de aperfeiçoamento na construção de câmaras fotogramétricas.

Os primeiros métodos desenvolvidos foram visuais.

Nos métodos visuais, utilizavam-se teodolitos ou goniômetros em conexão com uma escala calibrada ou uma grade presa ao plano focal da câmara. |SWELL, 1966|

Estes métodos, simples e de baixo custo, satisfaziam a maioria dos usuários.

Entretanto, alguns fotogrametristas desenvolveram pesquisas com o objetivo de instituir novas e mais precisas formas de calibração.

Pode-se citar, entre outros, HOTINE que em 1931, na Grã-Bretanha, destacou-se por suas pesquisas neste campo.

Nos Estados Unidos, em trabalhos independentes, GARDNER em 1937 e WASHER em 1946, também desenvolveram pesquisas com o intuito de aprimorar técnicas e equipamentos para calibração de câmaras.

Desde então, as pesquisas não cessaram sempre com o objetivo de aperfeiçoamento ou desenvolvimento de novos métodos com a mesma finalidade.

Atualmente, pode-se contar com um grande número de métodos

específicos para calibração de câmaras fotogramétricas, os quais podem ser divididos, basicamente, em duas categorias:

- MÉTODOS DE LABORATÓRIO
- MÉTODOS DE CAMPO

Os métodos de laboratório, usados principalmente pelos fabricantes de câmaras, geralmente utilizam um goniômetro, fotogoniômetro ou um calibrador multi-colimador.

Quando o goniômetro é empregado, uma grade calibrada é presa no foco do cone interior da câmara, enquanto que, no método do multi-colimador, as tarjetas são colocadas no foco infinito de cada colimador.

Nos Estados Unidos e Canadá, o método do multi-colimador é o mais empregado pelos fabricantes de câmaras fotogramétricas.

Os métodos de laboratório fornecem importantes informações no que diz respeito ao corpo da câmara e do magazine. Infelizmente, porém, tais processos não dão a necessária informação acerca das influências métricas, introduzidas por elementos remanescentes das medições do sistema.

Analisando-se por este prisma, os métodos de campo têm demonstrado vantagens em relação aos de laboratório, por serem analíticos e os dados necessários, obtidos em condições bem próximas àquelas de funcionamento efetivo da câmara.

Os métodos de campo tomaram impulso a partir da década de 50. O mais antigo deles, é o denominado MÉTODO ESTELAR, o qual utiliza estrelas como tarjetas.

A primeira técnica, verdadeiramente analítica, foi desen-

volvida em 1956 por DUANE C. BROWN, na qual os parâmetros de orientação interna e distorção radial simétrica foram recuperados, simultaneamente, com a orientação da câmara.

Para desenvolver a presente pesquisa, selecionamos dois métodos de campo, a saber:

- MÉTODO DOS CAMPOS MISTOS (*Method of Mixed Ranges - M.M.R*)
- MÉTODO DAS CÂMARAS CONVERGENTES (*Self-Calibration*).

Estes métodos serão descritos nos próximos capítulos.

2.2. CONCEITO DE CALIBRAÇÃO

Calibrar envolve, de início, a idéia de medir. Daí fixar-se, preliminarmente, o conceito de que calibração está diretamente ligada à operação de medição.

De fato. Procedimentos para calibração objetivam, em última análise, a obtenção das características individuais de um instrumento.

Tais características são indicadas através de valores obtidos com a calibração, os quais fornecem informações sobre a qualidade do instrumento.

O conceito de calibração foi eloquentemente discutido por EISENHART [1963].

Para ele, calibrar é uma forma refinada de medir. E, considerando que a obtenção de medidas constitui-se em uma operação repetitiva, associa o processo de medição a um processo de produção, sendo o produto final os números obtidos.

Desta forma, todos os cuidados que a avaliação do produto final requer em um processo de produção, devem ser repassados ao processo de calibração.

De acordo com EISENHART |1963|:

"Calibration of instruments and standards is a refined form of measurement. Measurement of some property of a thing is an operation that yields as an end result a number that indicates how much of the property the thing has. Measurement is ordinarily a repeatable operation, so that it is appropriate to regard measurement as a production process, the "product" being the number, i.e., the measurements, that it yields; and to apply to measurement processes in the laboratory the concepts and techniques of statistical process control that have proved so useful in the quality control of industrial production".

Adverte ainda EISENHART, que uma operação particular de medição só poderá ser definida como tal, se uma estabilidade estatística for alcançada; e que, na prática, para se determinar se uma operação particular de medição está ou não sob controle estatístico, tal medição deve ser realizada em condições as mais próximas possíveis daquelas em que o instrumento irá ser utilizado.

Para tanto, deve-se considerar as variações de funcionamento do aparelho, condições do meio ambiente, operadores, observadores, etc.

Além disso, a precisão das medidas devem ser caracterizadas por um desses dois fatores:

- desvio padrão do processo;
- limite de confiança de seus mais prováveis erros sistemáticos.

Sobre isto, comenta EISENHART |1963|:

"Determination of credible bounds to the combined effect of

recognized potential sources of systematic error always involves some arbitrariness, not only in the placing of reasonable bounds on the systematic error likely to be contributed by each particular cause, but also in the manner in which these individual contributions are combined. Consequently, the "inaccuracy" of ends results of measurement cannot be expressed by "confidence limits" corresponding to a definitive numerical "confidence level", except in those rare instances in which the possible overall systematic error of a final results is negligible in comparison with its imprecision".

Observando tais imposições ao processo de medição, estar-se-á avaliando não apenas o desempenho do instrumento, mas realizando o que foi denominado por EISENHART, de CALIBRAÇÃO DO SISTEMA.

2.3. CALIBRAÇÃO EM FOTOGRAMETRIA

Calibração, no que tange à Fotogrametria, é a determinação de números indicadores das propriedades que garantem as características métricas do sistema e a qualidade de seu desempenho.

A condição de colinearidade fornece a mais útil ferramenta para estabelecer o vínculo geométrico entre espaço-objeto e espaço-imagem. Entretanto, influências físicas, tais como, distorção das lentes, trabalho do filme, refração atmosférica, excentricidade do ponto principal, requerem métodos mais refinados para minorar os erros introduzidos por estas causas. |ANDRADE, 1977|

A validade no aperfeiçoamento dos métodos é por muitos questionada. Qual a necessidade de dispender-se tempo e dinheiro no aprimoramento e calibração de sistemas fotogramétricos?

MERCHANT [1979], justifica:

"The answer to this question can only be made after considering the accuracy requirements of a given measurement task. If one is satisfied with aerial triangulation results possessing accuracies of about one part in 10.000 of the flying height, then there is little justification for a system calibration. However, if one has the task of extending or densifying geodetic control, then careful attention to a total system calibration is essential." (O grifo é nosso).

Os métodos de campo, aplicados para calibração de câmaras fotogramétricas, estão em consonância com o conceito de calibração de sistemas, introduzido por EISENHART. Senão vejamos. Coordenadas de foto formam o suporte básico para uma calibração fora de laboratórios. Tais coordenadas são medidas em fotografias obtidas com a câmara a ser calibrada, em condições que muito se as semelham àquelas da operação normal da câmara.

Esta imposição dos métodos preenche o requisito de utilização do aparelho, com todo o aparato auxiliar necessário ao seu desempenho.

O outro ítem, referente ao desvio padrão das medidas, é preenchido através da obtenção da matriz variância-covariância no ajustamento analítico. Entretanto, algumas dificuldades aparecem quando se tenta fixar valores numéricos para os parâmetros do modelo matemático adotado. Nas equações utilizadas pela fotogrametria, basicamente as equações projetivas centrais, há uma forte correlação entre as coordenadas da estação de exposição (X_0, Y_0, Z_0) e os parâmetros de orientação interior (x_0, y_0, c) , para o caso usual de fotografias aéreas verticais sobre terre-

no plano. Em processos para calibração por métodos analíticos, todos os parâmetros são recuperados em um mesmo ajustamento computacional. Quando o ajustamento é realizado com o método dos mínimos quadrados, na matriz das derivadas parciais esta dependência pode ser visualizada através da razão constante entre os seguintes pares de parâmetros: (X_0, x_0) , (Y_0, y_0) , (Z_0, c) , como mostrado a seguir:

$$\frac{\frac{\partial F(x)}{\partial X_0}}{\frac{\partial F(x)}{\partial x_0}} = - \frac{c}{(Z - Z_0)}$$

$$\frac{\frac{\partial F(y)}{\partial Y_0}}{\frac{\partial F(y)}{\partial y_0}} = - \frac{c}{(Z - Z_0)}$$

$$\frac{\frac{\partial F(x)}{\partial Z_0}}{\frac{\partial F(x)}{\partial c}} = \frac{c}{(Z - Z_0)}$$

$$\frac{\frac{\partial F(y)}{\partial Z_0}}{\frac{\partial F(y)}{\partial c}} = \frac{c}{(Z - Z_0)}$$

Uma solução única para cada parâmetro, só será possível se esta dependência linear for quebrada. Pode ser facilmente verificado que, entre outras, as duas opções seguintes são possíveis:

- a) utilizar um campo com pontos cujas alturas Z variem, ou seja, fotografar um campo tridimensional forçando as-

sim uma variação em altura ($Z - Z_0$);

- b) modificar a geometria usual, de modo que os eixos óticos sejam paralelos. Para isto basta utilizar no ajustamento fotografias convergentes e pelo menos uma foto com rotação de 90° em relação às outras.

Os métodos de campo para calibração diferem entre si, essencialmente pela forma de quebrar a correlação entre os parâmetros de orientação interna e externa da câmara.

2.4. DADOS DE CALIBRAÇÃO DE UMA CÂMARA FOTOGRAFÉTRICA

2.4.1. Certificado de Calibração

A finalidade do certificado de calibração de uma câmara, é munir o usuário com uma série de informações que serão utilizadas como dados auxiliares no refinamento de medições efetuadas sobre imagens obtidas com a câmara.

Certificados de calibração por processos analíticos, podem fornecer as seguintes informações:

- distância principal calibrada
- coordenadas do ponto principal
- coeficientes para correção da distorção descentrada
- coeficientes para correção da distorção radial simétrica.
- desvio padrão dos dados acima.

2.4.2 Distorção dos Sistemas Objetivos

A distorção dos sistemas objetivos é causada por dois motivos principais:

- impossibilidade prática de polimento das lentes, até a forma ideal de um parabolóide de revolução ao redor do eixo óti-

co.

- inabilidade do construtor em alinhar os eixos óticos das lentes individuais, dentro do conjunto dos elementos que compõem a objetiva.

Estes fatores implicam em uma variação na distância focal da câmara, de ponto a ponto.

Como em Fotogrametria o trabalho é invariavelmente feito com a utilização de coordenadas de imagens, torna-se mais conveniente considerar a distorção como erros nas coordenadas (x, y) medidas, ao invés de variações na distância focal da câmara.

O primeiro tipo de distorção, conhecida como 5.^a aberração de SEIDEL, é caracterizada como radial e simétrica em relação ao ponto principal. Esta distorção, tem sido representada por um polinômio desenvolvido por A. E. CONRADY, como mostramos a seguir:

$$\delta x = (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots)(x - x_0)$$

$$\delta y = (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots)(y - y_0)$$

nas quais:

$\delta x, \delta y$ - componentes do deslocamento do ponto de coordenadas (x, y), devido à distorção radial simétrica.

r - distância do ponto de coordenadas (x, y) ao ponto principal da foto de coordenadas (x₀, y₀).

K₁, K₂, K₃, ... - constantes.

O segundo tipo de distorção, denominado distorção descentrada, é resultante da imperfeição no alinhamento dos eixos óticos das lentes. Esta imperfeição no conjunto de lentes, dá ori-

gem tanto à distorção radial como à distorção tangencial.

O modelo mais geral disponível para representar a distorção descentrada, é resultante de um modelo apresentado por CONRADY em 1919 e modificado por BROWN em 1966. Tal modelo, denominado "MODELO REVISADO CONRADY-BROWN", é atualmente aceito pela maioria dos fotogrametristas, e apresentado como segue:

$$\delta x = \left| P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2 xy \right| \cdot \left| 1 + P_3 r^2 + \dots \right|$$

$$\delta y = \left| 2P_1 xy + P_2(r^2 + 2y^2) \right| \cdot \left| 1 + P_3 r^2 + \dots \right|$$

nas quais:

- $\delta x, \delta y$ - componentes do deslocamento do ponto de coordenadas (x, y) , devido à distorção descentrada.
- r - distância do ponto de coordenadas (x, y) ao ponto principal da foto de coordenadas (x_0, y_0) .
- P_1, P_2, P_3, \dots - constantes.

Na prática, os termos utilizados são apenas P_1 e P_2 .

2.4.3 Trabalho do Filme

Existem basicamente dois tipos de filmes disponíveis para câmaras fotogramétricas: com base de cristal e com base sintética (polivinil, resina de poliéster, etc.).

Os filmes com base de cristal são teoricamente, os melhores para serem utilizados em Fotogrametria. Isto por ser o cristal um material rígido, praticamente insensível às mudanças de temperatura e umidade. Na prática, seu uso está diminuído pela sua fragilidade, peso e dificuldade no armazenamento.

Os outros, apesar de não apresentarem os problemas do cris-

tal são mais sensíveis às variações ambientais, resultando em deformações no filme.

Estas deformações, denominadas trabalho do filme, ocasionam mudanças nas posições originais das imagens. Portanto, quando se objetiva resultados de alta precisão em Fotogrametria, é necessário efetuar correções nas coordenadas medidas, relativas ao trabalho do filme. Estas correções serão viáveis se as coordenadas das marcas fiduciais da câmara forem conhecidas, ou se for utilizada uma câmara *reseau*.

MERCHANT 1973, sugere a aplicação da Transformação Afim Geral como a mais conveniente para o caso de deformações do filme. A forma geral desta transformação em sistemas coordenados bidimensionais, é a seguinte:

$$x' = a_1 x + b_1 y + c_1$$

$$y' = a_2 x + b_2 y + c_2$$

nas quais:

x', y' = coordenadas das marcas fiduciais, dadas pelo certificado de calibração

x, y = coordenadas das marcas fiduciais lidas em um monocomparador

$a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ = parâmetros.

Quando não dispomos de coordenadas fiduciais dadas pelo certificado de calibração, podemos medi-las em uma imagem negativa com base de cristal, obtida com a câmara. Assim, com as quatro coordenadas das marcas fiduciais conhecidas, é possível formar um sistema de oito equações e seis incógnitas e resolvê-

lo com a aplicação do método dos mínimos quadrados.

Esta forma de apresentar as equações da Transformação Afim Geral é sempre conveniente por ser linear, não necessitando portanto de valores iniciais para os parâmetros.

3. DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS

3.1. MÉTODO DOS CAMPOS MISTOS

3.1.1 Origem do Método

O Método dos Campos Mistos teve sua origem em uma pesquisa desenvolvida por DEAN MERCHANT, em 1.967, para obtenção do título de Ph.D. pela Ohio State University.

Neste trabalho, sugeriu a utilização de um campo tridimensional para calibração de sistemas fotográficos, com o objetivo de quebrar a alta correlação entre os elementos de orientação interna e externa da câmara.

Posteriormente, MERCHANT efetuou um estudo comparativo dos métodos "*Off-Wing*", "*Three Dimensional Range*", e "*Schemes Employing Exposure Station Constraints*". A partir dos resultados obtidos, aperfeiçoou seu trabalho anterior, utilizando então dois campos: um plano e outro montanhoso. Tal método foi denominado Método dos Campos Mistos (M.M.R.).

O campo tridimensional no M.M.R. tem o mesmo objetivo da pesquisa anterior, qual seja, separar os elementos de orientação interna e orientação externa. O campo plano foi introduzido com a finalidade de ampliar o número de observações para o ajustamento, possibilitando a recuperação dos parâmetros da distorção das lentes.

3.1.2 Descrição do Método

Como foi mostrado no capítulo anterior, existe uma razão constante entre os coeficientes das coordenadas da estação de exposição (X_0 , Y_0 , Z_0) se todos os pontos de campo estiverem situados em um mesmo plano e os eixos óticos forem paralelos.

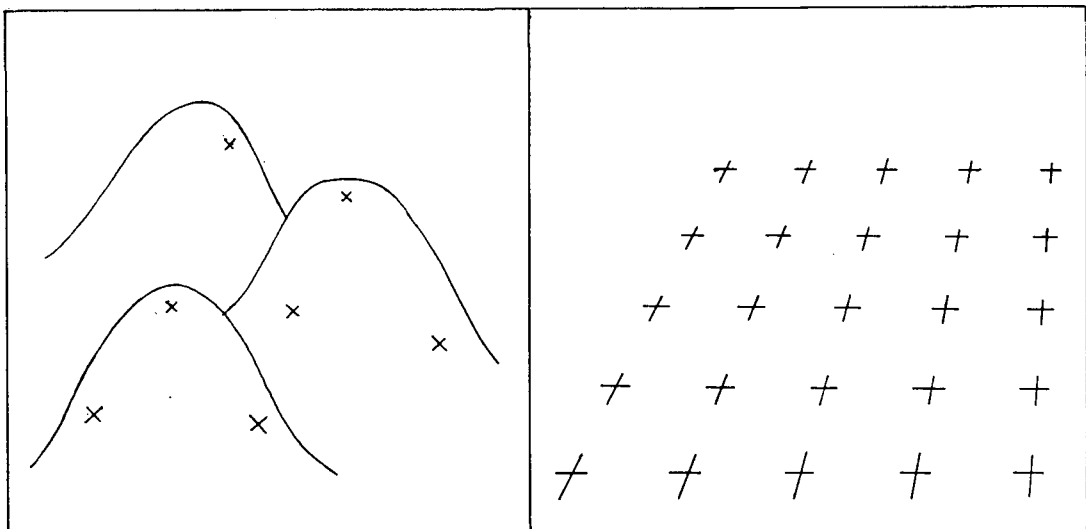
O Método dos Campos Mistos baseia-se na variação de altura dos pontos de campo, como forma de eliminar a dependência linear entre elementos de orientação interna e elementos de orientação externa da câmara.

Esta variação possibilita a separação dos parâmetros em um ajustamento, sem que a orientação externa seja incluída como observação direta.

