

JULIA CELIA MERCEDES STRAUCH

CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS

Dissertação apresentada ao Curso
de Pós-Graduação em Ciências
Geodésicas para a obtenção do
grau de Mestre em Ciências pela
Universidade Federal do Paraná.

Curitiba

1991

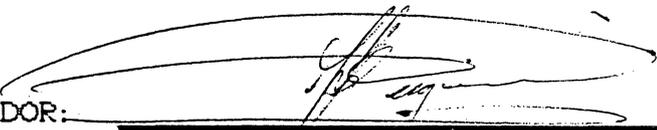
CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS

por

JULIA CELIA MERCEDES STRAUCH

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

ORIENTADOR:



Prof. Dr. JOÃO BOSCO LUGNANI, PhD



Prof.ª. MSc. Mary Angélica de Azevedo Olivas



Prof. MSc. Hideo Araki

Cúritiba, 6 de maio de 1991.

Aos meus amores: Tino e Daniel.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Dr. João Bosco Lugnani e Dr. Ernst U. Fischer pela orientação, baseada em dedicação e sugestões, que possibilitou o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, da Universidade Federal do Paraná, na pessoa do professor Camil Gemael, coordenador do Curso.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - pela bolsa de estudos concedida.

À minha família e, em especial, ao meu marido, Constantino Gonçalves Ribeiro, pelo apoio, paciência e compreensão, sem os quais não teria sido possível realizar o mestrado.

E a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a elaboração desta.

SUMARIO

<u>TITULO</u>	1
<u>TERMO DE APROVAÇÃO</u>	ii
<u>DEDICATÓRIA</u>	iii
<u>AGRADECIMENTOS</u>	iv
<u>SUMARIO</u>	v
<u>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</u>	ix
<u>RESUMO</u>	xi
<u>SUMMARY</u>	xii
1 <u>INTRODUÇÃO</u>	01
1.2 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO.....	03
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	03
2 <u>CORRELAÇÃO AUTOMÁTICA DE IMAGENS - PROCESSOS ANALÓGICOS</u> ..	05
2.1 CORRELAÇÃO ELETRÔNICA.....	06
2.2 CORRELAÇÃO ÓTICA.....	08
3 <u>IMAGEM DIGITAL</u>	11
3.1 FORMAÇÃO DA IMAGEM DIGITAL.....	11
3.2 CONSIDERAÇÕES.....	13
4 <u>CORRELAÇÃO DE AREAS A NÍVEL DE PIXEL</u>	15
4.1 FUNÇÕES DE CORRELAÇÃO.....	15
4.1.1 Tipos de funções de correlação.....	17
4.1.1.1 Função quociente.....	17

4.1.1.2	Função erro.....	19
4.1.1.3	Função erro quadrático.....	20
4.1.1.4	Função covariância cruzada.....	20
4.2	CORRELAÇÃO.....	21
5	<u>CORRELAÇÃO PONTUAL POR MÍNIMOS QUADRADOS</u>	24
5.1	MODELO MATEMÁTICO DA CORRELAÇÃO REFINADA.....	24
5.2	AJUSTAMENTO PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS.....	27
5.2.1	Parâmetros aproximados iniciais.....	30
5.2.2	Matriz das derivadas parciais.....	31
5.2.3	Gradientes da função de tom de cinza.....	32
5.2.4	Critério de convergência das correções dos parâmetros.....	34
5.2.5	Critério de precisão do ajustamento.....	35
5.2.6	Reamostragem.....	36
5.3	DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS DOS PONTOS HOMÓLOGOS E SUAS ESTIMATIVAS DE PRECISÃO.....	38
5.4	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO.....	40
6	<u>CORRELAÇÃO EPIPOLAR</u>	41
6.1	GEOMETRIA EPIPOLAR.....	42
6.2	DETERMINAÇÃO DAS LINHAS EPIPOLARES CONJUGADAS.....	43
6.3	CORRELAÇÃO.....	46
7	<u>DESCRIÇÃO DO SISTEMA</u>	47
7.1	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	47
7.1.1	Câmara de TV-HR-600.....	48
7.2	PROGRAMAS.....	48

7.2.1	Biblioteca gráfica PC ITEX PLUS.....	49
7.2.2	Programa para aquisição de imagens digitais..	49
7.2.3	Programa para correlação de áreas a nível de "pixel".....	50
7.2.4	Programa para correlação pontual.....	51
8	<u>IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA</u>	53
8.1	CORRELAÇÃO DE ÁREAS A NÍVEL DE <i>PIXEL</i>	53
8.1.1	Consideração.....	53
8.1.2	Com dados fictícios.....	54
8.1.3	Com dados reais.....	55
8.2	CORRELAÇÃO PONTUAL.....	58
8.2.1	Alvos pré-sinalizados.....	59
8.2.1.1	Correlações pontuais de um alvo pré-sinalizado delimitado por pares de janelas distintos.....	59
8.2.1.2	Correlação pontual de alvos pré-sinalizados do estereopar de imagens digitais.....	62
8.2.2	Alvos naturais.....	64
8.2.2.1	Correlações pontuais de uma feição com pares de janelas distintos.....	65
8.2.2.2	Correlação pontual de feições do estereopar de imagens digitalizadas.....	66
8.3	TESTES PRÁTICOS.....	68
8.3.1	Reconhecimento de padrões.....	68
8.3.2	Monocomparador digital.....	68

8.3.2.1	Identidade.....	69
8.3.2.2	Repetibilidade das medições.....	70
9	<u>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	72
9.1	CONCLUSÕES.....	72
9.2	RECOMENDAÇÕES.....	74
10	<u>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</u>	75

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CORRELAÇÃO AUTOMÁTICA DE IMAGENS

2.1	Varredura de um estereopar de imagens.....	07
2.2	Sistema correlator.....	07
2.3	Sistema de correlação ótica.....	09

IMAGEM DIGITAL

3.1	Conversão A/D.....	12
3.2	Representação da imagem digital.....	12
3.3	Imagem digital e sistema de coordenadas adotado.....	13

CORRELAÇÃO DE ÁREAS A NÍVEL DE *PIXEL*

4.1	Funções unidimensionais contínuas.....	16
4.2	Imagens digitais homólogas.....	22

CORRELAÇÃO PONTUAL POR MÍNIMOS QUADRADOS

5.1	Malha regular X malha transformada geometricamente.....	36
5.2	Reamostragem.....	37
5.3	Centro de gravidade da janela.....	38

CORRELAÇÃO EPIPOLAR

6.1	Coplanaridade.....	42
6.2	Determinação das linhas epipolares conjugadas.....	44

IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA

8.1	Matrizes A e P	54
-----	------------------------------------	----

8.2	Esquema de aquisição do estereopar de imagens digitais.	56
8.3	Janela padrão.....	56
8.4	Janela de pesquisa.....	57
8.5	Janelas correlacionadas.....	58
8.6	Representação dos alvos na imagem digital.....	59

RESUMO

Esta dissertação tem por objetivo elaborar a automação do processo de medição de alvos ou feições imageados com a câmara de TV-HR-600.

Neste processo de medição são empregados dois métodos de correlação. O primeiro método consiste em aplicar uma função de correlação a janelas de um estereopar de imagens digitais, para obter a correlação de áreas ao nível do *pixel*. O segundo método trata a correlação encontrada empregando a teoria dos mínimos quadrados a um modelo matemático que remove as distorções geométricas e as diferenças sistemáticas radiométricas inerentes ao processo de aquisição da imagem refinando o processo e elevando a precisão.

SUMMARY

The objective of this work is to make the automation of the measurement process of targets or features imaged by the TV-HR-600 camera.

In this measuring process two methods of correlations are used. The first method consists on the application of a correlation function to windows of a stereopair of digital images in order to obtain the correlation of areas at the *pixel's* level. The second method refines the correlation obtained in the previous one, applying the least square theory to a mathematical model which removes the geometric distortions and radiometric systematic difference inherent to the image acquisition process, improving the accuracy.

1 INTRODUÇÃO

A fotogrametria é considerada, no sentido mais amplo, como a ciência aplicada que tem por finalidade determinar formas, dimensões e posições de objetos, contidos em uma ou mais imagens, através de medidas efetuadas sobre as mesmas.

Um dos importantes recursos utilizado por esta ciência é a visão estereoscópica, que é implementada em quase todos os instrumentos fotogramétricos, desde simples estereoscópio de bolso aos restituidores analíticos /3/.

A visão estereoscópica, nas operações fotogramétricas, corresponde ao processo de correlação de imagens, isto é, a identificação de áreas homólogas num estereopar de imagens /9/.

A visão estereoscópica, entretanto, não se baseia apenas nas diferenças geométricas entre as imagens, mas também na habilidade do operador correlacioná-las. Assim, o bom desempenho dessas operações em termos de velocidade, acuracidade, e economia é determinado pelo sistema operador-instrumento /9/.

Na década de 50, com o desenvolvimento tecnológico da eletrônica, sentiu-se a necessidade de melhorar o desempenho

da correlação de imagens através da automação do processo de detecção de imagens homólogas. Esta automação foi proposta como um meio de poupar os operadores da tediosa tarefa de percepção visual dos pontos homólogos e minimizar o tempo nas operações de estereodetecção, impingindo maior velocidade as operações fotogramétricas. Este processo foi denominado de correlação automática de imagens e foi implementado por meio de sistemas correlatores /3/.

No decorrer dos anos 80, com os avanços tecnológicos dos elementos detectores e das câmaras digitais que possibilitaram a aquisição da imagem digital, dos recursos instrumentais de processamento aliados ao aumento da capacidade e velocidade dos microprocessadores, e das técnicas especiais de processamento da imagem digital, desenvolveu-se a fotogrametria digital e, conseqüentemente, a correlação digital para a automação do trabalho de medição /4/, /6/, /15/.

A correlação digital é efetuada em imagens digitais, que são representadas por uma matriz de elementos de imagem, os quais correspondem a valores numéricos inteiros de uma escala de tons de cinza. Estes valores são processados por programas que desempenham os cálculos necessários para determinar a posição acurada dos pontos homólogos no estereopar de imagens digitais /14/.

O alto grau de flexibilidade dos dados digitais e a alta velocidade nos cálculos para desempenhar a correlação prometem futuros desenvolvimentos nas técnicas da fotogrametria digital.

No momento, apesar de já implementada a nível de produção, a correlação digital se encontra em fase de pesquisa e desenvolvimento, buscando métodos ou combinação de métodos, que proporcionem uma acuracidade à nível de sub-pixel e confiabilidade no processo.

O Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, da Universidade Federal do Paraná, através do convênio entre os governos Brasil-Alemanha, obteve uma câmara de TV-HR-600 com unidade de processamento, que permite iniciar os estudos de correlação aplicada às imagens digitais.

1.2 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação tem por objetivo elaborar programas que automatizem o processo de medição de alvos imageados com a câmara de TV-HR-600.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O segundo capítulo faz uma breve revisão na literatura da correlação automática de imagens implementada pelos sistemas correlatores.

O terceiro capítulo, para melhor compreensão desta dissertação, define a imagem digital, o processo de sua aquisição pela câmara e estabelece como será manipulada pelos algoritmos de correlação.

O quarto capítulo disserta sobre a correlação bidimensional empregada para encontrar, à nível de pixel,

alvos ou feições homólogas em um estereopar de imagens digitais.

O quinto capítulo descreve a obtenção do modelo matemático da correlação por mínimos quadrados que refina a correlação bidimensional.

O sexto capítulo apresenta uma metodologia para implementar a correlação utilizando o plano epipolar.

O sétimo capítulo descreve os equipamentos utilizados e os programas envolvidos na implementação prática da correlação apresentada no oitavo capítulo.

E no nono capítulo são apresentadas as conclusões e recomendações.

2 CORRELAÇÃO AUTOMÁTICA DE IMAGENS - PROCESSOS ANALÓGICOS

A correlação de imagens consiste na comparação de formas, tamanho e densidades fotográficas de imagens correspondentes. Yaniris /16/ define a correlação automática de imagens como o processo de detecção automática de pontos homólogos num estereopar de imagens.

Esten /3/ considera três métodos distintos de correlação automática, que são caracterizados pelos avanços tecnológicos quanto à manipulação das informações do estereopar de imagens; correlação eletrônica, correlação ótica e correlação digital.

De modo geral, estes métodos de correlação automática investigam as imagens na hipótese de serem similares e empregam funções matemáticas, denominadas de funções de correlação, como um meio de determinar os pontos homólogos do estereopar de imagens /3/.

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão dos sistemas que implementam as correlações eletrônica e ótica.

2.1 CORRELAÇÃO ELETRÔNICA

A correlação eletrônica é desenvolvida por um sistema que converte simultaneamente as informações analógicas de densidade fotográfica de um estereopar de imagens em sinais elétricos, e a seguir os compara a fim de determinar a paralaxe entre os pontos homólogos /3/.

Este sistema é composto basicamente de dois outros sistemas denominados de sistema de varredura e sistema correlator /3/.

O sistema de varredura utiliza dois elementos exploratórios, que percorrem simultaneamente duas pequenas áreas distintas de um estereopar de imagens ao longo de um padrão de varredura previamente estabelecido. Cada elemento exploratório gera um sinal elétrico, função da variável independente tempo, que é proporcional a transmissão ótica do ponto imagem sobre o qual se apoia /3/.

Sejam as informações analógicas de um estereopar de imagens A e B designadas por $F_A(x,y)$ e sua homóloga por $F_B(x+x_0,y+y_0)$, onde x_0 e y_0 são as componentes da paralaxe ao longo dos eixos coordenados x e y . Após a operação de varredura estas funções de posição são transformadas numa função cuja variável independente é o tempo, podendo ser designadas no sistema correlator pelas funções $g(t)$ e $g(t+\omega)$, respectivamente, onde ω é a diferença de tempo do processo de varredura entre as duas imagens.

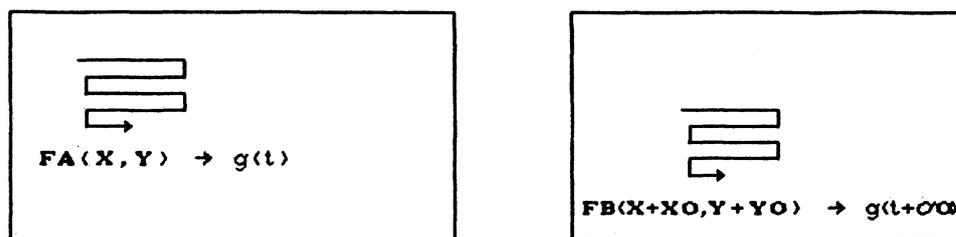


IMAGEM A

IMAGEM B

Fig. 2.1 - Varredura de um estereopar de imagens

Devido a existência das paralaxes x_0 e y_0 entre as imagens homólogas haverá um tempo de atraso ∞ entre os dois sinais elétricos [3]. Para encontrar este tempo de atraso os sinais elétricos são passados para o sistema correlator.

O sistema correlator é um circuito que aplica uma translação no tempo do sinal $g(t)$ de uma quantidade de tempo τ em relação ao sinal $g(t+\infty)$ e a seguir passa estes sinais em circuitos multiplicador e integrador [3].

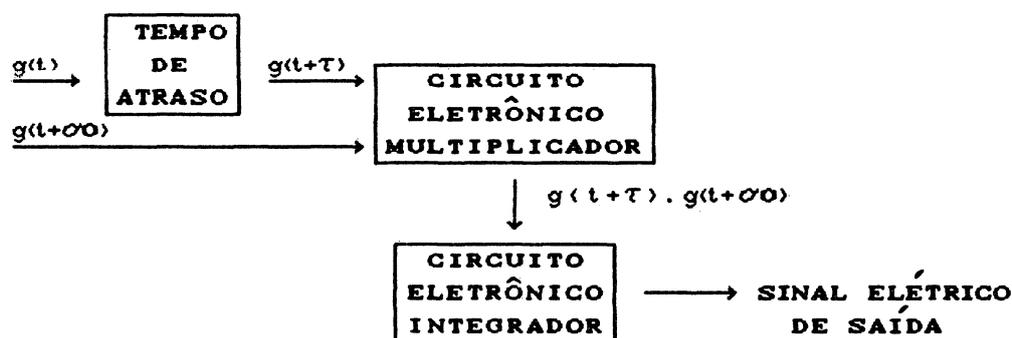


Fig. 2.2 - Sistema correlator

O sinal elétrico de saída pode ser representado pela função de correlação covariância cruzada:

$$C_{12}(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} g(t+\tau) \cdot g(t+\infty) dt \quad (2.1)$$

onde:

$2T$ = representa o comprimento de varredura que corresponde a

área a ser correlacionada.

