

Carlos Shigueyuki Koyama

**DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE UM
OBJETO, A PARTIR DE UMA SEQUÊNCIA DE
IMAGENS, APLICANDO AS EQUAÇÕES DE
COLINEARIDADE MODIFICADAS**

Orientador: Prof. Dr. Júlio Kiyoshi Hasegawa

Dissertação apresentada ao Departamento de Cartografia da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas (Área de Concentração: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais).

PRESIDENTE PRUDENTE

2001

K89d	<p>Koyama, Carlos Shigueyuki</p> <p>Determinação da velocidade de um objeto, a partir de uma seqüência de imagens, aplicando as equações de colinearidade modificadas / Carlos Shigueyuki Koyama.- Presidente Prudente : [s.n.], 2001. xii, 99 p. : il.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia</p> <p>Orientador: Júlio Kiyoshi Hasegawa</p> <p>1. Fotogrametria digital. 2. Resseção espacial. 3. Equações de colinearidade. 4. Processamento digital de imagem. 5. Correlação. I. Koyama, Carlos Shigueyuki. II. Título.</p> <p>CDD(18.ed) 623.71</p>
------	---

À Akemi,
Eduardo, Michele e Mirian

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças à colaboração e apoio, direto ou indireto, de muitas pessoas. Agradeço a todas elas, e, de forma particular:

ao Professor Dr. Júlio Kiyoshi Hasegawa, pela orientação e, paciência;

aos meus pais Goshite e Wakae e às minhas irmãs, Marili e Margarete pelo apoio e incentivo;

aos Professores João Fernando C. da Silva e Maurício Galo pela cessão de equipamentos e softwares;

aos demais professores e colegas do curso que de uma forma ou de outra contribuíram para que este trabalho fosse concluído;

aos funcionários do Campus.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivo.....	16
1.2 Justificativa.....	16
1.3 Estrutura do trabalho.....	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 Processamento digital de imagens.....	18
2.1.2 Estrutura de uma imagem digital.....	18
2.1.3 Conceito de vizinhança.....	20
2.1.4 Operações lógicas e aritméticas com imagens	20
2.1.5 Suavização de imagens.....	21
2.1.5.1 Filtro da média.....	23
2.1.5.2 Filtro da moda.....	23
2.1.5.3 Filtro da mediana.....	24
2.1.6 Correlação de imagens digitais.....	25
2.2 Fotogrametria- conceitos.....	28
2.2.1 Equações de colinearidade.....	29
2.2.1.1 Transformação isogonal e as equações de colinearidade.....	31
2.2.1.2 Equações de colinearidade inversa.....	35
2.2.2 Equações de colinearidade modificadas.....	37
2.2.2.1 Equações modificadas – para o movimento de translação.....	38

2.2.2.2	Tratamento para o caso da câmara em movimento.....	41
2.2.2.3	Tratamento, considerando-se a câmara fixa e o objeto em movimento.....	43
2.2.3	Ressecção espacial.....	47
2.2.4	Calibração de câmaras.....	51
2.2.4.1	Distorção das lentes	54
3.	DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE.....	55
3.1.	O sistema e os recursos utilizados.....	56
3.1.1.	Descrição do ambiente simulado.....	58
3.2.	Seleção e processamento das imagens.....	58
3.2.1.	Calibração da filmadora.....	59
3.2.2	Orientação exterior.....	61
3.2.3	Fluxograma do sistema.....	64
3.3.	Metodologia de desenvolvimento.....	65
3.3.1.	As imagens para processamento.....	65
3.3.1.1.	Detecção do objeto.....	66
3.3.1.2.	Determinação das coordenadas do objeto.....	71
3.3.2.	Cálculo da velocidade.....	78
4.	TESTES E RESULTADOS.....	82
4.1.	Coordenadas do objeto e a velocidade calculada.....	82
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	93
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Estrutura de uma imagem digital (Fonte: Smith, 1997).	19
Figura 2 - a) Ponto p e a vizinhança 4, b) ponto p e a vizinhança 8.	20
Figura 3 - Esquema da janela móvel para filtragem de uma imagem por convolução (Fonte: Crosta, 1993).	22
Figura 4 - a) Máscara 3 x 3, b) máscara 5 x 5, c) máscara 1 x 5.	23
Figura 5 - Janela 3 x 3 do filtro da moda.	24
Figura 6 - Filtro da mediana 3 x 1 a partir de uma seqüência de imagem (Fonte: adaptado de Artero, 1999).	25
Figura 7 - Correspondência baseada em área a) Janela alvo (<i>template</i>) e b) janela de busca.	27
Figura 8 - Sistema de coordenadas, imagem e objeto paralelos, com origem no centro perspectivo (Fonte: adaptado de Hasegawa, 1997).	30
Figura 9 - Sistemas de coordenadas da imagem e do objeto transladado e rotacionado (Fonte: Hasegawa, 1997).	32
Figura 10 - Geração de movimento da câmara (Fonte: Gosh, 1985).	38
Figura 11 - Obtenção das imagens, considerando-se o intervalo de exposição nos instantes t_1 e t_2 .	41
Figura 12 - a) Imagem de uma cena no instante t_1 de um carro (simulação) e b) Imagem de uma cena no instante t_2 de um carro (simulação).	44

Figura 13 -	Uma das imagens utilizada para a calibração da câmara.	53
Figura 14 -	Ambiente montado para a obtenção das imagens	57
Figura 15 -	(a) Imagem padrão sem a presença de objetos; (b) imagem 1 – objeto no instante t_1 ; (c) imagem 2 no instante t_2 – o objeto deslocado à frente, em 12,5cm; (d) imagem 3 no instante t_3 – o objeto deslocado 12,5cm em relação à imagem 2.	59
Figura 16 -	Ângulos das imagens para calibração.	60
Figura 17 -	Sistema de coordenadas local para a orientação exterior	62
Figura 18 -	Tela de Parâmetros – orientação interior, exterior, intervalo de tempo (Delta t) e tamanho do pixel em x e y.	63
Figura 19 -	Fluxograma geral do sistema.	64
Figura 20 -	Imagem resultante da diferença entre a imagem inicial e a imagem 1.	67
Figura 21 -	Imagem acrescida de ruídos.	67
Figura 22 -	Detecção de bordas – a) após filtro da média; b) após filtro da moda; c) após filtro da mediana.	68
Figura 23 -	Resultados, utilizando-se o limiar automático da diferença da imagem inicial: a) com a figura 15b; b) com a Figura 15c; c) com a Figura 15d.	70
Figura 24 -	Tela Carrega imagens – parâmetros e imagens para processamento	72
Figura 25 -	Deslocamento da janela de busca.	73

Figura 26 - Processo de detecção do objeto – janela de busca, percorrendo a imagem parcialmente.	74
Figura 27 - Zoom da área de localização do objeto e o ponto de referência para o enquadramento.	74
Figura 28 - Enquadramento (a partir da diferença com a imagem inicial): a) com a Figura 23a; b) com a Figura 23b; e c) com a Figura 23c.	75
Figura 29 - Resultados da correspondência a) coordenadas do objeto na imagem 1; e b) Resultado da correspondência.	77
Figura 30 - Ponto (branco) para a correspondência, localizado no pára-brisa, para o instante t_1 .	85
Figura 31 - Correspondência com: a) instante $t_2 - t_1$; e b) instante $t_3 - t_1$.	85
Figura 32 - a) Ponto para correspondência para o instante t_2 e b) Correspondência $t_3 - t_2$.	85
Figura 33 - Ponto indicado para correspondência.	88
Figura 34 - Correspondência com: a) instante t_2 ; b) instante t_3 .	89
Figura 35 - Ponto do objeto escolhido com pouca elevação.	91

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 01 - Parâmetros de orientação interior calculados.	60
Tabela 02 - Combinações possíveis das imagens para processamento e o intervalo Δt a ser adotado.	66
Tabela 03 - Limiar automático calculado.	70
Tabela 04 - Parâmetros de como se processou o enquadramento.	75
Tabela 05 - Resultado sem aplicação de filtro e sem a rotina de melhor correspondência.	83
Tabela 06 - Resultados com aplicação de filtro da média e sem a rotina para determinação de uma melhor área de correspondência.	84
Tabela 07 - Resultado sem aplicação de filtros, utilizando a rotina, para determinação de uma melhor área de correspondência.	86
Tabela 08 - Resultado com filtro da média e a rotina, para determinação de uma melhor área de correspondência.	87
Tabela 09 - Resultados, a partir da coordenada do objeto, indicada para o instante t_1 .	88
Tabela 10 - Resultado das comparações com os valores da velocidade da Tabela 8.	89
Tabela 11 - Resultados, utilizando-se um ponto do objeto com pouca elevação.	91

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para a determinação da velocidade de um objeto, a partir de uma seqüência de imagens obtidas com uma filmadora digital - Sony DSR-200 A (720 x 480 pixels). Para tanto, o procedimento é fundamentado em duas fases distintas: a identificação e localização do objeto na imagem e a determinação da velocidade do objeto. A identificação do objeto e a determinação das suas coordenadas na imagem é realizada a partir dos fundamentos da área de Processamento Digital de Imagens, envolvendo principalmente o processo de segmentação. A obtenção da velocidade do objeto é realizada a partir das equações de colinearidade modificadas, corrigindo-se, assim, os erros devido às inclinações da câmara (processo de retificação de imagens). O procedimento é desenvolvido partindo-se do conhecimento: dos elementos de Orientação interior, dos elementos de Orientação exterior, dos intervalos de tempo entre as tomadas fotográficas e das coordenadas altimétricas da área (considerada como plana). Os elementos de orientação interior são determinados num processo de calibração (pré-calibração). Os parâmetros de orientação exterior da câmara são determinados somente uma vez, são considerados constantes para as várias imagens, pois a filmadora permanece em uma posição fixa. Para validar o procedimento foi desenvolvido um protótipo e uma cena em laboratório, simulando um veículo em movimento numa rodovia. Vários testes foram realizados nessa cena, cujos resultados mostraram a viabilidade do procedimento.

ABSTRACT

This work presents a methodology for the determination of the speed of an object, starting from a sequence of images obtained with a digital movie camera - Sony DSR-200 A (720 x 480 pixels). Therefore, the procedure is based on two different phases: the identification and location of the object in the image and the determination of the speed of the object. The identification of the object and the determination of their coordinates in the image are accomplished starting from the foundations of the area of Image Digital Processing, involving mainly the segmentation process. The obtaining of the speed of the object is accomplished starting from the equations of modified co-linearity, correcting, thus, the mistakes due to the inclinations of the camera (process of rectification of images). The procedure is developed starting from the knowledge of the elements of interior Orientation, of the elements of external Orientation, from intervals of time in between photographic takings and from the coordinates altimeter measurements of the area (considered as a plane one). The elements of interior orientation are determined in a calibration process (pre-calibration). The parameters of external orientation of the camera is determined only once, they are also considered constant for the several images, because the movie camera is kept in a fixed position. To validate the procedure a prototype was developed and a scene in laboratory, simulating a vehicle in movement on a highway. Several tests were accomplished in this scene, whose results showed the viability of the procedure.

1. INTRODUÇÃO

A combinação das áreas de Processamento Digital de Imagens e Fotogrametria abre perspectivas para o desenvolvimento de uma série de aplicações (monitoramento de tráfego de veículos, sistemas de segurança, por exemplo) em que exista a necessidade de se estimarem medidas, a partir de imagens digitais. Neste sentido, o uso de filmadoras vem despertando grande interesse, devido à facilidade de coleta, edição das imagens obtidas e a possibilidade de se obter uma seqüência dessas imagens.

O desenvolvimento do processamento digital de imagens contribuiu para o surgimento de uma nova área de pesquisa, a Fotogrametria Digital, a qual se vem beneficiando do rápido desenvolvimento tecnológico principalmente em relação aos sensores.

O uso de filmadoras na fotogrametria é cada vez maior, dando uma importante contribuição em trabalhos, por exemplo, de reconstrução e mapeamento. Algumas tarefas começam a ser automatizadas (geração do Modelo Digital do Terreno – DTM); em outras, o tempo de processamento foi reduzido (possibilidade de edição das imagens quase que em tempo real); e algumas até eliminadas (revelação do filme).

A necessidade de se obterem informações métricas dos objetos, a partir das imagens obtidas pelos sensores, envolve conceitos da área de fotogrametria e o uso de filmadoras pode ser citado em aplicações, como no

controle ou monitoramento de tráfego de veículos, Sistemas de Mapeamento Móvel (SMM), sistemas de segurança entre outros.

Habib (1998) descreve um algoritmo, para estimar os parâmetros de orientação, baseado em informações obtidas com a extração de feições lineares das imagens (estereopar), utilizando um Sistema de Mapeamento Móvel (que geralmente trabalha com duas ou mais câmaras).

Chandler e Stirling (1992) descrevem o uso de duas câmaras filmadoras, num sistema de segurança, para a determinação da altura de ladrões e, por meio de experimentos realizados, destacam a necessidade do uso de parâmetros que corrijam as distorções provocadas por erros sistemáticos.

Em Chikatsu et al. (1992), o trabalho é direcionado para a análise de movimentos dinâmicos do ser humano na área de esportes, em que os movimentos do atleta podem ser analisados, pormenorizadamente, quadro a quadro, devido ao fato de se obterem as imagens pela câmara filmadora (geralmente 30 quadros por segundo). Das imagens conseguidas no Campeonato Mundial de Tóquio em 1991, selecionou-se a da prova de 100m, do corredor Carl Lewis, para o processamento. Essas imagens (cópias de vídeo de TV) não dispunham de pontos de controle, além de serem de baixa qualidade (muito ruído na imagem). A falta de pontos de controle na imagem fez com que a orientação se fizesse por meio das linhas das raias da pista de corrida, por uma transformação projetiva bidimensional. As imagens passaram por uma série de tratamentos como a eliminação de ruídos, binarização, esqueletização, extração de feições, entre outros, com o objetivo de determinar, automaticamente, 13 pontos de

interesse (joelho, cotovelos etc) para análise de elementos físicos que podem ser resumidos nos dados de energia mecânica e força impulsiva.

Sullivan et al. (1997) descrevem um método, para classificar veículos em tempo real, possibilitando o monitoramento e classificação contínuos do tráfego, a partir de uma câmara fixa em uma rodovia. A calibração da câmara dá-se com o uso de uma Ferramenta de Calibração Interativa (*Interactive Calibration Tool*), a partir de uma seqüência de imagens. A classificação de veículos ocorre, partindo-se da comparação das imagens de modelos em 2D e de um histograma 1D, gerados pela aplicação do filtro Sobel (detecção de bordas), previamente armazenado (*templates*).

Em Mori et al. (1996), uma filmadora foi posicionada em um balão fixo, com o objetivo de monitorar a velocidade e o fluxo de veículos, classificando-os de acordo com o tamanho (normal ou grande). Para a correção do movimento dos carros, devido a vibrações do balão causadas naturalmente por ventos, foram utilizados pontos de controle no terreno.

As aplicações e estudos envolvendo o uso de câmaras filmadoras em situações em que seja necessário estimar medidas ainda são poucos, considerando-se que existe um grande espaço a ser ocupado em diversas áreas, como na visão computacional, aplicado em controles industriais (o monitoramento de produtos numa esteira), automobilísticos (*test crash*) etc.; as pesquisas, nesse sentido, têm um atrativo maior, pois trazem um grande universo de aplicações e de novos desafios.