Entretanto, a recuperação dos parâmetros de distorção das lentes objetivas da câmara, exige um campo altamente densificado de pontos de controle. Como, em regiões montanhosas a fixação de tarjetas e obtenção de pontos de apoio são operações que apresentam dificuldades, o ajustamento é feito com a utilização de imagens de dois campos, simultaneamente.

O primeiro, um campo tridimensional, onde o número de pontos utilizados pode ser reduzido ao mínimo. O outro, em uma região plana e densa de pontos de controle, onde o trabalho de campo é bem mais simples.

A figura seguinte ilustra o Método dos Campos Mistos:



As observações fotogramétricas dos dois campos são ajustadas simultaneamente, sendo o conjunto de elementos que descreve a orientação interna da câmara comum para todas as fotografias.

Estudos realizados por ANDRADE [1977] sobre este método, mostraram que:

a) a distribuição dos pontos no terreno deve ser de tal forma que, nas fotografias, suas imagens não apareçam concentradas em uma única área.

b) a utilização de fotografias com ângulos de rotação $Kapa = 0^{\circ}$ e $Kapa = 90^{\circ}$, ou seja, vãos entre si ortogonais, aumenta a estabilidade da solução.

c) o número mínimo de informações externas (*constraints*) deve ser 8, sendo 6 para definir o sistema de referência, 1 para a escala e uma observação em altura para definir a distância focal de uma câmara.

LEIGH*, citado em ANDRADE [1977], assegura que o desnível entre os pontos no campo tridimensional deve ser no mínimo, em torno de 20% da altura de vão.

Em um estudo mais recente, MERCHANT [1979] sugere a inclusão de distâncias observadas entre pontos de campo e a observação de todos os pontos em altura, como forma de facilitar o trabalho de levantamento de campo.

A grande vantagem deste método é que não necessita qual-

*LEIGH, G.E. A Study in Improvement of One Aspect of the Metric Camera System. Dept. of Geodetic Science. The Ohio State University. (Thesis) 1973.

quer modificação da aeronave e nenhum equipamento auxiliar, além dos geralmente utilizados no vôo fotográfico.

Mais adiante, no item 4.5. mostraremos alguns exemplos de aplicação simulada do M.M.R., com um resumo dos resultados obtidos.

3.2. MÉTODO DAS CÂMARAS CONVERGENTES

3.2.1 Origem do Método

O Método das Câmaras Convergentes foi desenvolvido por DUANE C. BROWN.

Suas pesquisas para obtenção de calibração analítica de câmaras, levaram-no a elaborar um programa computacional, através do qual a distorção radial simétrica e orientação da câmara eram recuperados simultaneamente. Posteriormente, o modelo foi ampliado, tornando-se possível recuperar os parâmetros da distorção radial simétrica e orientação interna da câmara. Tal programa estava sendo utilizado apenas para calibração de câmaras terrestres, pertencentes à D.B.A. Systems (firma fotogramétrica pertencente a D.C. Brown), com resultados satisfatórios.

Quando a Apollo 14 foi lançada, levava uma câmara topográfica lunar, destinada a obter fotografias para mapeamento. Entretanto, a câmara falhou, sobrando apenas fotografias obtidas com uma câmara HASSELBLAD 500, para compilação das cartas. Como isto não estava previsto, uma rigorosa pré-calibração da HASSELBLAD não foi realizada e, uma imediata pós-calibração foi dificultada pelas restrições normais de quarentena da nave, após o regresso.

Então, a N.A.S.A. contratou a D.B.A. Systems para efetuar

uma calibração analítica com as fotografias obtidas com a câmara em órbita lunar. Foi então que a D.B.A. Systems teve oportunidade de testar o programa em câmaras focalizadas para o infinito. Por sorte as fotografias disponíveis para efetuar a calibração haviam sido tiradas com inclinações suficientes para aplicação do Método das Câmaras Convergentes. Os resultados desta calibração foram posteriormente comparados com os de outra calibração efetuada pelo método Stellar, após a liberação da câmara que estava em quarentena. Os resultados foram considerados absolutamente satisfatórios.

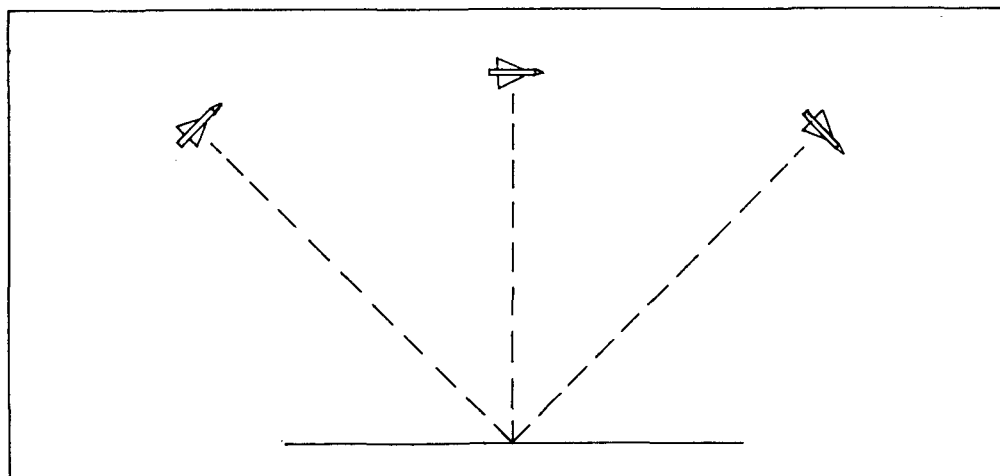
3.2.2 Descrição do Método das Câmaras Convergentes

Como já foi frisado, em fotografias verticais existem compensações quase perfeitas entre os elementos de orientação interna (x_o, y_o, c) e as coordenadas da estação de exposição (X_o, Y_o, Z_o), se o relevo no espaço-objeto é relativamente pequeno em relação à distância câmara-objeto.

O Método das Câmaras Convergentes baseia-se na utilização de fotografias altamente convergentes, como forma de contrabalançar as compensações projetivas, tornando-se desnecessário o conhecimento prévio das estações de exposição. Mas, a convergência por si só, não permite a completa recuperação de todos os elementos do cône interior. Para que isto ocorra, é necessário incorporar no ajustamento, exposições com ângulos kapa nominalmente ortogonais.

A experiência tem mostrado que, a convergência entre as câmaras deve ser levada a extremos, ou seja, exposições com $\phi \approx 45^\circ$ e exposições com $\phi \approx -45^\circ$. Isto implica em raios formando entre si aproximadamente 90° , como mostrado na figura a

seguir.



Neste método, é suficiente fixar-se arbitrariamente uma estação de exposição em posição e atitude, e deixar que todos os demais feixes ajustem-se livremente em relação ao feixe fixo. Por esta razão, o método foi denominado de "SELF - CALIBRATION".

Outra possibilidade para aplicação do Método das Câmaras Convergentes é efetuar o apoio para o ajustamento, com pontos de campo. Neste caso, os pontos de apoio podem ser reduzidos ao mínimo, ou seja, apenas o suficiente para definir o sistema de coordenadas. O mais interessante neste método é que as observações para apoio de campo podem ser com valores apenas aproximados.

Em síntese, o Método das Câmaras Convergentes não exige praticamente nenhuma informação externa, quer seja de coordenadas de campo ou das posições e orientações das câmaras. Na falta de um campo previamente preparado com tarjetas, pode-se utilizar pontos artificiais marcados com um PUG e com suas respec-

tivas coordenadas de campo apenas aproximadas. Foi exatamente esta a técnica utilizada por BROWN, no caso da Apollo 14.

No item 4.4 deste trabalho apresentaremos os resultados obtidos com este método, em calibrações simuladas.

4. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS

4.1 - USO DE FOTOGRAFIAS SINTÉTICAS

Os resultados que serão apresentados neste capítulo, foram obtidos a partir de fotografias sintéticas, ou seja, coordenadas de foto obtidas através de um programa computacional.

A aplicação prática dos métodos com a utilização de fotografias reais, foi impossibilitada pelas seguintes razões:

- a) a única câmara fotogramétrica disponível na Universidade Federal do Paraná, é uma câmara terrestre SMK da ZEISS. Infelizmente, a câmara não possui o certificado de calibração de fábrica e, conseqüentemente, as coordenadas de suas marcas fiduciais são desconhecidas;
- b) a obtenção de tais coordenadas foi impossibilitada por dois motivos: primeiro, porque as imagens obtidas com a câmara, só apresentavam duas marcas fiduciais, ao invés de quatro como é normal em câmaras fotogramétricas. Para correção do trabalho do filme, seriam necessárias no mínimo três marcas conhecidas; segundo, porque não conseguimos obter placas negativas com base de cristal.
- c) a Universidade Federal do Paraná e também as firmas fotogramétricas de Curitiba, não dispõem de um monocomparador para medir coordenadas em fotografias. Os instrumentos que, entre outras utilidades, podem ser usados para o fim desejado, não satisfazem as exigências de precisão que os métodos requerem.

4.2 - OBTENÇÃO DE FOTOGRAFIAS SINTÉTICAS

As fotografias, aqui denominadas sintéticas, são obtidas através de um programa computacional, elaborado para simular uma câmara fotogramétrica e um monocomparador. Os resultados obtidos com a utilização deste programa, são coordenadas fotográficas.

Para utilizá-lo, deve-se idealizar um terreno e, fornecer como dados de entrada, os seguintes elementos:

- coordenadas de pontos no espaço-objeto
- orientação externa da câmara
- elementos de orientação interna da câmara (x_0 , y_0 , c)
- desvio padrão para as coordenadas de foto.

As coordenadas fotográficas são então calculadas através das equações paramétricas da fotogrametria:

$$x - x_0 = c \cdot \frac{\Delta X}{\Delta Z}$$

$$y - y_0 = c \cdot \frac{\Delta Y}{\Delta Z}$$

nas quais:

$$\Delta X = (X - X_0)\cos\phi \cos k + (Y - Y_0)(\cos\omega \sen k - \sen\omega \sen\phi \cos k) + (Z - Z_0)(\sen\omega \sen k + \cos\omega \sen\phi \cos k)$$

$$\Delta Y = -(X - X_0)\cos\phi \sen k + (Y - Y_0)(\cos\omega \cos k + \sen\omega \sen\phi \sen k) + (Z - Z_0)(\sen\omega \cos k - \cos\omega \sen\phi \sen k)$$

$$\Delta Z = (X - X_0)\text{sen}\phi - (Y - Y_0)\text{sen}\omega \cos\phi + (Z - Z_0)\text{cos}\omega \cos\phi$$

As coordenadas (x, y) calculadas são absolutamente corretas. Na prática, todavia, os valores de coordenadas medidos por instrumentos são eivados de erros devidos ao trabalho do filme, à distorção das lentes objetivas e também por erros cometidos pelo operador do instrumento de medição.

Para que as coordenadas sintéticas aproximem-se ainda mais de uma situação real, o programa utiliza a subrotina científica "GAUSS", a qual, baseada na distribuição normal, insere erros randômicos nas coordenadas calculadas.

Na etapa seguinte, o programa ainda calcula erros devidos à distorção de lentes e soma-os às coordenadas, que já contém erros aleatórios fornecidos pela subrotina "GAUSS". Finalmente, as coordenadas calculadas são selecionadas pelo próprio programa, de acordo com as dimensões da placa negativa da câmara imaginária, fornecidas pelo usuário do programa.

Para que o leitor tenha uma visão geral da forma em que saem os resultados, o exemplo seguinte foi selecionado:

EXTERIOR ORIENTATION

PHOTO	2		
X ₀	3	260,00	
Y ₀	14	300,00	
Z ₀	5	000,00	
KAP	1	0	0,00
PHI	0	0	0,00
OME	1	0	0,00

PHOTO COORDINATES

PHOTO	POINT	X	Y	ST DEV
2	1	-93,52165	-93,51883	0,00300
2	2	0,00098	-93,65276	0,00300
2	3	94,50963	-94,46220	0,00300
2	8	-97,18764	0,00609	0,00300
2	9	0,08159	0,17685	0,00300
2	10	93,52860	0,07100	0,00300
2	15	-97,69693	97,87559	0,00300
2	16	-0,03249	97,23166	0,00300
2	17	96,82257	96,82238	0,00300

Uma listagem deste programa está anexada ao Apêndice deste trabalho.

4.3 - ELABORAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA OBTENÇÃO DOS DADOS DE CALIBRAÇÃO

Calibrar uma câmara fotogramétrica por métodos analíticos, é uma operação que envolve cálculos com matrizes de dimensões quase sempre elevadas. Desta forma, a utilização de um computador torna-se imprescindível para o ajustamento das observações que são necessárias para obtenção dos resultados finais ou seja, as constantes de calibração da câmara.

O programa computacional empregado no presente trabalho, é uma ampliação de um programa para triangulação analítica cedido pelo orientador desta pesquisa, Prof. Dr. José Bittencourt de Andrade, o que reduziu em grande parte, o trabalho de programação.

Com o objetivo de recuperar as constantes de calibração

de câmaras fotogramétricas, ampliamos o modelo matemático utilizado para triangulação analítica; então, às equações projetivas centrais, que eram o modelo básico no programa original, acrescentamos os modelos que descrevem as distorções radial simétrica e descentrada do conjunto de lentes objetivas.

O modelo completo, no programa para calibração, tomou então a seguinte forma:

$$x - x_0 - c \frac{\Delta X}{\Delta Z} - (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(x - x_0) -$$

$$(P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy) = 0$$

$$y - y_0 - c \frac{\Delta Y}{\Delta Z} - (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(y - y_0) -$$

$$(2P_1xy + P_2(r^2 + 2y^2)) = 0$$

Como o modelo é função tanto de observações como de parâmetros, e não é linear, o método empregado para o ajustamento foi o Método Combinado.

A linguagem utilizada para escrever o programa foi o FORTRAN X. Pela sua extensão e principalmente pela quantidade de memória que requer, este programa necessita de um computador de grande porte para ser executado. Vale frisar aqui que, sem o computador recentemente adquirido pela Universidade Federal do Paraná, um DEC-SYSTEM 10 da Digital, teria sido impossível concretizar este trabalho. Também não podemos deixar de salientar a importância dos terminais do computador adquiridos pelo Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e instalados em suas dependências, que possibilitaram a execução dos trabalhos computacionais em *timesharing*. Isto significou uma economia muito gran

de de tempo, o que tornou possível várias tentativas de emprego dos métodos em estudo, pesquisando assim as possibilidades e variações permitidas para cada método.

O programa, em sua forma atual, pode ser utilizado de duas maneiras distintas:

- calibração de câmaras fotogramétricas;
- triangulação analítica com obtenção do fator de refração atmosférica.

Dentro de qualquer das duas formas a ser utilizado, o programa permite ao usuário uma série de opções, tais como:

- determinar quantas e quais coordenadas dos pontos do espaço-objeto devem ser introduzidas no ajustamento como observações;
- incluir no ajustamento distâncias entre pontos de campo;
- os critérios de convergência angular, para calibração e para coordenadas podem ser pré-estabelecidos;
- os números mínimo e máximo de iterações podem ser controlados pelo usuário.

O programa é constituído por um programa principal e sete subrotinas. Para evitar o uso desnecessário de memória do computador, os dimensionamentos das matrizes, que estão incluídos no programa principal, devem ser refeitos a cada novo ajustamento.

Este programa encontra-se no apêndice deste trabalho. Como os resultados das calibrações efetuadas através deste programa serão apresentadas em forma resumida, daremos a seguir um exemplo de cada saída possível.

1) Análise estatística:

CONVERGED: ITERATIONS = 2
 A PRIORI VARIANCE OF UNIT WEIGHT = 1,0000
 A POSTERIORI VARIANCE OF UNIT WEIGHT = 1,0034
 COMPUTED CHI SQUARED = 89,3019
 DEGREES OF FREEDOM = 89

2) Orientação externa ajustada e resíduos das coordenadas fotográficas:

PHOTO		
XC =	80,00	
YC =	99,98	
ZC =	119,96	
OMEGA =	0,00964	
PHI =	-0,00578	
KAPPA =	0,00327	

POINT	RESIDUALS	
	VX	VY
1	-0,0113	0,0222
2	-0,0010	0,0111
3	0,0208	0,0207
4	-0,0020	0,0047
5	0,0076	0,0060
6	-0,0088	-0,0021
7	0,0002	0,0010
8	0,0112	0,0030
9	-0,0052	-0,0058
10	0,0089	-0,0162
11	-0,0102	-0,0206
12	-0,0055	-0,0109
13	0,0199	-0,0160

3) Resíduos dos pontos de apoio:

POINT	VX	VY	VZ
1	-0,0000	0,0000	-0,0000
8	0,0000	-0,0000	0,0000
13		0,0000	0,0000

4) Coordenadas ajustadas dos pontos de campo:

POINT	KODE	XG	YG	ZG
1	3	6,0000	196,0000	-0,0000
2	0	80,0045	165,9910	0,0029
3	0	154,0088	196,0053	0,0323
4	0	45,0064	149,9916	-0,0034
5	0	120,0030	149,9931	0,0162
6	0	6,0120	99,9915	-0,0253
7	0	80,0044	99,9956	-0,0019
8	3	154,0000	100,0000	0,0000
9	0	45,0172	50,0000	-0,0227
10	0	120,0127	- 0,0011	-0,0062
11	0	6,0062	5,9817	-0,0315
12	0	80,0077	24,0062	-0,0138
13	4	154,0187	6,0000	0,0000

5) Matriz variância covariância para os elementos de orientação externa, usando a variância da unidade de peso a priori

OMEGA	3,2072D-05					
PHI	-2,3372D-05	5,3352D-05				
KAPPA	-1,6315D-06	7,6826D-06	8,6759D-06			
XC	-5,6843D-05	1,2428D-04	3,6024D-05	4,1412D-04		
YC	-5,3970D-05	4,0963D-05	-2,0054D-06	8,3669D-05	1,3978D-04	
ZC	1,3476D-05	-8,3524D-05	-1,0737D-04	-5,5915D-04	6,2562D-05	2,3223D-03

6) Matriz variância-covariância para pontos de campo, usando a variância da unidade de peso a priori:

XG	2,5473D-04		
YG	4,2532D-05	4,0665D-05	
ZG	4,3372D-06	3,5199D-06	1,3778D-04

7) Matriz variância-covariância para os elementos de calibração:

	f	x _o	y _o	K ₁	K ₂	K ₃	P ₁	P ₂
F	1,3819D-04							
CX	-6,2586D-07	8,7708D-06						
CY	-1,5580D-06	3,2336D-08	8,5849D-06					
K ₁	-1,4694D-09	-3,6431D-11	-4,0020D-11	9,5945D-14				
K ₂	1,1567D-12	4,2977D-15	-5,6604D-15	-3,3056D-17	1,8072D-20			
K ₃	-2,1306D-16	2,8747D-19	2,7313D-18	4,1249D-21	-2,9707D-24	5,3832D-28		
P ₁	2,6904D-11	5,3002D-10	-1,4553D-10	1,3005D-14	-2,9991D-18	2,4029D-22	1,8410D-13	
P ₂	5,7244D-10	-1,4581D-10	5,5930D-10	1,8410D-14	1,0083D-18	-9,0911D-22	1,2040D-14	1,5146D-13

8) Resultados da calibração:

CAMERA CALIBRATION

F = 59,9853
CX = 0,0001
CY = 0,0001

CK₁ = -0,0000
CK₂ = -0,0000
CK₃ = 0,0000
CP₁ = -0,0000
CP₂ = -0,0000

CALIBRATION RESIDUALS

F 1,85280539D-01
X 2,18081851D-07
Y -1,13038997D-06

K₁ -1,75082424D-07
K₂ -1,62495034D-10
K₃ 4,84951894D-14
P₁ -1,22236792D-06
P₂ -9,34109026D-07

4.4 - EXPERIÊNCIAS REALIZADAS COM O MÉTODO DAS CÂMARAS CONVERGENTES

Neste item serão apresentados resultados obtidos com a aplicação do método das câmaras convergentes, para calibração de uma câmara terrestre de distância focal igual a 60,00 mm.