Quando o tempo de atraso é o mesmo que a diferença entre os sinais $g(t)$ e $g(t+\tau)$, isto é $\tau=0$, o coeficiente de correlação $C_{12}(\tau)$ será máximo. Isto significa dizer que o tempo τ corresponde a paralaxe x_0 entre os pontos homólogos do estereopar de imagens.

Do conhecimento do tempo de atraso $\tau=0$ e da velocidade de varredura v dos elementos exploratórios é obtida a paralaxe P_x entre os pontos homólogos do estereopar de imagens /3/:

$$P_x = v \cdot \tau \quad (2.2)$$

2.2 CORRELAÇÃO ÓTICA

A correlação ótica se desenvolveu da incorporação de sistemas de lentes aos sistemas eletrônicos, que auxiliam a transformação da imagem analógica numa função cuja variável independente é a posição. Esta correlação é um método bidimensional e pontual, análogo a correlação eletrônica, requerendo operações de varredura e correlação, entretanto, neste método estas operações são realizadas simultaneamente /3/.

O princípio básico deste método é esquematizado na ilustração abaixo. A iluminação emitida por uma fonte luminosa é "canalizada", através de lentes, para a primeira imagem do estereopar. Utilizando uma espécie de diafragma no plano desta imagem, o campo é bloqueado, exceto numa pequena área cuja imagem homóloga deseja-se encontrar. Esta área é então projetada, com ajuda de um sistema de lentes, sobre o plano da

segunda imagem do estereopar.

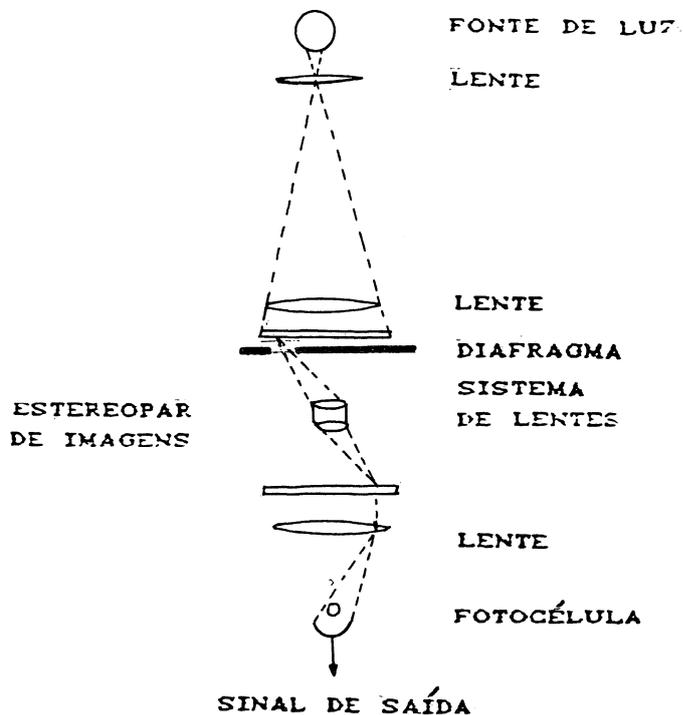


Fig. 2.3 - Sistema de correlação ótica

A seguir, a intensidade luminosa resultante das duas imagens é transmitida para uma lente, que coleta toda a luz e a canaliza para uma fotocélula. A quantidade de luz que alcança a fotocélula é o produto das intensidades luminosas das duas imagens.

Considerando a intensidade luminosa da primeira imagem do estereopar como uma função de posição designada por $F(x,y)$ e a segunda por $F(x+x_0,y)$, onde x_0 é a paralaxe horizontal, a intensidade luminosa que alcança a fotocélula é fornecida por [3]:

$$R_{FF}(x_0) = \iint F(x,y) \cdot F(x+x_0,y) \, dx \, dy \quad (2.3)$$

Esta função é na verdade a função de correlação covariância cruzada. Os pontos homólogos do estereopar de imagens são encontrados quando o coeficiente de correlação $R_{FF}(x_0)$ for máximo \surd .

3 IMAGEM DIGITAL

A imagem digital, em estudo, é uma imagem de perspectiva central, gerada *on-line* pela câmara digital.

A câmara digital é um sensor constituído de sistema ótico, elementos detectores dispostos num arranjo retangular e circuitos eletrônicos. O sistema ótico capta a luz incidente, refletida ou transmitida pelo meio ou por um objeto. Os elementos detectores, localizados no plano focal da câmara, recebem a radiação eletromagnética produzindo um sinal analógico (elétrico). Os circuitos eletrônicos transformam este sinal analógico em informação digital sobre o meio ou objeto imageado /6/.

3.1 FORMAÇÃO DA IMAGEM DIGITAL

O princípio de formação da imagem da câmara digital consiste na geração de um sinal elétrico ao incidir um raio de luz refletido ou transmitido pelo meio ou por um objeto. Este sinal é proporcional a variação de luz incidente que alcança a superfície fotosensível constituída pelos elementos sensores.

O sinal é amostrado seguindo um padrão de malha retangular, igualmente espaçada, e quantizado em intervalos

iguais, num processo conhecido como conversão analógico/digital (A/D) /4/.

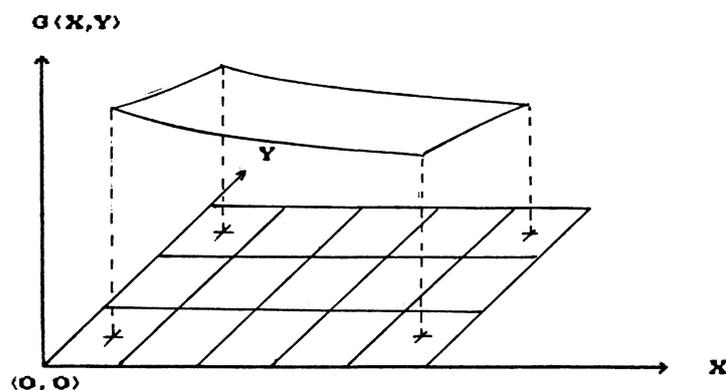


Fig. 3.1 - Conversão A/D

A conversão A/D discretiza a função contínua do sinal analógico em dois eixos espaciais coplanares, x e y , com intervalos fixos, que dependem dos espaçamentos entre os elementos individuais denominados "pixels" (pictures elements).

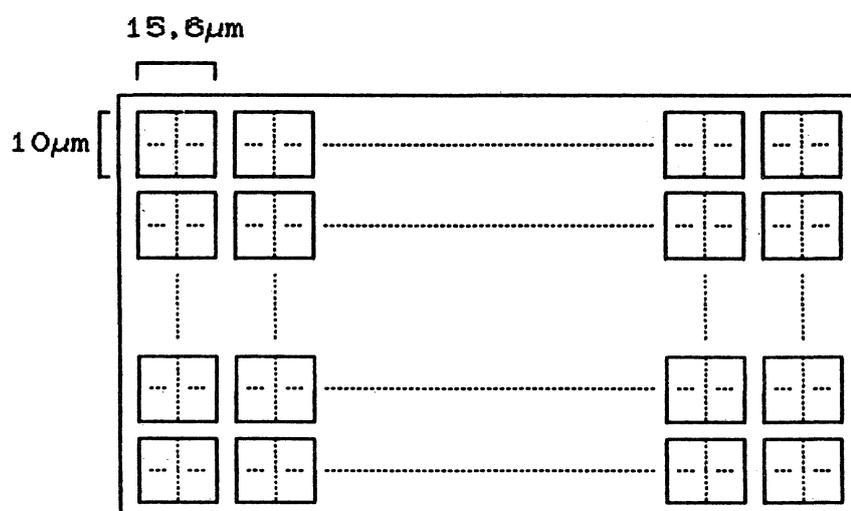


Fig. 3.2 - Representação da imagem digital

Os espaçamentos entre os "pixels" são fornecidos pelas suas dimensões, quando perfeitamente alinhados, nas direções x e y , as quais não são necessariamente iguais. Por exemplo, as

dimensões do "pixel" da câmara em questão, é de $15,6 \mu\text{m}$ na direção x por $10 \mu\text{m}$ na direção y.

3.2 CONSIDERAÇÕES

A imagem adquirida com a câmara digital é tratada como uma malha regular, cujas interseções determinam as posições dos "pixels".

Ela pode ser considerada como uma matriz em um sistema de coordenadas cartesianas onde os eixos x e y correspondem aos números de colunas e linhas, respectivamente. A origem deste sistema de coordenadas pode ser adotada em qualquer lugar da matriz, mas nesta dissertação, por conveniência, é adotada no centro do primeiro "pixel", do canto superior esquerdo da matriz.

As imagens adquiridas pela câmara de TV-HR-600 apresentam no monitor gráfico 512 "pixels" horizontais por 480 "pixels" verticais, formando uma matriz de mesma dimensão, 512 X 480.

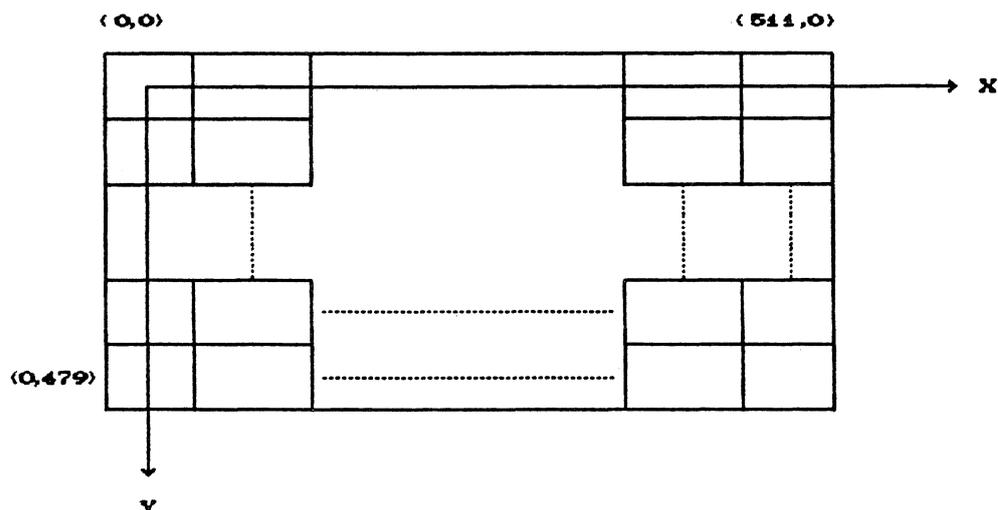


Fig. 3.3 - Imagem digital e o sistema de coordenadas adotado

A cada posição (x_i, y_j) desta matriz está associada a um número inteiro, que corresponde ao tom de cinza do "pixel" (i, j) , através de uma função denominada função de tons de cinza. Esta função é, na verdade, uma função contínua discretizada na conversão A/D que assume valores inteiros de zero a 255, na escala de tons de cinza, onde o zero representa o preto, ou seja, a ausência de cor, e 255 representa o branco. Ela pode ser expressa matematicamente através de uma função G , definida para o domínio da imagem, limitado no plano (x, y) , que relaciona a informação de posição (x_i, y_j) ao tom de cinza G .

$$G = G(x_i, y_j) \quad (3.1)$$

Todavia, devido aos problemas inerentes ao processo de aquisição, estas imagens possuem ruído que será designado por:

$$n = n(x_i, y_j), \quad (3.2)$$

de modo que o tom de cinza observado pode ser expresso por:

$$G = G(x_i, y_j) + n(x_i, y_j) \quad (3.3)$$

4 CORRELAÇÃO DE ÁREAS A NÍVEL DE PIXEL

A correlação de áreas a nível de "pixel" é realizada aplicando-se uma função de correlação às funções de tom de cinza pertencentes às janelas, que contém um alvo ou feição, em um estereopar de imagens digitais.

4.1 FUNÇÕES DE CORRELAÇÃO

Funções de correlação são funções matemáticas que determinam o grau de interdependência entre duas funções de mesma natureza. Elas são empregadas com a finalidade de comparar estas duas funções e determinar onde elas apresentam comportamento mais semelhante /13/, /16/.

Por exemplo, sejam duas funções unidimensionais contínuas que variam com o tempo; $A(t)$ com $t \in [a_1, a_2]$ e $B(t)$ com $t \in [b_1, b_2]$.

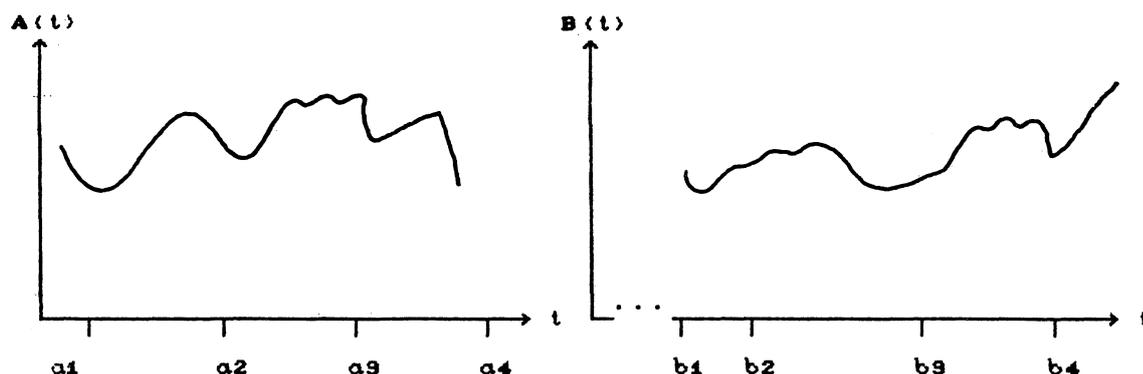


Fig. 4.1 - Funções unidimensionais contínuas

Aplicando uma função de correlação às funções $A(t)$ e $B(t)$, são determinados os intervalos $[a_2, a_3]$ e $[b_3, b_4]$, nos quais elas apresentam o comportamento mais semelhante, isto é, possuem alta correlação. Para determinar esta correlação todos intervalos das funções $A(t)$ e $B(t)$ são combinados e a eles é aplicado a função de correlação que assume um valor a cada combinação. Dentre estes valores um atenderá ao critério estabelecido para a função de correlação aplicada. Este valor determina os intervalos das funções analisadas que apresentam a melhor correlação /3/, /13/, /16/.

As funções analisadas pelas funções de correlação na fotogrametria podem ter como variável independente o tempo, $F(t)$, ou a posição, $F(x)$ ou $F(x,y)$.

Por exemplo, na correlação eletrônica a imagem analógica é transformada pelo sistema de varredura em uma sequência de sinais elétricos, ou seja, uma função contínua de tempo. Já na correlação ótica, o sistema correlator trata a informação da imagem analógica como uma função bidimensional contínua de posição. E na correlação digital a função analisada é a escala de tom de cinza, que assume valores

compreendidos entre zero e 255, tratando-se, portanto, de uma função bidimensional discreta.

Nas três correlações o modelo matemático da função de correlação é o mesmo, alterando apenas a forma de expressar as funções analisadas. Quando a função analisada é uma função contínua, a função de correlação se apresenta como uma integral de área, determinando intervalos, ao passo que, quando a função analisada é uma função discreta, ela se apresenta como um somatório de parcelas e determina posição /13/, /16/. Contudo, se a função analisada for uma função bidimensional, a função de correlação passa a ser apresentada como uma integral dupla de x e y , no caso contínuo, ou um duplo somatório, no caso discreto.

4.1.1 Tipos de funções de correlação

As funções de correlação, apresentadas a seguir, encontram-se em /3/, /13/ e /16/, entretanto serão apresentadas a seguir na forma unidimensional, aplicadas a duas funções de posição: $A(x_i^a)$ com $(x_i^a) \in [x_m, x_n]^a$ e $B(x_i^b)$ com $(x_i^b) \in [x_m, x_n]^b$. E seja Δx , no caso discreto, ou δx , no caso contínuo, a translação entre as posições das funções $A(x_i^a)$ e $B(x_i^b)$, aplicada no intervalo $[x_m, x_n]^b$.