1.1. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo primacial apresentar uma metodologia para a determinação da velocidade de um objeto, a partir de uma seqüência de imagens digitais obtidas por uma filmadora digital. Para tanto, técnicas digitais, de Processamento Digital de Imagens (para detecção automática do objeto e correspondência de imagens - *matching*) e de conceitos da área de fotogrametria foram aplicadas. A velocidade foi calculada pelas equações de colinearidade modificadas, sendo adotada uma variação dessas equações propostas por Gosh (1985).

1.2. Justificativa

O crescimento desordenado dos grandes centros urbanos traz uma série de problemas à população, diminuindo a qualidade de vida tão almejada. O controle de tráfego é um desses problemas. A necessidade de se criarem aplicações que permitam um monitoramento contínuo do tráfego de veículos faz com que o uso de câmaras filmadoras tenha grande importância.

Nesse sentido, este trabalho procura contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia que determine a velocidade, até então sem similar nas diversas fontes consultadas (inclusive a internet), que pode vir a ser aplicada a outras finalidades e em outras áreas.

1.3. Estrutura do trabalho

O capítulo 2º apresenta um desenvolvimento teórico sobre o Processamento Digital de Imagens e da Fotogrametria, com os fundamentos necessários ao embasamento deste trabalho.

O capítulo 3º apresenta a metodologia utilizada para determinação da velocidade, descrevendo os procedimentos do sistema desenvolvido.

O capítulo 4º apresenta os testes e os resultados auferidos nos experimentos, fazendo uma análise deles e, em seguida, no capítulo 5º, apresentam-se as conclusões deste trabalho e com recomendações para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresentam-se alguns conceitos de Processamento Digital de Imagens (item 2.1) e de Fotogrametria (item 2.2), necessários ao embasamento teórico.

2.1. Processamento digital de imagens

Segundo Mascarenhas & Velasco (1989), o processamento digital de imagens permite a análise e a manipulação de imagens por computador, com o objetivo de extração de informações e transformação dessas (realce de bordas, eliminação de ruídos, aumento de contraste p.ex.), para posterior interpretação. O grande volume de informações existentes numa imagem pode ser tratado por meios computacionais, de uma forma mais minuciosa que o ser humano e de maneira muito rápida, devido aos avanços de “*software*” e de “*hardware*”, o que vem despertando grande interesse em várias áreas, como na medicina e na fotogrametria.

2.1.2. Estrutura de uma imagem digital

Segundo Dal Poz & Galo (1993), uma imagem digital pode ser definida como uma função bidimensional $f(x,y)$ de tons cinza. Essa imagem pode ser obtida, basicamente, de duas formas: através de sensores digitais (CCD –

Change Coupled Device), presentes em câmaras fotográficas e filmadoras digitais, ou por um processo de digitalização, utilizando *scanners*, com o uso de imagens analógicas.

A matriz bidimensional, formada por uma imagem digital, define um conjunto de células ou *pixels* (*picture element*), em que, para cada elemento identificado por coordenadas x (colunas) e y (linhas) desse conjunto, se atribui um valor proporcional à intensidade de brilho (tons de cinza) daquele ponto da imagem. Ver Figura 1.

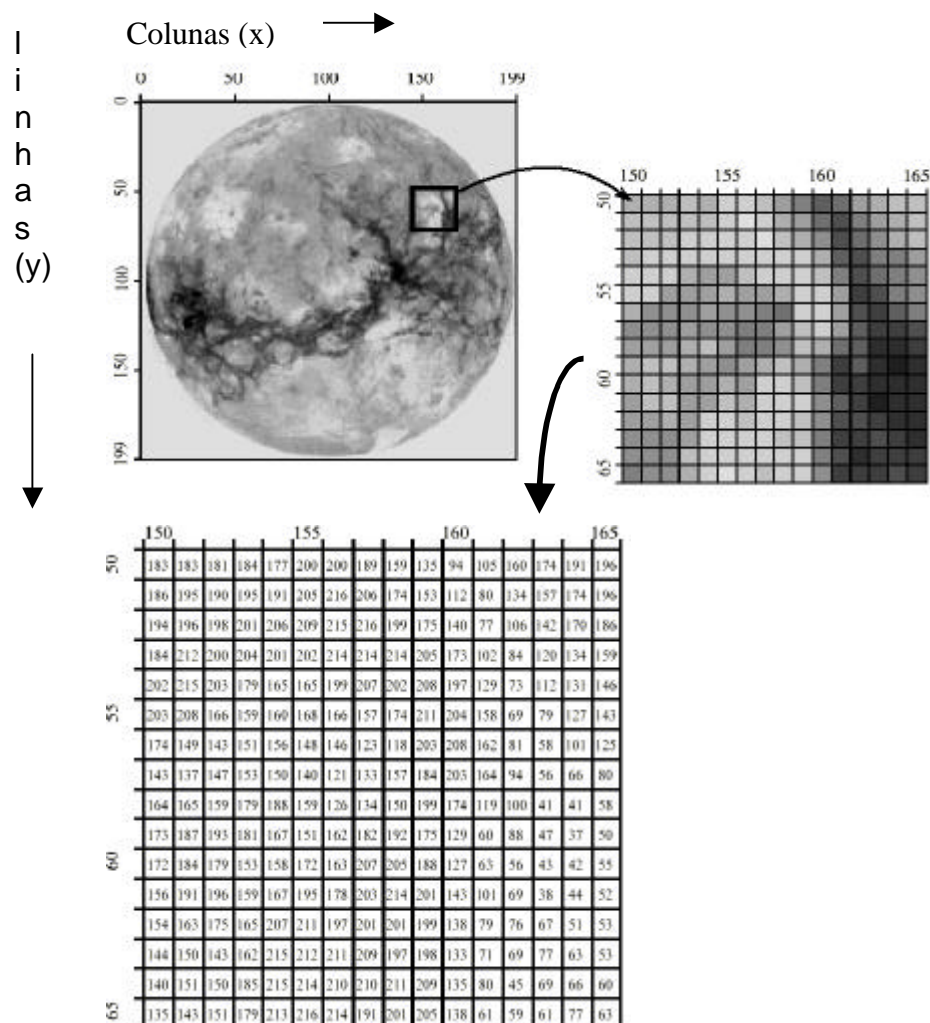


FIGURA 1 – Estrutura de uma imagem digital (Fonte: Smith, 1997).

2.1.3. Conceito de vizinhança

A vizinhança de um pixel, segundo Gonzalez & Woods (1993), é um dos relacionamentos básicos entre pixels de uma imagem digital. Dado um ponto p de coordenadas (x_i, y_c) numa imagem, são chamados de vizinhança-4 os pixels de coordenadas (x_i+1, y_c) , (x_i-1, y_c) , (x_i, y_c+1) e (x_i, y_c-1) . A vizinhança-8 acrescenta aos pixels da vizinhança-4 os pixels diagonais ao ponto p com coordenadas (x_i+1, y_c+1) , (x_i+1, y_c-1) , (x_i-1, y_c+1) , (x_i-1, y_c-1) – Figura 2.

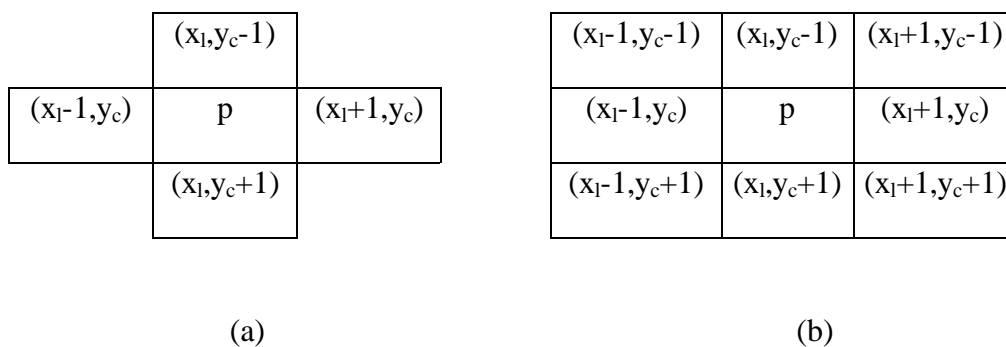


FIGURA 2 – a) Ponto p e a vizinhança 4, b) ponto p e a vizinhança 8.

2.1.4. Operações lógicas e aritméticas com imagens

As operações matemáticas, envolvendo duas ou mais imagens, segundo Marques e Vieira (1999), podem ser efetuadas pixel a pixel ou orientadas à vizinhança. Para o primeiro caso, pode-se ter a seguinte notação:

$$X \quad \text{opn} \quad Y = Z \quad (1)$$

onde:

X e Y podem ser imagens (matrizes ou escalares);

Z é uma matriz resultante da operação;

opn é um operador aritmético (+, -, x ou /) ou lógico (AND, OR, XOR).

Gonzales & Woods (1993) e Marques & Vieira (1999) citam algumas aplicações das operações aritméticas:

- Adição: pode ser utilizada para a remoção de ruídos;
- Diferença: detecção de diferença entre duas imagens;
- Multiplicação e Divisão: correção da intensidade do brilho (tons de cinza).

2.1.5. Suavização de imagens

Segundo Crosta (1993), a presença de ruídos eletrônicos numa imagem pode ser eliminada pela aplicação de filtros no domínio do espaço. Marques & Vieira (1999) definem a convolução discreta como sendo o “processo em que duas imagens são combinadas através de operações de deslocamento, multiplicação e adição”.

Esses filtros são conhecidos como filtros passa baixas ou de suavização (*smoothing*). Eles atenuam as altas frequências (caracterizadas por

bordas e ruídos em certas regiões da imagem), tendo como objetivo, também, eliminar o excesso de minúcias que não são importantes, preservando, apenas, as feições mais significativas (Artero, 1999). A aplicação desses filtros pode ser feita por uma janela móvel ou máscara – Figura 3, que percorre a imagem original, gerando uma nova imagem.

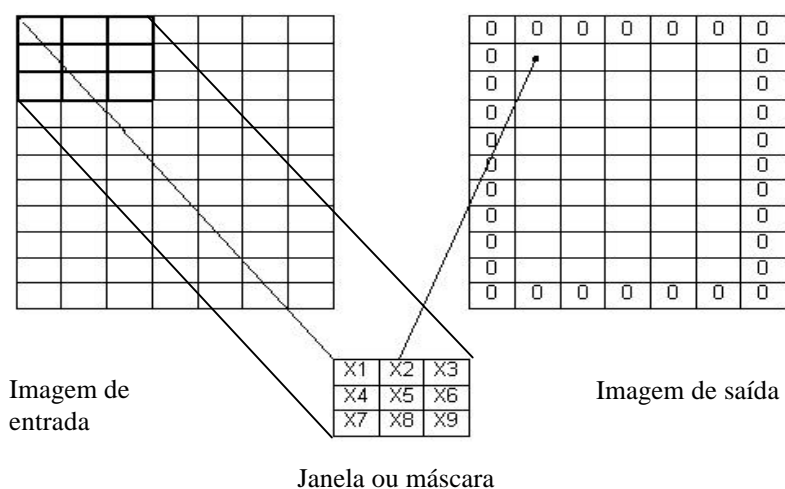


FIGURA 3 – Esquema da janela móvel para filtragem de uma imagem por convolução (Fonte: Crosta, 1993).

No modelo apresentado por Crosta (1993), a imagem de saída tem, nas suas bordas, o valor 0; esse efeito, denominado *efeito borda* é provocado pelo fato de que a primeira posição da janela móvel em que a máscara é aplicada, é o segundo pixel da segunda coluna. Isto ocorre, em virtude do tamanho da máscara 3 x 3; numa máscara 5 x 5, haveria 2 linhas e 2 colunas com bordas 0. Dependendo da aplicação do filtro, pode-se adotar, também, a manutenção dos valores originais da imagem inicial para as bordas na imagem de saída.

2.1.5.1. Filtro da média

O filtro da média substitui o valor do pixel pela média aritmética, considerando os pixels da janela definida. A Figura 4 apresenta alguns formatos de máscara desse filtro. Segundo Marques & Vieira (1999), quanto maior a máscara utilizada, maior será o grau de borramento da imagem.

A perda de definição na imagem resultante pode ser minimizada, através da comparação com um limiar L (Marques & Vieira, 1999). Nesse caso, se a diferença absoluta entre o valor do pixel da imagem original e o valor resultante da aplicação do filtro da média for menor que o limiar L , substituir-se-á o tom cinza pelo valor calculado; caso contrário, mantém-se o valor original.

$$\begin{array}{ccc} \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \frac{1}{25} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \frac{1}{5} [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1] \\ \text{(a)} & \text{(b)} & \text{(c)} \end{array}$$

FIGURA 4 – a) Máscara 3 x 3, b) máscara 5 x 5, c) máscara 1 x 5.

2.1.5.2. Filtro da moda

No filtro da moda, o valor resultante do filtro é aquele que possui maior frequência dentro da janela processada. Segundo Crosta (1993), esse

filtro traz um bom resultado em relação à eliminação de pixels isolados na imagem.

130	127	130
126	130	128
126	129	129

FIGURA 5 – Janela 3 x 3 do filtro da moda.

Na Figura 5, tem-se que o valor 130 representa a moda ou o valor que mais ocorre dentro da janela. No caso de ocorrer uma situação em que todos os valores da máscara sejam diferentes, não se alterará o pixel.

2.1.5.3. Filtro da mediana

No filtro da mediana, partindo-se de uma seqüência da imagem (pixels), os valores são ordenados e o resultado do filtro é dado pelo elemento que divide os valores dessa seqüência em duas partes iguais - Figura 6. Esse filtro, assim como o filtro da moda, não é obtido por um processo de convolução.

Segundo Artero (1999), uma grande vantagem desse filtro deve-se ao fato de ele permitir uma boa remoção dos ruídos, sem afetar, muito, as informações de borda. Devido à necessidade de se ordenarem os valores, segundo

Crosta (1993), esse filtro é um dos que apresentam uma melhor preservação de bordas da imagem.