Com o objetivo de testar as variações possíveis de apoio para a calibração analítica e possibilitar uma comparação dos resultados, realizamos três experiências utilizando as mesmas fotografias.

Para tanto um terreno foi idealizado (veja a figura 4.4.1) e coordenadas fotográficas dos pontos escolhidos foram obtidas com a utilização do programa descrito no item 4.2. O Quadro 1 resume os dados fornecidos para obtenção das fotografias sintéticas.

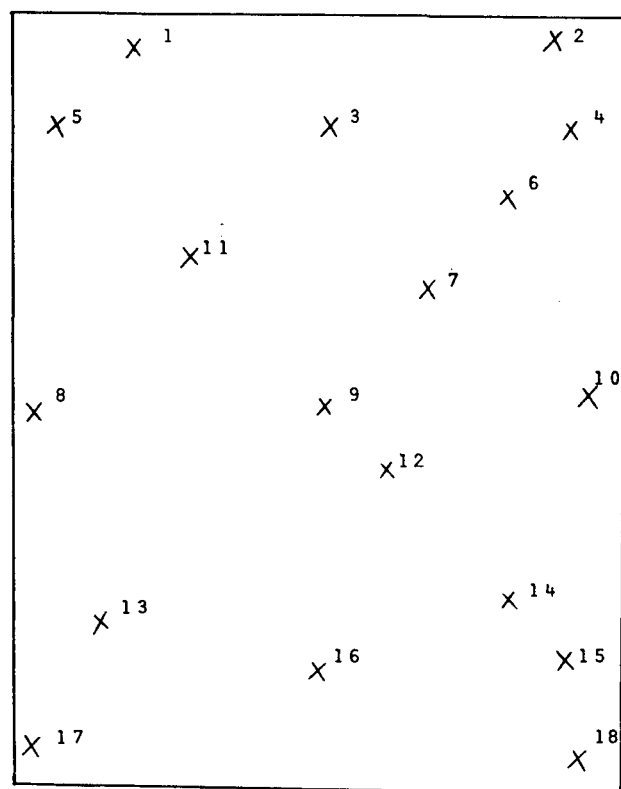


Fig. 4.4.1

Orientação interna		f = 60,00 mm					
		$x_o = 0,00$ mm					
		$y_o = 0,00$ mm					
número de fotografias		6					
número de pontos no terreno		18					
escala		1:200					
convergência entre fotografias extremas		90°					
desvio padrão para coordenadas fotográficas		0,001 mm					
dimensão das placas negativas		80 X 100 mm					
coeficientes da distorção radial simétrica		$K_1 = 3,6979 \times 10^{-7}$					
		$K_2 = -1,5592 \times 10^{-10}$					
		$K_3 = 1,2265 \times 10^{-14}$					
coeficientes da distorção descentrada		$P_1 = -5,7143 \times 10^{-7}$					
		$P_2 = -4,1770 \times 10^{-7}$					
orientação externa da câmara*		F.1	F.2	F.3	F.4	F.5	F.6
	ω	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	ϕ	-45°	0°	45°	45°	0°	-45°
	κ	0°	0°	0°	90°	180°	90°

Quadro 1

* Em posição da câmara foi feito: foto 1 \equiv foto 6, foto 2 \equiv foto 5 e foto 3 \equiv 4

Obtidas as coordenadas fotográficas, passamos então à segunda e mais importante etapa das experiências: calibrar a câmara. Como foi antecipado, três calibrações foram realizadas, distinguindo-se entre si, única e exclusivamente pelos elementos inseridos como observações, no ajustamento.

O Quadro nº 2 mostra, em resumo, os dados comuns às três experiências, fornecidos como entrada para o programa descrito no item 4.3.

Valores iniciais para os parâmetros	variâncias
$f = 59,8000 \text{ mm}$ $x_o = 0,0001 \text{ mm}$ $y_o = 0,0001 \text{ mm}$ $K_1 = 0,0000$ $K_2 = 0,0000$ $K_3 = 0,0000$ $P_1 = 0,0$ $P_2 = 0,0$	$\sigma^2 = 1,0$ $\sigma^2 = 1,0 \times 10^{-4}$ $\sigma^2 = 1,0 \times 10^{-4}$ $\sigma^2 = 1,0 \times 10^{-3}$ $\sigma^2 = 1,0 \times 10^{-3}$ $\sigma^2 = 1,0 \times 10^{-3}$ $\sigma^2 = 1,0 \times 10^{-3}$ $\sigma^2 = 1,0 \times 10^{-3}$
Número de pontos por fotografia	
Foto	Número de pontos
1	17
2	18
3	16
4	16
5	18
6	16
Variância da unidade de peso a priori	1,0
Número de iterações	mínimo = 1 máximo = 5
Variância para coordenadas fotogrâficas	$1,0 \times 10^{-7}$
Critérios de convergência	angular = $1,0 \times 10^{-3}$ para <u>ca</u> libração = $1,0 \times 10^{-4}$ para co- ordenadas = $1,0 \times 10^{-4}$

Quadro nº 2

4.4.1 Experiência nº 1

A primeira experiência caracterizou-se pelo apoio para o ajustamento ter sido feito apenas com pontos do terreno. Assim, foram fixadas, arbitrariamente, sete coordenadas de pontos do campo de testes (figura 4.4.1), conforme mostra o Quadro nº 3.

Nº do Ponto	Coordenadas	Variâncias
3	z	$1,0 \times 10^{-4}$
10	x, y, z	$1,0 \times 10^{-4}$
15	x, y, z	$1,0 \times 10^{-4}$

Quadro nº 3

4.4.1.1 Resultados obtidos

a) Análise estatística

Convergência estabelecida após 2 iterações

Variância da unidade de peso a posteriori: 1,0316

Qui-quadrado computado : 120,6940

Graus de liberdade : 117

Intervalo de confiança : $\chi^2_{117}(0,005) = 81,372$

$\chi^2_{117}(0,995) = 160,128$

b) Calibração da câmara

$f = 59,9999 \text{ mm}$

$x_0 = 0,0017 \text{ mm}$

$y_0 = 0,0014 \text{ mm}$

$K_1 = 3,5479 \times 10^{-7}$

$K_2 = -1,5571 \times 10^{-10}$

$K_3 = 1,2962 \times 10^{-14}$

$P_1 = -4,6123 \times 10^{-7}$

$P_2 = -2,9465 \times 10^{-7}$

c) Matriz Variância-Covariância dos elementos de calibração da câmara, usando a variância da unidade de peso a priori.

	f	x_0	y_0	K_1	K_2	K_3	P_1	P_2
f	1,5023D-06							
x_0	2,3255D-08	5,2604D-07						
y_0	-9,1377D-08	1,0654D-07	6,2610D-07					
K_1	1,7083D-12	-5,0146D-13	-4,5456D-13	1,0469D-15				
K_2	3,6145D-15	3,5394D-16	-1,8109D-16	-4,8147D-19	2,6122D-22			
K_3	-7,3609D-19	-6,5865D-20	5,5722D-20	7,5696D-23	-4,4184D-26	7,7465D-30		
P_1	-3,7993D-13	2,3468D-11	3,6754D-12	-6,1163D-17	2,7827D-20	-4,4439D-24	2,4597D-15	
P_2	-4,5600D-13	4,5063D-12	3,0119D-11	-2,3613D-17	1,1752D-20	-2,1274D-24	5,9276D-16	3,1303D-15

d) Matriz das correlações entre os elementos de calibração da câmara.

	f	x_0	y_0	K_1	K_2	K_3	P_1	P_2
f	0,1000D+01							
x_0	0,2616D-01	0,1000D+01						
y_0	-0,9422D-01	0,1856D+00	0,1000D+01					
K_1	0,4308D-01	-0,2137D-01	-0,1775D-01	0,1000D+01				
K_2	0,1825D+00	0,3019D-01	-0,1416D-01	-0,9207D+00	0,1000D+01			
K_3	-0,2158D+00	-0,3263D-01	0,2530D-01	0,8406D+00	-0,9822D+00	0,1000D+01		
P_1	-0,6250D-02	0,6524D+00	0,9366D-01	-0,3811D-01	0,3472D-01	-0,3219D-01	0,1000D+01	
P_2	-0,6650D-02	0,1110D+00	0,6803D+00	-0,1304D-01	0,1300D-01	-0,1366D-01	0,2136D+00	0,1000D+01

4.4.2 Experiência nº 2

O objetivo desta segunda experiência foi avaliar a precisão que o método das Câmaras Convergentes requer nas observações das coordenadas dos pontos para apoio de campo.

Para isto, repetimos a primeira experiência inserindo propositadamente, erros em duas coordenadas de campo e fornecendo-as como observação. Assim, para o ponto número 15, cujas coordenadas reais eram: $X = 14,5$ m, $Y = 3,5$ m, $Z = 0,0$ m, alteramos para $X = 13,5$ m, $Y = 2,5$ m e $Z = 0,0$ m, sem que os pesos a elas atribuídos fossem modificados.

4.4.2.1 Resultados obtidos

a) Análise estatística

Convergência estabelecida após 4 iterações

Variância da unidade de peso a posteriori: 1,0316

Qui-quadrado computado : 120,6940

Graus de liberdade : 117

Intervalos de confiança : $\chi^2_{117(0,005)} = 81,372$

$\chi^2_{117(0,995)} = 160,128$

b) Calibração da câmara

$f = 59,9999$ mm

$x_0 = 0,0017$ mm

$y_0 = 0,0014$ mm

$K_1 = 3,5479 \times 10^{-7}$

$K_2 = -1,5571 \times 10^{-10}$

$K_3 = 1,2962 \times 10^{-14}$

$P_1 = -4,6123 \times 10^{-7}$

$P_2 = -2,9465 \times 10^{-7}$

c) Matriz Variância-Covariância dos elementos de calibração da câmara, usando a variância da unidade de peso a priori.

	f	x_0	y_0	K_1	K_2	K_3	P_1	P_2
f	1,5023D-06							
x_0	2,3254D-08	5,2604D-07						
y_0	-9,1377D-08	1,0654D-07	6,2611D-07					
K_1	1,7084D-12	-5,0147D-13	-4,5456D-13	1,0469D-15				
K_2	3,6145D-15	3,5394D-16	-1,8109D-16	-4,8147D-19	2,6122D-22			
K_3	-7,3609D-19	-6,5865D-20	5,5722D-20	7,5696D-23	-4,4184D-26	7,7465D-30		
P_1	-3,7991D-13	2,3468D-11	3,6754D-12	-6,1162D-17	2,7827D-20	-4,4439D-24	2,4597D-15	
P_2	-4,5599D-13	4,5063D-12	3,0119D-11	-2,3612D-17	1,1752D-20	-2,1274D-24	5,9276D-16	3,1303D-15

d) Matriz das correlações entre os elementos de calibração da câmara.

	f	x _o	y _o	K ₁	K ₂	K ₃	P ₁	P ₂
f	0,1000D+01							
x _o	0,2616D-01	0,1000D+01						
y _o	0,9422D-01	0,1856D+00	0,1000D+01					
K ₁	0,4308D-01	-0,2137D-01	-0,1775D-01	0,1000D+01				
K ₂	0,1825D+00	0,3019D-01	-0,1416D-01	-0,9207D+00	0,1000D+01			
K ₃	-0,2158D+00	-0,3263D-01	0,2530D-01	0,8406D+00	-0,9822D+00	0,1000D+01		
P ₁	-0,6250D-02	0,6524D+00	0,9366D-01	-0,3811D-01	0,3472D-01	-0,3219D-01	0,1000D+01	
P ₂	-0,6649D-02	0,1110D+00	0,6803D+00	-0,1304D-01	0,1300D-01	-0,1366D-01	0,2136D+00	0,1000D+01

4.4.3 Experiência nº 3

Nesta última experiência com o método das Câmaras Convergentes, procuramos concretizar o que levou o autor do método, Duane C. Brown, a denominá-lo de *Self-Calibration*: fixar apenas uma estação de exposição e deixar que todos os demais feixes se ajustem livremente em relação àquele feixe fixo.

Com este objetivo, e utilizando exatamente os mesmos dados das experiências anteriores, escolhemos arbitrariamente a estação de exposição da fotografia nº 3 e fixamos todos os elementos de orientação externa, atribuindo a eles, pesos também arbitrários, conforme o quadro número 4.

Elemento	Variância
X_o	$1,0 \times 10^{-4}$
Y_o	$1,0 \times 10^{-4}$
Z_o	$1,0 \times 10^{-4}$
ω	$1,0 \times 10^{-4}$
ϕ	$1,0 \times 10^{-4}$
κ	$1,0 \times 10^{-4}$

Quadro 4

4.4.3.1 Resultados obtidos

a) Análise estatística

Convergência estabelecida após 2 iterações

Variância da unidade de peso a posteriori: 1,0405

Qui-quadrado computado : 120,6986

Graus de liberdade : 116

Intervalos de confiança : $\chi_{116}^2(0,005) = 80,546$

$\chi_{116}^2(0,995) = 158,954$

b) Calibração da câmara

$f = 59,9999 \text{ mm}$

$x_0 = 0,0017 \text{ mm}$

$y_0 = 0,0014 \text{ mm}$

$K_1 = 3,5479 \times 10^{-7}$

$K_2 = -1,5570 \times 10^{-10}$

$K_3 = 1,2962 \times 10^{-14}$

$P_1 = -4,6127 \times 10^{-7}$

$P_2 = -2,9468 \times 10^{-7}$

c) Matriz Variância-Covariância dos elementos de calibração da câmara, usando a variância da unidade de peso a priori.

	f	x_0	y_0	K_1	K_2	K_3	P_1	P_2
f	1,5023D-06							
x_0	2,3306D-08	5,2578D-07						
y_0	-9,1327D-08	1,0650D-07	6,2588D-07					
K_1	1,7084D-12	-5,0301D-13	-4,5354D-13	1,0469D-15				
K_2	3,6146D-15	3,5449D-16	-1,8164D-16	-4,8147D-19	2,6121D-22			
K_3	-7,3610D-19	-6,5935D-20	5,5830D-20	7,5694D-23	-4,4183D-26	7,7465D-30		
P_1	-3,7780D-13	2,3456D-11	3,6744D-12	-6,1236D-17	2,7854D-20	-4,4475D-24	2,4592D-15	
P_2	-4,5377D-13	4,5044D-12	3,0110D-11	-2,3570D-17	1,1729D-20	-2,1228D-24	5,9270D-16	3,1299D-15

d) Matriz das correlações entre os elementos de calibração da câmara.

	f	x_0	y_0	K_1	K_2	K_3	P_1	P_2
f	0,1000D+01							
x_0	0,2622D-01	0,1000D+01						
y_0	-0,9418D-01	0,1857D+00	0,1000D+01					
K_1	0,4308D-01	-0,2144D-01	-0,1772D-01	0,1000D+01				
K_2	0,1825D+00	0,3025D-01	-0,1421D-01	-0,9207D+00	0,1000D+01			
K_3	-0,2158D+00	-0,3267D-01	0,2536D-01	0,8405D+00	-0,9822D+00	0,1000D+01		
P_1	-0,6216D-02	0,6523D+00	0,9366D-01	-0,3816D-01	0,3475D-01	-0,3222D-01	0,1000D+01	
P_2	-0,6617D-02	0,1110D+00	0,6803D+00	-0,1302D-01	0,1297D-01	-0,1363D-01	0,2136D+00	0,1000D+01

4.4.4 Análise dos resultados

Aplicar um método analítico para calibrar uma câmara imaginária pode, à primeira vista, parecer um trabalho puramente teórico, do qual não se poderá tirar conclusões válidas para a prática de calibração de câmaras reais.

Felizmente esta conclusão não é verdadeira. Vejamos porque. O objetivo primordial deste trabalho era aplicar métodos analíticos para calibração de câmaras fotogramétricas. Para tanto, foi elaborado um programa computacional, o qual necessitava ser testado e os resultados por ele fornecidos comparados com valores de total confiabilidade.

Calibrações simuladas, realizadas em fotografias sintéticas, possibilitaram verificação real dos resultados, posto que, todas as constantes de calibração da câmara eram conhecidas a priori.