4.1.1.1 Função quociente

A função quociente pode ser expressa matematicamente por:

. no caso discreto:

$$Q(\Delta x) = \frac{1}{x_n - x_{m+1}} \cdot \sum_{i=x_m}^{i=x_n} \frac{B(x_i^b + \Delta x)}{A(x_i^a)} \quad (4.1)$$

. no caso contínuo:

$$Q(\delta x) = \frac{1}{x_n - x_m} \cdot \int_{x_m}^{x_n} \frac{B(x_i^b + \delta x)}{A(x_i^a)} dx \quad (4.2)$$

A posição de melhor correlação é encontrada quando a função de correlação $Q(\Delta x)$, no caso discreto, ou $Q(\delta x)$, no caso contínuo, for igual a unidade.

Esta função de correlação falha quando as funções analisadas $A(x_i^a)$ e $B(x_i^b + \Delta x)$ são monotônicas dentro dos intervalos $[x_m, x_n]^a$ e $[x_m, x_n]^b$, pois o somatório dos coeficientes será também monotônico, isto é, não possuirá um coeficiente distinto. Yaniris /16/ para evitar tal situação sugere maximizar e minimizar as funções analisadas dentro dos intervalos, passando o coeficiente a ser expresso por:

$$Q'(\Delta x) = \frac{1}{x_n - x_{m+1}} \cdot \sum_{i=x_m}^{i=x_n} \frac{\text{MAX}(A(x_i^a), B(x_i^b + \Delta x))}{\text{MIN}(A(x_i^a), B(x_i^b + \Delta x))} \quad (4.3)$$

Embora a expressão acima seja apresentada no caso discreto ela é válida para o caso contínuo com as devidas modificações.

Se as funções analisadas forem idênticas, apresentando igual amplitude média, a correlação é encontrada na expressão (4.3) quando $Q'(\Delta x)$ for a unidade. Porém, como as funções $A(x_i^a)$ e $B(x_i^b + \Delta x)$ podem estar sujeitas a pequenas diferenças randômicas, as componentes do somatório excedem a unidade, de forma que a posição de melhor correlação é encontrada quando o coeficiente $Q'(\Delta x)$ for mínimo.

Esta expressão apresenta ainda uma indefinição computacional quando os valores das funções analisadas estão

em torno de zero ou é zero. Isto pode ser evitado aplicando uma translação única a todos os valores das funções analisadas /16/.

4.1.1.2 Função erro

É também denominada função diferença e pode ser matematicamente descrita por:

. no caso discreto:

$$D(\Delta x) = \frac{1}{x_n - x_{m+1}} \cdot \sum_{i=x_m}^{i=x_n} |A(x_i^a) - B(x_i^b + \Delta x)| \quad (4.4)$$

. no caso contínuo:

$$D(\delta x) = \frac{1}{x_n - x_m} \cdot \int_{x_m}^{x_n} |A(x_i^a) - B(x_i^b + \delta x)| dx \quad (4.5)$$

A posição de melhor correlação é encontrada quando a função de correlação $D(\Delta x)$, no caso discreto, ou $D(\delta x)$, no caso contínuo for mínima.

Esta função de correlação não falha no caso das funções analisadas serem monotônicas, entretanto é sensível a pequenas variações de amplitude entre as funções, podendo apresentar uma correlação errônea. Yaninis /16/, na prática, altera esta expressão visando proporcionar uma normalização para compensar os níveis globais entre as duas funções analisadas e fornecer valores comparáveis para todo x e Δx :

$$D'(\Delta x) = \frac{1}{x_n - x_{m+1}} \cdot \sum_{i=x_m}^{i=x_n} \left| \frac{A(x_i^a) - B(x_i^b + \Delta x)}{A(x_i^a) + B(x_i^b + \Delta x)} \right| \quad (4.6)$$

Esta expressão é válida para os casos contínuos com as devidas modificações e obedecem ao mesmo critério anteriormente estabelecido para a posição de melhor correlação

das expressões (4.4) e (4.5).

4.1.1.3 Função erro quadrático

É definida matematicamente por:

. no caso discreto:

$$S(\Delta x) = \frac{1}{x_n - x_{m+1}} \cdot \sum_{i=x_m}^{i=x_n} (A(x_i^a) - B(x_i^b + \Delta x))^2 \quad (4.7)$$

. no caso contínuo :

$$S(\delta x) = \frac{1}{x_n - x_m} \cdot \int_{x_m}^{x_n} (A(x_i^a) - B(x_i^b + \delta x))^2 dx \quad (4.8)$$

A posição de melhor correlação é encontrada quando a função de correlação $S(\Delta x)$, no caso discreto, ou $S(\delta x)$, no caso contínuo, for mínima.

A principal vantagem desta função de correlação em relação a função erro reside no fato dela amplificar mais os pequenos erros, fornecendo, conseqüentemente, com melhor exatidão a posição de melhor correlação.

4.1.1.4 Função covariância cruzada

Pode ser expressa matematicamente por:

. no caso discreto:

$$R(\Delta x) = \frac{1}{x_n - x_{m+1}} \cdot \sum_{i=x_m}^{i=x_n} (A(x_i^a) \cdot B(x_i^b + \Delta x)) \quad (4.9)$$

. no caso contínuo:

$$R(\delta x) = \frac{1}{x_n - x_m} \cdot \int_{x_m}^{x_n} (A(x_i^a) \cdot B(x_i^b + \delta x)) dx \quad (4.10)$$

A posição de melhor correlação é encontrada quando a função de correlação $R(\Delta x)$, no caso discreto, ou $R(\delta x)$, no caso contínuo for máxima.

A função de correlação covariância cruzada não pode ser

aplicada quando as funções analisadas são monotônicas. Yaniris /16/ surge considerar a definição estatística da covariância, usando o artifício de transladar as funções analisadas de suas médias, passando a ser expressa no caso discreto por:

$$C(\Delta x) = \frac{1}{x_n - x_{m+1}} \cdot \sum_{i=x_m}^{i=x_n} ((A(x_i^a) - \bar{A}) \cdot (B(x_i^b + \Delta x) - \bar{B})) \quad (4.11)$$

onde:

$$\bar{A} = \frac{1}{x_n - x_{m+1}} \cdot \sum_{i=x_m}^{i=x_n} A(x_i^a) \quad (4.12)$$

$$\bar{B} = \frac{1}{x_n - x_{m+1}} \cdot \sum_{i=x_m}^{i=x_n} B(x_i^b)$$

Esta alteração também é válida para o caso contínuo com as devidas modificações e obedecem aos critérios estabelecidos anteriormente para a posição de melhor correlação das expressões (4.9) e (4.10).

4.2 CORRELAÇÃO

A correlação de áreas a nível de *pixel* examina áreas pré-estabelecidas no estereopar de imagens e aplica uma função de correlação aos valores numéricos das funções de tom de cinza.

Para ilustrar, seja um estereopar de imagens digitais, no qual as imagens possuem sistemas de coordenadas independentes e suas funções de tom de cinza são expressas matematicamente por: $G_e(x_i, y_j)^e$ e $G_d(x_i + \Delta x, y_j + \Delta y)^d$, onde os índices e e d representam as imagens esquerda e direita,

respectivamente.

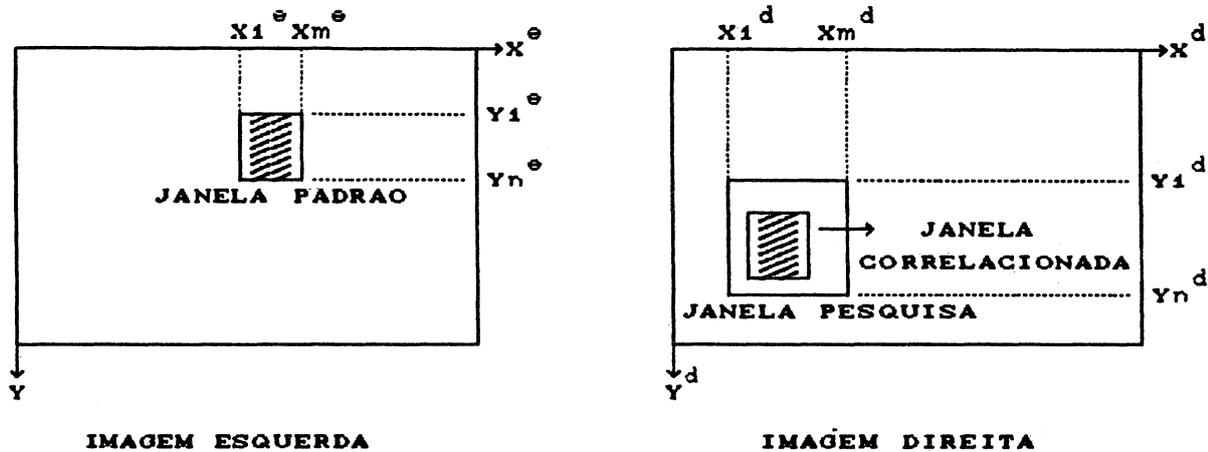


Fig. 4.2 - Imagens digitais homólogas

As funções de correlação são implementadas nas imagens digitais através de um programa com um eficiente algoritmo, cujas operações básicas consistem em /16/:

- . na imagem esquerda, selecionar um alvo ou feição, que será denominado de janela padrão, e será tratado como uma matriz de dimensão $m_e \times n_e$;
- . na imagem direita, selecionar uma área onde está contido o alvo ou feição selecionada na imagem esquerda. Esta área será denominada janela pesquisa e será tratada como uma matriz com n_d linhas e m_d colunas, sendo $n_d > n_e$ e $m_d > m_e$; e
- . aplicar uma função de correlação às funções de tom de cinza das imagens esquerda e direita, calculando seus coeficientes.

Visto que o objetivo desta dissertação é implementar a correlação de áreas a nível de "pixel" em um estereopar de imagens digitais, e não pesquisar a melhor função de correlação, foram escolhidas para serem aplicadas as funções

de tom de cinza das imagens digitais a variante da função de correlação covariância cruzada (4.11). Sendo a função de tom de cinza uma função bidimensional discreta, as expressões (4.11) e (4.12) passam a ser expressas por:

$$C(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{X_m - X_1 + 1} \cdot \frac{1}{Y_n - Y_1 + 1} \sum_{i=X_1}^{i=X_m} \sum_{j=Y_1}^{j=Y_n} (G_e(x_i, y_j)^e - \overline{G_e}) \cdot (G_d(x_i + \Delta x, y_j + \Delta y)^d - \overline{G_d}) \quad (4.13)$$

onde:

$$\overline{G_e} = \frac{1}{X_m - X_1 + 1} \cdot \frac{1}{Y_n - Y_1 + 1} \sum_{i=X_1}^{i=X_m} \sum_{j=Y_1}^{j=Y_n} G_e(x_i, y_j)^e \quad (4.14)$$

$$\overline{G_d} = \frac{1}{X_m - X_1 + 1} \cdot \frac{1}{Y_n - Y_1 + 1} \sum_{i=X_1}^{i=X_m} \sum_{j=Y_1}^{j=Y_n} G_d(x_i, y_j)^d$$

O algoritmo deve ser cíclico, pois a janela padrão é combinada com todas as sub-matrizes de dimensão $m \times n$ da janela pesquisa. Para cada combinação, a função de correlação assume um valor e, dentre estes, a posição de melhor correlação é determinada de acordo com o critério estabelecido para a função de correlação aplicada. Por exemplo, no caso da função de correlação covariância cruzada, a posição de melhor correlação é determinada pelo valor máximo que a função $C(\Delta x, \Delta y)$ assume.

A aplicação da função de correlação determina uma sub-matriz de dimensão de $m_e \times n_e$ na janela pesquisa da imagem direita, que dentro do critério estabelecido pela função de correlação aplicada, apresenta o comportamento mais semelhante à função de tom de cinza, da janela padrão da imagem esquerda. Esta sub-matriz será denominada de janela correlacionada.

5 CORRELAÇÃO PONTUAL POR MÍNIMOS QUADRADOS

As funções de tom de cinza das janelas padrão e correlacionada possuem geralmente alta correlação, porém esta não é perfeita. Devido aos problemas inerentes ao processo de aquisição da imagem, as funções apresentam pequenas diferenças nos tons de cinza e translações na posição /10/. Para obter pontos homólogos com acurada precisão é necessário que a correlação existente entre as janelas seja refinada.

Refinar a correlação consiste em aumentar o grau de correlação entre as funções de tom de cinza das janelas, de forma que possam ser determinadas as coordenadas dos pontos homólogos, representativos do alvo ou feição do estereopar de imagens digitais. Isto é obtido aplicando-se o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados a um modelo matemático que minimize as distorções geométricas e radiométricas da imagem e possibilite determinar as coordenadas dos pontos homólogos.

5.1 MODELO MATEMÁTICO DA CORRELAÇÃO REFINADA

O estabelecimento do modelo matemático que relaciona funções de tom de cinza de um estereopar de imagens digitais

conjugadas deve levar em conta, segundo Ackermann /1/, que estas sofrem:

- . distorções geométricas por pertencerem a perspectivas diferentes; e
- . diferenças sistemáticas radiométricas tais como a diferença de brilho e fator de escala devido as condições de iluminação diferentes na hora da tomada de cada imagem.

Assim, o modelo matemático da correlação refinada deve considerar duas transformações: uma geométrica e outra radiométrica /1/, /10/, embora a magnitude destas deformações e distorções dependa, ainda, da dimensão do "pixel", do tamanho e da textura do objeto imageado /10/.

Ackerman /1/ e Peltl /10/ sugerem aplicar a transformação afim no plano para a transformação geométrica, com seis parâmetros:

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}^d = \begin{bmatrix} p_0 \\ p_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_4 & p_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}^e \quad (5.1)$$

onde:

$(x,y)^e$ = coordenadas no sistema de coordenadas da imagem esquerda para um ponto da janela padrão; e

$(x,y)^d$ = coordenadas no sistema de coordenadas da imagem direita para um ponto da janela correlacionada.

Para a transformação radiométrica, /1/ e /10/ sugerem a transformação isogonal no espaço unidimensional, levando em consideração apenas dois parâmetros: uma translação (r_0) e um fator de escala (r_1).

$$\overline{G}_e(x,y)^e = r_0 + r_1 \cdot \overline{G}_d(T_x, T_y) \quad (5.2)$$

Esta expressão representa a equação de observação, onde \bar{G}_e e \bar{G}_d são, respectivamente, funções de tom de cinza observadas nas imagens esquerda e direita. Estas funções, além das distorções geométricas e diferenças sistemáticas radiométricas, apresentam ruídos:

$$\bar{G}_e(x,y)^\circ = G_e(x,y)^\circ + n(x,y)^\circ \quad (5.3)$$

$$\bar{G}_d(T_x,T_y) = G_d(T_x,T_y) + n(T_x,T_y) \quad (5.4)$$

Substituindo as expressões (5.3) e (5.4) na (5.2):

$$G_e(x,y)^\circ + n(x,y) = r_0 + r_1 \cdot (G_d(T_x,T_y) + n(T_x,T_y)) \quad (5.5)$$

Considerando a diferença entre os ruídos como o resíduo entre as funções de tom de cinza observadas:

$$V(x,y)^\circ = n(x,y)^\circ - r_1 \cdot n(T_x,T_y) \quad (5.6)$$

Combinando as expressões (5.5) e (5.6):

$$G_e(x,y)^\circ + V(x,y)^\circ = r_0 + r_1 \cdot G_d(T_x,T_y) \quad (5.7)$$

Para simplificar, será adotada a notação abaixo:

$$G_e(x,y)^\circ + V(x,y)^\circ = TR(r_j, G_d(T_x,T_y)) \text{ onde } j = 0, 1 \quad (5.8)$$

Ou ainda:

$$G_e(x,y)^\circ + V(x,y)^\circ = TR(r, G) \quad (5.9)$$

Expandindo esta equação por Taylor, e considerando somente os termos de primeira ordem:

$$\begin{aligned} G_e(x,y)^\circ + V(x,y)^\circ = TR(r_j^\circ, G_d(T_x, T_y)^\circ) + \\ + \sum_{j=0}^{j=1} \frac{\partial TR(r, G)}{\partial r_j} \cdot dr_j + \\ + \sum_{i=0}^{i=5} \left(\frac{\partial TR(r, G)}{\partial T_x} \cdot \frac{\partial T_x}{\partial p_i} + \frac{\partial TR(r, G)}{\partial T_y} \cdot \frac{\partial T_y}{\partial p_i} \right) \cdot dp_i \end{aligned} \quad (5.10)$$

Designando ΔG a diferença entre as funções de tom de cinza:

$$\Delta G = G_0(x,y)^0 - TR(r_j^0, G_0(T_x, T_y)^0) \quad (5.11)$$

Aplicando a expressão (5.11) em (5.10):

$$\Delta G + V(x,y)^0 = \sum_{j=0}^{j=1} \frac{\partial TR(r, G)}{\partial r_j} \cdot dr_j + \quad (5.12)$$

$$+ \sum_{i=0}^{i=5} \left(\frac{\partial TR(r, G)}{\partial T_x} \cdot \frac{\partial T_x}{\partial p_i} + \frac{\partial TR(r, G)}{\partial T_y} \cdot \frac{\partial T_y}{\partial p_i} \right) \cdot dp_i$$

Esta é a equação de observação linearizada, cujos pesos das observações ΔG são arbitrados iguais a unidade.