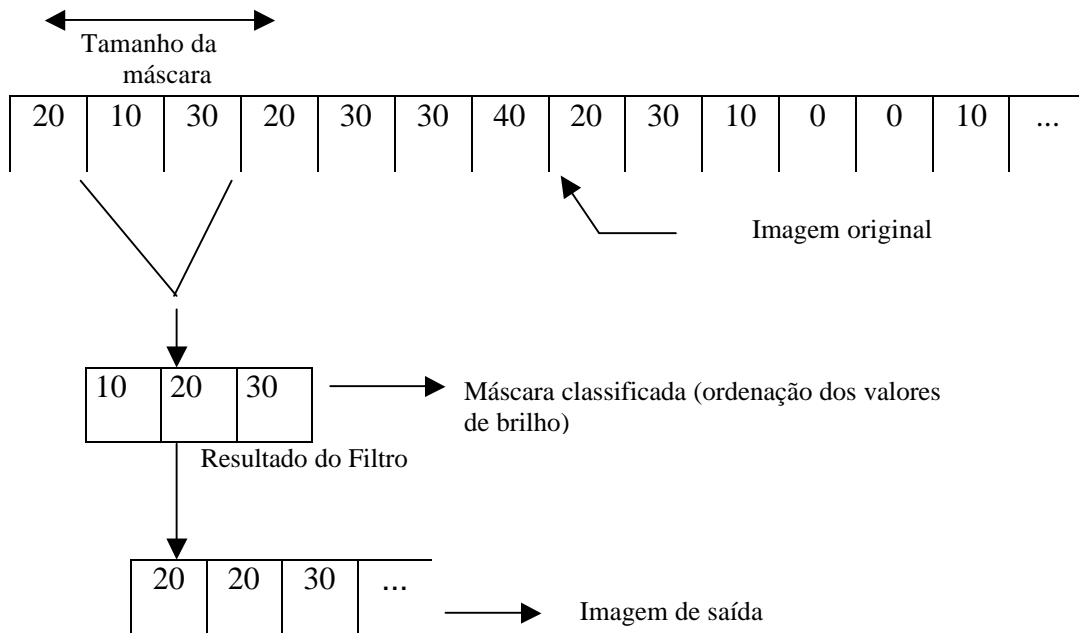


FIGURA 6 – Filtro da mediana 3 x 1, a partir de uma seqüência de imagem (Fonte: adaptado de Artero, 1999).

2.1.6. Correlação de imagens digitais

A correlação de imagens digitais ou correspondência de imagens digitais (*matching*), segundo Strauch & Lugnani (1991), é a técnica empregada na automação do processo de detecção e medição de pontos homólogos em um estereopar de imagens digitais.

A correspondência de imagens pode ser dividida em dois grupos principais: baseada em feições e baseada em áreas.

a) correspondência baseada em feições: utiliza feições simbólicas a partir da intensidade de brilho (tons de cinza) das imagens, que se faz a partir das feições presentes na imagem. Segundo Fonseca & Manjunath (1996), a correspondência baseada em feições pode ser dividida em duas etapas:

- a extração de feições de interesse nas imagens;
- a determinação, partindo de um critério de similaridade da correspondência de feições entre as imagens.

b) correspondência baseada em áreas - a correspondência de imagens digitais baseada em áreas examina áreas pré-estabelecidas num estereopar de imagens e aplica uma função de correlação aos valores de intensidade de brilho (tons de cinza). Segundo Strauch & Lugnani (1991), pode ser realizada em três etapas:

- definição de uma janela alvo (*template*): define-se uma sub-imagem de coordenadas $m \times n$, correspondendo ao alvo de interesse;
- definição da janela de busca: define-se uma área maior na imagem onde o alvo se localizar;
- pesquisa, a partir da janela alvo na janela de busca, procurando determinar a correspondência, aplicando uma função de correlação – Figura 7.

Segundo Strauch & Lugnani (1991), a correspondência baseada em áreas é realizada por meio de funções matemáticas específicas de correlação, que determinam o grau de interdependência entre as duas funções, que podem ser: função quociente, erro, erro quadrático e covariância cruzada.

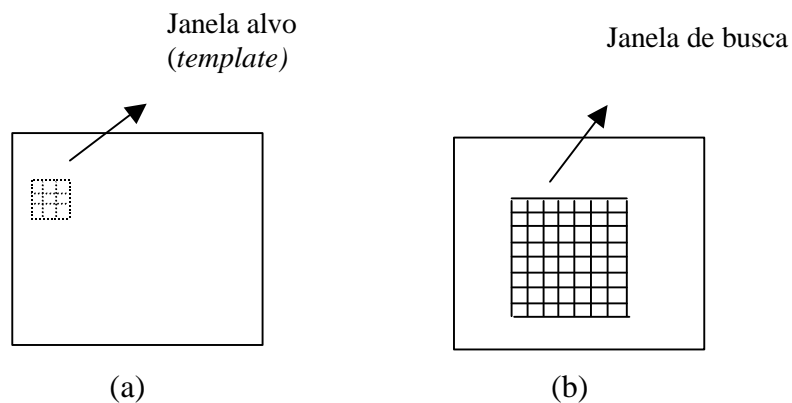


FIGURA 7 - Correspondência baseada em área a) Janela alvo (*template*) e b) janela de busca.

Foi implementada a função citada por Gonzales & Woods (1993) e Fonseca & Manjunath (1996), que apresentam a correspondência pelo coeficiente de correlação, em que o ponto de máxima correlação será aquele cujo valor de r mais se aproximar de 1, com $-1 \leq r \leq 1$, que descreve a dependência entre duas variáveis e pode ser expresso pela equação (2).

$$g(s, t) = \frac{\sum_x \sum_y [f(x, y) - \bar{f}(x, y)] [w(x-s, y-t) - \bar{w}]}{\left\{ \sum_x \sum_y [f(x, y) - \bar{f}(x, y)]^2 \sum_x \sum_y [w(x-s, y-t) - \bar{w}]^2 \right\}^{1/2}} \quad (2)$$

onde:

$\gamma(s, t)$ é coeficiente de correlação de uma janela;

s, t são as coordenadas do centro da janela;

$\bar{f}(x, y)$ é a densidade da janela alvo;

$f(x, y)$ é a média aritmética da densidade da janela alvo;

$\bar{w}(x-s, y-t)$ é a densidade da janela de busca;

$w(x, y)$ – é a média aritmética da densidade da janela de busca;

2.2. Fotogrametria – conceitos

A necessidade de se efetuarem medições e interpretarem informações, tendo por base imagens (analógicas ou digitais), faz com que a área da fotogrametria tenha papel fundamental nas várias atividades e aplicações em que essas necessidades se fazem presentes.

Neste sub-item, são apresentados alguns conceitos da fotogrametria, que fundamentam parte deste trabalho.

2.2.1. Equações de colinearidade

As equações de colinearidade permitem transformar as coordenadas do espaço objeto para o espaço imagem (e também de forma inversa). Segundo Hasegawa (1997), “as equações de colinearidade reproduzem matematicamente o processo da formação da imagem, fazendo a ligação entre as coordenadas dos pontos no espaço objeto (3D) e suas correspondentes coordenadas no espaço imagem (2D)”.

As aplicações, segundo Lugnani (1987), do modelo matemático são bastante amplas, tais como a determinação do centro perspectivo, ressecção espacial, entre outros.

A condição de colinearidade é definida como sendo a condição de que, dados os pontos p' (ponto imagem), P (ponto objeto) e C (centro perspectivo), esses pertencem a uma mesma reta, considerando-se que o plano da imagem e o plano do objeto tenham origem no centro de projeção C , e que não existam rotações entre eles – Figura 8.

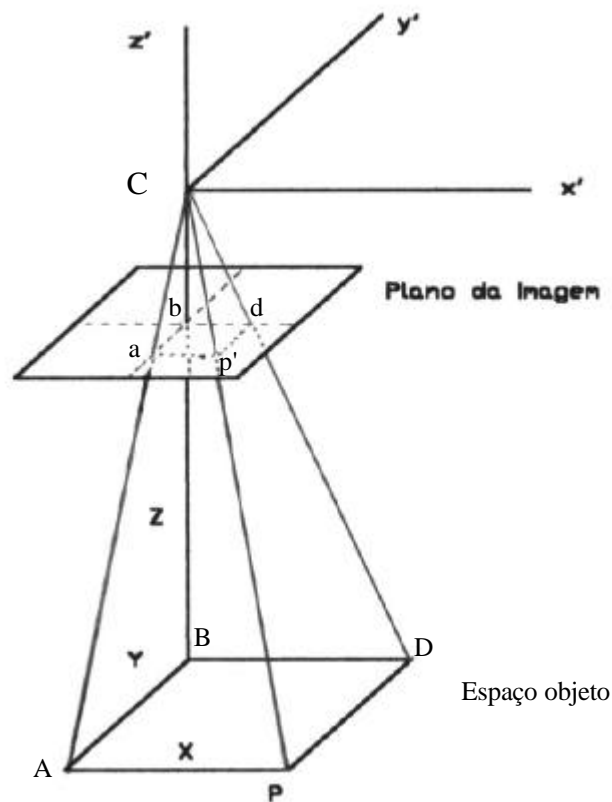


FIGURA 8 – Sistema de coordenadas, imagem e objeto paralelos, com origem no centro perspectivo (Fonte: adaptado de Hasegawa, 1997).

Considerando-se essas definições, pode-se fazer, da semelhança dos triângulos $\Delta CDB \sim \Delta Cdb$ e $\Delta CBA \sim \Delta Cba$, a relação:

$$\frac{x_p}{X'} = \frac{z_p}{Z'} \quad \text{e} \quad \frac{y_p}{Y'} = \frac{z_p}{Z'} \quad (3)$$

donde se podem obter as equações projetivas:

$$x_p = z_p \frac{X'}{Z'} \quad \text{e} \quad y_p = z_p \frac{Y'}{Z'} \quad (4)$$

onde:

x_p , y_p , e z_p são as coordenadas do ponto p (espaço imagem);

X' , Y' e Z' são as coordenadas do ponto P (espaço objeto).

No caso de os sistemas de coordenadas da imagem e do objeto não serem coincidentes (transladado, rotacionado e com diferente escala), a transformação das coordenadas do sistema referencial do espaço objeto (ponto P) para o sistema referencial do espaço imagem (ponto p'), evidencia-se pela transformação isogonal ou de similaridade.

2.2.1.1. Transformação isogonal e as equações de colinearidade

A transformação isogonal, também conhecida como transformação de similaridade ou conforme, permite transformar as coordenadas do sistema do terreno XYZ para o sistema fotogramétrico xyz . Segundo Tommaselli & Tozzi (1991), a transformação pode ser realizada em três passos:

- a) aplicação de três translações, para compensar a diferença espacial entre as origens;
- b) compensação das diferenças angulares por meio de uma matriz de rotação;

- c) correção da diferença de escala entre os referenciais (fator de escala).

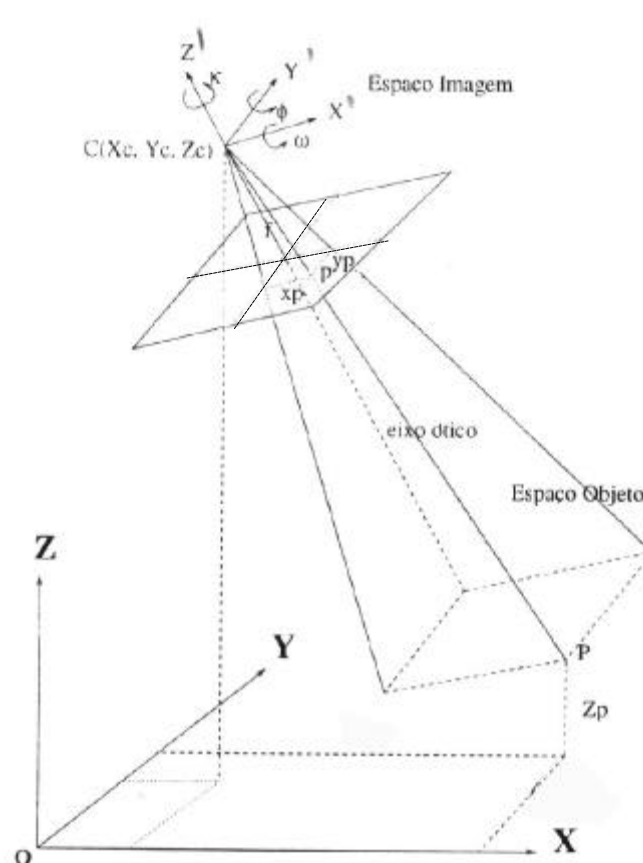


FIGURA 9 - Sistemas de coordenadas da imagem e do objeto transladado e rotacionado (Fonte: Hasegawa, 1997).

Os movimentos de rotação ocorrem no sentido anti-horário, considerando-se os sistemas dextrógiros e as transformações como passivas, ou seja, o sistema referencial da imagem gira, enquanto o objeto permanece fixo, cujas matrizes de rotação são dados por:

$$\begin{aligned}
M_k &= \begin{bmatrix} \cos k & \text{sen } k & 0 \\ -\text{sen } k & \cos k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
M_s &= \begin{bmatrix} \cos j & 0 & -\text{sen } j \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen } j & 0 & \cos j \end{bmatrix} \\
M_w &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos w & \text{sen } w \\ 0 & -\text{sen } w & \cos w \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{5}$$

onde:

M_k, M_s, M_w são as matrizes de rotação em torno dos eixos x, y e z respectivamente.

A matriz M ($M=M_k \cdot M_j \cdot M_w$) é dada por:

$$M = \begin{pmatrix} \cos j \cos k & \cos w \text{sen } k + \text{sen } w \text{sen } j \cos k & \text{sen } w \text{sen } k - \cos w \text{sen } j \cos k \\ -\cos j \text{sen } k & \cos w \cos k - \text{sen } w \text{sen } j \text{sen } k & \text{sen } w \cos k - \cos w \text{sen } j \text{sen } k \\ \text{sen } j & -\text{sen } w \cos j & \cos w \cos j \end{pmatrix} \tag{6}$$

e a transformação dar-se-á por meio de:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}' \\ \mathbf{Y}' \\ \mathbf{Z}' \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{M} \begin{bmatrix} \mathbf{X} - \mathbf{X}_c \\ \mathbf{Y} - \mathbf{Y}_c \\ \mathbf{Z} - \mathbf{Z}_c \end{bmatrix} \tag{7}$$

onde:

λ é um fator de escala;

X_C, Y_C e Z_C são as coordenadas do centro perspectivo do sistema;

X', Y' e Z' são as coordenadas do ponto no sistema XYZ ;

M a matriz de rotação.

As equações (7) podem ser escritas como:

$$\begin{aligned} X' &= \mathbf{I} [m_{11}(X - X_C) + m_{12}(Y - Y_C) + m_{13}(Z - Z_C)] \\ Y' &= \mathbf{I} [m_{21}(X - X_C) + m_{22}(Y - Y_C) + m_{23}(Z - Z_C)] \\ Z' &= \mathbf{I} [m_{31}(X - X_C) + m_{32}(Y - Y_C) + m_{33}(Z - Z_C)] \end{aligned} \quad (8)$$

Substituindo-se as equações (8) nas equações projetivas (4), λ desaparece, obtendo-se:

$$\begin{aligned} x_p &= f \cdot \frac{m_{11}(X - X_C) + m_{12}(Y - Y_C) + m_{13}(Z - Z_C)}{m_{31}(X - X_C) + m_{32}(Y - Y_C) + m_{33}(Z - Z_C)} \\ y_p &= f \cdot \frac{m_{21}(X - X_C) + m_{22}(Y - Y_C) + m_{23}(Z - Z_C)}{m_{31}(X - X_C) + m_{32}(Y - Y_C) + m_{33}(Z - Z_C)} \end{aligned} \quad (9)$$

As equações (9) são conhecidas como equações de colinearidade, sendo utilizadas na concepção do negativo; quando aplicadas no diapositivo, em virtude de $z = -f$, esse se torna:

$$x_p = -f \cdot \frac{m_{11}(X - X_C) + m_{12}(Y - Y_C) + m_{13}(Z - Z_C)}{m_{31}(X - X_C) + m_{32}(Y - Y_C) + m_{33}(Z - Z_C)} \quad (10)$$

$$y_p = -f \cdot \frac{m_{21}(X - X_C) + m_{22}(Y - Y_C) + m_{23}(Z - Z_C)}{m_{31}(X - X_C) + m_{32}(Y - Y_C) + m_{33}(Z - Z_C)} \quad (11)$$

onde:

X , Y e Z são as coordenadas do ponto P no espaço objeto, no referencial de terreno;

X_C, Y_C e Z_C são as coordenadas do centro perspectivo no sistema de coordenadas do espaço objeto;

m_{ij} correspondem aos elementos da matriz de rotação;

x_p e y_p são as coordenadas do ponto p' no sistema fotogramétrico.