Apenas para que se torne mais fácil a comparação dos resultados, vamos repetir aqui (Quadro 5), as constantes da câmara utilizadas para gerar as fotografias e os resultados obtidos nas três calibrações.

	reais	1. ^a experiência	2. ^a experiência	3. ^a experiência
f	60,00 mm	59,9999 mm	59,9999 mm	59,9999 mm
x _o	0,00 mm	0,0017 mm	0,0017 mm	0,0017 mm
y _o	0,00 mm	0,0014 mm	0,0014 mm	0,0014 mm
K ₁	3,6979 X 10 ⁻⁷	3,5479 X 10 ⁻⁷	3,5479 X 10 ⁻⁷	3,5479 X 10 ⁻⁷
K ₂	- 1,5592 X 10 ⁻¹⁰	- 1,5571 X 10 ⁻¹⁰	- 1,5571 X 10 ⁻¹⁰	- 1,5570 X 10 ⁻¹⁰
K ₃	1,2265 X 10 ⁻¹⁴	1,2962 X 10 ⁻¹⁴	1,2962 X 10 ⁻¹⁴	1,2962 X 10 ⁻¹⁴
P ₁	- 5,7143 X 10 ⁻⁷	- 4,6123 X 10 ⁻⁷	- 4,6123 X 10 ⁻⁷	- 4,6127 X 10 ⁻⁷
P ₂	- 4,1770 X 10 ⁻⁷	- 2,9465 X 10 ⁻⁷	- 2,9465 X 10 ⁻⁷	- 2,9468 X 10 ⁻⁷

Quadro 5

Como pode ser verificado, em todas as experiências os resultados foram plenamente satisfatórios, independente do tipo de apoio fornecido para o ajustamento.

A única diferença marcante entre os testes realizados foi o número de iterações necessárias, na segunda experiência, para satisfazer os critérios de convergência estabelecidos.

A matriz variância-covariância obtida para cada uma das calibrações realizadas, assim como os percentis da distribuição de qui-quadrado, nos trouxe ainda maior tranquilidade sobre os resultados.

Somente uma surpresa nos foi reservada para as avaliações finais que foram efetuadas. Quando da obtenção da matriz das correlações entre os elementos de calibração da câmara, encontramos altas correlações entre as constantes K_1 , K_2 e K_3 .

A princípio, isto nos pareceu muito estranho, levando-nos a repetir todas as experiências, com nova curva para a distorção radial simétrica e uma melhor distribuição dos pontos no terreno.

Como os resultados se repetiram chegamos à conclusão de que estas correlações realmente existem, apesar de nada ter sido encontrado na literatura consultada acerca da distorção radial simétrica.

4.5 - EXPERIÊNCIAS REALIZADAS COM O MÉTODO DOS CAMPOS MISTOS.

Com o método dos campos mistos efetuamos duas experiências completamente distintas. A primeira utilizando o método em sua forma original, com os dois campos, sendo um plano e outro montanhoso, como proposto pelo autor Dean Merchant.

Na segunda experiência, aproveitando uma sugestão do orientador desta pesquisa, o método foi testado com apenas um campo no qual pontos altos e baixos foram misturados.

As descrições das experiências 4 e 5, que são relativas ao segundo método estudado, e os resultados obtidos, serão apresentados separadamente por não haver elementos comuns entre elas.

4.5.1 Experiência nº 4

4.5.1.1 Obtenção das Fotografias

Para a primeira experiência com o método dos Campos Mistos, foi utilizada uma câmara terrestre imaginária, com a finalidade de testar o método com fotografias a curta distância.

Como já antecipamos, idealizamos dois campos, um plano e outro montanhoso. No campo plano foram escolhidos treze pontos distribuídos conforme mostra a figura 4.2.

O campo montanhoso foi montado com apenas sete pontos, dos quais três possuíam altura aproximadamente igual a 30% da altura de vôo e os quatro restantes com alturas iguais a zero. A fig. 4.3. mostra a distribuição dos pontos no terreno*.

* Na figura 4.3. o X indica ponto baixo e o Ø ponto alto.
Nas figuras 4.2 e 4.3 o --- indica distâncias observadas.

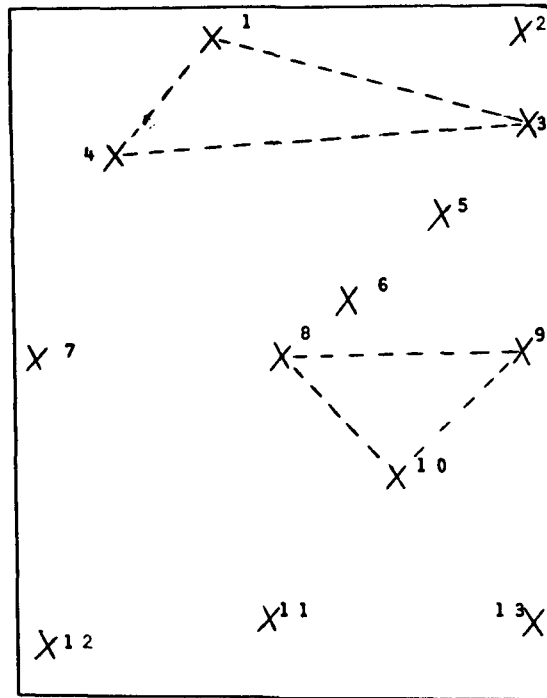


Fig. 4.2

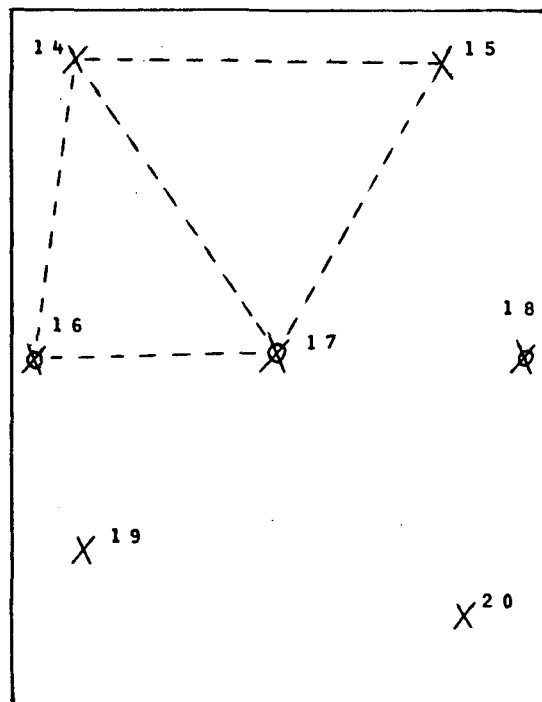


Fig. 4.3

As fotografias foram geradas da mesma forma que o foram nas experiências anteriores e os dados fornecidos para o programa estão resumidos no quadro nº 6.

Elementos de orientação interna	$f = 60,00 \text{ mm}$ $x_o = 0,00 \text{ mm}$ $y_o = 0,00 \text{ mm}$
Coefficientes da distorção radial	$K_1 = 3,6979 \times 10^{-7}$ $K_2 = - 1,5592 \times 10^{-10}$ $K_3 = 1,2265 \times 10^{-14}$
Coefficientes da distorção descentrada	$P_1 = - 5,7143 \times 10^{-7}$ $P_2 = - 4,1770 \times 10^{-7}$
Desvio padrão para coordenadas fotográficas	0,001
Número de pontos no terreno	plano 13 montanhoso 7
Escala	1:200
Dimensão da placa negativa	8 X 10 cm
Número de fotografias por campo	plano 6 montanhoso 4
Orientação externa da câmara para as fotografias do campo plano*	F.1 F.2 F.3 F.4 F.5 F.6
	ω 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0
	ϕ 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0
	κ 0,0 0,0 0,0 90,0 180,0 90,0
Orientação externa da câmara para as fotografias do campo montanhoso**	F.7 F.8 F.9 F.10
	ω 0,0 0,0 0,0 0,0
	ϕ 0,0 0,0 0,0 0,0
	κ 0,0 0,0 0,0 90,0

Quadro 6

* O vôo foi feito em cruz, sendo que quanto à posição da câmara, a foto 2 coincide com a foto 5.

** Neste vôo as posições da câmara para as fotos de números 8 e 10 são coincidentes.

4.5.1.2 Calibração da Câmara

Após a obtenção das coordenadas fotográficas, passamos então ao ajustamento, objetivando a calibração da câmara.

As únicas novidades introduzidas nesta experiência, em relação a trabalhos publicados sobre o método, foram as distâncias observadas entre pontos de campo e uma redução no número de pontos de apoio por campo.

Nas figuras 4.2 e 4.3 as linhas pontilhadas indicam as distâncias que foram medidas.

Os pontos cujas coordenadas foram fornecidas com observações para o apoio de campo são os de números 1, 9, 13, 17, 19 e 20 (veja figuras 4.2 e 4.3).

O quadro número 7 resume os elementos fornecidos para a calibração da câmara.

Valores aproximados das constantes de calibração da câmara e respectivas variâncias	$f = 59,80 \quad \sigma^2 = 1,0$ $x_o = 0,0001 \quad \sigma^2 = 1,0 \times 10^{-5}$ $y_o = 0,0001 \quad \sigma^2 = 1,0 \times 10^{-5}$ $K_1 = 0,0 \quad \sigma^2 = 1,0 \times 10^{-3}$ $K_2 = 0,0 \quad \sigma^2 = 1,0 \times 10^{-3}$ $K_3 = 0,0 \quad \sigma^2 = 1,0 \times 10^{-3}$ $P_1 = 0,0 \quad \sigma^2 = 1,0 \times 10^{-3}$ $P_2 = 0,0 \quad \sigma^2 = 1,0 \times 10^{-3}$
número de pontos por fotografia	F.1 6 F.2 13 F.3 9 F.4 7 F.5 13 F.6 9 F.7 4 F.8 6 F.9 4 F.10 5
número de pontos de apoio	6
VARIÂNCIAS	- para coordenadas de campo $1,0 \times 10^{-8}$ - a priori da unidade de peso 1,0 - para coordenadas fotográficas $1,0 \times 10^{-7}$ - para distâncias $2,5 \times 10^{-5}$
número de distâncias observadas	11
número de iterações	mínimo 2 máximo 5
critérios de convergência	- angular $1,0 \times 10^{-2}$ - para calibração $1,0 \times 10^{-3}$ - para coordenadas $1,0 \times 10^{-4}$

Quadro 7

4.5.1.3 Resultados Obtidos

a) Análise estatística

Convergência estabelecida após 4 iterações

Variância a posteriori da unidade de peso 0,9645

Qui-quadrado computado : 58,8357

Graus de liberdade : 61

Intervalo de confiança : $\chi^2_{61(0,005)} = 36,3086$

$\chi^2_{61(0,995)} = 93,1780$

b) Constantes de calibração da câmara

$$f = 59,9917 \text{ mm}$$

$$x_0 = 0,0002 \text{ mm}$$

$$y_0 = 0,0003 \text{ mm}$$

$$K_1 = 4,9550 \times 10^{-7}$$

$$K_2 = -1,7644 \times 10^{-10}$$

$$K_3 = 1,4609 \times 10^{-14}$$

$$P_1 = -5,9413 \times 10^{-7}$$

$$P_2 = -2,7864 \times 10^{-7}$$

c) Matriz variância-covariância dos elementos de calibração, usando a variância da unidade de peso a priori

	f	x_0	y_0	K_1	K_2	K_3	P_1	P_2
f	8,2558D-04							
x_0	-3,7373D-05	6,5796D-06						
y_0	4,8470D-05	-1,3165D-06	7,3413D-06					
K_1	-8,2111D-09	5,1653D-10	-5,0588D-10	2,0819D-13				
K_2	9,6698D-15	-5,6305D-16	-5,0196D-16	-2,0800D-19	2,7257D-22			
K_3	-2,3675D-18	1,3939D-19	2,0981D-20	5,5895D-23	-4,1701D-26	6,5370D-30		
P_1	1,0492D-11	1,9280D-13	1,1821D-14	6,1316D-16	-3,1335D-20	3,3785D-24	3,2631D-15	
P_2	-2,8463D-11	4,6381D-12	1,4706D-12	6,9624D-16	-1,0814D-19	1,5199D-23	1,0216D-15	4,4611D-15

d) Matriz das correlações entre as constantes de calibração da câmara.

	f	x_0	y_0	K_1	K_2	K_3	P_1	P_2
f	0,1000D+01							
x_0	-0,5071D+00	0,1000D+01						
y_0	0,6226D+00	-0,1894D+00	0,1000D+01					
K_1	-0,6263D+00	0,4413D+00	-0,4092D+00	0,1000D+01				
K_2	0,2038D-01	-0,1330D-01	-0,1122D-01	-0,2761D-01	0,1000D+01			
K_3	-0,3223D-01	0,2125D-01	0,3029D-02	0,4791D-01	-0,9879D+00	0,1000D+01		
P_1	0,6392D-02	0,1316D-02	0,7638D-04	0,2352D-01	-0,3323D-01	0,2313D-01	0,1000D+01	
P_2	-0,1483D-01	0,2707D-01	0,8126D-02	0,2285D-01	-0,9807D-01	0,8900D-01	0,2678D+00	0,1000D+01

4.5.2 Experiência nº 5

Esta segunda experiência realizada com o método dos Campos Mistos, possui características bastante distintas da experiência anterior.

Primeiramente porque foi efetuada com fotografias aéreas, utilizando para isto uma câmara fotogramétrica de distância focal igual a 153,0 mm.

Em segundo lugar, foi utilizado apenas um campo e não dois campos como propõe o método.

Evidentemente, a característica principal do método, que é incluir no ajustamento pontos altos e baixos, de tal forma que a diferença de altura entre eles seja superior a 20% da altura de vôo, foi mantida.

Como na experiência nº 4 a inclusão de distâncias observadas entre pontos de campo nos trouxe resultados satisfatórios, utilizamos aqui um número maior de distâncias, de tal forma que cada ponto foi ligado por distâncias a pelo menos um outro ponto do campo.

A figura 4.4 indica a distribuição dos pontos no terreno e as distâncias medidas entre eles*.

* Símbolos utilizados na figura 4.4:
⊗ ponto alto
X ponto baixo
--- distância observada.

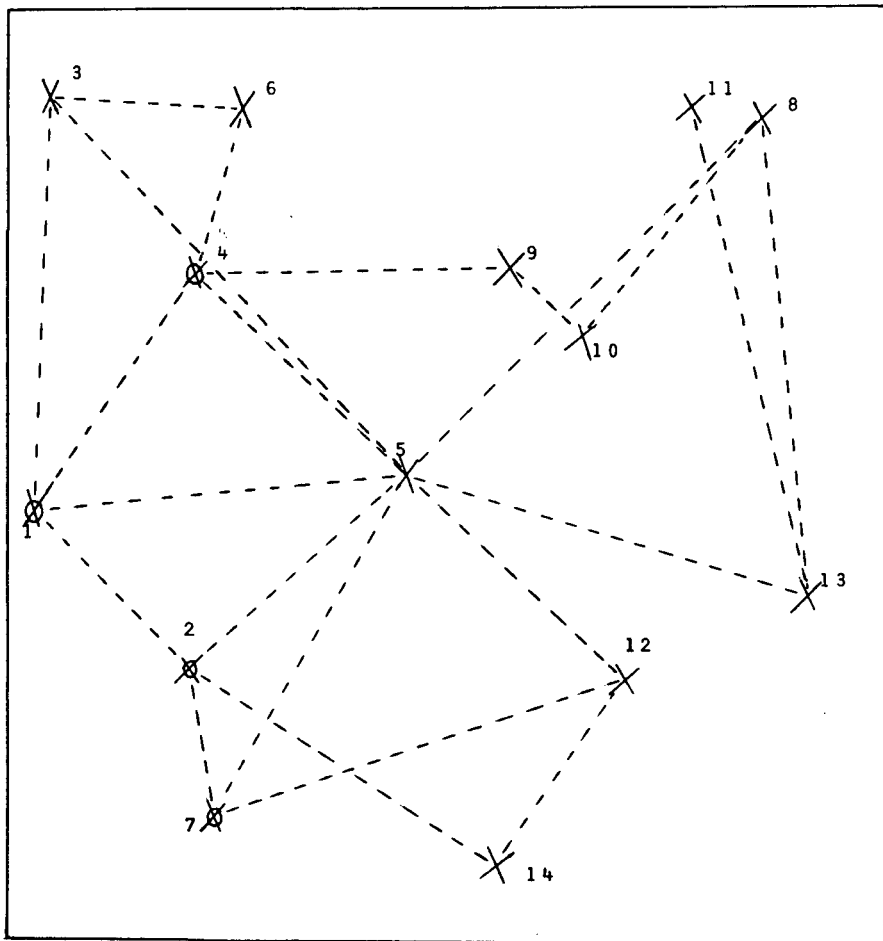


Figura 4.4

Os dados fornecidos para gerar as coordenadas fotográficas, estão resumidos no quadro nº 8.

Elementos de orientação interna		$f = 153,0 \text{ mm}$
		$x_o = 0,0 \text{ mm}$
		$y_o = 0,0 \text{ mm}$
Coeficientes da distorção radial simétrica		$K_1 = 3,6979 \times 10^{-7}$
		$K_2 = -1,5592 \times 10^{-10}$
		$K_3 = 1,2265 \times 10^{-14}$
Coeficientes da distorção descentrada		$P_1 = -5,7143 \times 10^{-7}$
		$P_2 = -4,1770 \times 10^{-7}$
Desvio padrão para as coordenadas fotográficas		0,001 mm
Número de pontos no terreno		14
Escala		1:8.000
Dimensão das placas negativas		23 X 23 cm
Número de fotografias		8
orientação externa da câmara		F.1 F.2 F.3 F.4 F.5 F.6 F.7 F.8
	ω	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0
	ϕ	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0
	κ	0,0 0,0 0,0 90,0 180,0 90,0 90,0 90,0
esquema do vôo		

Quadro 8

4.5.2.1 Calibração da Câmara

Nesta experiência o apoio de campo para o ajustamento foi feito utilizando apenas 6 coordenadas de pontos. São elas:

Ponto	1	X, Y, Z
Ponto	8	Z
Ponto	12	Y, Z

Além destas coordenadas, inserimos 21 distâncias como observações, as quais foram calculadas até a casa do centrímetro, e sem arredondamentos.

Os dados fornecidos para a calibração, estão resumidos no quadro nº 9.