5.2 AJUSTAMENTO PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

Na equação de observação linearizada (5.12) o primeiro membro representa a diferença entre as funções de tom de cinza observadas, e no segundo, uma função dos parâmetros (r_j e p_i com $j = 0,1$ e $i = 0, \dots, 5$). Os valores observados ajustados podem ser expressos como uma função explícita dos parâmetros ajustados, ou seja:

$$L_a = F(X_a);$$

que representa a expressão geral, na forma matricial, do ajustamento paramétrico pelo método dos mínimos quadrados, onde:

L_a = vetor das funções de tom de cinza ajustados; e

X_a = vetor dos parâmetros geométricos e radiométricos ajustados $[r_0, r_1, p_0, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5]^T$.

Considerando:

$$L_a = L_b + V \quad (5.13)$$

$$X_a = X_0 + X \quad (5.14)$$

onde:

L_b = vetor das funções de tom de cinza observados da matriz padrão, na imagem esquerda;

V = vetor dos resíduos;

X_0 = vetor dos parâmetros geométricos e radiométricos aproximados $[r_0, r_1, p_0, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5]^T$; e

X = vetor das correções dos parâmetros geométricos e radiométricos.

Substituindo as expressões (5.13) e (5.14) na expressão geral do método paramétrico:

$$L_b + V = F(X_0 + X) \quad (5.15)$$

Linearizando esta expressão por Taylor:

$$L_b + V = F(X_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial X_\alpha} \right|_{X_0} \cdot X \quad (5.16)$$

Fazendo:

$$L_0 = F(X_0) = F(r_0, r_1, p_0, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5)^T$$

$$L = L_b - L_0$$

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_\alpha} \right|_{X_0} = \left. \frac{\partial T(r, G)}{\partial X_\alpha} \right|_{X_0}$$

onde:

L_0 = função dos parâmetros geométricos e radiométricos aproximados; e

A = matriz das derivadas parciais da equação de observação em relação aos parâmetros aproximados.

Reescrevendo a expressão (5.16) tem-se:

$$L + V = AX; \quad (5.17)$$

que representa o modelo matemático linearizado do

ajustamento pelo método paramétrico.

Aplicando-se a teoria dos mínimos quadrados que considera o melhor estimador das correções aos parâmetros aquele que torna mínima a soma dos quadrados do resíduos:

$$V^T V = \min$$

Substituindo nesta condição o modelo matemático linearizado do método paramétrico:

$$(AX - L)^T \cdot (AX - L) = \min$$

$$X^T A^T A X - 2X^T A^T L + L^T L = \min$$

Igualando-se a derivada primeira desta expressão a zero para se obter o ponto de mínimo:

$$A^T A X - A^T L = 0$$

As correções dos parâmetros geométricos e radiométricos são calculados através da resolução do seguinte sistema de equações normais:

$$N = A^T \cdot A$$

$$U = A^T \cdot L \quad (5.18)$$

$$X = N^{-1} \cdot U$$

Cada par de "pixel" correspondente das janelas gera uma equação de observação. É necessário que o sistema de equações gerado seja redundante com oito incógnitas, para permitir o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados, possibilitando que as correções dos parâmetros aproximados geométricos e radiométricos sejam determinadas.

Uma vez que o modelo é não linear, os termos de segunda ordem e superiores foram desprezados na linearização por Taylor e os parâmetros iniciais são aproximados, é necessário

a utilização de um processo iterativo no ajustamento /1/, /10/.

A adequada convergência deste processo iterativo depende, principalmente, dos parâmetros aproximados iniciais e de um conveniente critério de convergência estabelecido para as correções aos parâmetros.

A cada processo iterativo a transformação geométrica (5.1) é aplicada às coordenadas $(x,y)^e$ de cada ponto da janela padrão, calculando coordenadas dos pontos homólogos $(x,y)^d$ na janela correlacionada. Estas coordenadas geram uma nova malha. Como a função de tom de cinza é uma função de posição, estas coordenadas não correspondem a função de tom de cinza da malha regular, necessitando associá-las a um novo conjunto de tons de cinza. Este novo conjunto de tons de cinza deve ser calculado. Isto é realizado interpolando-se a função de tom de cinza da janela correlacionada, para a qual foi criada a nova malha num processo denominado reamostragem da imagem /1/, /10/.

5.2.1 Parâmetros aproximados iniciais

Os parâmetros geométricos de translação aproximados (p_0^o e p_3^o) são arbitrados pela diferença entre as coordenadas x e y , na primeira posição, das janelas correlacionada e padrão, nas imagens direita e esquerda, respectivamente:

$$p_0^o = x_1^d - x_1^e \quad (5.10)$$

$$p_3^o = y_1^d - y_1^e$$

Os parâmetros geométricos aproximados, componentes da matriz de transformação, são arbitrados iguais a matriz

identidade:

$$\begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_4 & p_5 \end{bmatrix}^{\circ} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

Os parâmetros radiométricos aproximados são calculados nas áreas limitadas pelas janelas. Para a diferença de brilho aproximada (r_0°) é arbitrada a diferença entre as médias das funções de tom de cinza observadas. E para o fator de escala (r_1°) é arbitrado a razão entre os intervalos fornecidos pela diferença entre o maior e o menor tom de cinza assumido pela função de tom de cinza nas janelas padrão e correlacionada.

5.2.2 Matriz das derivadas parciais

Os elementos componentes desta matriz decorrem da derivada parcial da equação de observação (5.2) em relação aos parâmetros ajustados. Estes elementos são calculados numericamente com os valores dos parâmetros aproximados.

Assim:

$$\frac{\partial TR(r, G)}{\partial r_0} = 1; \quad (5.21)$$

$$\frac{\partial TR(r, G)}{\partial r_1} = G_d(T_x, T_y); \quad (5.22)$$

$$\frac{\partial TR(r, G)}{\partial p_0} = r_1 \cdot \frac{\partial TR(r, G)}{\partial T_x} \cdot \frac{\partial T_x}{\partial p_0} = r_1 \cdot \frac{\partial TR(r, G)}{\partial T_x} \cdot 1; \quad (5.23)$$

A derivada parcial da equação de observação em relação a transformação geométrica na direção x , representa o gradiente na direção x da função de tom de cinza, a qual foi aplicada uma transformação geométrica. Este gradiente será designado por g_x . Então:

$$\frac{\partial TR(r, G)}{\partial p_0} = r_1 \cdot g_x; \quad (5.24)$$

$$\frac{\partial TR(r, G)}{\partial p_1} = r_1 \cdot \frac{\partial TR(r, G)}{\partial T_x} \cdot \frac{\partial T_x}{\partial p_1} = r_1 \cdot g_x \cdot x^e; \quad (5.25)$$

$$\frac{\partial TR(r, G)}{\partial p_2} = r_1 \cdot \frac{\partial TR(r, G)}{\partial T_x} \cdot \frac{\partial T_x}{\partial p_2} = r_1 \cdot g_x \cdot y^e; \quad (5.26)$$

$$\frac{\partial TR(r, G)}{\partial p_3} = r_1 \cdot \frac{\partial TR(r, G)}{\partial T_y} \cdot \frac{\partial T_y}{\partial p_3} = r_1 \cdot \frac{\partial TR(r, G)}{\partial T_y} \cdot 1; \quad (5.27)$$

Analogamente, a derivada parcial da equação de observação em relação a transformação geométrica na direção y representa o gradiente nesta direção da função de tom de cinza, que será designado por g_y . Portanto:

$$\frac{\partial TR(r, G)}{\partial p_3} = r_1 \cdot g_y; \quad (5.28)$$

$$\frac{\partial TR(r, G)}{\partial p_4} = r_1 \cdot \frac{\partial TR(r, G)}{\partial T_y} \cdot \frac{\partial T_y}{\partial p_4} = r_1 \cdot g_y \cdot x^e; \quad (5.29)$$

$$\frac{\partial TR(r, G)}{\partial p_5} = r_1 \cdot \frac{\partial TR(r, G)}{\partial T_y} \cdot \frac{\partial T_y}{\partial p_5} = r_1 \cdot g_y \cdot y^e; \quad (5.30)$$

Esta matriz terá dimensão $[(n.m) \times 8]$, sendo $(n.m)$ o número total de "pixels" utilizado na janela padrão, com n linhas e m colunas.

5.2.3 Gradientes da função de tom de cinza

Segundo Stack /11/, uma função contínua e bidimensional $G(x,y)$, que possui diferencial em um determinado intervalo, pode ser expandida em série de Taylor. Portanto, $G(x_{i+1}, y_{j+1})$ pode ser expressa em termos da função $G(x_i, y_j)$ e suas derivadas parciais em relação a x e y :

$$G(x_{i+1}, y_{j+1}) = G(x_i, y_j) + \frac{\partial G(x_i, y_j)}{\partial x} \cdot (x_{i+1} - x_i) +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\partial G(x_i, y_j)}{\partial y} (y_{j+1} - y_j) + \\
& + \frac{\partial^2 G(x_i, y_j)}{\partial x^2} \frac{(x_{i+1} - x_i)^2}{2!} + \\
& + \frac{\partial^2 G(x_i, y_j)}{\partial y^2} \frac{(y_{j+1} - y_j)^2}{2!} + \dots
\end{aligned} \tag{5.31}$$

Supondo que o ponto (x_i, y_j) esteja muito próximo de (x_{i+1}, y_{j+1}) , de modo que $(x_{i+1} - x_i)^2$ e $(y_{j+1} - y_j)^2$ possam ser negligenciados, assim como os termos superiores aos de segunda ordem. Reescrevendo, portanto, a expressão acima tem-se:

$$\begin{aligned}
G(x_{i+1}, y_{j+1}) = G(x_i, y_j) + \frac{\partial G(x_i, y_j)}{\partial x} \cdot (x_{i+1} - x_i) + \\
+ \frac{\partial G(x_i, y_j)}{\partial y} \cdot (y_{j+1} - y_j)
\end{aligned} \tag{5.32}$$

As derivadas parciais da função representam as contribuições nas direções x e y , isto é, são os gradientes g_x e g_y , respectivamente, calculados nos pontos $x = x_i$ e $y = y_j$.

$$G(x_{i+1}, y_{j+1}) = G(x_i, y_j) + g_x \cdot (x_{i+1} - x_i) + g_y \cdot (y_{j+1} - y_j) \tag{5.33}$$

Para analisar o comportamento desta função na direção x , considera-se a função constante na direção y , fazendo $y_{j+1} = y_j$, de modo que o último termo da expressão (5.33) se anula, obtendo-se assim:

$$G(x_{i+1}, y_j) = G(x_i, y_j) + g_x \cdot (x_{i+1} - x_i) \tag{5.34}$$

Portanto o gradiente na direção X será:

$$g_x = \frac{G(x_{i+1}, y_j) - G(x_i, y_j)}{(x_{i+1} - x_i)} \tag{5.35}$$

Analogamente, para analisar o comportamento da função na direção y , considera-se a função constante na direção x , fazendo $x_{i+1} = x_i$ na expressão (5.33):

$$G(x_i, y_{j+1}) = G(x_i, y_j) + g_y \cdot (y_{j+1} - y_j) \tag{5.36}$$

E o gradiente na direção y será:

$$g_y = \frac{G(x_i, y_{j+1}) - G(x_i, y_j)}{(y_{j+1} - y_j)} \quad (5.37)$$

Ao derivar a equação de observação (5.2) para calcular os elementos componentes da matriz das derivadas parciais verifica-se que o gradiente deve ser calculado para a função de tom de cinza na imagem direita. Pertl /10/ sugere calcular os gradientes g_x e g_y nas duas funções de tom de cinza, das janelas padrão e correlacionada, e empregar no processo de ajustamento a média destes gradientes, tanto na direção x quanto na y , visando assegurar simetria e otimizar iterações.

5.2.4 Critério de convergência das correções dos parâmetros

O modelo matemático, em estudo, é complexo, envolvendo dois tipos de transformações: geométrica e radiométrica. O critério de convergência dos parâmetros deve ser estabelecido individualmente de acordo com a natureza destes tipos de transformações.

O critério de convergência dos parâmetros geométricos deve levar em consideração o tamanho do "pixel" nas direções horizontal e vertical.

É adotado um deslocamento máximo para os parâmetros geométricos de translação de 0,1% do tamanho do "pixel" nas direções horizontal e vertical. Por exemplo, para a câmara de TV-HR-600 que possui 512 X 480 "pixels" com tamanho de 10 X 15,6 μm , o critério de convergência estabelecido para p_0 é igual 0,01 μm e para p_9 igual a 0,016 μm .

Para os parâmetros geométricos p_1 , p_2 , p_4 e p_5 são

arbitrados:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{p1,p4} &< \frac{p0}{\text{Max } x^e} \\ \varepsilon_{p2,p5} &< \frac{\varepsilon_{p3}}{\text{Max } y^e} \end{aligned} \quad (5.38)$$

O critério de convergência dos parâmetro radiométrico deve levar em consideração os 256 níveis da escala de tons de cinza. Para o parâmetro radiométrico de translação (r_0) é arbitrado a tolerância de um décimo da unidade da escala de tom de cinza. Para o contraste de escala (r_1) é aconselhado arbitrar a razão de $1/256$, que é aproximadamente igual a 0,004.

5.2.5 Critério de precisão do ajustamento

O critério de precisão do ajustamento empregando o método dos mínimos quadrados é realizado aplicando-se o teste qui-quadrado amostral ao sigma a posteriori, que é fornecido por: $/1/, /10/$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n.m} \Delta G^2}{2(n.m) - u} \quad (5.39)$$

onde :

$$\Delta G = (r_0^a + r_1^a \cdot G_d(T_x, T_y)^a) - G_e(x, y)^e \quad (5.40)$$

$(n.m)$ = número total de "pixels" usado nas janelas padrão e correlacionada para refinar a correlação encontrada do alvo ou feição; e

u = número de parâmetros geométricos e radiométricos, que no caso são oito.

A estimativa de precisão dos parâmetros é fornecida pela matriz variância-covariância dos parâmetros:

$$\Sigma X^a = \hat{\sigma}_0^2 \cdot N^{-1} \quad (5.41)$$

5.2.6 Reamostragem

A imagem digital é definida por uma malha regular, igualmente espaçada. A cada iteração os parâmetros geométricos ajustados são aplicados às coordenadas da janela padrão, na imagem esquerda, calculando assim coordenadas dos pontos correspondentes na janela correlacionada da imagem direita:

$$\begin{aligned} x_i'^d &= p_0^a + p_1^a \cdot x_i^e + p_2^a \cdot y_j^e \\ y_j'^d &= p_3^a + p_1^a \cdot x_i^e + p_2^a \cdot y_j^e \end{aligned} \quad (5.42)$$

Estas coordenadas $(x_i', y_j')^d$, da janela correlacionada, determinarão novas posições dos "pixels" que não estarão alinhadas a malha regular inicial, formando uma nova malha distorcida, dentro da janela correlacionada na imagem direita. Os tons de cinza associados a estas novas posições também não corresponderão mais aos tons da malha regular, e sim a um novo conjunto de tons de cinza.