2.2.1.2. Equações de colinearidade inversa

A forma inversa das equações de colinearidade pode ser obtida aplicando-se a transformação inversa nas equações (7), donde se obtém:

$$\begin{bmatrix} X - X_C \\ Y - Y_C \\ Z - Z_C \end{bmatrix} = I^{-1} M^T \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (12)$$

e:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \mathbf{I}_p \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad (13)$$

pois os sistemas $X'Y'Z'$ e xyz têm a mesma origem e a mesma orientação.

A substituição das equações (13) por (12):

$$\begin{bmatrix} X - X_C \\ Y - Y_C \\ Z - Z_C \end{bmatrix} = \mathbf{I}^{-1} \cdot \mathbf{M}^T \mathbf{I}_p \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad (14)$$

resultam em:

$$X - X_C = \mathbf{I}^{-1} \mathbf{I}_p (m_{11}x_p + m_{21}y_p + m_{31}z_p) \quad (15)$$

$$Y - Y_C = \mathbf{I}^{-1} \mathbf{I}_p (m_{12}x_p + m_{22}y_p + m_{32}z_p) \quad (16)$$

$$Z - Z_C = \mathbf{I}^{-1} \mathbf{I}_p (m_{13}x_p + m_{23}y_p + m_{33}z_p) \quad (17)$$

Dividindo-se as equações (15) e (17) pela equação (17), tem-se:

$$\frac{X - X_C}{Z - Z_C} = \frac{\mathbf{I}^{-1} \mathbf{I}_p (m_{11}x_p + m_{21}y_p + m_{31}z_p)}{\mathbf{I}^{-1} \mathbf{I}_p (m_{13}x_p + m_{23}y_p + m_{33}z_p)} \quad (18)$$

$$\frac{Y - Y_C}{Z - Z_C} = \frac{\mathbf{I}^{-1} \mathbf{I}_p (m_{12} x_p + m_{22} y_p + m_{32} z_p)}{\mathbf{I}^{-1} \mathbf{I}_p (m_{13} x_p + m_{23} y_p + m_{33} z_p)} \quad (19)$$

e isolando-se os termos X e Y das equações (18) e (19) tem-se:

$$X = X_C + (Z - Z_C) \frac{m_{11} x_p + m_{21} y_p + m_{31} z_p}{m_{13} x_p + m_{23} y_p + m_{33} z_p} \quad (20)$$

$$Y = Y_C + (Z - Z_C) \frac{m_{12} x_p + m_{22} y_p + m_{32} z_p}{m_{13} x_p + m_{23} y_p + m_{33} z_p} \quad (21)$$

que representam a forma inversa das equações de colinearidade.

2.2.2. Equações de colinearidade modificadas

Em Gosh (1985), é apresentada uma variação das equações de colinearidade, em que se inclui o vetor velocidade e tempo para a correção da imagem, em virtude do “borramento” (arrasto da imagem) causado pelo tempo de exposição do obturador (Figura 10). Nesse caso, o problema é tratado para uma única imagem.

O referido trabalho comenta sobre os problemas causados pelos efeitos de translação e de rotação e apresenta as equações modificadas para cada problema.

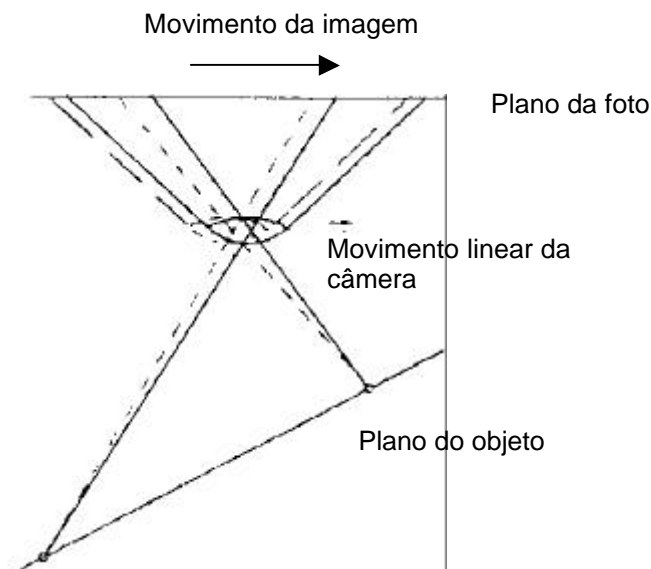


FIGURA 10 - Geração de movimento da câmara (Fonte: Gosh, 1985).

Em termos relativos, o efeito de movimento na imagem pode ser considerado tanto com a câmara em movimento e o objeto fixo como para a situação inversa, o objeto em movimento e a câmara fixa. Os movimentos a serem considerados podem ser de translação e de rotação. Dessa forma, as equações de colinearidade podem ser mais bem tratadas em duas partes: em relação a movimentos lineares e angulares.

2.2.2.1. Equações modificadas – para o movimento de translação

No trabalho citado, Gosh (1985) apresenta as equações de colinearidade, de forma abreviada (22).

Considerando o movimento de translação (provoca o borramento), o autor define o centro perspectivo para o instante do início do

borramento como $\underline{X}_C = \underline{X}'_C$; e para o fim do borramento como $\underline{X}_C = \underline{X}''_C$ com suas fotocoordenadas $x'y'$ e $x''y''$, respectivamente.

$$\begin{aligned} x = x_p - x_0 &= -f \left[\frac{M_1(\underline{X}_p - \underline{X}_C)}{M_3(\underline{X}_p - \underline{X}_C)} \right] \\ y = y_p - y_0 &= -f \left[\frac{M_2(\underline{X}_p - \underline{X}_C)}{M_3(\underline{X}_p - \underline{X}_C)} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

onde:

x e y são as coordenadas do ponto no sistema de coordenadas fotogramétricas;

x_p e y_p são as coordenadas do ponto no sistema de coordenadas fiducial;

x_0 e y_0 são as coordenadas do ponto principal;

M_i – corresponde à *i*ésima linha da matriz $M = M_k M_s M_w$

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$$

\underline{X}_p – vetor das coordenadas do ponto no espaço objeto $[X \ Y \ Z]_p^T$;

\underline{X}_C - vetor das coordenadas do centro perspectivo $[X \ Y \ Z]_C^T$

A partir destas definições, assumindo que a câmara se movimentava de forma uniforme, ao longo de um caminho reto, com uma velocidade média constante V , no espaço tridimensional, tem-se:

$$\underline{X}_C'' - \underline{X}_C' = V\Delta t \quad (23)$$

onde:

Dt é o tempo de exposição que causa o borramento;

V é a velocidade de deslocamento do sensor (avião).

Substituindo-se a equação (23) nas equações (22), tem-se:

$$\begin{aligned} x'' - x_0 &= -f \left[\frac{M_1(\underline{X}_p - \underline{X}_C' - V\Delta t)}{M_3(\underline{X}_p - \underline{X}_C' - V\Delta t)} \right] \\ y'' - y_0 &= -f \left[\frac{M_2(\underline{X}_p - \underline{X}_C' - V\Delta t)}{M_3(\underline{X}_p - \underline{X}_C' - V\Delta t)} \right] \end{aligned} \quad (24)$$

Os componentes de deslocamento da imagem, que causam o borramento, são determinados por:

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_p'' - x_p' \\ &= -f \left[\frac{M_1(\underline{X}_p - \underline{X}_C' - V\Delta t)}{M_3(\underline{X}_p - \underline{X}_C' - V\Delta t)} \right] + f \left[\frac{M_1(\underline{X}_p - \underline{X}_C')}{M_3(\underline{X}_p - \underline{X}_C')} \right] \\ \Delta y &= y_p'' - y_p' \\ &= -f \left[\frac{M_2(\underline{X}_p - \underline{X}_C' - V\Delta t)}{M_3(\underline{X}_p - \underline{X}_C' - V\Delta t)} \right] + f \left[\frac{M_2(\underline{X}_p - \underline{X}_C')}{M_3(\underline{X}_p - \underline{X}_C')} \right] \end{aligned} \quad (25)$$

2.2.2.2. Tratamento para o caso da câmara em movimento

As equações desenvolvidas no trabalho de Gosh (1985) podem ser, também, aplicadas na situação em que a câmara está em movimento, desconsiderando-se o efeito do obturador. Neste caso, considera-se o intervalo de exposição entre as tomadas fotográficas.

A Figura 11 mostra duas imagens inclinadas, com os pontos p_1' e p_2' deslocados no plano imagem provocados pelo movimento da câmara, e o ponto p no plano objeto, tomadas nos instantes t_1 e t_2 .

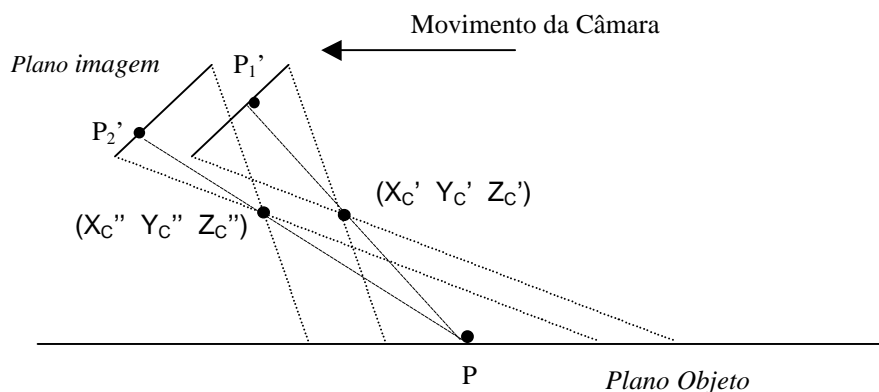


FIGURA 11 - Obtenção das imagens, considerando-se o intervalo de exposição nos instantes t_1 e t_2 .

Em ambas as situações mencionadas (tempo de exposição e intervalo de exposição), para cada instante t_1 e t_2 , é necessário determinar os respectivos parâmetros de orientação exterior.

Considerando-se somente o movimento de translação e a câmara movendo-se uniformemente, ao longo de um caminho reto com uma velocidade V , e o ponto P fixo, a determinação das coordenadas no espaço objeto, no instante t_1 (conhecidos os parâmetros de orientação exterior), é realizada pelas equações de colinearidade (10) e (11), apresentadas novamente, para melhor acompanhamento (considerando x' e y' para o instante t_1):

$$\begin{aligned} x' &= -f \cdot \frac{m_{11}(X - X'_C) + m_{12}(Y - Y'_C) + m_{13}(Z - Z'_C)}{m_{31}(X - X'_C) + m_{32}(Y - Y'_C) + m_{33}(Z - Z'_C)} \\ y' &= -f \cdot \frac{m_{21}(X - X'_C) + m_{22}(Y - Y'_C) + m_{23}(Z - Z'_C)}{m_{31}(X - X'_C) + m_{32}(Y - Y'_C) + m_{33}(Z - Z'_C)} \end{aligned} \quad (26)$$

similarmente, no instante t_2 , tem-se:

$$\begin{aligned} x'' &= -f \cdot \frac{m_{11}(X - X''_C) + m_{12}(Y - Y''_C) + m_{13}(Z - Z''_C)}{m_{31}(X - X''_C) + m_{32}(Y - Y''_C) + m_{33}(Z - Z''_C)} \\ y'' &= -f \cdot \frac{m_{21}(X - X''_C) + m_{22}(Y - Y''_C) + m_{23}(Z - Z''_C)}{m_{31}(X - X''_C) + m_{32}(Y - Y''_C) + m_{33}(Z - Z''_C)} \end{aligned} \quad (27)$$

Através das equações (26), as coordenadas do centro perspectivo para o instante t_2 podem ser dadas por:

$$\begin{aligned} X_C'' &= X_C' + S_x \\ Y_C'' &= Y_C' + S_y \\ Z_C'' &= Z_C' + S_z \end{aligned} \quad (28)$$

onde:

S_x corresponde ao componente X ($X_C'' - X_C'$) do vetor deslocamento;

S_y corresponde ao componente Y ($Y_C'' - Y_C'$) do vetor deslocamento;

S_z corresponde ao componente Z ($Z_C'' - Z_C'$) do vetor deslocamento;

Substituindo-se as equações (28) pelas equações (27), tem-se, para o instante t_2 :

$$\begin{aligned} x'' &= -f \cdot \frac{m_{11}(X - X_C' - S_x) + m_{12}(Y - Y_C' - S_y) + m_{13}(Z - Z_C' - S_z)}{m_{31}(X - X_C' - S_x) + m_{32}(Y - Y_C' - S_y) + m_{33}(X - Z_C' - S_z)} \\ y'' &= -f \cdot \frac{m_{21}(X - X_C' - S_x) + m_{22}(Y - Y_C' - S_y) + m_{23}(Z - Z_C' - S_z)}{m_{31}(X - X_C' - S_x) + m_{32}(Y - Y_C' - S_y) + m_{33}(Z - Z_C' - S_z)} \end{aligned} \quad (29)$$

As equações (29) representam as equações de colinearidade modificada para o caso da câmara em movimento.

2.2.2.3. Tratamento, considerando-se a câmara fixa e o objeto em movimento.

Considerem-se, agora, duas imagens obtidas nos instantes t_1 e t_2 (conhecidos), onde o objeto é que se desloca e a câmara permanece fixa - situação representada nas Figuras 12a e 12b.

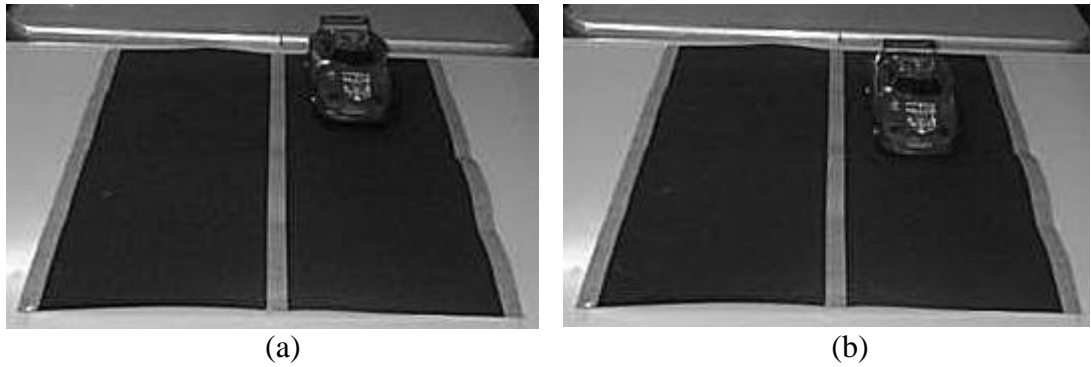


FIGURA 12 – a) Imagem de uma cena no instante t_1 de um carro (simulação) e b) Imagem de uma cena no instante t_2 de um carro (simulação).