Valores iniciais para os parâmetros		Variâncias
$f = 152,500$ $x_o = 0,001$ $y_o = 0,001$ $K_1 = 0,000$ $K_2 = 0,000$ $K_3 = 0,000$ $P_1 = 0,000$ $P_2 = 0,000$		$2,5 \times 10^{-1}$ $1,0 \times 10^{-6}$ $1,0 \times 10^{-6}$ $1,0 \times 10^{-4}$ $1,0 \times 10^{-4}$ $1,0 \times 10^{-4}$ $1,0 \times 10^{-4}$ $1,0 \times 10^{-4}$
Número de pontos por fotografia		F.1 7 F.2 14 F.3 8 F.4 8 F.5 14 F.6 7 F.7 6 F.8 8
VARIÂNCIAS	- para coordenadas de campo - da unidade de peso a priori - para coordenadas fotográficas - para distâncias	$1,0 \times 10^{-7}$ 1,0 $1,0 \times 10^{-6}$ $1,0 \times 10^{-4}$
Número de iterações		mínimo 2 máximo 5
Critérios de convergência	- angular - para calibração - para coordenadas	$1,0 \times 10^{-2}$ $1,0 \times 10^{-3}$ $1,0 \times 10^{-4}$

Quadro 9

4.5.2.2 Resultados Obtidos

a) Análise estatística

Convergência estabelecida após 3 iterações

Variância da unidade de peso a posteriori 1,6199

Qui-quadrado computado 131,2091

Graus de liberdade 81

Intervalo de confiança $\chi^2_{81(0,005)} = 51,973$

$\chi^2_{81(0,995)} = 117,518$

b) Constantes de calibração da câmara

$f = 152,9901 \text{ mm}$

$x_0 = 0,0009 \text{ mm}$

$y_0 = 0,0005 \text{ mm}$

$K_1 = 2,7425 \times 10^{-7}$

$K_2 = -1,3353 \times 10^{-10}$

$K_3 = 1,0860 \times 10^{-4}$

$P_1 = -5,9909 \times 10^{-7}$

$P_2 = -4,0564 \times 10^{-7}$

c) Matriz variância-covariância dos elementos de calibração, usando a variância da unidade de peso a priori

	f	x ₀	y ₀	K ₁	K ₂	K ₃	P ₁	P ₂
f	5,3535E-04							
x ₀	1,2779E-07	9,0690E-07						
y ₀	-2,1223E-07	-1,5876E-08	9,1381E-07					
K ₁	-2,3018E-11	2,9995E-13	-5,7614E-14	2,7544E-16				
K ₂	4,5375E-15	-3,6264E-17	5,0611E-18	-3,7666E-20	5,3179E-24			
K ₃	-1,5163E-19	1,3744E-21	-2,5175E-22	1,4858E-24	-2,1198E-28	8,5181E-33		
P ₁	4,6659E-11	7,6670E-12	-6,1153E-13	7,6017E-18	-6,7957E-22	4,1761E-26	1,4139E-15	
P ₂	-8,7906E-12	4,4134E-13	7,4439E-12	1,7326E-17	-3,8057E-21	1,7261E-25	5,6478E-17	1,2603E-15

d) Matriz das correlações entre os elementos de calibração

	f	x_0	y_0	K_1	K_2	K_3	P_1	P_2
f	0,1000D+01							
x_0	0,5800D-02	0,1000D+01						
y_0	-0,9595D-02	-0,1744D-01	0,1000D+01					
K_1	-0,5994D-01	0,1898D-01	-0,3632D-02	0,1000D+01				
K_2	0,8504D-01	-0,1651D-01	0,2296D-02	-0,9842D+00	0,1000D+01			
K_3	-0,7101D-01	0,1564D-01	-0,2853D-02	0,9700D+00	-0,9960D+00	0,1000D+01		
P_1	0,5363D-01	0,2141D+00	-0,1701D-01	0,1218D-01	-0,7837D-02	0,1203D-01	0,1000D+01	
P_2	-0,1070D-01	0,1305D-01	0,2193D+00	0,2941D-01	-0,4649D-01	0,5268D-01	0,4231D-01	0,1000D+01

4.5.3 Análise dos Resultados

Os resultados obtidos nas experiências realizadas com o método dos Campos Mistos não são comparáveis entre si. Isto porque cada uma delas possui características próprias tais como câmara utilizada, terreno, observações para o apoio, etc...

Mas, pelo fato de termos trabalhado apenas com simulações, para cada resultado obtido existe um padrão de comparação, que é o valor imposto para gerar as coordenadas fotográficas. Nestas condições, isto é, comparando os valores obtidos com os valores esperados, podemos observar que a menor precisão conseguida foi da ordem do centésimo do milímetro.

Nas avaliações estatísticas efetuadas, apenas a experiência nº 5 não passou no teste do qui-quadrado.

Outro detalhe que nos chamou a atenção, foi relativo às correlações entre as constantes da distorção radial simétrica. Somente na experiência nº 4, na qual foram utilizados dois campos, houve uma melhor separação entre os parâmetros da distorção radial simétrica.

A utilização de distâncias entre pontos de campo trouxe resultados bons em nossas simulações, o que, se realmente aprovado em testes reais, trará uma redução apreciável ao trabalho de campo.

5. CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

5 - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

A calibração de uma câmara fotogramétrica tem por objetivo principal a atualização das constantes da câmara. Esta é a primeira etapa do trabalho.

A segunda fase é a informação ao usuário dos resultados obtidos. Isto deve ser feito de modo simples e objetivo, de tal forma que as constantes de calibração possam ser corretamente utilizadas.

Analizando alguns certificados de calibração, observamos a complexidade na maneira pela qual estas informações são transmitidas. Assim, procuramos elaborar um modelo para certificado de calibração por métodos analíticos, que forneça não apenas as constantes da câmara calibrada, mas também as equações utilizadas na calibração.

Desta forma, para corrigir coordenadas de máquina, o usuário terá à sua disposição todos os conhecimentos necessários.

O modelo de certificado que foi elaborado será apresentado a seguir, a título de sugestão e como um alerta para a necessidade de modificação na maneira de fornecer ao usuário as informações obtidas com a calibração.

5.1 - SUGESTÃO PARA CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Câmara	:	SMK 120	Nº 113.872
Método utilizado	:	Câmaras Convergentes	
Data do vôo	:	02/02/80	
Escala	:	1:200	

Filme utilizado : AGFAPAN 25 PROFISSIONAL

Equações utilizadas :

$$x - x_0 = c \frac{\Delta X}{\Delta Z} + (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(x - x_0) \\ + P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2 xy$$

$$y - y_0 = c \frac{\Delta Y}{\Delta Z} + (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(y - y_0) \\ + 2P_1 xy + P_2(r^2 + 2y^2)$$

Resultados da calibração e respectivos erros padrões:

1) Distância principal calibrada

$$c = 59,9999 \text{ mm} \pm 1,2256 \times 10^{-3}$$

2) Coordenadas do ponto principal

$$x_0 = 0,0017 \text{ mm} \pm 7,2528 \times 10^{-4}$$

$$y_0 = 0,0014 \text{ mm} \pm 7,9126 \times 10^{-4}$$

3) Coeficientes da distorção radial simétrica

$$K_1 = 3,5479 \times 10^{-7} \pm 0,3235 \times 10^{-7}$$

$$K_2 = -1,5571 \times 10^{-10} \pm 0,1616 \times 10^{-10}$$

$$K_3 = 1,2962 \times 10^{-14} \pm 0,2783 \times 10^{-14}$$

4) Coeficientes da distorção descentrada:

$$P_1 = - 4,6123 \times 10^{-7} \pm 0,4955 \times 10^{-7}$$

$$P_2 = - 2,9465 \times 10^{-7} \pm 0,5594 \times 10^{-7}$$

Pode ser incluído ainda, desta vez como cópia do certificado original, as coordenadas das marcas fiduciais, abertura do diafragma, tipo de objetiva e os demais dados que nele constem.

6. CONCLUSÕES

6 - CONCLUSÕES

A calibração analítica mostrou vantagens em relação aos métodos de laboratório, no que diz respeito às distorções dos sistemas objetivos, por fornecer as constantes a serem aplicadas aos modelos escolhidos para representar cada uma das distorções. Isto possibilita a obtenção da correção exatamente para o ponto desejado e não a distorção média para a área que contém o ponto.

Os estudos realizados especificamente sobre o método das Câmaras Convergentes, nos levaram a concluir que:

- 1 - O método é de fácil aplicação por não necessitar de um campo pré-conhecido.
- 2 - Apenas a fixação arbitrária de uma estação de exposição é suficiente para a calibração da câmara.
- 3 - Sua aplicação é mais indicada para a calibração de câmaras fotogramétricas terrestres, pela grande rotação em ϕ exigida pelo método.

Já o método dos Campos Mistos apresenta mais dificuldades para a aplicação por necessitar de campos pré-estabelecidos.

Dos estudos realizados com o Método dos Campos Mistos, podemos concluir:

- 1 - Que é possível utilizá-lo com apenas um campo, desde que este satisfaça as exigências básicas do método.
- 2 - A inclusão de distâncias entre pontos de campo possibilita reduzir o apoio ao mínimo, ou seja, apenas o suficiente para definir o sistema de coordenadas.

- 3 - A utilização de dois campos pode conduzir a uma melhor separação entre os coeficientes da distorção radial simétrica, sem que isto contribua para a obtenção de resultados mais precisos.
- 4 - O método é ideal para câmaras fotogramétricas aéreas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - ABDEL-AZIZ, Youssef I. Asymmetrical lens distortion
Photogrammetric Engineering, 41(3): 337-40, Mar. 1975.
- 2 - ANDRADE, J.B. Camera calibration; further notes on method
of mixed ranges. Ohio, 1977. Inédito.
- 3 - BROWN, Duane C. Close range camera calibration.
Photogrammetric Engineering, 37(8): 855-66, Aug. 1971.
- 4 - ———. Decentering distortion of lenses. Photogrammetric
Engineering, 32(3): 444-62 May 1966.
- 5 - EISENHART, Churchill. Realistic evaluation of the
precision and accuracy of instrument calibration
systems. Journal of Research of the National Bureau of
Standards - C. Engineering and Instrumentation.
67C(2) : 161-87. Apr./Jun. 1963.
- 6 - GEMAEL, Camil. Ajustamento de observações geodésicas no-
ções de estatística. Curitiba, Universidade Federal do
Paraná - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas,
1975. 54 p.
- 7 - ———. Aplicações do cálculo matricial em geodésia; ajus-
tamento de observações. Curitiba, Universidade Federal
do Paraná - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodési-
cas, 1974. 92 p.
- 8 - KENEFIC, John F. et alii. Analytical self-calibration.
Photogrammetric Engineering, 38(11) : 1117-26, Nov.
1972.
- 9 - MERCHANT, Dean C. Calibration of the air photo system.
Photogrammetric Engineering, 40(5) : 605-17, May 1974.

- 10 - MERCHANT, Dean C. Elements of photogrammetry. Ohio, Ohio State University, 1963, 2 v.
- 11 - ———. System calibration for aerial analytical photogrammetry. 1979. Trabalho apresentado no IX Congresso Brasileiro de Cartografia, Curitiba, fev. 4-9, 1979.
- 12 - PACITTI, Tércio. Fortran-monitor; princípios. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico, 1968. 347 p.
- 13 - SWELL, Eldon D. Aerial cameras. In: AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. Manual of photogrammetry. 3ed. Washington, American Society of Photogrammetry, 1966. p. 133-94.

APÊNDICE

PROGRAMA 1 - gera coordenadas fotográficas

PROGRAMA 2 - calibra câmaras fotogramétricas

PROGRAMA 1

```

C      SD=STANDARD DEVIATION FOR FOTOGRAMMETRIC COORDINATES
C      SXD, SYD= COORDINATES OF THE PRINCIPAL POINT
C      CC= CAMERA CONSTANT
C      NS= NUMBER OF EXPOSURE STATIONS
C      NG= NUMBER OF GROUND CONTROL
C      XX,YY,ZZ = GROUND COORDINATES
C      XO , YO , ZO = COORDENADAS DA ESTACAO DE EXPOSICAO
C      OM = OMEGA EM GRAUS E FRACAO DE GRAU
C      FI = FI EM GRAUS E FRACAO DE GRAU
C      AKF = KAPPA EM GRAUS E FRACAO DE GRAU
DIMENSION FX(100),PY(100),XX(50),YY(50),ZZ(50),XO(50),YO(50),
      1ZO(50),OM(50),FI(50),AKF(50)
IX=9513
      BK1=0.369792945E-06
      BK2=-0.155926709E-09
      BK3=0.122655904E-13
      P1=-0.57143E-6
      P2=-0.41770E-6
      RAD=3.1415926535/180.0
      READ(2,100)SD
100  FORMAT(F10)
      READ(2,200)SXD,SYD,CC,NS,NG
200  FORMAT(3F,2I)
      OPEN(UNIT=3,DEVICE='DSK',FILE='PJ2.CDR')
      GO TO 19
      WRITE(3,201)
201  FORMAT(1H1)
      WRITE(3,202)
202  FORMAT(/,10X,'SYNTHETIC DATA FOR PHOTO CALIBRATION')
      WRITE(3,203)SXD,SYD,CC
203  FORMAT(/,5X,'SXD=',F10.5,/,5X,'SYD=',F10.5,/,5X,'CC=',F10.5)
19   READ(2,400)(XX(I),YY(I),ZZ(I),I=1,NG)
400  FORMAT(3F)
      GO TO 21
      WRITE(3,401)
401  FORMAT(/,10X,'GROUND COORDINATES'/10X,'POINT',10X,'X',15X,'Y',15X,
      1'Z')
21   WRITE(3,500)(I,XX(I),YY(I),ZZ(I),I=1,NG)
500  FORMAT(I5,5X,3F15.3)
      READ(2,300)(XO(I),YO(I),ZO(I),OM(I),FI(I),AKF(I),I=1,NS)
300  FORMAT(6F)
      DO 25 I=1,NS
      WRITE(3,301) I,XO(I),YO(I),ZO(I),OM(I),FI(I),AKF(I)
301  FORMAT(I5,2X,'0',3F12.2,3F7.2)
25   CONTINUE
      DO 10 I=1,NG
      AKF(I)=AKF(I)*RAD
      FI(I)=FI(I)*RAD
      OM(I)=OM(I)*RAD
      CK=COS(AKF(I))
      SK=SIN(AKF(I))
      CF=COS(FI(I))
      SF=SIN(FI(I))
      CW=COS(OM(I))
      SW=SIN(OM(I))
      DO 20 J=1,NG
      X=XX(J)
      Y=YY(J)
      Z=ZZ(J)

```

```

DX=CC*(X-X0(I))/(Z-Z0(I))
DY=CC*(Y-Y0(I))/(Z-Z0(I))
A1=DX*CF*CK
A2=DY*(CW*SK+SW*SF*CK)
A3=CC*(SW*SK-CW*SF*CK)
B1=-DX*CF*SK
B2=DY*(CW*CK-SW*SF*SK)
B3=CC*(SW*CK+CW*SF*SK)
C1=DX*SF
C2=-DY*SW*CF
C3=CC*CW*CF
SX=SX0+CC*(A1+A2+A3)/(C1+C2+C3)
SY=SY0+CC*(B1+B2+B3)/(C1+C2+C3)
R2=(SX-SX0)**2+(SY-SY0)**2
DX=(BK1*R2+BK2*R2**2+BK3*R2**3)*(SX-SX0)+P1*(R2+2*SX**2)+
12*P2*SX*SY
DY=(BK1*R2+BK2*R2**2+BK3*R2**3)*(SY-SY0)+2*P1*SX*SY+P2*
1(R2+2*SY**2)
SX=SX+DX
SY=SY+DY
IF(SD)30,50,30
30 CALL GAUSS(IX,SD,SX,V)
FX(J)=V
CALL GAUSS(IX,SD,SY,V)
PY(J)=V
GO TO 20
50 FX(J)=SX
PY(J)=SY
20 CONTINUE
GO TO 23
WRITE(3,402)
402 FORMAT(/,10X,'PHOTO COORDINATES',/,10X,'PHOTO',2X,'POINT',10X,
1'X',15X,'Y',10X,'ST DEV')
23 DO 10 J=1,NG
PXT=ABS(PX(J))
PYT=ABS(PY(J))
IF(PXT-112.5)39,39,10
39 IF(PYT-112.5)40,40,10
40 WRITE(3,403)I,J,PX(J),PY(J)
403 FORMAT(2I5,2F12.4)
10 CONTINUE
CLOSE(UNIT=3)
STOP
END