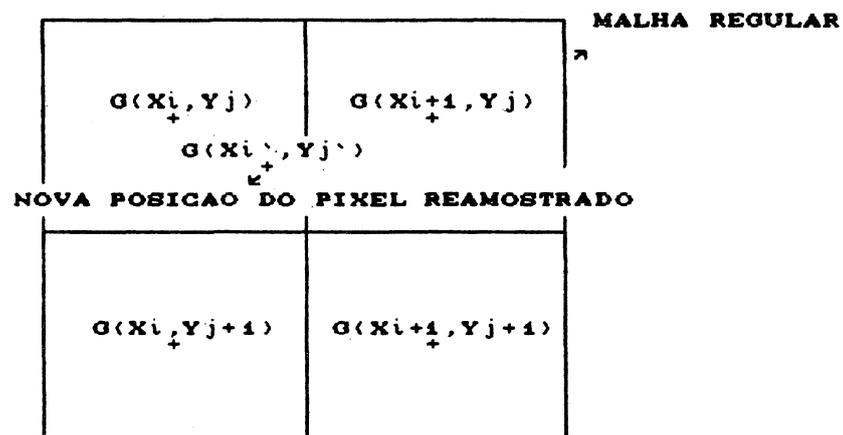


Fig. 5.1 - Malha regular X malha transformada geometricamente

Este novo conjunto de tons de cinza deve ser calculado

levando em consideração os deslocamentos das novas posições dos "pixels", ou seja, a função de tom de cinza da janela correlacionada na imagem direita deve ser reamostrada. O método de reamostragem sugerido em /1/ e /10/ é a interpolação bilinear, que consiste em aplicar três interpolações lineares a quatro pixels vizinhos.

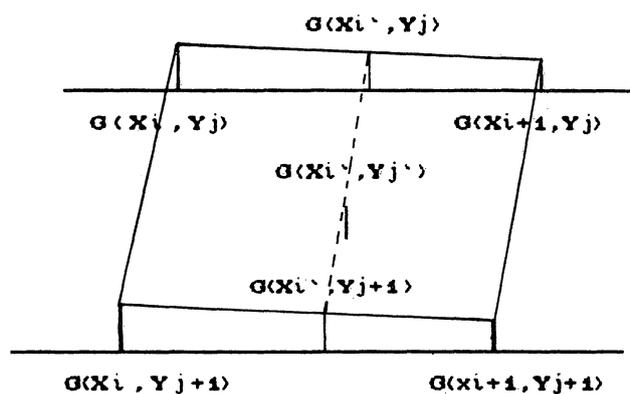


Fig 5.2 - Reamostragem

O processo de reamostragem empregando interpolação bilinear, ilustrado acima, consiste basicamente em:

- 1 . interpolar o tom de cinza ao longo da linha $\overline{G(x_i, y_j)G(x_{i+1}, y_j)}$, obtendo-se o tom de cinza na posição $G(x_i', y_j)$;
- 2 . interpolar o tom de cinza ao longo da linha $\overline{G(x_i, y_{j+1})G(x_{i+1}, y_{j+1})}$, determinando o tom de cinza na posição $G(x_i', y_{j+1})$;
- 3 . interpolar o tom de cinza ao longo da linha $\overline{G(x_i', y_j)G(x_i', y_{j+1})}$, obtendo-se o tom de cinza na nova posição $G(x_i', y_j')$.

O modelo matemático da interpolação bilinear que melhor exprime este procedimento é /2/:

$$G(x_i', y_j') = G(x_i, y_j) + \quad (5.43)$$

$$\begin{aligned}
& + dx (G(x_{i+1}, y_j) - G(x_i, y_j)) + \\
& + dy (G(x_i, y_{j+1}) - G(x_i, y_j)) + \\
& + dx \cdot dy \cdot (G(x_i, y_j) - G(x_{i+1}, y_j) - G(x_i, y_{j+1}) + G(x_{i+1}, y_{j+1}))
\end{aligned}$$

onde:

$$dx = x_i - x_{i'}$$

$$dy = y_j - y_{j'}$$

(5.44)

5.3 DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS DOS PONTOS HOMÓLOGOS E SUAS ESTIMATIVAS DE PRECISÃO

O objetivo da correlação pontual empregando o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados é determinar coordenadas precisas de pontos homólogos nas imagens esquerda e direita do estereopar, que tenham uma forte correlação.

Ackerman /1/ e Pertl /10/ sugerem que os pontos homólogos sejam determinados após a convergência do processo iterativo do ajustamento, aplicando o conceito de centro de gravidade a uma superfície determinada pela função de tom de cinza.

Para ilustrar, seja a função de tom de cinza $G(x,y)$ projetada na superfície plana, referida aos eixos coordenados (x,y) .

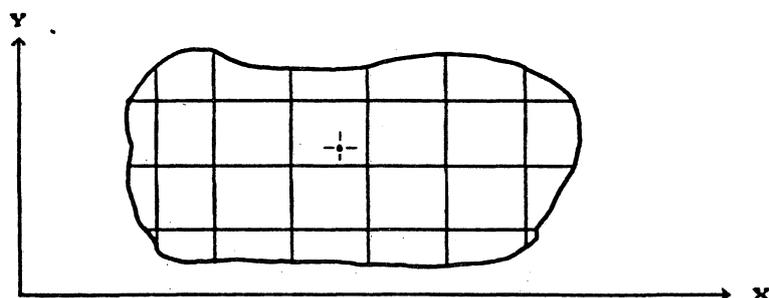


Fig. 5.3 - Centro de gravidade da janela

O centro de gravidade da janela padrão, segundo Pertl /10/, é fornecido pela média ponderada das coordenadas dos "pixels", cujos pesos são os quadrados dos gradientes da função de tom de cinza. Desta forma, as coordenadas dos pontos representativos dos alvos ou feições da janela padrão é expressa por:

$$x_c^e = \frac{\sum_{i=1}^{i=n.m} x_i \cdot g_{x_i}^2}{\sum_{i=1}^{i=n.m} g_{x_i}^2}$$

$$y_c^e = \frac{\sum_{j=1}^{j=n.m} y_j \cdot g_{y_j}^2}{\sum_{j=1}^{j=n.m} g_{y_j}^2}$$
(5.46)

O ponto $(x_c, y_c)^e$ é a seguir transformado geometricamente aplicando-se os parâmetros geométricos ajustados, a fim de determinar o seu ponto homólogo na imagem direita:

$$x_c^d = p_0^a + p_1^a \cdot x_c^e + p_2^a \cdot y_c^e$$

$$y_c^d = p_3^a + p_4^a \cdot x_c^e + p_5^a \cdot y_c^e$$
(5.47)

Porém, este ponto não é necessariamente coincidente com o centro de gravidade da superfície determinada pela função de tom de cinza da janela correlacionada, mas é o ponto correspondente ao alvo ou feição na imagem esquerda /10/.

As estimativas de precisão destas coordenadas são obtidas pela propagação da matriz variância-covariância dos parâmetros geométricos:

$$\Sigma Y = D \cdot \Sigma X_a \cdot D^T$$
(5.48)

onde:

ΣX_G = matriz variância-covariância dos parâmetros geométricos, obtida do ajustamento; e

D = matriz das derivadas parciais do modelo (5.47).

A matriz D é obtida da derivada parcial da transformação geométrica em relação aos parâmetros geométricos, calculada numericamente no ponto $(x_c, y_c)^e$. Esta matriz de dimensão 2×6 , terá o seguinte padrão:

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_x}{\partial p_0} & \frac{\partial T_x}{\partial p_1} & \frac{\partial T_x}{\partial p_2} & \frac{\partial T_x}{\partial p_3} & \frac{\partial T_x}{\partial p_4} & \frac{\partial T_x}{\partial p_5} \\ \frac{\partial T_y}{\partial p_0} & \frac{\partial T_y}{\partial p_1} & \frac{\partial T_y}{\partial p_2} & \frac{\partial T_y}{\partial p_3} & \frac{\partial T_y}{\partial p_4} & \frac{\partial T_y}{\partial p_5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_c^e & y_c^e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_c^e & y_c^e \end{bmatrix}$$

5.4 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO

Segundo Pertl /10/, a cada iteração, o coeficiente de correlação das funções de tom de cinza deve ser calculado. Entretanto, este não é um critério de convergência do ajustamento, mas sim um valor adimensional, contido no intervalo $[-1,1]$, que descreve o grau de dependência linear entre as duas funções de tom de cinza ajustadas.

Na presente dissertação, o coeficiente de correlação é calculado, após os parâmetros terem convergido, com a finalidade de avaliar o nível de resposta da correlação refinada, podendo alcançar valores tão alto quanto 0,99. Este coeficiente é expresso por:.

$$\rho_{G_e G_d} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n.m} G_{e_i}(x,y)^e \cdot G_{d_i}(x,y)^d}{\sum_{j=1}^{j=n.m} G_{e_j}(x,y)^e \cdot \sum_{k=1}^{k=n.m} G_{d_k}(x,y)^d} \quad (5.49)$$

6 · CORRELAÇÃO EPIPOLAR

A situação prática encontrada na fotogrametria consiste em imagens tomadas de perspectivas diferentes e com diferentes inclinações. Na imagem digital, isto resulta numa mudança geométrica das funções de tom de cinza representadas que, adicionando circunstâncias fotográficas na aquisição da imagem, geram problemas na correlação digital /8/.

Estes problemas podem ser simplificados se forem consideradas as relações geométricas entre o plano imagem e o espaço objeto, que são facilmente aplicadas pelo uso de técnicas da geometria perspectiva, denominada coplanaridade ou geometria epipolar /8/.

O principal conceito da geometria epipolar reside no fato das imagens de um estereopar, relativamente orientado, não possuírem, ao longo das linhas epipolares conjugadas, paralaxe p_y , apenas a paralaxe p_x , que permite determinar elevações do terreno. Assim, as relações da geometria epipolar do estereopar de imagens são calculadas e usadas para estimar pontos homólogos ao longo de linhas epipolares que contém somente paralaxe p_x .

A principal vantagem deste conceito, na correlação

digital, é que para pontos pertencentes a linhas epipolares conjugadas a rotina de procura é unidimensional, reduzindo a área de pesquisa, proporcionando uma grande redução de cálculo computacional, e, conseqüentemente, do tempo de pesquisa */7/*.

6.1 GEOMETRIA EPIPOLAR

A condição de coplanaridade exige que os centros perspectivos das imagens esquerda e direita e o ponto objeto estejam sobre o mesmo plano.

Segundo Moffit & Mikail */9/*, considerando duas imagens relativamente orientadas e sobrepostas, o plano formado pelos centros perspectivos, e o ponto objeto P no modelo é denominado plano epipolar.

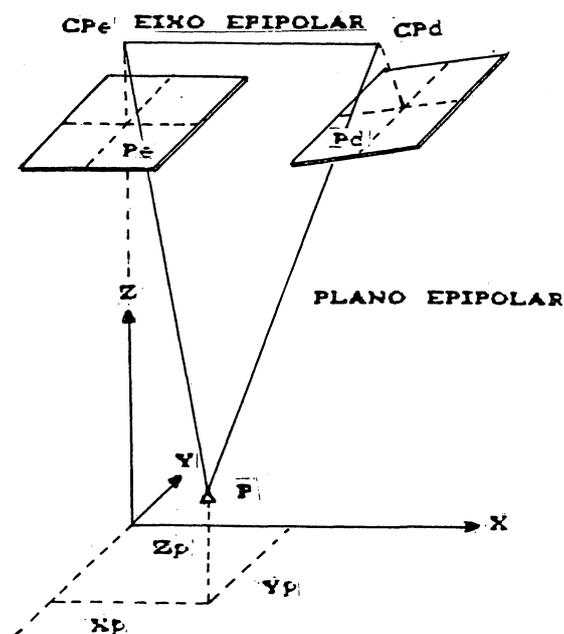


Fig. 6.1 - Coplanaridade

O plano epipolar, que configura a condição de coplanaridade, contém por definição a linha que une os centros

perspectivos CP_0 e CP_d , denominado de eixo epipolar ou mais comumente base aérea.

A interseção deste plano com os planos das imagens formam dois seguimentos de retas, um em cada imagem, denominado de linhas epipolares conjugadas.

6.2 DETERMINAÇÃO DAS LINHAS EPIPOLARES CONJUGADAS

Embora existam outros métodos para determinar as linhas epipolares conjugadas, o melhor procedimento, segundo Keating *et al.*, é o que manipula as equações de colinearidade, devido esta aproximação utilizar apenas um único ponto para determiná-las.

$$X_e = -f \cdot \frac{m_{11}(X_p - X_{Ce}) + m_{12}(Y_p - Y_{Ce}) + m_{13}(Z_p - Z_{Ce})}{m_{31}(X_p - X_{Ce}) + m_{32}(Y_p - Y_{Ce}) + m_{33}(Z_p - Z_{Ce})} \quad (6.1)$$

$$Y_e = -f \cdot \frac{m_{21}(X_p - X_{Ce}) + m_{22}(Y_p - Y_{Ce}) + m_{23}(Z_p - Z_{Ce})}{m_{31}(X_p - X_{Ce}) + m_{32}(Y_p - Y_{Ce}) + m_{33}(Z_p - Z_{Ce})} \quad (6.2)$$

$$X_d = -f \cdot \frac{m'_{11}(X_p - X_{Cd}) + m'_{12}(Y_p - Y_{Cd}) + m'_{13}(Z_p - Z_{Cd})}{m'_{31}(X_p - X_{Cd}) + m'_{32}(Y_p - Y_{Cd}) + m'_{33}(Z_p - Z_{Cd})} \quad (6.3)$$

$$Y_d = -f \cdot \frac{m'_{21}(X_p - X_{Cd}) + m'_{22}(Y_p - Y_{Cd}) + m'_{23}(Z_p - Z_{Cd})}{m'_{31}(X_p - X_{Cd}) + m'_{32}(Y_p - Y_{Cd}) + m'_{33}(Z_p - Z_{Cd})} \quad (6.4)$$

A determinação das linhas epipolares conjugadas é ilustrada na figura (6.2) e explicada nos procedimentos descritos a seguir *et al.*:

- Determinar as coordenadas do ponto A_1 com uma elevação pré-definida z_1 , empregando as coordenadas do ponto a , escolhido na imagem esquerda, $(x_a, y_a)^0$, e seus parâmetros de orientação relativa nas equações inversas da colinearidade (6.1) e (6.2). A seguir, escolher uma nova

elevação, para a qual o procedimento anterior é repetido, pois a mudança na elevação afetará a posição horizontal do ponto a no modelo. Deste modo, é escolhida uma elevação z_2 , para a qual são determinadas as coordenadas para o ponto a na posição A_2 , de coordenadas no modelo (x_{A2}, y_{A2}, z_2) .

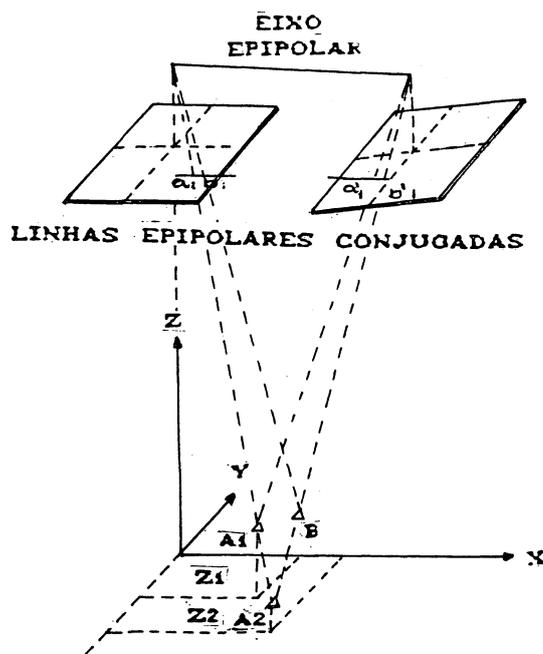


Fig. 6.2 - Determinação das linhas epipolares conjugadas

Aplicando os parâmetros da orientação exterior relativa da imagem direita e as coordenadas do ponto A_1 , (x_{A1}, y_{A1}, z_1) , nas equações de colinearidade (6.3) e (6.4), podem ser obtidas as coordenadas do ponto a_1 na imagem direita, $(x_{a1}, y_{a1})^d$. Este ponto estará, por definição, sobre a linha epipolar conjugada da imagem esquerda que contém a e ainda não foi determinada. De modo análogo, são determinadas as coordenadas na imagem direita de a_2 , $(x_{a2}, y_{a2})^d$, usando as coordenadas do ponto A_2 , (x_{A2}, y_{A2}, z_2) .