Calculados os parâmetros de orientação exterior (\mathbf{k} , \mathbf{s} , \mathbf{w} , X_C , Y_C e Z_C), válidos para todas as imagens neste caso, pois o sensor está fixo e o objeto está em movimento, as coordenadas do ponto no espaço objeto, no instante t_1 , podem ser calculadas, através das equações:

$$\begin{aligned} x' &= -f \cdot \frac{m_{11}(X' - X_C) + m_{12}(Y' - Y_C) + m_{13}(Z' - Z_C)}{m_{31}(X' - X_C) + m_{32}(Y' - Y_C) + m_{33}(Z' - Z_C)} \\ y' &= -f \cdot \frac{m_{21}(X' - X_C) + m_{22}(Y' - Y_C) + m_{23}(Z' - Z_C)}{m_{31}(X' - X_C) + m_{32}(Y' - Y_C) + m_{33}(Z' - Z_C)} \end{aligned} \quad (30)$$

Similarmente, para o instante t_2 :

$$\begin{aligned} x'' &= -f \cdot \frac{m_{11}(X'' - X_C) + m_{12}(Y'' - Y_C) + m_{13}(Z'' - Z_C)}{m_{31}(X'' - X_C) + m_{32}(Y'' - Y_C) + m_{33}(Z'' - Z_C)} \\ y'' &= -f \cdot \frac{m_{21}(X'' - X_C) + m_{22}(Y'' - Y_C) + m_{23}(Z'' - Z_C)}{m_{31}(X'' - X_C) + m_{32}(Y'' - Y_C) + m_{33}(Z'' - Z_C)} \end{aligned} \quad (31)$$

Como houve um deslocamento do objeto no intervalo t_1 e t_2 , podem-se definir as coordenadas do espaço objeto no instante t_2 (X'' , Y'' e Z''), como as coordenadas do espaço objeto no instante t_1 , acrescido do deslocamento:

$$\begin{aligned} X'' &= X' + S_x \\ Y'' &= Y' + S_y \\ Z'' &= Z' + S_z \end{aligned} \quad (32)$$

As equações (32) substituídas pelas (31) para o instante t_2 podem ser escritas como:

$$\begin{aligned} x'' &= -f \cdot \frac{m_{11}(X'+S_x - X_C) + m_{12}(Y'+S_y - Y_C) + m_{13}(Z'+S_z - Z_C)}{m_{31}(X'+S_x - X_C) + m_{32}(Y'+S_y - Y_C) + m_{33}(Z'+S_z - Z_C)} \\ y'' &= -f \cdot \frac{m_{21}(X'+S_x - X_C) + m_{22}(Y'+S_y - Y_C) + m_{23}(Z'+S_z - Z_C)}{m_{31}(X'+S_x - X_C) + m_{32}(Y'+S_y - Y_C) + m_{33}(Z'+S_z - Z_C)} \end{aligned} \quad (33)$$

Considerando-se a equação da velocidade dada por:

$$v = \frac{S}{\Delta t} \quad (34)$$

onde:

Δt é o intervalo de tempo = $t_2 - t_1$;

S corresponde à distância entre o pontos P1 e P2 do objeto (espaço percorrido entre os instantes t_1 e t_2).

pode-se escrevê-la:

$$\mathbf{S} = \mathbf{V}\mathbf{D}t \quad (35)$$

Das equações (35) tem-se:

$$S_x = V_x \Delta t \quad (36)$$

$$S_y = V_y \Delta t \quad (37)$$

$$S_z = V_z \Delta t \quad (38)$$

onde:

S_x , S_y e S_z são os componentes X , Y e Z do vetor deslocamento;

V_x , V_y e V_z são os componentes X , Y e Z do vetor velocidade;

$\mathbf{D}t$ é o intervalo de tempo ($t_2 - t_1$).

Substituindo-se as equações (36), (37) e (38) nas equações (33)

obté-m-se:

$$\begin{aligned} x'' &= -f \cdot \frac{m_{11}(X'+V_x \Delta t - X_C) + m_{12}(Y'+V_y \Delta t - Y_C) + m_{13}(Z'+V_z \Delta t - Z_C)}{m_{31}(X'+V_x \Delta t - X_C) + m_{32}(Y'+V_y \Delta t - Y_C) + m_{33}(Z'+V_z \Delta t - Z_C)} \\ y'' &= -f \cdot \frac{m_{21}(X'+V_x \Delta t - X_C) + m_{22}(Y'+V_y \Delta t - Y_C) + m_{23}(Z'+V_z \Delta t - Z_C)}{m_{31}(X'+V_x \Delta t - X_C) + m_{32}(Y'+V_y \Delta t - Y_C) + m_{33}(Z'+V_z \Delta t - Z_C)} \end{aligned} \quad (39)$$

que correspondem às equações de colinearidade modificada, para o caso da câmara fixa e o objeto em movimento.

2.2.3. Resseção espacial

Os elementos de orientação exterior (κ , ϕ , ω , X_C , Y_C , Z_C), matematicamente, requerem a solução de, no mínimo, seis equações (10) e (11) para os seis parâmetros (orientação exterior) que relacionam o espaço imagem e o espaço objeto.

O relacionamento da transformação do referencial global para o referencial da câmara é realizado, a partir do conhecimento dos parâmetros de orientação exterior, também conhecidos como parâmetros extrínsecos (κ , ϕ , ω , X_C , Y_C , Z_C), que determinam a atitude e a posição da câmara no momento da tomada das imagens. Esse problema, em Fotogrametria, é denominado resseção espacial, cujo modelo matemático formaliza a condição de colinearidade, descrita, analiticamente, pelas equações (10) e (11).

Segundo Arruda et al. (2000), a resseção espacial de uma foto consiste em determinar os parâmetros de orientação exterior da câmara, a partir das:

- fotocoordenadas de n pontos;
- coordenadas de pontos correspondentes no espaço objeto;

- constante de calibração da câmara – distância focal e as coordenadas do ponto principal;
- valores aproximados dos elementos de orientação exterior;

A resseção espacial pode ser resolvida, através do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Para cada ponto com coordenadas conhecidas do terreno, e lido na foto, são geradas duas equações (10) e (11). Portanto, para encontrar a solução para as 6 incógnitas, serão necessários 4 pontos no mínimo (não alinhados), pois o MMQ requer uma superabundância de observações.

Uma solução simplificada, admitindo que os pontos de apoio medidos no espaço objeto sejam isentos de erros (injunção absoluta), fará com que, nos primeiros membros das equações (10) e (11), se tenham observações L_a ; e, no segundo, uma função dos parâmetros X_a (modelo explícito). Dessa forma:

$$L_a = F(X_a) \quad (40)$$

onde:

$$L_a = \begin{bmatrix} x_1^a \\ y_1^a \\ x_2^a \\ y_2^a \\ \vdots \\ x_n^a \\ y_n^a \end{bmatrix} \quad X_a = \begin{bmatrix} k \\ j \\ w \\ X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (41)$$

L_a é o vetor de fotocoordenadas da imagem ajustadas;

$x_1^a, y_1^a, x_2^a, y_2^a \dots x_n^a, y_n^a$ são as coordenadas dos pontos na imagem;

X_a são os parâmetros ajustados (a determinar).

A equação (40), na forma linearizada, pode ser escrita:

$$V = AX + L \quad (42)$$

onde:

$$L = L_0 - L_b$$

$$L_0 = F(X_0)$$

L_0 é o vetor das fotocoordenadas aproximadas;

L_b é o vetor com as fotocoordenadas observadas;

A é a matriz das derivadas parciais, em relação aos parâmetros de orientação exterior, interior e coordenadas do pontos no terreno.

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_a = X_0}$$

$$X_0^T = [w \ j \ k \ X_c \ Y_c \ Z_c] \quad (43)$$

Fazendo:

$$N = (A^T PA) \quad (44)$$

e

$$U = (A^T PL) \quad (45)$$

onde:

P corresponde à matriz peso, com $P = \mathbf{s}_0^2 \sum_{L_b}^{-1}$;

\mathbf{s}_0^2 é a variância da observação de peso unitário (variância) *a priori*;

$\sum_{L_b}^{-1}$ é a matriz variância-covariância dos valores observados.

A solução será dada por:

$$X = -N^{-1}U \quad (46)$$

$$X_a = X_0 + X \quad (47)$$

A solução (47) fornece um primeiro valor ajustado de X_a , que deve ser usado como valor aproximado para uma próxima iteração. A iteração é requerida, devido à linearização do modelo, e deverá ser interrompida, quando o valor das correções de X se tornarem negligenciáveis.

Para indicar a estimativa da precisão dos parâmetros ajustados, é calculada a matriz variância-covariância, dada por:

$$\Sigma_x = \mathbf{s}_0^2 N^{-1} \quad (48)$$

onde:

\mathbf{s}_0^2 é a variância da observação de peso unitário.

2.2.4 – Calibração de câmaras

A calibração de câmaras consiste na determinação dos parâmetros de orientação interior ou intrínsecos e estão relacionados com a construção física da câmara. Esses parâmetros correspondem, basicamente, à determinação:

- da distância focal;
- posição do ponto principal;
- coeficiente de distorções do sistema de lentes.

Segundo Galo (1993), a calibração de câmaras consiste “num procedimento para determinação de um conjunto de parâmetros inerentes à câmara, os quais permitem a reconstituição do feixe perspectivo que deu origem a imagem”.

Alguns métodos de calibração de câmaras são:

- método de laboratório – requer o uso de equipamentos especiais, que podem ser divididos em método de

multicolimador e método do goniômetro, utilizados na calibração de câmaras aéreas. No caso do colimador, uma série de projetores ópticos emitem um sinal que penetra no sistema de lentes de uma câmara aérea, que são montados de forma perpendicular entre si. O sistema de lentes da câmara é posicionado sobre os colimadores, que são ligados, para projetar a luz em uma placa fotográfica, na outra extremidade do sistema de lentes. As coordenadas das imagens projetadas pelos colimadores e as marcas fiduciais do quadro da câmara aérea são medidas em um instrumento de precisão, de onde são obtidas, através de processamento a distância focal e os parâmetros de distorção radial do conjunto de lentes.

- Método dos Campos Misturados – o método consiste na obtenção de imagens fotográficas, onde se tenham pontos de controle devidamente sinalizados e com coordenadas conhecidas, medidas com grande precisão, “fundamenta-se na quebra da dependência linear e na minimização da instabilidade através do ajustamento simultâneo das observações fotogramétricas realizadas sobre um campo de testes plano e outro montanhoso” (Andrade & Olivas, 1981). A Figura 13 mostra uma das imagens utilizadas na calibração da filmadora, através desse método, utilizando o programa CC (Galo, 1988).

- Método das câmaras convergentes – esse método desenvolvido por Duane C. Brown, segundo Olivas (1980), baseia-se “na utilização de fotografias altamente convergentes, como forma de contrabalançar as compensações projetivas, tornando-se desnecessário o conhecimento prévio das estações de exposição”. A convergência entre as câmaras é de $\phi \cong 45^\circ$ e $\phi \cong -45^\circ$, formando raios entre si, de, aproximadamente, 90° .

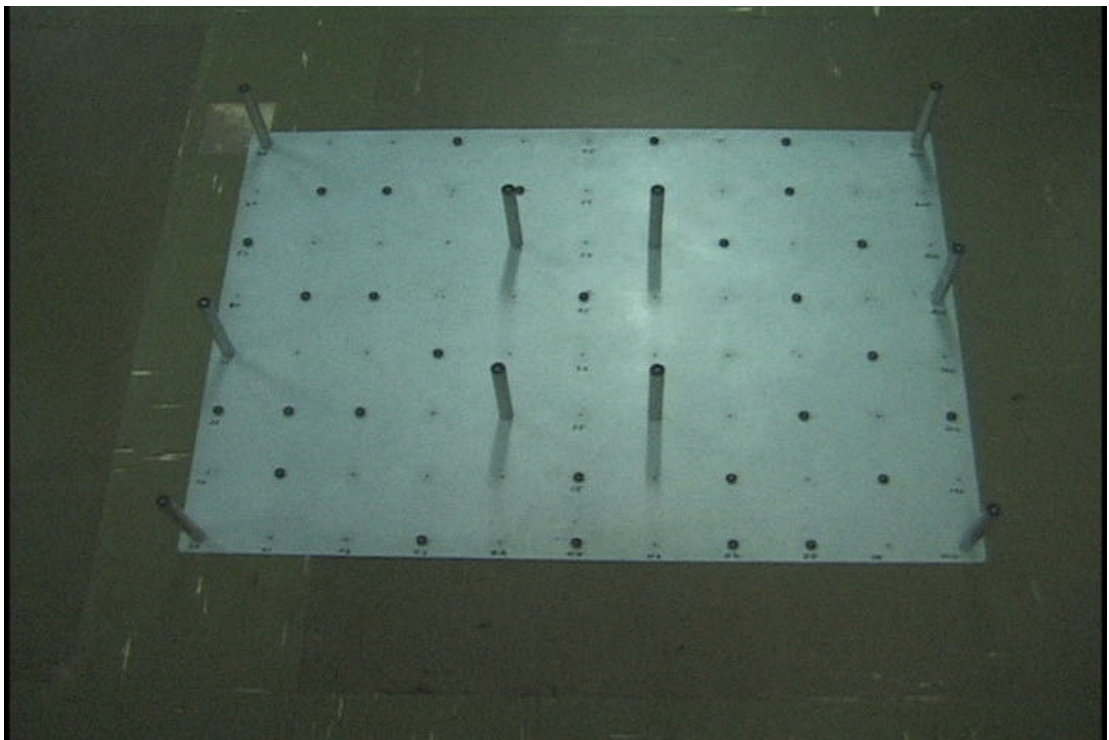


FIGURA 13 – Uma das imagens utilizada para a calibração da câmara.

2.2.4.1 – Distorção das lentes

Segundo Galo (1993), as distorções do sistema de lentes podem ser consideradas como sendo perturbações sofridas pelos raios de luz, ao atravessarem um sistema ótico, e podem tanto prejudicar a qualidade quanto provocar deslocamentos na imagem.

Usualmente, as distorções de lentes são divididas em dois tipos:

- radial: que afeta a posição do ponto imagem numa linha reta, a partir do ponto principal da câmara no sentido radial, também conhecida como distorção radial simétrica. Segundo Merchant (1979), as componentes da distorção radial simétrica, em x e y, são:

$$\begin{aligned} dx_r &= (x'_f - x_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ dy_r &= (y'_f - y_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{aligned} \quad (49)$$

onde:

x'_f, y'_f são as coordenadas de imagem com origem no

centro perspectivo;

x_0, y_0 são as coordenadas do ponto principal em relação ao centro da imagem;

k_1, k_2, k_3 são os coeficientes da distorção radial simétrica;

$r = \sqrt{(x'_f - x_0)^2 + (y'_f - y_0)^2}$ - distância radial.