```

PROGRAMA 2

```

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON/INTEGR/ MAXIT,NSIZ,NPHOTO,NSRV,NCC,NOB,NG,ICON,ITER,MX,
      INTERN,MINIT,MCO,NCO,MDIST,NDIST,IREFR
COMMON/INTCON/ MSRV
COMMON/REAL8/ VPV,PF,DA,DS,CX,CY,F,SZZ,DR,PCX,PCY,PF,CXB,CYB,FB,DC
      1,CK1,CK2,CK3,CP1,CP2,FK1,FK2,FK3,PF1,PF2,CK1B,CK2B,CK3B,
      2CP1B,CP2B
COMMON/ROTAIT/ R(3,3),T(6)
C*****
C
C-----INSTRUCTIONS TO CHANGE DIMENSIONS
C
C-----NPF(NPH)=NUMBER DE PTS IN A PARTICULAR PHOTO
C-----WHERE
C-----          NPH= TOTAL NUMBER OF PHOTOS
C-----NUMPT(NPH,MX)= PHOTO POINT NUMBER
C-----          NPH= TOTAL NUMBER OF PHOTOS
C-----          MX= MAX. NUMBER OF POINTS IN A SINGLE PHOTO
C-----LSP(L)= CONTROL POINT NUMBER
C-----          L= NUMBER OF CONTROL POINTS
C-----KODE(NG) =
C-----          0 - POINT IS FREE VARIABLE
C-----          1 - Z IS WEIGHTED
C-----          2 - X & Y ARE WEIGHTED
C-----          4 - Y & Z ARE WEIGHTED
C-----          3 - X, Y, Z ARE WEIGHTED
C-----          NG= NUMBER OF GROUND POINTS
C-----INTEGER CODE(NPH),LCO(NPH),LDIST(NDIST,2)
C-----WHERE
C-----          CODE(NPH)=
C-----          0 - EXT. ORIENT. ARE FREE VARIABLES
C-----          1 - EXT. ORIENT. ARE WEITED
C-----          NPH = NUMBER OF PHOTOS
C      LCO=NUM. DE FOTOS CUJAS COORD. DA EST. SAO CONHECIDAS
C-----OBS. IF CODE(NPH)=0 FOR ALL PHOTOS - LCO(1) ECONOMIZE SPACE
C-----LDIST(NDIST,2)= GROUND POINT FROM WHERE DIST. WAS MEAS.
C-----          NDIST = NUMBER OF DISTANCES
C-----REAL*8 A(NV,NV),U(NV),X(NV),OMEGA(NPH),PHI(NPH),KAPPA(NPH)
C----- NV= TOTAL NUMBER OF VARIABLES (WEITED OR NOT)
C-----NPH= TOTAL NUMBER OF PHOTOS
C-----REAL*8XC(NPH),YC(NPH),ZC(NPH),XG(NG),YG(NG),ZG(NG)
C-----NPH= NUMBER OF PHOTOS
C-----NG= NUMBER OF GROUND POINTS
C-----REAL*8 XP(NPH,MX),YP(NPH,MX),FG(NPH,3),GOB(NG,3)
C-----REAL*8 PDIST(NDIST),DIST(NDIST),COB(NPH,6),PC(NPH,6)
C-----OBS. HERE NPH=1 IF EXT. OR. ARE FREE VARIABLE IN ALL PHOTOS
C
C*****
      DIMENSION NPF(9),NUMPT(9,16),LSP(7),KODE(16)
      INTEGER CODE(9),LCO(1),LDIST(1,2)
      REAL*8 A(103,103),U(103),X(103),OMEGA(9),PHI(9),KAPPA(9)
      REAL*8 XC(9),YC(9),ZC(9),XG(16),YG(16),ZG(16)
      REAL*8 XP(9,16),YP(9,16),FG(9,3),GOB(16,3)
      REAL*8 PDIST(1),DIST(1),COB(1,6),PC(1,6)
      MCO=1
      MDIST=1
      MSRV=1
C
C READ NUMBER OF: PHOTOS, GROUND POINTS, POINTS PER PHOTO (MAXIMUM),
      POINTS WITH OBSERVED SURVEY COORDINATES, PHOTOS WITH
      OBSERVED EXTERIOR ORIENTATION, AND DISTANCES OBSERVE
      BETWEEN GROUND POINTS

```

```

READ(2,500) NPHOTO,NG,MX,NSRV,NCO,NDIST
IF(NCO.EQ.0) MCO=0
IF(MCO.EQ.0) NCO=1
IF(NDIST.EQ.0) MDIST=0
IF(MDIST.EQ.0) NDIST=1
  IF(NSRV.EQ.0) MSRV=0
  IF(MSRV.EQ.0) NRSV=1
CALL INPUT(NPF,NUMPT,LSP,KODE,CODE,LCO,LDIST,OMEGA,PHI,KAPPA,
  XC,YC,ZC,XG,YG,ZG,XP,YP,PG,GOB,PDIST,DIST,COB,PC)
CALL BLOCK(NPF,NUMPT,LSP,CODE,KODE,LCO,LDIST,A,U,X,OMEGA,PHI,
  KAPPA,XC,YC,ZC,XG,YG,ZG,XP,YP,PG,GOB,PDIST,DIST,COB,PC)
CALL OUTPUT(NPF,NUMPT,LSP,KODE,CODE,LCO,LDIST,OMEGA,PHI,KAPPA,
  XC,YC,ZC,XG,YG,ZG,XP,YP,GOB,DIST,COB,A)
STOP
500 FORMAT(16I)
END
SUBROUTINE INPUT(NPF,NUMPT,LSP,KODE,CODE,LCO,LDIST,OMEGA,PHI,
  KAPPA,XC,YC,ZC,XG,YG,ZG,XP,YP,PG,GOB,PDIST,DIST,COB,PC)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON/INTEGR/ MAXIT,NSIZ,NPHOTO,NSRV,NCC,NOB,NG,ICON,ITER,MX,
  INTERN,MINIT,MCO,NCO,MDIST,NDIST,IREFR
COMMON/INTCON/MSRV
COMMON/REAL8/ VPU,PP,DA,DS,CX,CY,F,SZZ,DR,PCX,PCY,PF,CXB,CYB,FB,DC
  1,CK1,CK2,CK3,CP1,CP2,PK1,PK2,PK3,PP1,PP2,CK1B,CK2B,CK3B,
  2CP1B,CP2B
DIMENSION NPF(NPHOTO),NUMPT(NPHOTO,MX),LSP(NSRV),KODE(NG)
INTEGER CODE(NPHOTO),LCO(NCO),LDIST(NDIST,2)
REAL*8 PG(NSRV,3),GOB(NSRV,3),OMEGA(NPHOTO)
REAL*8 PHI(NPHOTO),KAPPA(NPHOTO),XC(NPHOTO),YC(NPHOTO),ZC(NPHOTO)
REAL*8 XG(NG),YG(NG),ZG(NG),XP(NPHOTO,MX),YP(NPHOTO,MX)
REAL*8 PDIST(NDIST),DIST(NDIST),COB(NCO,6),PC(NCO,6)
DR=57.2957795131D0
C
C READ GROUND COORDINATES (OBSERVED AND/OR APPROXIMATE)
C
  DO 5 I=1,NG
  READ(2,500) NPT,KODE(NPT),XG(NPT),YG(NPT),ZG(NPT)
  5 CONTINUE
C
C READ EXTERIOR ORIENTATION (OBSERVED AND/OR APPROXIMATE)
C
  DO 10 I=1,NPHOTO
  READ(2,500) NPH,CODE(NPH),XC(NPH),YC(NPH),ZC(NPH),OMEGA(NPH),
  PHI(NPH),KAPPA(NPH)
  10 NPF(I)=0
  IF(MSRV.EQ.0) GO TO 32
C
C FIND CONTROL POINTS
C
  L=1
  DO 15 I=1,NG
  IF(KODE(I).EQ.0) GO TO 15
  LSP(L)=I
  L=L+1
  15 CONTINUE
C
C READ OBSERVED GROUND POINT COORDINATE VARIANCES
C
  DO 30 I=1,NSRV
  READ(2,500) IDUMMY,NPT,VX,VY,VZ
  DO 20 J=1,NSRV
  IF(NPT.EQ.LSP(J)) GO TO 25
  20 CONTINUE
  WRITE(3,600) NPT
  STOP

```

```

25 PG(J,1)=VX
   PG(J,2)=VY
30 PG(J,3)=VZ
32   CONTINUE
   IF(MCO,EQ.0) GO TO 65
C
C FIND PHOTOS WITH OBSERVED EXTERIOR ORIENTATION
C
   L=1
   DO 35 I=1,NPHOTO
   IF(CODE(I),EQ.0) GO TO 35
   LCO(L)=I
   COB(L,1)=OMEGA(I)/DR
   COB(L,2)=PHI(I)/DR
   COB(L,3)=KAPPA(I)/DR
   COB(L,4)=XC(I)
   COB(L,5)=YC(I)
   COB(L,6)=ZC(I)
   L=L+1
35 CONTINUE
C
C READ OBSERVED EXTERIOR ORIENTATION VARIANCES
C
   DO 60 I=1,NCO
   READ(2,500) IDUMMY,NPH,V1,V2,V3,VX,VY,VZ
   DO 40 J=1,NCO
   IF(NPH,EQ.LCO(J)) GO TO 45
40 CONTINUE
   WRITE(3,601) NPH
   STOP
45 CONTINUE
   PC(J,1)=V1
   PC(J,2)=V2
   PC(J,3)=V3
   PC(J,4)=VX
   PC(J,5)=VY
60 PC(J,6)=VZ
65 IF(MDIST,EQ.0) GO TO 75
C
C READ OBSERVED DISTANCES BETWEEN GROUND POINTS AND THEIR VARIANCES
C
   DO 70 L=1,NDIST
70 READ(2,500) LDIST(L,1),LDIST(L,2),DIST(L),PDIST(L)
C
C READ PHOTO COORDINATE OBSERVATIONS
C
75 READ(2,500) NPH,NPT,PX,PY
   IF(NPT,EQ.0) GO TO 80
   NPP(NPH)=NPP(NPH)+1
   J=NPP(NPH)
   NUMPT(NPH,J)=NPT
   XP(NPH,J)=PX
   YP(NPH,J)=PY
   GO TO 75
C
C READ INTERIOR ORIENTATION AND CONVERGENCE CRITERIA
C
   IREFR=0 REFRACAO NAO SERA CALCULADA
   =1 REFRACAO SERA CALCULADA
   INTERN=0 ORIENT. INT. NAO SERA CALCULADA
   =1 ORIENT. INT. SERA CALCULADA
C
   CX,CY,F,PCX,PCY,PF=OR. INTERNA E RESPECTIVAS VARIANCIAS
   CK1,CK2,CK3,CP1,CP2=VAL. INICIAIS P/ COEF. DE DISTORCOES
   PK1,PK2,PK3,PC1,PC2=VARIANCIAS P/OS COEF. DE DISTORCOES
   DA,DC,DS =CRIT. DE CONVERG.: ANGULAR, P/CALIBRACAO E PARA
   COORDENADAS
C
   SZZ,VP =VAR. A PRIORI E VAR. PARA COOR. FOTOGRAFICAS

```

```

80 READ(2,500) IREFR,INTERN,CX,CY,F,PCX,PCY,PF
   READ(2,501) CK1,CK2,CK3,CP1,CP2,PK1,PK2,PK3,PP1,PP2
   READ(2,500) IDUMMY, IDUMMY, DA, DC, DS, SZZ, VF
   MINIT=1
   MAXIT=5
C
C LIST INPUT DATA
C
   WRITE(3,602)
   L=1
   DO 100 I=1,NG
   IF(KODE(I).EQ.0) GO TO 95
   IF(KODE(I).EQ.1) WRITE(3,603) I,KODE(I),XG(I),YG(I),ZG(I),PG(L,3)
   IF(KODE(I).EQ.2) WRITE(3,604) I,KODE(I),XG(I),YG(I),ZG(I),
   .                               PG(L,1),PG(L,2)
   IF(KODE(I).EQ.3) WRITE(3,604) I,KODE(I),XG(I),YG(I),ZG(I),
   .                               (PG(L,K),K=1,3)
   IF(KODE(I).EQ.4) WRITE(3,617) I,KODE(I),XG(I),YG(I),ZG(I),PG(L
   2,2),PG(L,3)
   L=L+1
   GO TO 100
95 WRITE(3,603) I,KODE(I),XG(I),YG(I),ZG(I)
100 CONTINUE
C
   L=1
   DO 125 I=1,NPHOTO
   WRITE(3,605) I
   IF(CODE(I).EQ.0) GO TO 105
   IF(CODE(I).LT.4) GO TO 105
   WRITE(3,606) OMEGA(I),PC(L,1),PHI(I),PC(L,2),KAPPA(I),PC(L,3)
   GO TO 110
105 WRITE(3,607) OMEGA(I),PHI(I),KAPPA(I)
   IF(CODE(I).EQ.0) GO TO 115
110 IF(CODE(I).EQ.1) WRITE(3,608) XC(I),YC(I),ZC(I),PC(L,6)
   IF(CODE(I).EQ.2) WRITE(3,609) XC(I),PC(L,4),YC(I),PC(L,5),ZC(I)
   IF(CODE(I).GE.3) WRITE(3,609) XC(I),PC(L,4),YC(I),PC(L,5),
   .                               ZC(I),PC(L,6)
   L=L+1
   GO TO 120
115 WRITE(3,608) XC(I),YC(I),ZC(I)
120 LOOP=NPF(I)
   WRITE(3,610)
   DO 125 J=1,LOOP
125 WRITE(3,616) NUMPT(I,J),XP(I,J),YP(I,J)
C
   IF(MDIST.EQ.0) GO TO 135
   WRITE(3,611)
   DO 130 I=1,NDIST
130 WRITE(3,612) LDIST(I,1),LDIST(I,2),DIST(I),PDIST(I)
135 IF(INTERN.EQ.0) WRITE(3,613) F,CX,CY
   IF(INTERN.EQ.1) WRITE(3,614) F,PF,CX,PCX,CY,PCY
   IF(INTERN.EQ.1) WRITE(3,502) CK1,PK1,CK2,PK2,CK3,PK3,CP1,PP1,
   .   1CP2,PP2
   WRITE(3,615) MINIT,MAXIT,DA,DC,DS,SZZ,VF
C
C STORE OBSERVED VALUES OF PARAMETERS AND FORM WEIGHTS
C
   FB=F
   CXB=CX
   CYB=CY
   CK1B=CK1
   CK2B=CK2
   CK3B=CK3

```

```

    CP1B=CP1
    CP2B=CP2
    PF=SZZ/VP
    NCC=6*NPHOTO
    NSIZ=NCC+3*NG
    NOB=0
    DA=DA/DR

```

C

```

    DO 140 I=1,NPHOTO
    OMEGA(I)=OMEGA(I)/DR
    PHI(I)=PHI(I)/DR
    KAPPA(I)=KAPPA(I)/DR
    IF(CODE(I).EQ.4) NOB=NOB+2
140 NOB=NOB+CODE(I)+2*NPF(I)

```

C

```

    IF(MCO.EQ.0) GO TO 165
    DO 160 I=1,NCO
    J=LCO(I)
    IF(CODE(J).LT.4) GO TO 150
    DO 145 K=1,3
145 FC(I,K)=SZZ*DR*DR/PC(I,K)
150 IF(CODE(J).EQ.1) GO TO 155
    FC(I,4)=SZZ/PC(I,4)
    FC(I,5)=SZZ/PC(I,5)
    IF(CODE(J).EQ.2) GO TO 160
155 FC(I,6)=SZZ/PC(I,6)
160 CONTINUE
165 DO 170 I=1,NG
    IF(KODE(I).EQ.4) NOB=NOB-2
170 NOB=NOB+KODE(I)
    DO 180 I=1,NSRV
    J=LSF(I)
    GOB(I,1)=XG(J)
    GOB(I,2)=YG(J)
    GOB(I,3)=ZG(J)
    IF(KODE(J).EQ.2) GO TO 175
    PG(I,3)=SZZ/PG(I,3)
    IF(KODE(J).EQ.1) GO TO 180
    IF(KODE(J).EQ.4) GO TO 176
175 PG(I,1)=SZZ/PG(I,1)
176 PG(I,2)=SZZ/PG(I,2)
180 CONTINUE
    IF(MDIST.EQ.0) GO TO 190
    NOB=NOB+NDIST
    DO 185 I=1,NDIST
185 PDIST(I)=SZZ/PDIST(I)
190 IF(INTERN.EQ.0) GO TO 195
    NOB=NOB+8
    NSIZ=NSIZ+8
    PF=SZZ/PF
    FCX=SZZ/PCX
    PCY=SZZ/PCY
    PK1=SZZ/PK1
    PK2=SZZ/PK2
    PK3=SZZ/PK3
    PP1=SZZ/PP1
    PP2=SZZ/PP2
195 IF(IREFR.EQ.0) RETURN
    NSIZ=NSIZ+1
    RETURN

```

```
500 FORMAT(2I,6F)
```

```
600 FORMAT('1',3(80('*')),//,20X,'ERROR:  KODE IS EQUAL TO ZERO FOR',
.      ' POINT',I5,/,3(80('*')),/)
601 FORMAT('1',3(80('*')),//,20X,'ERROR:  CODE IS EQUAL TO ZERO FOR',
.      ' PHOTO',I5,/,3(80('*')),/)