As coordenadas dos pontos a_1 e a_2 , na imagem direita, descrevem a linha epipolar que contém o ponto conjugado ao ponto a , escolhido na imagem esquerda. Esta linha se encontra na interseção entre o plano epipolar que contém A_1 e A_2 e o plano da imagem direita. Resta agora descrever um ponto adicional na imagem esquerda, que forneça a direção da linha epipolar passando pelo ponto a . Isto é obtido aplicando-se o processo inverso.

Aplicando os parâmetros de orientação relativa da imagem direita no ponto a_2 , com a elevação z_1 nas equações inversas da colinearidade (6.3) e (6.4), determina-se as coordenadas do ponto B , (x_B, y_B, z_1) . A seguir, o ponto imagem b é localizado na imagem esquerda, ao longo da linha epipolar passante pelo ponto a , através das coordenadas do ponto B e dos parâmetros de orientação da imagem esquerda aplicados nas equações de colinearidade (6.1) e (6.2).

Após a determinação das linhas epipolares conjugadas todos os alvos pertencente a linha epipolar esquerda podem ser correlacionados às suas respectivas imagens homólogas na linha epipolar direita.

De modo geral, no padrão de varredura proposto por Keating /7/, o número total de linhas epipolares conjugadas do estereopar de imagens corresponde ao número total de linhas varridas necessárias para cobrir toda a área de superposição.

6.3 CORRELAÇÃO

A correlação das imagens neste método é revertida a uma rotina de pesquisa unidimensional ao longo das linhas epipolares conjugadas que contém somente a paralaxe px .

O operador seleciona os pontos nas imagens esquerda e direita a serem correlacionados, indicando em quais linhas de varredura se encontram. A seguir, é aplicado um programa que implementa um algoritmo de correlação, como por exemplo, a função de correlação erro, função de correlação covariância cruzada ou ainda uma combinação deste método com a correlação por mínimos quadrados.

A pesquisa é incrementada ao longo da direção x , de coluna em coluna, até atender ao critério estabelecido pelo algoritmo da correlação empregada.

7 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Neste capítulo são descritos os equipamentos utilizados na estação de trabalho e os programas envolvidos na execução da parte prática desta dissertação.

7.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

A estação de trabalho é composta pela câmara TV-HR-600 b/w, acoplada a um "image capture board"* , instalado em um microcomputador IBM-PC do tipo AT com:

- . co-processor matemático 80287;
- . disco rígido de 30 megabytes;
- . dois drives de 5 1/4", sendo um de dupla densidade e outro de alta densidade;
- . RAM de 512 kbytes;
- . placa controladora de vídeo padrão EGA;
- . um monitor preto/branco e outro colorido; e
- . sistema operacional MS-DOS versão 3.3.

* *Image capture board* - Também denominado de *frame grabber*. É o conjunto da interface sinal/vídeo, quadro de memória, display lógico e interface microcomputador/usuário.

7.1.1 Câmara de TV-HR-600

A câmara de TV-HR-600 é uma câmara de alta resolução construída na tecnologia das câmaras de estado sólido, composta por uma objetiva e um sensor.

A objetiva é uma grande angular com ângulo de campo de 84°, distância focal de 24 mm, diafragma automático com aberturas variando de f 2,8 a f 16, filtro de 49 mm de diâmetro, campo fotográfico mínimo de 24 x 16 cm e distância mínima de focalização de 25 cm.

O sensor é um CCD (*Couple Charge Device*), contendo um array de 604 "pixels" horizontais por 575 "pixels" verticais com área sensível no formato 4:3 e dimensão do "pixel" de 15,6 x 10 μm .

7.2 PROGRAMAS

Foram utilizados nesta dissertação a biblioteca gráfica PC Itex Plus, um programa para aquisição das imagens digitais e programas desenvolvidos pela autora para implementar as correlações de áreas a nível de "pixel" e pontual nas imagens digitais.

Os programas foram escritos em C, uma vez que a biblioteca gráfica se encontra nesta linguagem.

A linguagem C é considerada uma linguagem de nível médio, pois combina a estruturação da linguagem de alto nível com a funcionabilidade do *assembler*.

7.2.1 Biblioteca gráfica PC Itex Plus

É um conjunto de funções primárias para o processamento da imagem digital, projetada para ser utilizada em microcomputadores IBM-PC/AT/XT e compatíveis. Ela contém funções de:

- . Inicialização e definição do *hardware* utilizado;
- . Operações com registradores;
- . Aquisição de imagens digitais;
- . Gravação/recuperação de imagens no disco rígido ou disquete;
- . Leitura/gravação de linhas, colunas, blocos, e/ou valores individuais do "pixel" no quadro de memória;
- . Operações com LUT'S (*Look up-table*);
- . Operações de processamento, filtragem e análise das imagens digitais;
- . Operações geométricas, tais como reflexão, condensação, *pan*, *scroll*, *zoom*,....; e
- . Operações gráficas, tais como desenhar linhas, retângulos, circunferência, escrever textos,

7.2.2 Programa para aquisição de imagens digitais

A aquisição das imagens digitais foi feita por um programa desenvolvido pelo Dr. Eng. Ernst Ulrich Fischer, denominado IMAGEPRO. Este programa é um conjunto de módulos que utilizam a biblioteca gráfica PC Itex Plus para aquisição, manipulação, processamento e análise da imagem digital.

7.2.3 Programa para correlação de áreas a nível de "pixel"

Foi desenvolvido um programa iterativo, denominado CB (Correlação Bilinear), com funções para recuperar um estereopar de imagens digitais, selecionar as janelas padrão e pesquisa, aplicar a função de correlação covariância cruzada e indicar as janelas correlacionadas através da primeira posição do canto superior esquerdo das janelas e de suas dimensões.

O algoritmo do programa CB pode ser descrito sucintamente da seguinte forma:

- . Inicializar os registradores;
- . Chamar a primeira imagem do estereopar;
- . Selecionar janela padrão a ser correlacionada, desenhando um cursor para marcar o canto superior esquerdo da janela e um retângulo para delimitá-la;
- . Armazenar os tons de cinza da janela padrão e suas respectivas posições na imagem digital;
- . Chamar a segunda imagem do estereopar;
- . Selecionar janela pesquisa dentro da qual se encontra a imagem homóloga do alvo da janela padrão, desenhando um cursor para marcar o canto superior esquerdo e um retângulo para delimitá-la;
- . Armazenar os tons de cinza da janela pesquisa e suas respectivas posições na imagem digital;
- . Combinar a janela padrão com sub-matrizes de mesma dimensão pertencentes a janela pesquisa aplicando a função de correlação covariância cruzada;
- . Aplicar o critério estabelecido pela função de

correlação covariância cruzada, para encontrar a sub-matriz da janela pesquisa que apresenta melhor correlação com a janela padrão; e

Imprimir a primeira posição do canto superior esquerdo das janelas padrão e da janela correlacionada e suas dimensões.

7.2.4 Programa para correlação pontual

Foi desenvolvido um programa, denominado COD (Comparador Digital), com funções que implementam a correlação de áreas a nível de "pixel" e a seguir aplica o ajustamento paramétrico às janelas correlacionadas, calculando as correções aos parâmetros geométricos e radiométricos, as coordenadas dos pontos homólogos na janelas correlacionadas e suas estimativas de precisão.

Seu algoritmo é composto pelo algoritmo da correlação de áreas a nível de "pixel", descrito no item anterior, e pelo algoritmo da correlação pontual por mínimos quadrados, descrito abaixo:

- . Determinar os parâmetros geométricos e radiométricos aproximados iniciais do ajustamento, nas janelas correlacionadas;
- . Iniciar o processo iterativo do ajustamento, calculando os gradientes das funções de tom de cinza das janelas correlacionadas, as matrizes N e U acumuladas e reamostrando a função de tom de

cinza da janela correlacionada;

- . Calcular a precisão dos parâmetros e do ajustamento;
- . Determinar o centro de gravidade da janela padrão;
- . Aplicar os parâmetros geométricos ao centro de gravidade da janela padrão para calcular seu homólogo na janela correlacionada e sua estimativa de precisão;
- . Calcular o coeficiente de correlação das funções de tom de cinza da janela padrão e da janela correlacionada reamostrada; e
- . Imprimir o resultado das correlações de área a nível de "pixel" e pontual, e do processo de ajustamento.

8 IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA

Este capítulo apresenta as aplicações e os testes implementados, utilizando os programas de correlações de áreas a nível de "pixel" e pontual.

8.1 CORRELAÇÃO DE ÁREAS A NÍVEL DE *PIXEL*

Para melhor compreensão da aplicação da função de correlação covariância cruzada na correlação de áreas a nível de "pixel", foi executado primeiro o programa CB com dados fictícios e depois com dados reais de um estereopar de imagens digitais.

8.1.1 Consideração

De modo a simplificar a designação de janela, será adotada a seguinte notação:

$$M=(l,c) \rightarrow n \times m$$

onde:

M = nome da matriz que representa a janela;

l = linha do canto superior esquerdo da matriz;

c = coluna do canto superior esquerdo da matriz;

n = numero de linhas da matriz; e

m = número de colunas da matriz.

8.1.2 Com dados fictícios

Sejam as matrizes A e P , esquematizadas abaixo, geradas aleatoriamente, onde cada linha e coluna da matriz esta associada a um elemento.

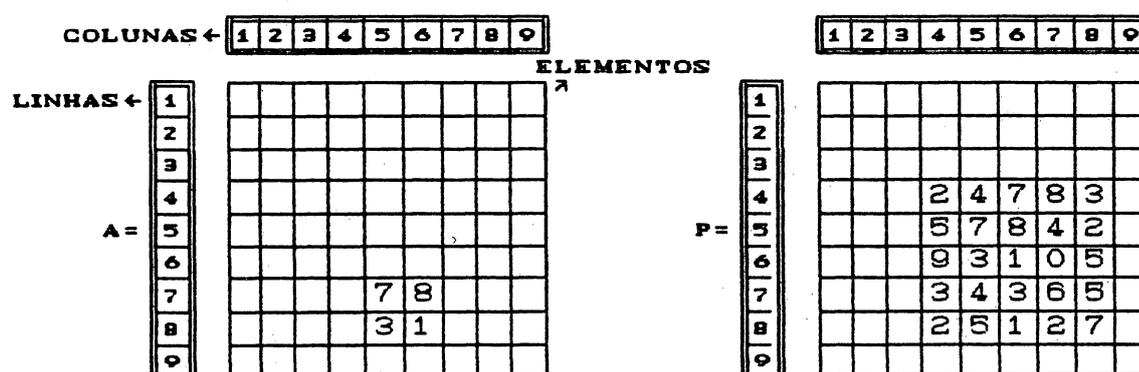


Fig. 8.1 - Matrizes A e P

Considerando a janela padrão formada apenas pelos elementos da matriz A que estão nas posições $(7,5)$, $(7,6)$, $(8,5)$ e $(8,6)$ e a janela de pesquisa formada pelos elementos da matriz P que estão nas posições $(4,4)$, $(4,5)$, $(4,6)$, $(4,7)$, $(4,8)$, $(5,4)$, $(5,5)$, $(5,6)$, $(5,7)$, $(5,8)$, $(6,4)$, $(6,5)$, $(6,6)$, $(6,7)$, $(6,8)$, $(7,4)$, $(7,5)$, $(7,6)$, $(7,7)$, $(7,8)$, $(8,4)$, $(8,5)$, $(8,6)$, $(8,7)$ e $(8,8)$, cujas notações simplificadas são $A=(7,5) \rightarrow 2 \times 2$ e $P=(4,4) \rightarrow 5 \times 5$.

Executando o programa CB, que combina os elementos da matriz $A=(7,5) \rightarrow 2 \times 2$ com os elementos das sub-matrizes de dimensão 2×2 da matriz $P=(4,4) \rightarrow 5 \times 5$, foi obtido para a função de correlação covariância cruzada os seguintes valores:

MATRIZ A	MATRIZ P	C(X, Y)
(7,5)→2X2	(4,4)→2X2	-4,375
(7,5)→2X2	(4,5)→2X2	-2,625
(7,5)→2X2	(4,6)→2X2	+3,188
(7,5)→2X2	(4,7)→2X2	+3,313
(7,5)→2X2	(5,4)→2X2	+1,750
(7,5)→2X2	(5,5)→2X2	+8,188 ← MÁXIMO
(7,5)→2X2	(5,6)→2X2	+5,500
(7,5)→2X2	(5,7)→2X2	-0,813
(7,5)→2X2	(6,4)→2X2	+2,438
(7,5)→2X2	(6,5)→2X2	-2,063
(7,5)→2X2	(6,6)→2X2	-6,375
(7,5)→2X2	(6,7)→2X2	3,250
(7,5)→2X2	(7,4)→2X2	-0,625
(7,5)→2X2	(7,5)→2X2	+1,563
(7,5)→2X2	(7,6)→2X2	+4,250
(7,5)→2X2	(7,7)→2X2	0,000

Aplicando o critério da função de correlação covariância cruzada, o programa indica que as matrizes $A=(7,5) \rightarrow 2X2$ e $P=(5,5) \rightarrow 2X2$, para as quais a função de correlação assume o valor 8,188, apresentam correlação, como pode ser visto na fig. 8.1.

8.1.3 Com dados reais

Utilizando uma placa de invar de 1 m, com circunferências de 3 mm de diâmetro a cada 10 cm, apoiada verticalmente em uma parede branca, foram tomadas duas imagens digitais, com a câmara de TV-HR-600, na escala de 1:61,25, com 80% de superposição, a uma distancia de 1,47 m e aerobase de 11,5 cm.