- descentrada: provocada pela imperfeição no alinhamento dos eixos das lentes de um sistema ótico, resultando em deslocamentos da imagem. Segundo Galo (1993), o modelo Conrady-Brow modificado é o mais aceito, para determinar as componentes da distorção descentrada, representada pelas equações (50):

$$\begin{aligned} dx_d &= [P_1(r^2 + 2(x'_f - x_0)^2) + 2P_2(x'_f - x_0)(y'_f - y_0)](1 + P_3r^2 \dots) \\ dy_d &= [P_2(r^2 + 2(y'_f - y_0)^2) + 2P_1(x'_f - x_0)(y'_f - y_0)](1 + P_3r^2 \dots) \end{aligned} \quad (50)$$

onde:

P_1 , P_2 , P_3 são os coeficientes da distorção descentrada.

Segundo Galo (1993), na calibração de câmaras digitais, os parâmetros P_1 , P_2 e P_3 podem ser desprezados, em função da precisão requerida, assim como os parâmetros k_2 e k_3 não são considerados, devido a sua pequena influência na modelagem da distorção das lentes.

3. DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE

Com o intuito de validar o protótipo, montou-se um ambiente para a obtenção das imagens em que se simula um veículo (carro de brinquedo) em movimento, numa rodovia. O objeto (carro) é detectado, tomando-se, como parâmetro, a diferença entre imagens: uma definida como padrão, sem a presença

de objetos; e as subseqüentes simulando o objeto em vários instantes. O protótipo detecta o objeto de forma automática, identifica a sua coordenada no instante t_1 e, numa imagem subseqüente (simulando o movimento do objeto); por um processo de correspondência de imagens (*matching*), obtêm-se as coordenadas do objeto no instante t_2 . Conhecidas as coordenadas do objeto nos instantes t_1 e t_2 , aplicam-se as equações de colinearidade modificadas (Gosh, 1985) para a determinação da velocidade do objeto.

Neste capítulo, apresentam-se, inicialmente, o sistema e os recursos materiais utilizados no desenvolvimento do projeto; e, em seguida, a metodologia, onde se descrevem as etapas que envolvem o processamento digital de imagens e a determinação da velocidade do objeto, aplicando-se as equações de colinearidade modificadas.

3.1 O sistema e os recursos utilizados

Desenvolveu-se o sistema, utilizando-se a linguagem C++ e ambiente de programação Builder 4.0, bem como os seguintes recursos:

- Software Corel Draw 4.0 – para conversão das imagens coloridas em tons de cinza;
- rotina de resseção fotogramétrica adaptada de Arruda et al. (2000);
- Programa CC - Calibração de Câmaras - Galo (1998);

- Filmadora digital Sony DSR-200 A, com tripé, para a obtenção das imagens;
- placa de aço com 88 pontos (para efetivar a orientação exterior), distribuídos em um arranjo matricial, com espaçamento de 100mm, cartolina preta e um carro de brinquedo;
- Adobe Premiere LE 4.2 32 bit version Windows 95 – software utilizado para a seleção das imagens obtidas pela filmadora.

Para a realização dos experimentos, simulou-se uma situação no laboratório, para a obtenção das imagens. A Figura 14 mostra o ambiente montado, com a filmadora fixa sobre um tripé e a simulação da estrada (cartolina preta) com o carro.



FIGURA 14 – Ambiente montado para a obtenção das imagens.

3.1.1. Descrição do ambiente simulado

O ambiente, no laboratório, simula uma rodovia, onde veículos trafegam em um único sentido (de encontro com a câmara), na qual o asfalto é substituído por uma cartolina preta (fosca), procurando reproduzir, radiometricamente, as mesmas condições do ambiente real. Para a determinação dos parâmetros de orientação exterior, utilizou-se uma placa de aço com 88 pontos, distribuídos em um arranjo matricial, com espaçamento de 100mm.

A cena – placa de aço, cartolina e carro - foi montada numa escala reduzida de 8 vezes (1/8). Nessa simulação, considerou-se que o veículo se deslocaria a uma velocidade média de 30m/s ou 108 Km/h. Apoiado nessa escala e considerando o intervalo de tempo $\Delta t = 1/30s$, o deslocamento simulado do veículo na cena é de 12,5 cm. Dessa forma, para cada tomada fotográfica o veículo foi colocado espaçado de 12,5 cm, representando o seu deslocamento no intervalo de tempo de 1/30 segundos.

3.2. Seleção e processamento das imagens

As imagens mostradas nas Figuras 15a, 15b, 15c e 15d, com dimensão de 480 x 720 pixels, passaram por um processo de seleção, feito com o software Adobe Premiere LE 4.2, e, depois, convertidas para tons de cinza, utilizando o software Corel Draw 4.0 (o sistema trabalha com as imagens em tons de cinza no padrão bitmap).

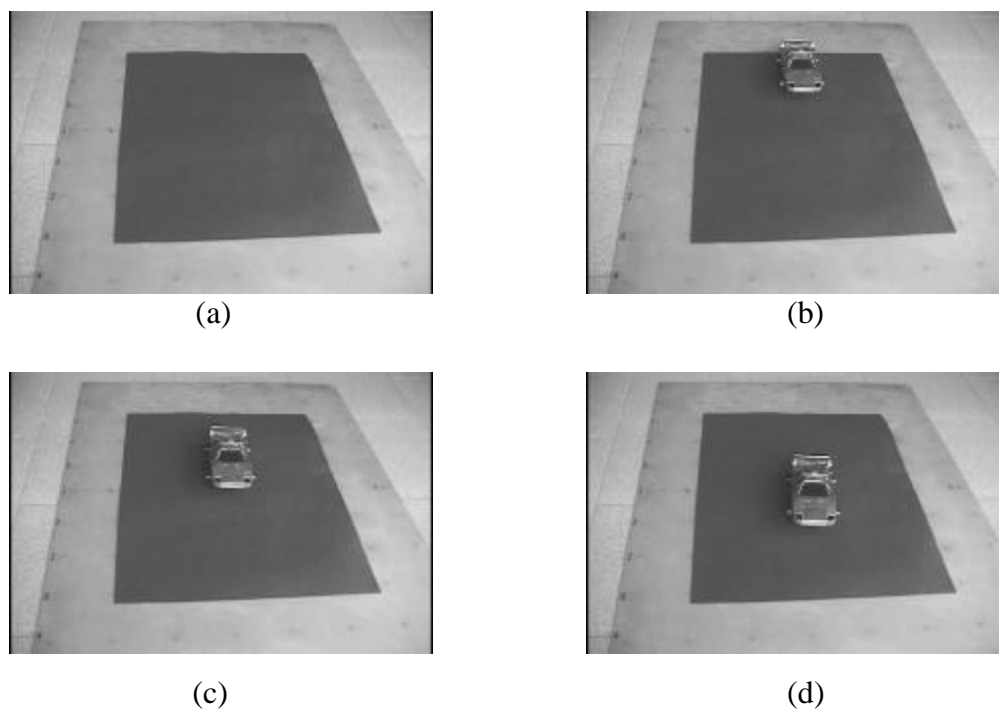


FIGURA 15 – (a) Imagem padrão sem a presença de objetos; (b) imagem 1 - objeto no instante t_1 ; (c) imagem 2 no instante t_2 - o objeto deslocado à frente, em 12,5cm; (d) imagem 3 no instante t_3 - o objeto deslocado 12,5cm em relação à imagem 2.

3.2.1. Calibração da filmadora

Para determinação dos parâmetros de orientação interior da câmara filmadora, utilizou-se o software Calibração de Câmara – CC (Galo, 1998). A maquete, com os pontos de controle, foi filmada de vários ângulos – Figura 16 -, onde, a partir de 6 imagens selecionadas, se efetuou a leitura das

coordenadas dos pontos de controle (determinação semi-automática do centro de massa) no espaço imagem (31 pontos).

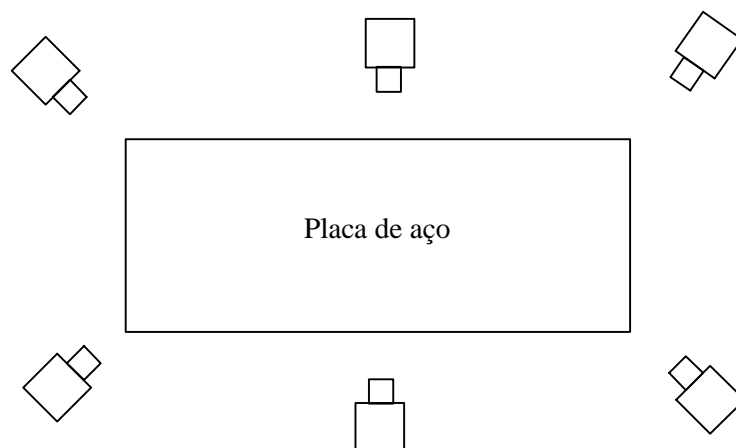


FIGURA 16 – Ângulos das imagens para calibração.

Conforme Galo (1993), os parâmetros P_1 e P_2 são de pequena magnitude, significando que, em função da precisão requerida, esses parâmetros podem ser desprezados, assim como os parâmetros K_2 e K_3 .

Conhecidos os valores do tamanho do pixel em $x = 0,048$ mm e $y = 0,054$ mm simulando uma câmara 35 mm, estimaram-se os parâmetros de orientação interior da filmadora; os resultados obtidos, após o processamento, são apresentados pela tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de orientação interior calculados.

	Distância Focal	x_0	y_0	K_1
Valores	42,7519 mm	-0,02 mm	0,2734 mm	-0,00011274 mm ⁻²
Desvio Padrão	0,1044 mm	0,06049 mm	0,1186 mm	0,000002933 mm ⁻²

As coordenadas obtidas das imagens foram corrigidas aplicando-se o parâmetro K_1 (coeficiente da distorção radial simétrica), conforme a equação 51.

$$\begin{aligned}x' &= x + (x - x_0) * K_1 r^2 \\y' &= y + (y - y_0) * K_1 r^2\end{aligned}\tag{51}$$

onde:

x' e y' são as coordenadas de um ponto na imagem;

x_0 e y_0 – coordenadas do ponto principal em relação ao centro da imagem;

K_1 – coeficiente da distorção radial simétrica;

$$r = \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2}$$

3.2.2. Orientação exterior

Os parâmetros de orientação exterior da câmara informam a atitude e a posição da câmara no momento da tomada das imagens; são calculados uma única vez, pois ela permanece fixa para todas as tomadas.

Para a determinação dos parâmetros de orientação exterior, definiu-se um sistema de coordenadas na placa (local) e utilizaram-se alguns pontos existentes na placa, como apoio - Figura 17.

Foram atribuídas as coordenadas (1000, 1000, 100) para o ponto da placa no canto inferior esquerdo (conforme Figura 17); e, para os demais,

consideraram-se os espaçamentos dos pontos na placa. Todos os pontos da placa receberam a coordenada altimétrica (z) de 100 mm.

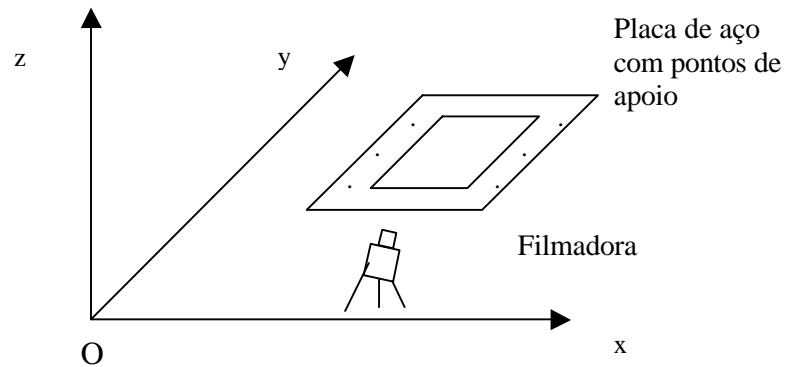


Figura 17- Sistema de coordenadas local para a orientação exterior.

Os parâmetros de orientação exterior, calculados pela rotina adaptada de Arruda (2000), foram (conforme valores apresentados na Figura 18):

- atitude da câmara:
 - $\omega = 49^{\circ} 48' 48,96''$
 - $\varphi = -9^{\circ} 09' 22,40''$
 - $\kappa = -1^{\circ} 03' 09,70''$
- posição do centro perspectivo da câmara:
 - $X_C = 1159,9376 \text{ mm}$
 - $Y_C = 656,4861 \text{ mm}$
 - $Z_C = 871,2729 \text{ mm}$

Parâmetros Iniciais

Tamanho do Pixel (mm)		Delta t (seg)
x	y	
0,048	0,054	0,033333

Parâmetros de Orientação Interior

Distância Focal (mm) ->	42,7519
X _o ->	-0,02
Y _o ->	0,2734
K1 ->	-0,00011274

Parâmetros de Orientação Exterior

Omega ->	0,7773069345	X _c ->	1159,9376500
Fi ->	-0,142820584	Y _c ->	656,48618003
Kapa ->	-0,027145392	Z _c ->	871,27298360

FIGURA 18 – Tela de parâmetros – orientação interior, exterior, intervalo de tempo (Delta t) e tamanho do pixel em x e y.

Uma vez realizadas as observações e montado o arquivo com as coordenadas dos pontos de apoio, os parâmetros de orientação exterior são calculados, toda vez que o sistema é executado.

O intervalo adotado no processamento entre os quadros obtidos pela filmadora é de 1/30s ($\Delta t = 0,033333$ seg); e o intervalo de tempo entre os instantes t_1 e t_3 é de 1/15s ($\Delta t = 0,066666$ seg).

3.2.3. Fluxograma do sistema

Para um entendimento geral do sistema, a Figura 19 apresenta, um fluxograma identificando suas diversas etapas.