```

```

602 FORMAT('1',////,30X,'INPUT PASS POINT COORDINATES AND VARIANCES',
,
, //,21X,'POINT',2X,'KODE',10X,'X',14X,'Y',14X,'Z',12X,
,
, 'VAR(X)',09X,'VAR(Y)',09X,'VAR(Z)')
603 FORMAT('0',20X,2I5,3F15.4,30X,1PD15.4)
604 FORMAT('0',20X,2I5,3F15.4,3(1PD15.4))
605 FORMAT('1',////,20X,'INPUT DATA: PHOTO',I3,/,51X,'VARIANCE',/)
501 FORMAT(10F)
502 FORMAT(' ',/,20X,'K1=',F12.4,1PD15.4,/,20X,'K2=',F12.4,1PD15
1.4,/,20X,'K3=',F12.4,1PD15.4,/,20X,'P1=',F12.4,1PD15.4,/,20
2X,'P2=',F12.4,1PD15.4)
606 FORMAT(' ',20X,'OMEGA=',F12.2,1PD20.4,/,23X,'PHI=',0FF12.2,
,
, 1PD20.4,/,21X,'KAPPA=',0FF12.2,1PD20.4)
607 FORMAT(' ',20X,'OMEGA=',F12.2,/,23X,'PHI=',F12.2,/,21X,'KAPPA=',
,
, F12.2)
608 FORMAT(' ',23X,'XC=',F12.2,/,24X,'YC=',F12.2,/,24X,'ZC=',
,
, F12.2,1PD20.4)
609 FORMAT(' ',23X,'XC=',F12.2,1PD20.4,/,24X,'YC=',0FF12.2,1PD20.4,
,
, /,24X,'ZC=',0FF12.2,1PD20.4)
610 FORMAT('0',25X,'PHOTO COORDINATES',/,21X,'POINT',11X,'X',14X,'Y')
611 FORMAT('1',////,20X,'OBSERVED DISTANCES AND VARIANCES',/,
,
, 21X,'FROM TO',4X,'DISTANCE',7X,'VARIANCE')
612 FORMAT('0',19X,2I5,F12.2,1PD15.4)
613 FORMAT('1',////,20X,'CAMERA CALIBRATION CONSTANTS',/,21X,'F=',
,
, F12.4,/,21X,'X=',F12.4,/,21X,'Y=',F12.4,/)
614 FORMAT('1',////,20X,'CAMERA CALIBRATION OBSERVATIONS',/,40X,
,
, 'VARIANCE',/,21X,'F=',F12.4,1PD15.4,/,21X,'X=',0FF12.4,
,
, 1PD15.4,/,21X,'Y=',0FF12.4,1PD15.4)
615 FORMAT('-',30X,'MINIMUM ITERATIONS=',I3,/,31X,'MAXIMUM',
,
, 'ITERATIONS=',I3,/,30X,'ANGULAR CONVERGENCE=',1PD12.4,/,
,
, 26X,'CALIBRATION CONVERGENCE=',1PD12.4,/,27X,'COORDINATE',
,
, 'CONVERGENCE=',1PD12.4,/,17X,'A PRIORI VARIANCE OF UNIT',
,
, 'WEIGHT=',1PD12.4,/,24X,'PHOTO COORDINATE VARIANCE=',
,
, 1PD12.4)
616 FORMAT('0',19X,I5,2F15.4)
617 FORMAT('0',20X,2I5,3F15.4,15X,2(1PD15.4))
END
SUBROUTINE BLOCK(NFP,NUMPT,LSP,CODE,KODE,LCO,LDIST,A,U,X,OMEGA,PHI
,
, KAPPA,XC,YC,ZC,XG,YG,ZG,XP,YF,PG,GOB,PDIST,DIST,COB,PC)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON/INTEGR/ MAXIT,NSIZ,NPHOTO,NSRV,NCC,NOB,NG,ICON,ITER,MX,
,
, INTERN,MINIT,MCO,NCO,MDIST,NDIST,IREFR
COMMON/INTCON/ MSRV
COMMON/REAL8/ VPV,FP,DA,DS,CX,CY,F,SZZ,DR,PCX,PCY,FF,CXB,CYB,FB,DC
1,CK1,CK2,CK3,CP1,CP2,PK1,PK2,PK3,PP1,PP2,CK1B,CK2B,CK3B,
2CP1B,CP2B
COMMON/ROTAIT/ R(3,3),T(6)
COMMON/REFRA/AKR
DIMENSION NFP(NPHOTO),NUMPT(NPHOTO,MX),LSP(NSRV)
INTEGER CODE(NPHOTO),LCO(NCO),LDIST(NDIST,2),LD(6),KODE(NG)
REAL*8 A(NSIZ,NSIZ),U(NSIZ),X(NSIZ),OMEGA(NPHOTO)
REAL*8 PHI(NPHOTO),KAPPA(NPHOTO),XC(NPHOTO),YC(NPHOTO),ZC(NPHOTO)
REAL*8 XG(NG),YG(NG),ZG(NG),XP(NPHOTO,MX),YF(NPHOTO,MX)
REAL*8 PG(NSRV,3),GOB(NSRV,3),PD(15)
REAL*8 PDIST(NDIST),DIST(NDIST),COB(NCO,6),PC(NCO,6)
C
C AKR=0.D0
C DO 110 ITER=1,MAXIT
C VPV=0
C
C CLEAR NORMALS
C
C CALL NITIAL(A,U,NSIZ)
C
C DO 5 IP=1,NPHOTO

```

```

C COMPUTE ROTATION MATRIX
C
C CALL ROTATE(OMEGA(IP),PHI(IP),KAPPA(IP))
C
C ADD PHOTO COORDINATE OBSERVATIONS TO NORMALS
C
C LOOP=NPF(IP)
C
C PROJECTING TO THE SYNTHETIC PHOTO
C
C IF(IREFR.EQ.0) GO TO 6
C IF(ITER.EQ.1) GO TO 6
C IF(ITER.GT.2) GO TO 6
C DO 4 JL=1,LOOP
C Q1=R(1,3)*(XP(IP,JL)-CX)+R(2,3)*(YP(IP,JL)-CY)-R(3,3)*F
C XPR=-F*(R(1,1)*(XP(IP,JL)-CX)+R(2,1)*(YP(IP,JL)-CY)-R(3,1)*F)/Q1
C YPR=-F*(R(1,2)*(XP(IP,JL)-CX)+R(2,2)*(YP(IP,JL)-CY)-R(3,2)*F)/Q1
C CX=0.DO
C CY=0.DO
C XP(IP,JL)=XPR
4 YP(IP,JL)=YPR
C OMEGA(IP)=0.DO
C PHI(IP)=0.DO
C KAPPA(IP)=0.DO
C CALL ROTATE(OMEGA(IP),PHI(IP),KAPPA(IP))
C AKR=0.DO
6 DO 5 JL=1,LOOP
C JPT=NUMPT(IP,JL)
C DX=XG(JPT)-XC(IP)
C DY=YG(JPT)-YC(IP)
C DZ=ZG(JPT)-ZC(IP)
C Q=R(3,1)*DX+R(3,2)*DY+R(3,3)*DZ
C Q2=Q*Q
C RR=R(1,1)*DX+R(1,2)*DY+R(1,3)*DZ
C S=R(2,1)*DX+R(2,2)*DY+R(2,3)*DZ
C CM1=XP(IP,JL)-CX
C CM2=YP(IP,JL)-CY
C RQ=CM1**2+CM2**2
C PD(1)=-F*(Q*(DY*R(1,3)-DZ*R(1,2))-RR*(DY*R(3,3)-DZ*R(3,2)))/Q2
C PD(2)=-F*(Q*(DX*T(2)*T(6)-DY*T(1)*T(5)*T(6)+DZ*T(4)*T(5)*T(6))
C +RR*(DX*T(5)+DY*T(1)*T(2)-DZ*T(4)*T(2)))/Q2
C PD(3)=F*S/Q
C PD(4)=-F*(Q*R(1,1)-RR*R(3,1))/Q2
C PD(5)=-F*(Q*R(1,2)-RR*R(3,2))/Q2
C PD(6)=-F*(Q*R(1,3)-RR*R(3,3))/Q2
C PD(7)=RR/Q
C PD(8)=-1+CM1**2*(2*CK1+4*CK2*RQ+6*CK3*RQ**2)+CK1*RQ+CK2*RQ**2+
C 1CK3*RQ**3+2*CF1*CM1
C PD(9)=CM1*(2*CK1+4*CK2*RQ+6*CK3*RQ**2)*CM2+2*CF1*CM2
C PD(10)=-RQ*CM1
C PD(11)=-RQ**2*CM1
C PD(12)=-RQ**3*CM1
C PD(13)=-RQ-2*XP(IP,JL)**2
C PD(14)=-2*XP(IP,JL)*YP(IP,JL)
C PD(15)=-((XP(IP,JL)**2+YP(IP,JL)**2)/F**2)*XP(IP,JL)
C FR=-CM1-F*RR/Q+CM1*(CK1*RQ+CK2*RQ**2+CK3*RQ**3)+(CF1*(RQ+2*XP
C 1(IP,JL)**2)+2*CF2*XP(IP,JL)*YP(IP,JL))
C IF(IREFR.EQ.1) FR=FR-AKR*PD(15)
C VPV=VPV+FR*FP*FR
C CALL NORMAL(A,U,PD,FR,FP,IP,JPT,NSIZ,NCC,INTERN,IREFR)
C
C PD(1)=F*(Q*(-DY*R(2,3)+DZ*R(2,2))+S*(DY*R(3,3)-DZ*R(3,2)))/Q2
C PD(2)=-F*(-Q*(DX*T(2)*T(3)-DY*T(1)*T(5)*T(3)+DZ*T(4)*T(5)*T(3))
C +S*(DX*T(5)+DY*T(1)*T(2)-DZ*T(4)*T(2)))/Q2

```

```

PD(3)=-F*RR/Q
PD(4)=-F*(QR(2,1)-S*R(3,1))/Q2
PD(5)=-F*(QR(2,2)-S*R(3,2))/Q2
PD(6)=-F*(QR(2,3)-S*R(3,3))/Q2
PD(7)=S/Q
  PD(8)=CM1*(2*CK1+4*CK2*RQ+6*CK3*RQ**2)*CM2+2*CF2*CM1
  PD(9)=-1+CM2**2*(2*CK1+4*CK2*RQ+6*CK3*RQ**2)+CK1*RQ+CK2*RQ**
  12+CK3*RQ**3+2*CF2*CM2
  PD(10)=-RQ*CM2
  PD(11)=-RQ**2*CM2
  PD(12)=-RQ**3*CM2
  PD(13)=-2*XF(IP,JL)*YF(IP,JL)
  PD(14)=-RQ-2*YF(IP,JL)**2
  PD(15)=-((XF(IP,JL)**2+YF(IP,JL)**2)/F**2))*YF(IP,JL)
  FR=-CM2-F*S/Q+CM2*(CK1*RQ+CK2*RQ**2+CK3*RQ**3)+2*CF1*XF(IP,JL)
  1*YF(IP,JL)+CF2*(RQ+2*YF(IP,JL)**2)
  IF(IREFR.EQ.1) FR=FR-AKR*PD(15)
  VPV=VPV+FR*PF*FR
5 CALL NORMAL(A,U,PD,FR,PF,IP,JPT,NSIZ,NCC,INTERN,IREFR)

```

C
C
C
C

ADD SURVEY COORDINATE OBSERVATIONS TO NORMALS

```

DO 10 I=1,NSRV
  JC=LSP(I)
  K=NCC+3*(JC-1)
  IF(KODE(JC).EQ.1) GO TO 7
  IF(KODE(JC).EQ.4) GO TO 8
  A(K+1,K+1)=A(K+1,K+1)+PG(I,1)
  FR=GOB(I,1)-XG(JC)
  U(K+1)=U(K+1)+FR*PG(I,1)
  VPV=VPV+FR*FR*PG(I,1)
8 A(K+2,K+2)=A(K+2,K+2)+PG(I,2)
  FR=GOB(I,2)-YG(JC)
  U(K+2)=U(K+2)+FR*PG(I,2)
  VPV=VPV+FR*FR*PG(I,2)
  IF(KODE(JC).EQ.2) GO TO 10
7 A(K+3,K+3)=A(K+3,K+3)+PG(I,3)
  FR=GOB(I,3)-ZG(JC)
  U(K+3)=U(K+3)+FR*PG(I,3)
  VPV=VPV+FR*FR*PG(I,3)
10 CONTINUE

```

C
C
C
C

IF(INTERN.EQ.0) GO TO 15

ADD INTERIOR ORIENTATION OBSERVATIONS TO NORMALS

```

NSI1=NSIZ
IF(IREFR.EQ.0) NSI1=NSIZ+1
A(NSI1-8,NSI1-8)=A(NSI1-8,NSI1-8)+PF
A(NSI1-7,NSI1-7)=A(NSI1-7,NSI1-7)+PCX
A(NSI1-6,NSI1-6)=A(NSI1-6,NSI1-6)+PCY
  A(NSI1-5,NSI1-5)=A(NSI1-5,NSI1-5)+PK1
  A(NSI1-4,NSI1-4)=A(NSI1-4,NSI1-4)+PK2
  A(NSI1-3,NSI1-3)=A(NSI1-3,NSI1-3)+PK3
  A(NSI1-2,NSI1-2)=A(NSI1-2,NSI1-2)+PF1
  A(NSI1-1,NSI1-1)=A(NSI1-1,NSI1-1)+PF2
U(NSI1-8)=U(NSI1-8)+PF*(FB-F)
U(NSI1-7)=U(NSI1-7)+PCX*(CXB-CX)
U(NSI1-6)=U(NSI1-6)+PCY*(CYB-CY)
  U(NSI1-5)=U(NSI1-5)+PK1*(CK1B-CK1)
  U(NSI1-4)=U(NSI1-4)+PK2*(CK2B-CK2)
  U(NSI1-3)=U(NSI1-3)+PK3*(CK3B-CK3)
  U(NSI1-2)=U(NSI1-2)+PF1*(CF1B-CF1)
  U(NSI1-1)=U(NSI1-1)+PF2*(CF2B-CF2)

```

```

      VPV=VPV+FF*(FB-F)**2+FCX*(CXB-CX)**2+FCY*(CYB-CY)**2
      VPV=VPV+FK1*(CK1B-CK1)**2+FK2*(CK2B-CK1)**2+FK3*(CK3B-CK3)**2+
      1FF1*(CF1B-CF1)**2+FF2*(CF1B-CF1)**2
15 IF(MDIST.EQ.0) GO TO 25
C
C
C ADD GROUND DISTANCE OBSERVATIONS TO NORMALS
C
      DO 20 L=1,NDIST
      I=LDIST(L,1)
      J=LDIST(L,2)
      S=DSQRT((XG(I)-XG(J))**2+(YG(I)-YG(J))**2+(ZG(I)-ZG(J))**2)
      PD(1)=(XG(I)-XG(J))/S
      PD(2)=(YG(I)-YG(J))/S
      PD(3)=(ZG(I)-ZG(J))/S
      PD(4)=-PD(1)
      PD(5)=-PD(2)
      PD(6)=-PD(3)
      LD(1)=NCC+3*I-2
      LD(2)=LD(1)+1
      LD(3)=LD(2)+1
      LD(4)=NCC+3*J-2
      LD(5)=LD(4)+1
      LD(6)=LD(5)+1
      FR=DIST(L)-S
      VPV=VPV+FR*FR*PDIST(L)
      DO 20 I=1,6
      U(LD(I))=U(LD(I))+PD(I)*PDIST(L)*FR
      DO 20 J=1,6
20 A(LD(I),LD(J))=A(LD(I),LD(J))+PD(I)*PD(J)*PDIST(L)
25 IF(MCO.EQ.0) GO TO 50
C
C
C ADD EXTERIOR ORIENTATION OBSERVATIONS TO NORMALS
C
      DO 45 I=1,NCO
      J=LCO(I)
      K=6*(J-1)
      JCODE=CODE(I)
      GO TO (40,35,35,30),JCODE
30 A(K+1,K+1)=A(K+1,K+1)+FC(I,1)
      FR=COB(I,1)-OMEGA(J)
      U(K+1)=U(K+1)+FR*FC(I,1)
      VPV=VPV+FR*FR*FC(I,1)
      A(K+2,K+2)=A(K+2,K+2)+FC(I,2)
      FR=COB(I,2)-PHI(J)
      U(K+2)=U(K+2)+FR*FC(I,2)
      VPV=VPV+FR*FR*FC(I,2)
      A(K+3,K+3)=A(K+3,K+3)+FC(I,3)
      FR=COB(I,3)-KAPPA(J)
      U(K+3)=U(K+3)+FR*FC(I,3)
      VPV=VPV+FR*FR*FC(I,3)
35 A(K+4,K+4)=A(K+4,K+4)+FC(I,4)
      FR=COB(I,4)-XC(J)
      U(K+4)=U(K+4)+FR*FC(I,4)
      VPV=VPV+FR*FR*FC(I,4)
      A(K+5,K+5)=A(K+5,K+5)+FC(I,5)
      FR=COB(I,5)-YC(J)
      U(K+5)=U(K+5)+FR*FC(I,5)
      VPV=VPV+FR*FR*FC(I,5)
      IF(CODE(J).EQ.2) GO TO 45
40 A(K+6,K+6)=A(K+6,K+6)+FC(I,6)
      FR=COB(I,6)-ZC(J)
      U(K+6)=U(K+6)+FR*FC(I,6)
      VPV=VPV+FR*FR*FC(I,6)
45 CONTINUE

```

```

C SOLVE FOR CORRECTIONS
C
50 CALL FILL(A,NSIZ)
   CALL VERSOL(A,X,NSIZ)
   CALL AB(A,U,X,NSIZ,NSIZ,1)
C
   DO 55 I=1,NSIZ
55  VPV=VPV-X(I)*U(I)
   VPV=VPV/DFLOAT(NOBS-NSIZ)
C
C
C UPDATE EXTERIOR ORIENTATION
C
   DO 60 I=1,NPHOTO
   K=6*(I-1)
   OMEGA(I)=OMEGA(I)+X(K+1)
   PHI(I)=PHI(I)+X(K+2)
   KAPPA(I)=KAPPA(I)+X(K+3)
   XC(I)=XC(I)+X(K+4)
   YC(I)=YC(I)+X(K+5)
60  ZC(I)=ZC(I)+X(K+6)
C
C
C UPDATE GROUND COORDINATES
C
   DO 65 I=1,NG
   K=NCC+3*(I-1)
   XG(I)=XG(I)+X(K+1)
   YG(I)=YG(I)+X(K+2)
65  ZG(I)=ZG(I)+X(K+3)
C
   IF(INTERN.EQ.0) GO TO 66
C
C UPDATE INTERIOR ORIENTATION
C
   NSI1=NSIZ
   IF(IREFR.EQ.0) NSI1=NSIZ+1
   F=F+X(NSI1-8)
   CX=CX+X(NSI1-7)
   CY=CY+X(NSI1-6)
   CK1=CK1+X(NSI1-5)
   CK2=CK2+X(NSI1-4)
   CK3=CK3+X(NSI1-3)
   CP1=CP1+X(NSI1-2)
   CP2=CP2+X(NSI1-1)
66  IF(IREFR.EQ.0) GO TO 70
   AKR=AKR+X(NSIZ)
C
C
C CHECK FOR CONVERGENCE
C
70  DO 80 I=1,NPHOTO
   K=6*(I-1)
   J=K+3
C
   DO 80 L=1,3
   IF(DA-DABS(X(K+L))) 110,75,75
75  IF(DS-DABS(X(J+L))) 110,80,80
80  CONTINUE
C
   DO 85 I=1,NG
   K=NCC+3*(I-1)
   DO 85 J=1,3
   IF(DS-DABS(X(K+J))) 110,85,85
85  CONTINUE