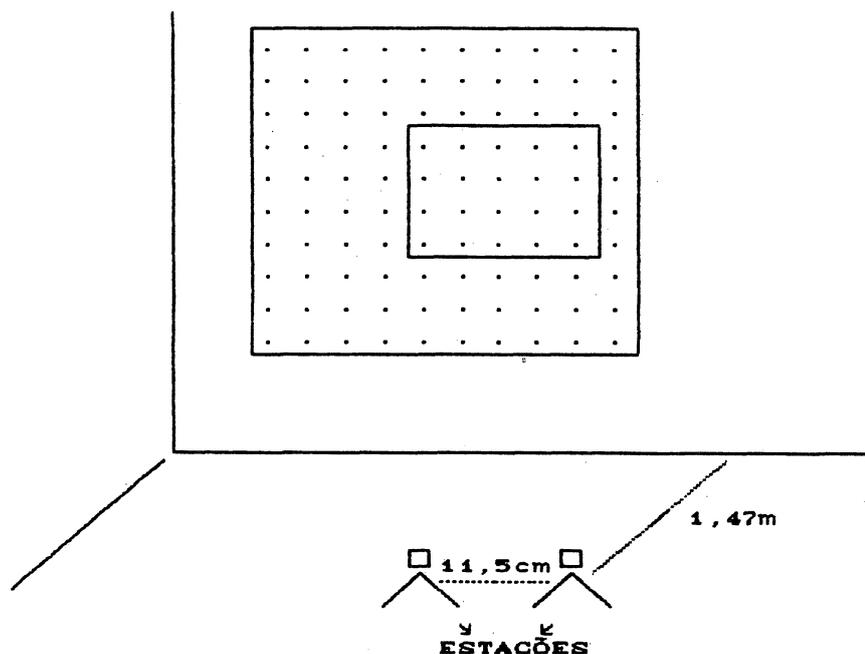


Fig. 8.2 - Esquema de aquisição do estereopar de imagens digitais

O programa IMAGEPRO, através de seus módulos, grava o estereopar de imagens digitais, seleciona um alvo (janela padrão) e uma área de pesquisa (janela pesquisa), e lê as coordenadas das janelas e os seus respectivos tons de cinza, obtendo os dados representados nas figuras abaixo:

COLUNAS DA IMAGEM DIGITAL		379	380	381	382	383	
27		188	181	164	180	182	TONS DE CINZA DA IMAGEM DIGITAL
28		188	142	94	143	194	
29		171	83	3	59	175	
30		150	39	0	19	145	
31		147	45	0	61	154	
32		168	112	60	150	182	
33		174	149	126	199	218	

Fig. 8.3 - Janela padrão

	255	256	257	258	259	260	261	262	263
12	161	170	165	160	170	165	162	163	155
13	156	161	166	154	164	161	159	157	151
14	155	167	165	155	153	156	165	162	153
15	160	158	152	117	84	113	166	167	156
16	153	161	133	36	0	59	161	189	156
17	148	146	124	19	0	17	113	202	162
18	148	149	116	13	0	67	141	200	155
19	150	147	139	74	50	120	145	175	155
20	154	149	148	125	137	180	178	162	148
21	158	144	146	125	131	171	195	196	147

Fig. 8.4 - Janela de pesquisa

Executando o programa CB, que combina os elementos da matriz PADRAO=(27,39)→7X5 com os elementos das sub-matrizes de dimensão 7X5 da matriz PESQUISA=(12,255)→10X9, são fornecidos os seguintes valores para a função de correlação covariância cruzada:

ALVO	PESQUISA	C(X<Y)
(27, 39)→7X5	(12, 255)→7X5	-695,514
(27, 39)→7X5	(12, 256)→7X5	+542,857
(27, 39)→7X5	(12, 257)→7X5	1427,371
(27, 39)→7X5	(12, 258)→7X5	1013,571
(27, 39)→7X5	(12, 259)→7X5	-123,600
(27, 39)→7X5	(13, 255)→7X5	-84,607
(27, 39)→7X5	(13, 256)→7X5	1680,800
(27, 39)→7X5	(13, 257)→7X5	2775,971
(27, 39)→7X5	(13, 258)→7X5	1777,400
(27, 39)→7X5	(13, 259)→7X5	23,629
(27, 39)→7X5	(14, 255)→7X5	438,772
(27, 39)→7X5	(14, 256)→7X5	2433,428
(27, 39)→7X5	(14, 257)→7X5	3523,600 ← MAXIMO
(27, 39)→7X5	(14, 258)→7X5	2087,857
(27, 39)→7X5	(14, 259)→7X5	-37,743
(27, 39)→7X5	(15, 255)→7X5	+176,143
(27, 39)→7X5	(15, 256)→7X5	1860,543
(27, 39)→7X5	(15, 257)→7X5	2709,143
(27, 39)→7X5	(15, 258)→7X5	1437,686
(27, 39)→7X5	(15, 259)→7X5	-442,171

Aplicando o critério da função de correlação covariância cruzada, o programa indica que os elementos das

matrizes $PADRAO=(27,379) \rightarrow 7 \times 5$ e $PESQUISA=(14,257) \rightarrow 7 \times 5$, para as quais a função de correlação assume o valor 3523,600, apresentam correlação. Deste modo, as matrizes correlacionadas são:

	379	380	381	382	383		257	258	259	260	261
27	188	181	164	180	182	14	165	155	153	156	165
28	188	142	94	143	194	15	152	117	84	113	166
29	171	83	3	59	175	16	133	36	0	59	161
30	150	39	0	19	145	17	124	19	0	17	113
31	147	45	0	61	154	18	116	13	0	67	141
32	168	112	60	150	182	19	139	74	50	120	145
33	174	149	126	199	218	20	148	125	137	180	178

Fig. 8.5 - Janelas correlacionadas

Verifica-se que a distribuição dos tons de cinza da matriz $PESQUISA=(14,257) \rightarrow 7 \times 5$ apresenta um comportamento semelhante a da matriz $PADRAO=(27,379) \rightarrow 7 \times 5$.

Como se trata de um mesmo alvo em imagens digitais que formam um estereopar, pode-se concluir que as janelas $PADRAO=(27,379) \rightarrow 7 \times 5$ e $PESQUISA=(14,257) \rightarrow 7 \times 5$ apresentam uma correlação a nível de "pixel", porém esta correlação não é perfeita devido aos problemas inerentes a aquisição das imagens, que causam distorções geométricas e diferenças radiométricas.

8.2 CORRELAÇÃO PONTUAL

Com o objetivo de analisar os resultados da correlação pontual, foi implementado o programa COD a estereopares de imagens digitais com alvos pré-sinalizados e com alvos naturais, em dois tipos de teste:

- . correlações pontuais de um alvo, ou feição, delimitado por pares de janelas distintos; e
- . correlação pontual de alvos ou feições do estereopar.

8.2.1 Alvos pré-sinalizados

Considerando o esquema de aquisição do estereopar de imagens digitais da figura 8.2. Na região de superposição das imagens foi montada uma casinha em cima de um tijolo, procurando-se obter imagens de alvos pré-sinalizados com diferentes profundidades, conforme a ilustração abaixo:

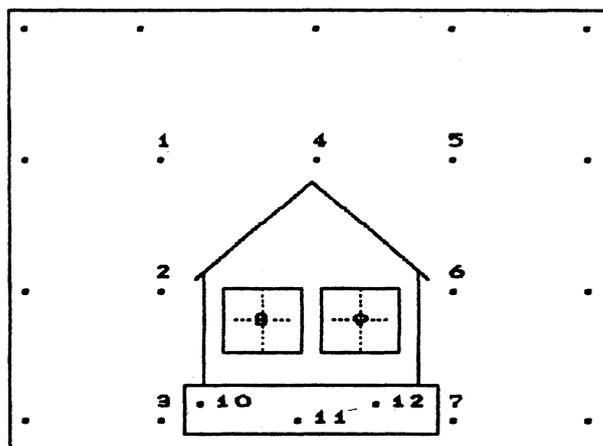


Fig. 8.6 - Representação dos alvos na imagen digital

Os alvos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 são pontos escolhidos nas circunferências da placa de invar, 8 e 9 são os cruzamentos das janelas da casinha e 10, 11 e 12 são pontos marcados a giz, sobre o tijolo.

8.2.1.1 Correlações pontuais de um alvo pré-sinalizado delimitado por pares de janelas distintos

Foi aplicado o programa de correlação pontual (COD) a

quatro pares de janelas (padrão e pesquisa) distintos, que delimitavam o mesmo alvo pré-sinalizado (ponto 8), obtendo os seguintes resultados:

RESULTADO DA CORRELAÇÃO							
NÚMERO DO PONTO: 8				DIMENSÃO DA JANELA PADRÃO: 11X6			
IMAGENS	CORRELAÇÃO AREAL		CORRELAÇÃO PONTUAL				
	X	Y	X	Y	σ_X	σ_Y	ρ_{XY}
ESQUERD.	287	287	289,45	291,85			
DIREITA	126	293	128,73	298,03	+0,312	+0,380	0,019

RESULTADO DO AJUSTAMENTO PELO M. M. Q.								
PA.	r0	r1	p0	p1	p2	p3	p4	p5
	-13,957	1,090	-147,870	0,976	-0,020	8,673	-0,002	0,994
PR.	3,061	0,024	4,952	0,017	0,000	12,720	0,017	0,040
N. DE ITERAÇÕES: 30			GRAUS DE LIBERDADE: 58			$\hat{\sigma}_0 = 70,762$		
$\rho_{GeGd} = 0,995$								

RESULTADO DA CORRELAÇÃO							
NÚMERO DO PONTO: 8				DIMENSÃO DA JANELA PADRÃO: 10X6			
IMAGENS	CORRELAÇÃO AREAL		CORRELAÇÃO PONTUAL				
	X	Y	X	Y	σ_X	σ_Y	ρ_{XY}
ESQUERD.	287	287	289,44	291,79			
DIREITA	126	293	128,72	297,98	+0,343	+0,380	0,022

RESULTADO DO AJUSTAMENTO PELO M. M. Q.								
PA.	r0	r1	p0	p1	p2	p3	p4	p5
	-13,381	1,090	-147,870	0,976	-0,020	8,673	-0,002	0,994
PR.	3,181	0,026	5,026	0,055	0,000	13,419	0,017	0,042
N. DE ITERAÇÕES: 30			GRAUS DE LIBERDADE: 52			$\hat{\sigma}_0 = 71,935$		
$\rho_{GeGd} = 0,995$								

RESULTADO DA CORRELAÇÃO							
NÚMERO DO PONTO: 8				DIMENSÃO DA JANELA PADRÃO: 8X6			
IMAGENS	CORRELAÇÃO AREAL		CORRELAÇÃO PONTUAL				
	X	Y	X	Y	σ_X	σ_Y	ρ_{XY}
ESQUERD.	287	289	289,44	291,81			
DIREITA	126	295	128,77	297,99	+0,468	+0,440	0,029

RESULTADO DO AJUSTAMENTO PELO M. M. Q.								
PA.	r0	r1	p0	p1	p2	p3	p4	p5
	-16,734	1,108	-161,488	1,036	-0,033	2,503	-0,000	1,013
PR.	3,985	0,035	6,991	0,022	0,010	16,545	0,022	0,053
N. DE ITERAÇÕES: 30			GRAUS DE LIBERDADE: 40			$\hat{\sigma}_0 = 94,766$		
$\rho_{GeGd} = 0,992$								

RESULTADO DA CORRELACAO							
NUMERO DO PONTO: 8				DIMENSAO DA JANELA PADRAO: 11X6			
IMAGENS	CORRELACAO AREAL		CORRELACAO PONTUAL				
	X	Y	X	Y	σ_X	σ_Y	ρ_{XY}
ESQUERD.	287	287	289,45	291,85			
DIREITA	126	294	128,61	297,81	+1,264	+1,020	0,140

RESULTADO DO AJUSTAMENTO PELO M. M. Q.								
PA.	r0	r1	p0	p1	p2	p3	p4	p5
		21,691	0,758	-134,652	0,923	-0,013	80,143	-0,007
PR.	6,772	0,059	21,614	0,073	0,020	23,779	0,047	0,071
N. DE ITERACOES: 90			GRAUS DE LIBERDADE: 58			$\sigma_0 = 688,186$		
$\rho_{GeGd} = 0,965$								

Onde: $\{r_0, r_1, p_0, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$ = parametros radiometricos e geometricos;

σ_0 = sigma a posteriori; e

ρ_{GeGd} = coeficiente de correlacao.

Obs.: As unidades das coordenadas (X,Y) estao em linhas e colunas da imagem digital e as unidades de suas precisoes estao em micra.

Aplicando o teste de hipótese do qui-quadrado ao $\hat{\sigma}_0^2$, com a finalidade verificar a aderência dos ajustamentos empregados na correlação pontual, extraiu-se da tabela de distribuição do qui-quadrado, para os graus de liberdade de 40, 50 e 60, os seguintes intervalos para χ^2 , considerando um nível de significância de 1%:

ν	INTERVALO
40	$20,706 < \chi^2 < 73,402$
50	$27,991 < \chi^2 < 86,661$
60	$35,535 < \chi^2 < 99,607$

Verifica-se que somente os $\hat{\sigma}_0^2$ dos dois primeiros pares de janelas se encontram dentro dos intervalos estabelecidos para o χ^2 . Desta forma, os dois primeiros ajustamentos são aceitos pelo teste de hipótese do qui-quadrado, ao nível de significância de 1%, ao passo que, os ajustamentos dos dois

N. DO	CORRELAÇÃO								DIM.	NI	GL	$\hat{\sigma}_0^2$	ρ_{Ged}		
	AREAL.		PONTUAL												
	PTO.	X	Y	X	Y	σ_X	σ_Y	ρ_{XY}						JAN.	
5	E	486	64	489,75	66,13	+	-3,685	+	-4,047	1,806	7X6	30	34	697,670	0,972
	D	334	71	338,12	72,77										
6	E	487	249	490,62	244,97	-	-0,468	-	-0,100	0,538	7X6	30	34	122,482	0,989
	D	335	250	336,93	251,71										
7	E	487	422	491,24	424,12	+	-1,881	+	-1,571	0,815	8X7	30	48	119,374	0,969
	D	335	429	338,85	430,53										
8	E	287	289	289,45	291,85	+	-0,312	+	-0,380	0,019	11X6	30	58	70,762	0,995
	D	126	293	128,73	298,03										
9	E	333	287	334,78	291,35	+	-0,469	+	-0,810	0,029	10X5	30	42	181,226	0,991
	D	172	293	173,85	297,58										
10	E	244	404	248,07	409,87	+	-0,929	+	-0,724	0,074	11X9	30	91	116,553	0,994
	D	64	410	67,95	415,26										
11	E	315	425	319,34	432,27	+	-0,751	+	-0,682	0,021	14X10	30	132	67,337	0,996
	D	134	431	138,25	438,04										
12	E	399	408	393,15	412,54	+	-1,582	+	-1,091	0,261	11X12	30	102	169,637	0,990
	D	208	414	212,11	418,25										

ONDE : AREAL. = DE ÁREAS
 DIM. JAN. = DIMENSÃO DA JANELA
 NI = NÚMERO DE ITERAÇÕES
 GL = GRAUS DE LIBERDADE
 E = IMAGEM ESQUERDA
 D = IMAGEM DIREITA

Obs.: As unidades das coordenadas (X,Y) estão em linhas e colunas da imagem digital e as unidades de suas precisões estão em micra

O estereopar de imagens apresentou pouco contraste, devido a iluminação precária no momento de sua aquisição. Isto dificultou a delimitação de alguns alvos que tiveram que ser representados por janelas grandes, como por exemplo, os alvos das janelas 11 e 12.

O teste de hipótese do qui-quadrado aplicado ao $\hat{\sigma}_0^2$ dos ajustamentos da correlação pontual, contemplou os alvos pré-sinalizados, cujos graus de liberdade são inferiores a 100. Assim, extraiu-se da tabela de distribuição do qui-quadrado, para os graus de liberdade abaixo, os seguintes intervalos para χ^2 , considerando um nível de significância de 1%:

ν	INTERVALO
28	$12,461 < \chi^2 < 56,829$
30	$13,787 < \chi^2 < 59,703$
40	$20,706 < \chi^2 < 73,402$
50	$27,991 < \chi^2 < 86,661$
60	$35,535 < \chi^2 < 99,607$
90	$59,196 < \chi^2 < 137,208$
100	$67,328 < \chi^2 < 149,449$

Aplicando o teste de hipótese do qui-quadrado ao $\hat{\sigma}_0^2$, verifica-se que somente os $\hat{\sigma}_0^2$ dos pontos 3, 8 e 10 se encontram dentro dos intervalos estabelecidos para seus graus de liberdade. Desta forma, seus ajustamentos são aceitos, ao nível de significância de 1%, ao passo que, os ajustamentos dos demais são rejeitados.

Na figura 8.6, verifica-se que os pontos 3, 8 e 10 se encontram localizados no canto esquerdo da imagem, na parte inferior, numa região onde o contraste foi um pouco melhor.

O baixo contraste das imagens do estereopar pode ser o responsável pelo alto número de iterações, uma vez que, ele foi igual para todos os alvos pré-sinalizados.

Observa-se que as precisões das coordenadas fornecidas pela correlação pontual, transformadas para as dimensões do "pixel" (μm), alcançam, para todos os pontos, uma precisão de sub-pixel. E que a correlação entre as coordenadas é muito pequena.

8.2.2 Alvos naturais

Utilizando a câmara de TV-HR-600 e o programa IMAGEPRO,

foi digitalizado um estereopar de imagens da região de Daunmehren, fotografada por uma câmara analógica, com distancia focal de 153 mm, filme Dupon com 100 ASA/21 DIN, na escala de 1:12.400.