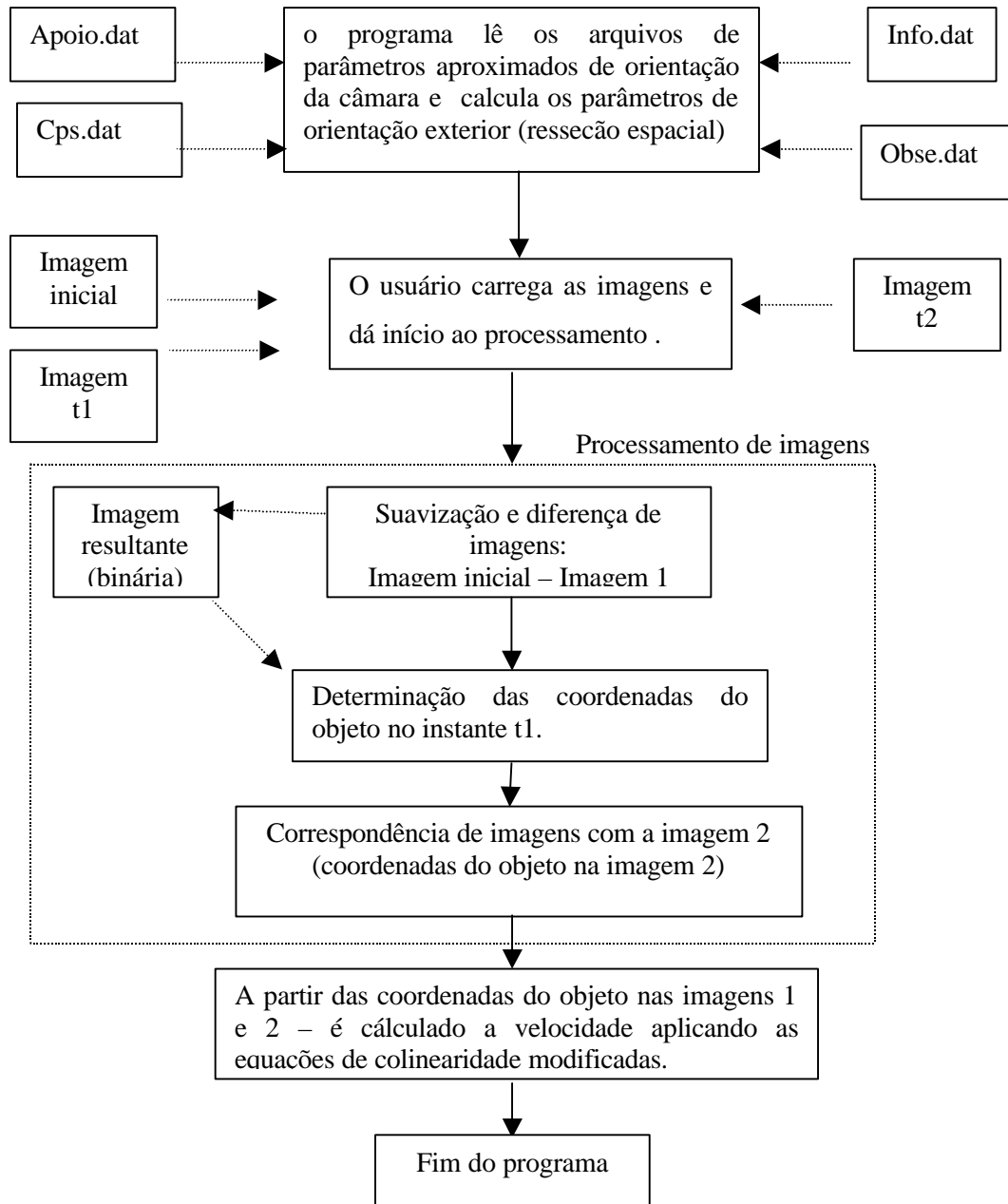


FIGURA 19 – Fluxograma geral do sistema.

3.3. Metodologia de desenvolvimento

A metodologia, utilizada para o desenvolvimento do sistema, envolve os conceitos de Processamento Digital de Imagens e da Fotogrametria, podendo dividir-se em duas etapas: a primeira, envolvendo o processamento digital de imagens (detecção do objeto e correspondência - *matching*), apresentada na seção 3.3.1.; a segunda, a determinação da velocidade do objeto, com a aplicação das equações de colinearidade modificadas, apresentada na seção 3.3.2..

3.3.1. As imagens para processamento

Das quatro imagens selecionadas para a realização dos experimentos - Figuras 15a, 15b, 15c e 15d – utilizam-se três a cada processamento, selecionadas pelo usuário: a imagem inicial (Figura 15a – sem a presença de objeto) e outras duas imagens que simulem o deslocamento do veículo. Considerando-se a posição do veículo nas imagens - Figura 15b, 15c e 15d, as combinações possíveis para o processamento são apresentadas na Tabela 1.

Para um melhor acompanhamento, serão denominadas, daqui para a frente, imagem inicial, imagem 1 e imagem 2 as utilizadas para processamento, correspondendo, respectivamente, à imagem da Figura 15a e a imagens nos instantes t_1 e t_2 (que podem variar, conforme a Tabela 2).

Tabela 2 – Combinações possíveis das imagens para processamento e o intervalo Δt a ser adotado.

	Imagens		Δt (s)
	Instante t_1	Instante t_2	
Possibilidade 1	Figura 15b	Figura 15c	0,0333333
Possibilidade 2	Figura 15b	Figura 15d	0,0666666
Possibilidade 3	Figura 15c	Figura 15d	0,0333333

3.3.1.1. Detecção do objeto

A detecção do objeto far-se-á, pela diferença de imagens, e, após um processo de enquadramento, determinar-se-ão as coordenadas do objeto na imagem 1.

Utilizou-se a diferença de imagens proposta por Gonzales & Woods (1993), apresentada pela equação (52).

$$d(i, j) = \begin{cases} 0 & \text{se } |I'(i, j) - I''(i, j)| < \tau \\ 1 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (52)$$

onde:

$d(i, j)$ é a imagem binária da diferença;

$I'(i, j)$ e $I''(i, j)$ são as intensidades dos pixels das imagens;

τ um limiar.

Desse processamento, resulta uma imagem binária – Figura 20 - (imagem inicial – imagem 1), onde os pixels brancos representam a presença de objetos ou ruídos.



FIGURA 20 – Imagem resultante da diferença entre a imagem inicial e a imagem 1.

Os métodos de suavização de imagens descritos no capítulo 2, filtro da moda, média e mediana, foram implementados (utilizando C++ Builder) e testados para avaliação. Para fazer essa avaliação, acrescentaram-se, a uma imagem ruídos, aplicando-se o filtro Gaussiano – Figura 21.

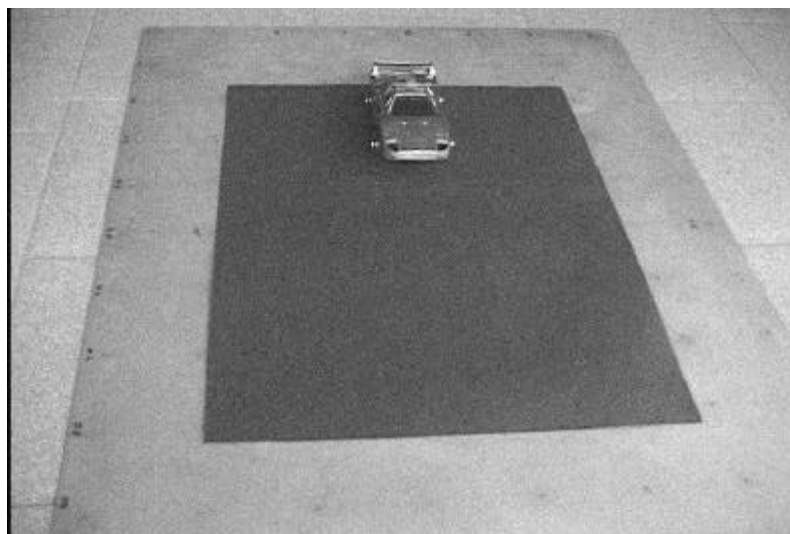
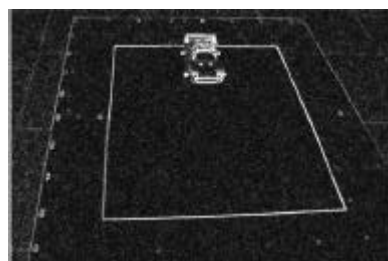


FIGURA 21 – Imagem acrescida de ruídos.

À imagem gerada, Figura 21, aplicaram-se os filtros da média, mediana e moda, e as imagens resultantes dos filtros foram avaliadas de maneira visual, utilizando-se o filtro Sobel para a detecção de bordas.

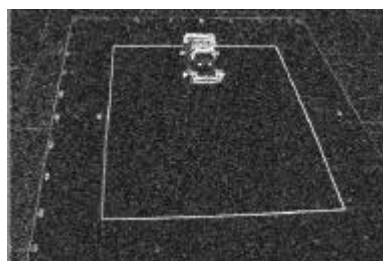
As Figuras 22a, 22b e 22c mostram os resultados conseguidos com a detecção de bordas, com base nas imagens geradas com os filtros da média, moda e mediana, respectivamente.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 22 – Detecção de bordas a) após filtro da média; b) após filtro da moda; c) após filtro da mediana.

Visualmente, observando-se as figuras 22a, 22b e 22c, verifica-se que o filtro da média apresentou melhor resultado, quanto à eliminação de ruídos, em relação aos filtros da moda e mediana.

A diferença de imagens fica sujeita a problemas, como, por exemplo, a variação da luminosidade e a presença de ruídos. A variação da luminosidade, nesse tipo de aplicação, é minimizada (quase zero) pela pequena diferença de tempo entre as tomadas, e a presença de ruídos pode ser reduzida, com a aplicação de filtros de suavização.

A determinação de um limiar de forma automática é desejável.

Para tanto, aplicou-se a equação:

$$\mathbf{q} = \mathit{round}(\bar{x} + 2 * \sigma) \quad (53)$$

onde:

θ é o valor do limiar a ser adotado;

\bar{x} é o valor médio dos valores absolutos da diferença entre as imagens inicial e (imagem) 1;

σ é o desvio padrão da imagem da diferença.

A tabela 3 apresenta os valores das médias das diferenças de imagens com seus respectivos desvios e os limiares obtidos no processamento de diferentes imagens, aplicando-se a equação 53.

Tabela 3 – Limiar automático calculado.

Imagem inicial Menos	\bar{x} (média)	s (desvio padrão)	q (limiar)
Figura 15b	2.95	7.16	17
Figura 15c	3.33	8.22	20
Figura 15d	4.53	8.82	22

As Figuras 23a, 23b e 23c mostram as imagens resultantes da diferença em que foram aplicados os limiares calculados de forma automática.

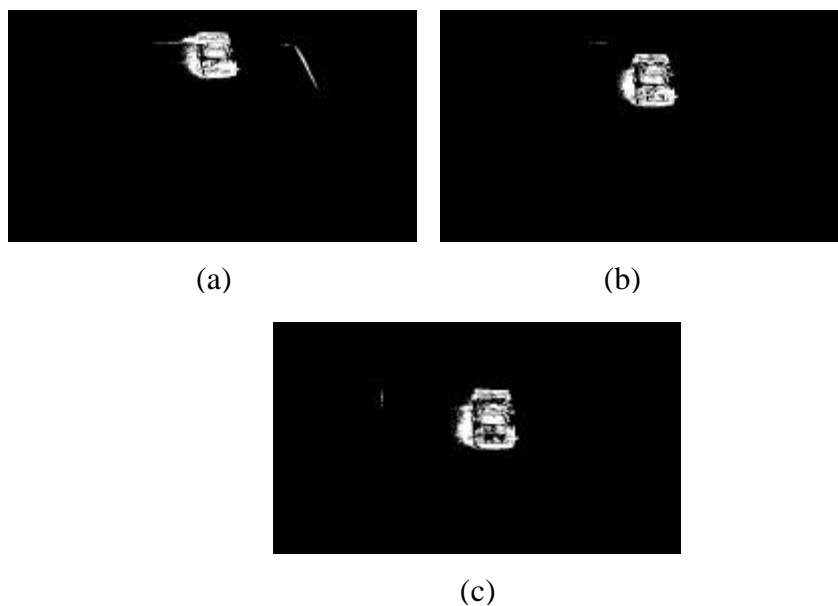


FIGURA 23 – Resultados, utilizando-se o limiar automático da diferença da imagem inicial: a) com a Figura 15b; b) com a Figura 15c; c) com a Figura 15d.

3.3.1.2. Determinação das coordenadas do objeto

A imagem binária, resultante da diferença, permite a identificação visual do objeto de forma clara; porém não determina uma coordenada de referência do objeto. A determinação dessa coordenada pode ser realizada a partir de um processo que identifique uma janela limitante (*bounding box*), que enquadre o objeto de interesse.

Utilizou-se um processo de enquadramento, para a localização do objeto/área de interesse na imagem binária, o qual permite a determinação de um ponto de referência dentro da área de enquadramento, definida como a coordenada do objeto na imagem 1.

Os parâmetros de enquadramento e de determinação das coordenadas do objeto, apresentados em uma das telas do sistema desenvolvido - tela Carrega Imagens (ver Figura 24), são:

- a) Limiar: valor de limiar, utilizado para a diferença de imagens, determinada automaticamente;
- b) Tamanho da janela, para localização do objeto (AxA);
- c) Coordenadas iniciais para processamento (x e y) – valores de coordenadas, que definem o ponto de início do processamento nas imagens;

- d) Percentual de pixels, para enquadrar o objeto – valor utilizado como limiar de borda da janela limitante, para definição do enquadramento;
- e) Percentual a ser considerado, para localização do objeto.

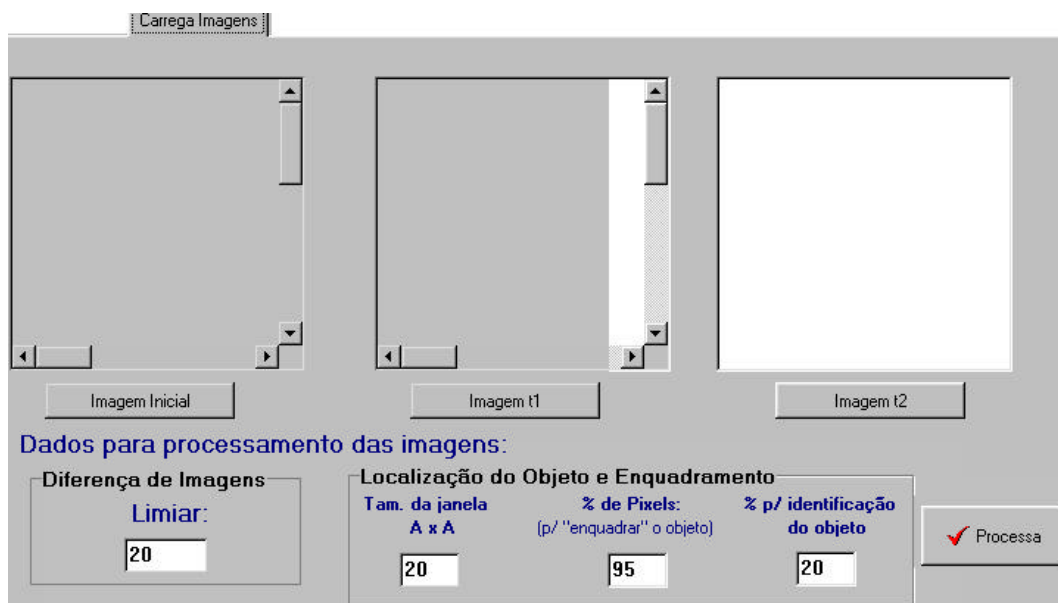


FIGURA 24 – Tela Carrega imagens - parâmetros e imagens para processamento.

O algoritmo de enquadramento, inicialmente, tem como objetivo detectar o objeto na imagem binária; faz-se a localização do objeto, por meio de uma janela de busca ($A \times A$), que percorre a imagem, que se desloca de baixo para cima e da esquerda para a direita (Figura 25).

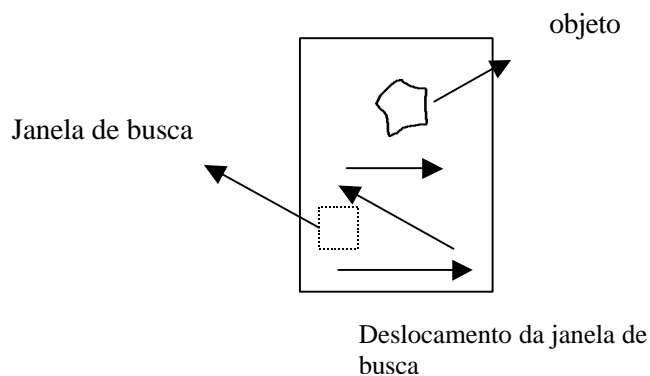


FIGURA 25 – Deslocamento da janela de busca.