```

```

      ICON=1
      IF(INTERN.EQ.0) GO TO 100
      NS1=NSIZ
      IF(IREFR.EQ.0) NS1=NS1+1
      IF(DC-DABS(X(NS1-1))) 110,90,90
90    IF(DC-DABS(X(NS1-2))) 110,95,95
95    IF(DC-DABS(X(NS1-3))) 110,101,101
101   IF(DC-DABS(X(NS1-4))) 110,102,102
102   IF(DC-DABS(X(NS1-5))) 110,103,103
103   IF(DC-DABS(X(NS1-6))) 110,104,104
104   IF(DC-DABS(X(NS1-7))) 110,105,105
105   IF(DC-DABS(X(NS1-8))) 110,100,100
100  IF(ITER.LT.MINIT) GO TO 110
      RETURN
110  CONTINUE
      ICON=0
      RETURN
      END
      SUBROUTINE ROTATE(OMEGA,PHI,KAPPA)
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      COMMON/ROTAIT/ R(3,3),T(6)
      REAL*8 KAPPA
C
C  COMPUTE THE ROTATION MATRIX AND TRIG FUNCTIONS
C
      T(1)=DSIN(OMEGA)
      T(2)=DSIN(PHI)
      T(3)=DSIN(KAPPA)
      T(4)=DCOS(OMEGA)
      T(5)=DCOS(PHI)
      T(6)=DCOS(KAPPA)
      R(1,1)= T(5)*T(6)
      R(1,2)= T(1)*T(2)*T(6)+T(4)*T(3)
      R(1,3)=-T(4)*T(2)*T(6)+T(1)*T(3)
      R(2,1)=-T(5)*T(3)
      R(2,2)=-T(1)*T(2)*T(3)+T(4)*T(6)
      R(2,3)= T(4)*T(2)*T(3)+T(1)*T(6)
      R(3,1) =T(2)
      R(3,2)=-T(1)*T(5)
      R(3,3)= T(4)*T(5)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE VERSOL(A,B,I)
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION A(I,I),B(I)
      IF(I.EQ.1) GO TO 10
      IM=I-1
      DO 5 K=1,I
      DO 2 J=1,IM
2    B(J)=A(1,J+1)/A(1,1)
      B(I)=1./A(1,1)
      DO 4 L=1,IM
      DO 3 J=1,IM
3    A(L,J)=A(L+1,J+1)-A(L+1,1)*B(J)
4    A(L,I)=-A(L+1,1)*B(I)
      DO 5 J=1,I
5    A(I,J)=B(J)
      RETURN
10  A(1,1)=1./A(1,1)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE AB(A,B,R,L,M,N)
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION A(L,M),B(M,N),R(L,N)
      DO 5 I=1,L

```

```

DO 5 J=1,N
R(I,J)=0
DO 5 K=1,M
5 R(I,J)=R(I,J)+A(I,K)*B(K,J)
RETURN
END
SUBROUTINE NORMAL(A,U,PD,F,P,IF,JPT,NSIZ,NCC,INTERN,IREFR)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,D-Z)
DIMENSION A(NSIZ,NSIZ),U(NSIZ),PD(15)

```

C
C
C

ADD TO NORMALS OBSERVATIONS OF PHOTO COORDINATES

```

K=NCC+3*(JPT-1)
L=6*(IF-1)
PF=P*F
DO 5 I=1,6
U(I+L)=U(I+L)+PD(I)*PF
DO 5 J=I,6
5 A(I+L,J+L)=A(I+L,J+L)+PD(I)*PD(J)*F
DO 6 I=4,6
M=I-3
U(K+M)=U(K+M)-PD(I)*PF
DO 6 J=I,6
N=J-3
6 A(K+M,K+N)=A(K+M,K+N)+PD(I)*PD(J)*F
DO 7 I=1,6
DO 7 J=4,6
N=J-3
7 A(I+L,N+K)=A(I+L,N+K)-PD(I)*PD(J)*F
IF(INTERN.EQ.0) GO TO 15
M=NSIZ-15
IF(IREFR.EQ.0) M=NSIZ-14
DO 8 I=7,14
U(I+M)=U(I+M)+PD(I)*PF
DO 8 J=I,14
8 A(I+M,J+M)=A(I+M,J+M)+PD(I)*PD(J)*F
DO 9 I=1,6
DO 9 J=7,14
9 A(I+L,J+M)=A(I+L,J+M)+PD(I)*PD(J)*F
K3=K-3
DO 10 I=4,6
DO 10 J=7,14
10 A(I+K3,J+M)=A(I+K3,J+M)-PD(I)*PD(J)*F
15 IF(IREFR.EQ.0) RETURN
U(NSIZ)=U(NSIZ)+PD(15)*PF
A(NSIZ,NSIZ)=A(NSIZ,NSIZ)+PD(15)*PD(15)*F
DO 11 I=1,6
11 A(I+L,NSIZ)=A(I+L,NSIZ)+PD(I)*PD(15)*F
K3=K-3
DO 12 I=4,6
12 A(I+K3,NSIZ)=A(I+K3,NSIZ)-PD(I)*PD(15)*F
RETURN

```

C
C
C

CLEAR NORMALS

```

ENTRY NITIAL(A,U,NSIZ)
DO 20 I=1,NSIZ
U(I)=0
DO 20 J=I,NSIZ
20 A(I,J)=0
RETURN

```

C
C
C

FORM LOWER TRIANGULAR PORTION

```

ENTRY FILL(A,NSIZ)
DO 30 I=1,NSIZ

```

```

DO 30 J=I,NSIZ
30 A(J,I)=A(I,J)
RETURN
END
SUBROUTINE OUTPUT(NPF,NUMPT,LSP,KODE,CODE,LCO,LDIST,OMEGA,PHI,
, KAPPA,XC,YC,ZC,XG,YG,ZG,XP,YF,GOB,DIST,COB,A)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON/INTEGR/ MAXIT,NSIZ,NPHOTO,NSRV,NCC,NOB,NG,ICON,ITER,MX,
, INTERN,MINIT,MCO,NCO,MDIST,NDIST,IREFR
COMMON/INTCON/ MSRV
COMMON/REAL8/ VPV,FP,DA,DS,CX,CY,F,SZZ,DR,PCX,PCY,PF,CXB,CYB,FB,DC
1,CK1,CK2,CK3,CP1,CP2,FK1,FK2,FK3,FP1,FP2,CK1B,CK2B,CK3B,
2CP1B,CP2B
COMMON/ROTAIT/ R(3,3),T(6)
COMMON/REFRA/AKR
DIMENSION NPF(NPHOTO),LSP(NSRV),KODE(NG),NUMPT(NPHOTO,MX)
INTEGER CODE(NPHOTO),LCO(NCO),LDIST(NDIST,2),NAME(34)
REAL*8 GOB(NSRV,3),OMEGA(NPHOTO),PHI(NPHOTO),KAPPA(NPHOTO)
REAL*8 XC(NPHOTO),YC(NPHOTO),ZC(NPHOTO),XG(NG),YG(NG),ZG(NG)
REAL*8 XP(NPHOTO,MX),YF(NPHOTO,MX)
REAL*8 DIST(NDIST),COB(NCO,6),A(NSIZ,NSIZ)
DATA NAME/4H O,4HMEGA,4H ,4H PHI,4H K,4HAPPA,4H ,
, 4H XC,4H ,4H YC,4H ,4H ZC,4H ,4H XG,
, 4H ,4H YG,4H ,4H ZG,4H ,4H F,
, 4H ,4H CX,4H ,4H CY,4H ,4H K1,4H ,4H K2,
1 4H ,4H K3,4H ,4H P1,4H ,4H P2/
IF(ICON.EQ.1) WRITE(3,600) ITER
IF(ICON.EQ.0) WRITE(3,601) MAXIT
C
C COMPUTE CHI SQUARED
C
NU=NOB-NSIZ
XX=DFLOAT(NU)*VPV/SZZ
WRITE(3,614) SZZ,VPV,XX,NU
C
C COMPUTE AND LIST PHOTO COORDINATE RESIDUALS
C
DO 20 IP=1,NPHOTO
CALL ROTATE(OMEGA(IP),PHI(IP),KAPPA(IP))
OMEGA(IP)=OMEGA(IP)*DR
PHI(IP)=PHI(IP)*DR
KAPPA(IP)=KAPPA(IP)*DR
WRITE(3,602) IP,XC(IP),YC(IP),ZC(IP),OMEGA(IP),PHI(IP),KAPPA(IP)
LOOP=NPF(IP)
DO 10 J=1,LOOP
K=NUMPT(IP,J)
DX=XG(K)-XC(IP)
DY=YG(K)-YC(IP)
DZ=ZG(K)-ZC(IP)
Q=R(3,1)*DX+R(3,2)*DY+R(3,3)*DZ
RX=CX-F*(R(1,1)*DX+R(1,2)*DY+R(1,3)*DZ)/Q-XP(IP,J)+AKR*(
1(XP(IP,J)**2+YP(IP,J)**2)/F**2)*XP(IP,J)+CM1*(CK1*RQ+CK2
2*RQ**2+CK3*RQ**3)+(CP1*(RQ+2*XP(IP,J)**2)+2*CP2*XP(IP,
3J)*YP(IP,J))
RY=CY-F*(R(2,1)*DX+R(2,2)*DY+R(2,3)*DZ)/Q-YF(IP,J)+AKR*(
1(XP(IP,J)**2+YP(IP,J)**2)/F**2)*YP(IP,J)+CM2*(CK1*RQ+CK
22*RQ**2+CK3*RQ**3)+2*CP1*XP(IP,J)*YP(IP,J)+CP2*(RQ+2*YP
3(IP,J)**2)
10 WRITE(3,603)K,RX,RY
20 CONTINUE
C
C LIST ADJUSTED GROUND COORDINATES
C
WRITE(3,604)
DO 30 I=1,NG
30 WRITE(3,605) I,KODE(I),XG(I),YG(I),ZG(I)

```

```

      IF(MSRV.EQ.0) GO TO 40
C   COMPUTE AND LIST CONTROL POINT RESIDUALS
C
      WRITE(3,606)
      DO 40 I=1,NSRV
      J=LSF(I)
      RX=XG(J)-GOB(I,1)
      RY=YG(J)-GOB(I,2)
      RZ=ZG(J)-GOB(I,3)
      IF(KODE(J).EQ.1) WRITE(3,619) J,RZ
      IF(KODE(J).EQ.2) WRITE(3,607) J,RX,RY
      IF(KODE(J).EQ.4) WRITE(3,625) J,RY,RZ
      IF(KODE(J).EQ.3) WRITE(3,607) J,RX,RY,RZ
40  CONTINUE
C
C   COMPUTE AND LIST INTERIOR ORIENTATION RESIDUALS
C
      IF(IREFR.EQ.0) GO TO 41
      CX=CXB
      CY=CYB
41  CONTINUE
      RX=CX-CXB
      RY=CY-CYB
      RZ=F-FB
      RK1=CK1-CK1B
      RK2=CK2-CK2B
      RK3=CK3-CK3B
      RP1=CP1-CP1B
      RP2=CP2-CP2B
      WRITE(3,608) F,CX,CY
      WRITE(3,626) CK1,CK2,CK3,CP1,CP2
      WRITE(3,609) RZ,RX,RY
      WRITE(3,627) RK1,RK2,RK3,RP1,RP2
      IF(MCO.EQ.0) GO TO 50
C
C   COMPUTE AND LIST EXTERIOR ORIENTATION RESIDUALS
C
      WRITE(3,610)
      DO 45 I=1,NCO
      J=LCO(I)
      R1=OMEGA(J)-COB(I,1)*DR
      R2=PHI(J) -COB(I,2)*DR
      R3=KAPPA(J)-COB(I,3)*DR
      RX=XC(J) -COB(I,4)
      RY=YC(J) -COB(I,5)
      RZ=ZC(J) -COB(I,6)
      IF(CODE(J).EQ.1) WRITE(3,621) J,RZ
      IF(CODE(J).EQ.2) WRITE(3,622) J,RX,RY
      IF(CODE(J).EQ.3) WRITE(3,622) J,RX,RY,RZ
      IF(CODE(J).GE.4) WRITE(3,611) J,R1,R2,R3,RX,RY,RZ
45  CONTINUE
50  IF(MDIST.EQ.0) GO TO 58
C
C   COMPUTE AND LIST DISTANCE OBSERVATION RESIDUALS
C
      WRITE(3,612)
      DO 55 L=1,NDIST
      I=LDIST(L,1)
      J=LDIST(L,2)
      DX=DSQRT((XG(I)-XG(J))**2+(YG(I)-YG(J))**2+(ZG(I)-ZG(J))**2)
      VX=DX-DIST(L)
55  WRITE(3,613) I,J,DX,VX
C
C   CONVERT RADIANS IN VAR-COV MATRIX TO DEGREES

```

```

58 DO 60 IP=1,NPHOTO
   K=6*(IP-1)
   DO 60 I=1,6
   DO 60 J=1,I
   IF(I,LT,4) A(I+K,J+K)=DR*A(I+K,J+K)
   IF(J,LT,4) A(I+K,J+K)=DR*A(I+K,J+K)
60 A(I+K,J+K)=SZZ*A(I+K,J+K)
   DO 65 IP=1,NG
   K=NCC+3*(IP-1)
   DO 65 I=1,3
   DO 65 J=1,I
65 A(I+K,J+K)=SZZ*A(I+K,J+K)
C
C LIST VAR-COV SUBMATRICES
C
   NPH=1
70 WRITE(3,615)
   DO 80 II=1,3
   K=6*(NPH-1)
   WRITE(3,616) NPH
   NPH=NPH+1
   DO 75 I=1,6
   JH=2*I
   JL=JH-1
75 WRITE(3,617) (NAME(JJ),JJ=JL,JH),(A(I+K,J+K),J=1,I)
   IF(NPH.GT.NPHOTO) GO TO 85
80 CONTINUE
   GO TO 70
85 NPT=1
90 WRITE(3,615)
   DO 100 II=1,5
   WRITE(3,618) NPT
   K=NCC+3*(NPT-1)
   NPT=NPT+1
   DO 95 I=1,3
   JH=2*I + 12
   JL=JH-1
95 WRITE(3,617) (NAME(JJ),JJ=JL,JH),(A(I+K,J+K),J=1,I)
   IF(NPT.GT.NG) GO TO 105
100 CONTINUE
   GO TO 90
105 IF(INTERN.EQ.0) GO TO 120
   K=NSIZ-9
   IF(IREFR.EQ.0) K=NSIZ-8
   WRITE(3,620)
   WRITE(3,615)
   DO 115 I=1,8
   JH=2*I + 18
   JL=JH-1
   DO 110 J=1,I
110 A(K+I,K+J)=SZZ*A(K+I,K+J)
115 WRITE(3,617) (NAME(JJ),JJ=JL,JH),(A(K+I,K+J),J=1,I)
120 IF(IREFR.EQ.0) GO TO 125
   A(NSIZ,NSIZ)=SZZ*A(NSIZ,NSIZ)
   WRITE(3,623)
   WRITE(3,624)AKR,A(NSIZ,NSIZ)
125 RETURN
C
600 FORMAT('1',////,20X,'CONVERGED:  ITERATIONS=',I2)
601 FORMAT('1',////,20X,'DID NOT CONVERGE:  ITERATIONS=',I2)
602 FORMAT(' ',////,30X,'PHOTO',I3,/,25X,'XC=',F10.2,/,25X,'YC=',
.      F10.2,/,25X,'ZC=',F10.2,/,22X,'OMEGA=',F10.5,/,24X,
.      'PHI=',F10.5,/,22X,'KAPPA=',F10.5,/,30X,'RESIDUALS',/,
.      21X,'POINT',8X,'VX',10X,'VY')

```

```

603 FORMAT('0',20X,I5,2F12.4)
604 FORMAT(' ',////,30X,'GROUND COORDINATES',//,21X,'POINT NODE',
,
9X,'XG',10X,'YG',10X,'ZG')
605 FORMAT('0',20X,I5,3F14.4)
606 FORMAT(' ',////,30X,'CONTROL POINT RESIDUALS',//,21X,'POINT',7X,
,
'UX',08X,'UY',08X,'VZ')
607 FORMAT('0',20X,I5,3F10.4)
608 FORMAT('1',////,20X,'CAMERA CALIBRATION',//,21X,'F=',F12.4,/,
,
20X,'CX=',F12.4,/,20X,'CY=',F12.4)
609 FORMAT('- ',20X,'CALIBRATION RESIDUALS',//,21X,'F ',1PD15.8,/,
,
21X,'X ',1PD15.8,/,21X,'Y ',1PD15.8)
610 FORMAT('1',////,20X,'CAMERA ORIENTATION AND LOCATION RESIDUALS',
,
//,21X,'PHOTO',5X,'OMEGA',7X,'PHI',5X,'KAPPA',6X,'XC',8X,
,
'YC',8X,'ZC')
611 FORMAT('0',20X,I5,6F10.4)
612 FORMAT(' ',////,20X,'ADJUSTED DISTANCES AND RESIDUALS',///,21X,
,
' FROM TO',7X,'DISTANCE',7X,'RESIDUAL')
613 FORMAT('0',20X,I5,2F15.3)
614 FORMAT('- ',20X,'A PRIORI VARIANCE OF UNIT WEIGHT=',F10.4,/,17X,
,
'A POSTERIORI VARIANCE OF UNIT WEIGHT=',F10.4,/,33X,
,
'COMPUTED CHI SQUARED=',F10.4,/,35X,
,
'DEGREES OF FREEDOM=',I5)
615 FORMAT(' ',////,20X,'VAR.-COVAR. MATRICES USING THE',
,
'A PRIORI VARIANCE OF UNIT WEIGHT')
616 FORMAT('- ',20X,'VARIANCE-COVARIANCE MATRIX FOR PHOTO',I3,/)
617 FORMAT('0',2A4,8(1PD15.4))
618 FORMAT('- ',20X,'VARIANCE-COVARIANCE MATRIX FOR PASS POINT',I3,/)
619 FORMAT('0',20X,I5,20X,F10.4)
620 FORMAT('- ',20X,'VARIANCE-COVARIANCE MATRIX FOR CAMERA',
,
' CALIBRATION',/)
621 FORMAT('0',20X,I5,50X,F10.4)
622 FORMAT('0',20X,I5,30X,3F10.4)
623 FORMAT('- ',20X,'REF. FACTOR & VARIANCE')
624 FORMAT('- ',20X,2(1PD15.4))
625 FORMAT('0',20X,I5,10X,2F10.4)
626 FORMAT(' ',/,19X,'CK1=',F12.4,/,19X,'CK2=',F12.4,/,19X,'CK3=
1',F12.4,/,19X,'CP1=',F12.4,/,19X,'CP2=',F12.4)
627 FORMAT(' ',/,20X,'K1',1PD15.8,/,20X,'K2',1PD15.8,/,20X,'K3',
11PD15.8,/,20X,'P1',1PD15.8,/,20X,'P2',1PD15.8)
STOP
END

```