8.2.2.1. Correlações pontuais de uma feição com pares de janelas distintos

Implementando o programa COD a janelas distintas de uma feição bem definida nas imagens digitalizadas, foram obtidos os seguintes resultados:

RESULTADO DA CORRELAÇÃO							
NÚMERO DO PONTO: 2				DIMENSÃO DA JANELA PADRÃO: 12X10			
IMAGENS	CORRELAÇÃO ÁREAS		CORRELAÇÃO PONTUAL				
	X	Y	X	Y	σ_X	σ_Y	ρ_{XY}
ESQUER.	156	181	159,05	187,25			
DIREITA	155	186	158,26	192,33	+0,437	+0,380	0,030

RESULTADO DO AJUSTAMENTO PELO M. M. Q.								
PARAM.	r0	r1	p0	p1	p2	p3	p4	p5
	-2,530	1,259	-21,035	1,156	-0,024	-2,753	0,014	1,030
PRECI.	2,134	0,019	3,423	0,014	0,014	4,305	0,025	0,014
N. DE ITERAÇÕES:	4		GRAUS DE LIBERDADE:			112		$\hat{\sigma}_0 = 60,837$
$\rho_{GEGd} = 0,998$								

RESULTADO DA CORRELAÇÃO							
NÚMER DO PONTO: 2				DIMENSÃO DA JANELA PADRÃO: 12X9			
IMAGES	CORRELAÇÃO ÁREAS		CORRELAÇÃO PONTUAL				
	X	Y	X	Y	σ_X	σ_Y	ρ_{XY}
ESQUE.	155	181	158,58	187,23			
DIREIA	154	186	157,73	192,27	+0,515	+0,430	0,051

RESULTADO DO AJUSTAMENTO PELO M. M. Q.								
PARAM.	r0	r1	p0	p1	p2	p3	p4	p5
	-2,342	1,264	-15,562	1,141	-0,041	-6,204	0,039	1,027
PRECI.	2,250	0,023	3,790	0,017	0,015	4,679	0,025	0,016
N. DE ITERAÇÕES:	5		GRAUS DE LIBERDADE:			100		$\hat{\sigma}_0 = 67,933$
$\rho_{GEGd} = 0,998$								

Obs.: As unidades das coordenadas (X,Y) estão em linhas e colunas da imagem digital e as unidades de suas precisões estão em micra

Como as janelas padrões para delimitar a feição foram grandes e a distribuição do qui-quadrado é recomendado para populações com até 100 graus de liberdade, ele foi aplicado apenas ao segundo par de janelas.

Considerando um nível de significância de 1%, extraiu-se da tabela de distribuição do qui-quadrado, para 100 graus de liberdade, o intervalo $67,328 < \chi^2 < 149,449$, de forma que, aplicando o teste de hipóteses ao qui-quadrado, o ajustamento é considerado bom.

Os pares de janelas representam o mesmo alvo, entretanto, seus posicionamentos e suas dimensões diferem de um "pixel", assim, as coordenadas e as precisões dos pontos homólogos, os parâmetros e as precisões são próximas.

A precisão das coordenadas fornecidas pela correlação pontual alcançaram, também, uma precisão de sub-pixel.

8.2.2.2 Correlação pontual de feições do estereopar de imagens digitalizadas

As imagens digitalizadas não apresentaram um contraste bom dificultando o reconhecimento de feições bem definidas, entretanto, foi aplicado o programa COD a algumas feições, obtendo o seguinte quadro resumo das correlações de áreas a nível de "pixel" e pontual e do ajustamento:

N. DO PTO.	CORRELACAO							DIM. JAN.	NI	GL	$\hat{\sigma}_0^2$	ρ_{GeGd}	
	AREAL.		PONTUAL										
	X	Y	X	Y	σ_X	σ_Y	ρ_{XY}						
1	E	6	82	7,82	85,05	+1,110	+0,958	0,138	8X6	6	40	24,228	0,998
	D	8	89	9,18	91,80								
2	E	155	181	158,58	187,23	+0,517	+0,431	0,051	12X9	5	100	67,933	0,998
	D	154	186	157,72	192,27								
3	E	414	138	417,74	142,90	+0,390	+0,314	0,022	12X11	6	124	27,279	0,998
	D	421	139	425,23	144,35								
4	E	279	394	281,46	402,24	+0,827	+0,634	0,070	17X9	8	145	75,228	0,998
	D	272	398	275,23	405,99								
5	E	373	197	377,62	208,20	+0,737	+0,571	0,197	21X13	5	265	50,880	0,998
	D	371	199	375,72	210,79								
6	E	276	44	281,03	51,51	+0,799	+0,446	0,058	18X15	5	262	70,834	0,998
	D	284	47	289,36	54,06								
7	E	190	17	195,05	23,85	+0,329	+0,434	0,137	17X11	3	179	53,729	0,998
	D	198	21	202,99	27,50								

ONDE : AREAL. = DE ÁREAS
 DIM. JAN. = DIMENSÃO DA JANELA
 NI = NÚMERO DE ITERAÇÕES
 GL = GRAUS DE LIBERDADE
 E = IMAGEM ESQUERDA
 D = IMAGEM DIREITA

Obs.: As unidades das coordenadas (X,Y) estão em linhas e colunas da imagem digital e as unidades de suas precisões estão em micra

Como todos os pontos apresentam mais que 100 graus de liberdade, exceto os pontos 1 e 2, o teste de hipóteses do qui-quadrado foi aplicado apenas a seus $\hat{\sigma}_0^2$, sendo seus ajustamentos aceitos pois os $\hat{\sigma}_0^2$ se encontram dentro dos seguintes intervalos extraídos da tabela de distribuição do qui-quadrado:

ν	INTERVALO
40	$20,706 < \chi^2 < 73,402$
100	$67,328 < \chi^2 < 149,449$

Observa-se que as coordenadas fornecidas pela correlação pontual alcançaram uma precisão de sub-pixel.

8.3 TESTES PRATICOS

Foi aplicada a correlação de áreas a nível de "pixel" com a finalidade de testar o reconhecimento de padrões e a correlação pontual com o objetivo de verificar sua utilização como monocomparador digital.

8.3.1 Reconhecimento de padrões

A frase abaixo, escrita com letra legível em papel branco, foi digitalizada utilizando a câmara de TV-HR-600 e o programa IMAGEPRO.

CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS

Aplicando o programa CB, foi selecionada a letra N como janela padrão e a frase como a janela de pesquisa. O programa determina o canto superior esquerdo e a dimensão da janela onde a letra se encontra dentro da frase.

Deste modo, verifica-se a possibilidade de utilização da correlação de áreas a nível de "pixel" para reconhecimento de padrões em imagens digitalizadas.

8.3.2 Monocomparador digital

Nas aplicações da correlação pontual de alvos pré-sinalizados e de feições, o programa COD desempenhou o trabalho de medição realizado por um monocomparador. De modo a verificar a sua potência de medição, foram implementados dois testes denominados de:

- . identidade; e
- . repetibilidade das medições.

8.3.2.1 Identidade

O objetivo deste teste consiste em verificar se a correlação pontual permite encontrar imagens perfeitamente idênticas.

O programa COD foi aplicado ao ponto 1 da imagem esquerda do estereopar, representada na figura 8.6, selecionando um par de janelas (padrão e pesquisa) onde ele se encontra, obtendo os seguintes resultados:

RESULTADO DA CORRELAÇÃO							
NÚMERO DO PONTO: 1			DIMENSÃO DA JANELA PADRÃO: 7X7				
IMAGENS	CORRELAÇÃO AREAL		CORRELAÇÃO PONTUAL				
	X	Y	X	Y	σ_X	σ_Y	ρ_{XY}
ESQUER.	187	65	189,33	67,69			
DIREITA	187	65	189,33	67,69	+0,000	+0,000	0,000

RESULTADO DO AJUSTAMENTO PELO M. M. Q.								
PAR.	r0	r1	p0	p1	p2	p3	p4	p5
	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	1,000
PRE.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
N. DE ITERAÇÕES: 0			GRAUS DE LIBERDADE: 41			$\sigma_0 = 0,000$		
$\rho_{\text{geod}} = 1,000$								

Obs.: As unidades das coordenadas (X,Y) estão em linhas e colunas da imagem digital e as unidades de suas precisões estão em micra

Observa-se que a correlação de áreas a nível de "pixel" é realizada, ao passo que, a correlação pontual por mínimos quadrados não, uma vez que, os parâmetros iniciais radiométricos e geométricos do processo iterativo do ajustamento assumem a identidade.

As coordenadas fornecidas pelas correlações de áreas a nível de "pixel" e pontual para os pontos homólogos são

idênticas, pois se trata de um alvo na mesma imagem.

As coordenadas dos pontos homólogos fornecidas pela correlação de áreas a nível de "pixel" representam o canto superior esquerdo da janela de dimensão 7x7, onde o alvo se encontra dentro da imagem esquerda do estereopar. E, as coordenadas fornecidas pela correlação pontual representam as o centro de gravidade, nas direções x e y, da superfície estabelecida pela função de tom de cinza da janela padrão.

O coeficiente de correlação das funções de tom de cinza é a unidade, ou seja, as funções de tom de cinza apresentam uma relação linear. Isto significa que a correlação existente entre as funções é perfeita.

8.3.2.2 Repetibilidade das medições

O objetivo deste teste consiste em aplicar a correlação pontual várias vezes a um alvo, tentando delimitá-lo com a mesma janela, para verificar a repetibilidade das medições.

Assim foi implementada a correlação pontual ao ponto 6 8 vezes, e destas 5 foram a mesma janela, obtendo nas 5 correlações o resultado abaixo:

RESULTADO DA CORRELAÇÃO							
NÚMERO DO PONTO: 6				DIMENSÃO DA JANELA PADRÃO: 7x6			
IMAGENS	CORRELAÇÃO ÁREAS		CORRELAÇÃO PONTUAL				
	X	Y	X	Y	σ_X	σ_Y	ρ_{XY}
ESQUER.	487	242	490,62	244,97	+0,468	+0,100	0,538
DIREITA	335	250	338,93	251,71			

RESULTADO DO AJUSTAMENTO PELO M. M. Q.								
PAR.	r0	r1	p0	p1	p2	p3	p4	p5
	24,822	0,629	-71,237	0,878	0,123	-79,708	0,156	1,040
PRE.	5,294	0,053	32,348	0,050	0,079	51,058	0,096	0,020
N. DE ITERAÇÕES: 90			GRAUS DE LIBERDADE: 34			$\sigma_0 = 122,482$		
$\rho_{G \& Gd} = 0,989$								

Obs.: As unidades das coordenadas (X,Y) estão em linhas e colunas da imagem digital e as unidades de suas precisões estão em micra

Conclui-se que as medições para janelas de mesmo tamanho e na mesma posição a repetibilidade do resultado fornecido pela correlação pontual é de 100%, visto que a estabilidade geométrica e radiométrica da informação digital é grande. Esta estabilidade é em decorrência das posições dos "pixels" serem fixas, com respeito umas as outras, não havendo mudanças de elemento a elemento, nem deformações ou distorções dos tons de cinza na imagem digital.

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são descritas as conclusões observadas na implementação prática e na análise dos resultados das correlações de áreas a nível de "pixel" e pontual efetuadas no oitavo capítulo, e a seguir são feitas algumas recomendações.

9.1 CONCLUSÕES

. A correlação de áreas a nível de "pixel", aplicando a função de correlação covariância cruzada, se mostrou eficiente, uma vez que, encontrou as funções similares entre as janelas padrão e pesquisa, seja com dados fictícios ou com dados do estereopar de imagens digitais.

. Devido a perspectiva geométrica e das condições de iluminação serem diferentes no momento de aquisição das imagens digitais do estereopar, as áreas correlacionadas a nível de "pixel", apresentaram translações geométricas e uma distribuição da função de tom de cinza da janela correlacionada semelhante a da janela padrão. A translação geométrica se traduz numa diferença em linhas e colunas entre as imagens do estereopar.

. A correlação de áreas a nível de "pixel" se mostrou adequada

ao reconhecimentos de padrões em imagens digitalizadas.

. O programa de correlação pontual, COD, desempenha o trabalho desenvolvido por um comparador digital, fornecendo as coordenadas dos pontos homólogos, representativos das janelas padrão e pesquisa correlacionada, com uma precisão maior do que a dimensão do "pixel" utilizado.

. A correlação pontual aplicada a pares de janelas distintos para um mesmo alvo apresentam as coordenadas dos pontos homólogos próximas uma das outras, com uma diferença em torno de $1 \mu\text{m}$.

. A localização de um "pixel" na imagem digital é feita por linha e coluna, um padrão rígido, de forma que, a potência da medição automatizada em imagens digitais apresenta uma repetibilidade de 100% .

. Em imagens perfeitamente idênticas, a correlação pontual não é realizada, apenas a correlação de áreas a nível de "pixel", uma vez que a relação entre as funções de tom de cinza é linear, apresentando o coeficiente de correlação das funções correlacionadas igual a unidade.

. Quanto ao resultado do processo iterativo do ajustamento aplicado na correlação pontual, pode se concluir que :

os parâmetros de translações geométricos e radiométricos do modelo matemático utilizado absorvem as deformações;

o teste de hipótese do qui-quadrado aplicado ao $\hat{\sigma}_0^2$ nem sempre é adequado ao modelo matemático, visto que as janelas podem apresentar mais que 100 graus de liberdade;

- . Para imagens com baixo contraste o número de iterações é alto; e
- . O coeficiente de correlação entre as funções de tom de cinza da janela padrão e da janela pesquisa correlacionada reamostrada alcança valores próximos a unidade.
- . A delimitação dos alvos da janela padrão a serem correlacionados foi dificultada, pois as imagens digitais apresentaram um grande variação de tons de cinza, devido a iluminação inadequada utilizada na aquisição das imagens digitais.

9.2 RECOMENDAÇÕES

- . Implementar a correlação de áreas a nível de "pixel" e a correlação pontual por mínimos quadrados no plano epipolar, abordado no capítulo 6.
- . Testar o resultado fornecido pela correlação pontual de um estereopar de imagens digitais em processos fotogramétricos.
- . A câmara de TV-HR-600 é composta por uma objetiva e um array de detectores no plano focal. Para se obter medições precisas é necessário o conhecimento dos parâmetros óticos e eletrônicos, que garantam a estabilidade geométrica e radiométrica da câmara, ou seja, é necessário calibrar a câmara

10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 . ACKERMANN, F.. High precision digital image correlation,
In.: Proceedings of 39 th Photogrammetric Week,
Stuttgart, pg 231-244.
- 02 . BAHR, HANS PETER. Digitale Bildverarbeitung; Anwendung in
Photogrammetrie und Fernerkundung, Kalsruhe,
Wichman,1981, pg. 401
- 03 . ESTEN, R. D.. Automation of stereocompilation. In.:
American Society of photogrammetry, Manual of
photogrammetry. Falls Church, V. A., 1966, V. 2, cap.
15, pg. 759-802.
- 04 . GRUEN, A. W. & BEYER, H. A.. Real time photogrammetry at
the digital photogrammetric station (DIPS) of the
Zürich. The Canadian Surveyor, 41 (2): pg. 181-199,
summer, 1987.
- 05 . GULCH, E.. Geometric calibration of two CCD-cameras used
for digital image correlation on the Planicom C-100.
In.: International Society for Photogrammetry and
Remote Sensing. International Archives of
Photogrammetry, commission III. Hamburg, XIV
International Congress, 1980. pg. 363-372.
- 06 . HAGGREN H.. Real time photogrammetry as used for

- machine vision applications. The Canadian Surveyor 41(2): pg. 201-209, summer, 1987
- 07 . KEATING, T. J.; P. R. & SCARPACE, F. L.. An improved method of digital image correlation. Photogrammetry Engineering and Remote Sensing, 51 (8): pg. 993-1002, agosto, 1975.
- 08 . MASRY, S. E.. Digital correlation principles. Photogrammetry Engineering, 50 (3): pg. 303-308, março, 1974.
- 09 . MOFFIT, F. H. & MIKHAIL, A. S.. Photogrammetry. 3^a ed., USA, Harper & Row, Inc., 1980, 648 pg..
- 10 . PELTL, A.. Digital image correlation with the analytical plotter Planicomp C-100. In.: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. International Archives of Photogrammetry, commission III. Hamburg, XIV International Congress, 1980. pg. 874-882.
- 11 . STACK, Peter A.. Introduction to numerical methods. 334 pg. Macmiliam Company, 1970.
- 12 . TOLEGARD, K.. Transference of methods from analytical to digital photogrammetry. Photogrammetria (PRS), 42(1988): pg. 197-198.
- 13 . WALKER, A. S. Development of a system for stereomodel heigting based on epipolar scanning. Fredericton, 1975. 129 pg. Tese, doutorado, UNB, Canadá.
- 14 . WONG, K. W.. Close-range mapping with a solid state camera. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 52(1): pg 67-74, janeiro 1986.
- 15 . -----. Real time machine vision systems. The Canadian

Surveyor, 41 (2): pg. 173-180, summer, 1987.

- 16 . YANNIRIS, Y. Improvements to the off-line epipolar correlation. Frederiction, 1974, 104 pg. Tese, doutorado, UNB, Canadá.