A janela de busca se desloca com incremento de linhas e colunas em 50% do tamanho da janela definida e, em cada janela, efetua-se a contagem de pixels brancos, até que atinja o percentual informado.

A Figura 26 mostra o processo de localização do objeto, utilizando os parâmetros: janela 20 x 20 (com deslocamento de 10 pixels por vez), limiar igual a 17 (automático) e percentual de 20% de objeto para a janela. Os quadriculados na imagem mostram algumas janelas (sobrepostas pelo deslocamento) “procurando” o objeto, que se encerra, quando uma janela com mais do que 20% de pixels brancos for encontrada; nesse caso, 80 pixels brancos. O resultado da localização do objeto é apresentado, de forma ampliada, pela Figura 27.

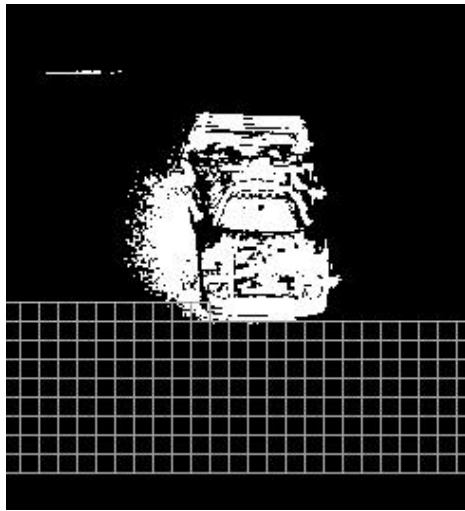


FIGURA 26 – Processo de detecção do objeto – janela de busca, percorrendo a imagem parcialmente.

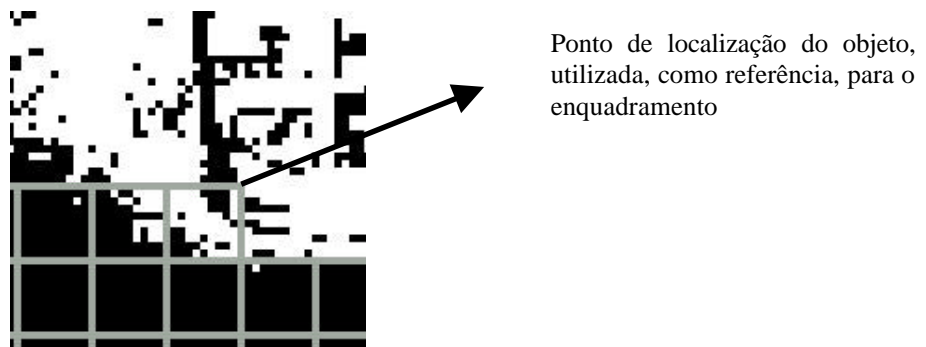


FIGURA 27 – Zoom da área de localização do objeto e o ponto de referência para o enquadramento.

Com a localização do objeto na imagem, faz-se o processo de enquadramento. O algoritmo de enquadramento, partindo da coordenada de localização do objeto - Figura 27, efetua uma varredura nos sentidos horizontal e vertical. O algoritmo encontra os limites dos objetos (4 lados), realizando a

contagem de pixels brancos nas linhas ou colunas, até que seja encontrada uma com 95% de pixels pretos (inexistência de objeto), determinando os limites para enquadramento (coordenadas superior esquerda e inferior direita).

As Figuras 28a, 28b e 28c mostram o resultado do enquadramento, utilizando o algoritmo descrito, a partir das Figuras 23a , 23b e 23c com os parâmetros apresentados na tabela 4.

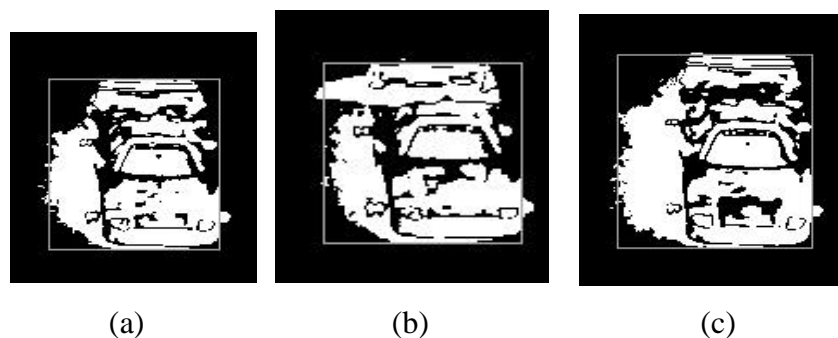


FIGURA 28 – Enquadramento (a partir da diferença com a imagem inicial): a) com a Figura 23a; b) com a Figura 23b; e c) com a Figura 23c.

Tabela 4 – Parâmetros de como se processou o enquadramento.

	Limiar para diferença (automático)	Percentual de Localização	Limiar de Borda (linha de varredura)
Figura 28a	17	20%	95%
Figura 28b	20	20%	95%
Figura 28c	22	20%	95%

Com base nas coordenadas da janela de enquadramento (que define a área de interesse), é calculado o centro de massa do objeto, partindo das equações (54) e (55).

$$x_m = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m i * d(i + \mathbf{a}, j + \mathbf{b}) \quad (54)$$

$$y_m = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m j * d(i + \mathbf{a}, j + \mathbf{b}) \quad (55)$$

$$N = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m i * d(i + \mathbf{a}, j + \mathbf{b})$$

onde:

x_m e y_m são as coordenadas do centro de massa do objeto na sub-imagem;

α e β definem a posição da sub-imagem na imagem;

n e m são as dimensões da janela limitante (tamanho da sub-imagem); e

N é a quantidade de pixels não nulos na janela limitante.

Uma vez determinadas as coordenadas do centro de massa do objeto na imagem 1, o processamento volta a trabalhar com as imagens em tons cinza para a próxima etapa, que é a de correspondência de imagens.

Testes foram realizados com as coordenadas resultantes, obtidas, a partir da determinação do centro de massa; porém os resultados do processo de correspondência não se mostraram satisfatórios. Em um dos experimentos realizados, detectou-se um problema, em virtude de as coordenadas do centro de massa se localizarem sobre uma área homogênea do veículo (parabrisa). Ao se utilizarem as Figuras 15b e 15c para processamento, observou-se, visualmente, um erro significativo na correspondência.

Com o intuito de se determinar uma coordenada para o objeto, na imagem 1, mais adequada para a realização da correspondência de forma automática, foi desenvolvida uma rotina, para encontrar uma área de melhor correspondência, levando-se em conta os valores de brilho dos pixels da área vizinha.

A rotina desenvolvida procura (na imagem original), na área vizinha (a partir das coordenadas do centro de massa), uma janela, cujo valor de desvio padrão seja maior que um limiar – com o valor inicial igual a 50. Esse valor foi determinado, após a realização de alguns experimentos, e, no caso de não ser encontrado dentro da área de enquadramento, a rotina repete a busca, diminuindo o valor do limiar em 5, até que seja encontrada uma área adequada para correspondência.

As Figuras 29a e 29b mostram o problema da correspondência e o resultado positivo, após a aplicação da rotina descrita.

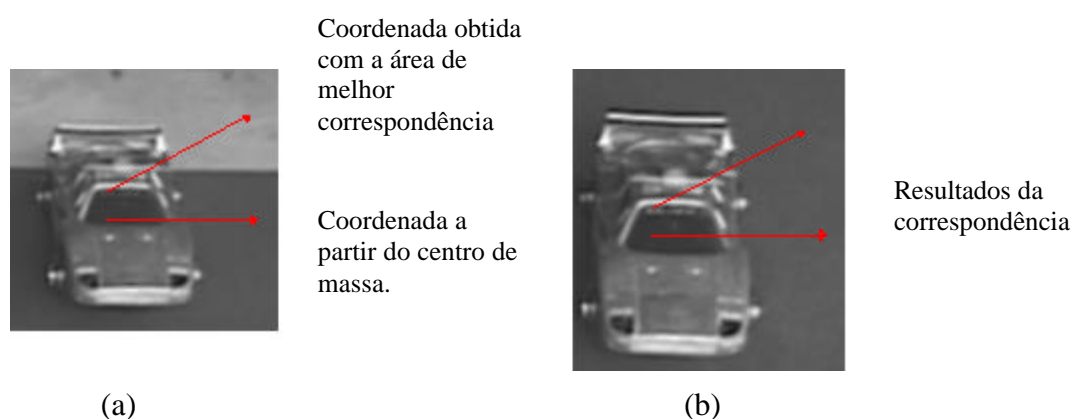


FIGURA 29 – Resultados da correspondência: a) Coordenadas do objeto na imagem 1; e b) Resultado da correspondência.

As coordenadas resultantes do objeto na imagem 1 e na imagem 2, no sistema de coordenadas da imagem, devem transformar-se em coordenadas no sistema fotogramétrico, para a aplicação nas equações de colinearidade modificadas; essa transformação é propiciada pela equação (56) (Galo, 1998).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & -S_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c - c_x \\ l - c_y \end{bmatrix} \quad (56)$$

onde:

x, y coordenadas fotogramétricas a serem obtidas;

$S_x, -S_y$ tamanho do pixel (mm) em x e y ;

c, l coordenadas na imagem (pixels);

c_x, c_y – coordenadas do pixel central da imagem;

3.3.2. Cálculo da velocidade

As equações de colinearidade modificadas, propostas por Gosh (1985), incluem as componentes de velocidade V_x , V_y e V_z e o intervalo de tempo Δt ; considerando-se a planura do terreno, pode-se indicar $Z = \text{constante}$. Desta forma, o componente vertical (V_z) do vetor velocidade tende a zero ($V_z = 0$). Para os pontos do objeto, na imagem 1 e imagem 2, podem-se escrever as equações de colinearidade, novamente apresentadas para um melhor acompanhamento (considerando x' e y' para o instante t_1 e x'' e y'' para o instante t_2). Para o instante t_1 :

$$\begin{aligned}
x' &= -f \cdot \frac{m_{11}(X' - X_C) + m_{12}(Y' - Y_C) + m_{13}(Z' - Z_C)}{m_{31}(X' - X_C) + m_{32}(Y' - Y_C) + m_{33}(Z' - Z_C)} \\
y' &= -f \cdot \frac{m_{21}(X' - X_C) + m_{22}(Y' - Y_C) + m_{23}(Z' - Z_C)}{m_{31}(X' - X_C) + m_{32}(Y' - Y_C) + m_{33}(Z' - Z_C)} \quad (57)
\end{aligned}$$

e para o instante t_2 :

$$\begin{aligned}
x'' &= -f \cdot \frac{m_{11}(X' + V_x \Delta t - X_C) + m_{12}(Y' + V_y \Delta t - Y_C) + m_{13}(Z' + V_z \Delta t - Z_C)}{m_{31}(X' + V_x \Delta t - X_C) + m_{32}(Y' + V_y \Delta t - Y_C) + m_{33}(Z' + V_z \Delta t - Z_C)} \\
y'' &= -f \cdot \frac{m_{21}(X' + V_x \Delta t - X_C) + m_{22}(Y' + V_y \Delta t - Y_C) + m_{23}(Z' + V_z \Delta t - Z_C)}{m_{31}(X' + V_x \Delta t - X_C) + m_{32}(Y' + V_y \Delta t - Y_C) + m_{33}(Z' + V_z \Delta t - Z_C)} \quad (58)
\end{aligned}$$

Manipulando-se as equações (57) e (58) do vetor velocidade

$(V_{x1}$ e $V_{y1})$ resulta no sistema de equações escritas pela equação (59).

$$\begin{aligned}
X' a_1 + Y' a_2 &= X_C (x' m_{31} + f m_{11}) + Y_C (x' m_{32} + f m_{12}) + Z_C (x' m_{33} + f m_{13}) - \\
&\quad Z' (x' m_{33} + f m_{13}) \\
X' b_1 + Y' b_2 &= X_C (y' m_{31} + f m_{21}) + Y_C (y' m_{32} + f m_{22}) + Z_C (y' m_{33} + f m_{23}) - \\
&\quad Z' (y' m_{33} + f m_{23}) \\
X' c_1 + Y' c_2 + V_x c_3 + V_y c_4 &= X_C (x'' m_{31} + f m_{11}) + Y_C (x'' m_{32} + f m_{12}) + Z_C (x'' m_{33} + f m_{13}) - \\
&\quad Z' (x'' m_{33} + f m_{13}) - V_z (x'' m_{33} \Delta t + f m_{13} \Delta t) \\
X' d_1 + Y' d_2 + V_x d_3 + V_y d_4 &= X_C (y'' m_{31} + f m_{21}) + Y_C (y'' m_{32} + f m_{22}) + Z_C (y'' m_{33} + f m_{23}) - \\
&\quad Z_C (y'' m_{33} + f m_{23}) - V_z (y'' m_{33} \Delta t + f m_{12} \Delta t) \quad (59)
\end{aligned}$$

onde:

$$a_1 = (x' m_{31} + f m_{11})$$

$$a_2 = (x' m_{32} + f m_{12})$$

$$b_1 = (y' m_{31} + f m_{21})$$

$$b_2 = (y' m_{32} + f m_{22})$$

$$c_1 = (x'' m_{31} + f m_{11})$$

$$c_2 = (x'' m_{32} + f m_{12})$$

$$c_3 = (x'' m_{31} \Delta t + f m_{11} \Delta t)$$

$$c_4 = (x'' m_{32} \Delta t + f m_{12} \Delta t)$$

$$d_1 = (y'' m_{31} + f m_{21})$$

$$d_2 = (y'' m_{32} + f m_{22})$$

$$d_3 = (y'' m_{31} \Delta t + f m_{21} \Delta t)$$

$$d_4 = (y'' m_{32} \Delta t + f m_{22} \Delta t)$$

O sistema pode ser resolvido por:

$$X = A^{-1} \cdot B \quad (60)$$

onde:

X é o vetor das incógnitas:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Vx_1 \\ Vy_1 \end{bmatrix}$$

A é a matriz dos coeficientes das incógnitas;

B a matriz dos termos independentes.

A determinação da velocidade resultante é dada por:

$$V = \sqrt{V_{x1}^2 + V_{y1}^2} \quad (61)$$

onde:

V é a velocidade média do objeto.

Partindo-se das modificações nas equações de colinearidade, matematicamente, demonstrou-se a possibilidade de utilizá-las na determinação da velocidade do objeto para o problema proposto.

4. TESTES E RESULTADOS

Este capítulo apresenta os testes realizados e seus resultados, levando-se em conta as imagens selecionadas e as combinações possíveis entre elas.

Nos experimentos realizados, os procedimentos e parâmetros de determinação do limiar automático (Tabela 3) e de localização/enquadramento do objeto na imagem não apresentaram problemas nas diversas situações. Assim sendo, esses testes realizados e esses resultados são analisados em relação à determinação das coordenadas do objeto nas imagens e a velocidade calculada.

4.1. Coordenadas do objeto e a velocidade calculada

Os resultados apresentados, neste sub-item, foram obtidos, após a realização de vários testes, combinando imagens nos instantes t_1 , t_2 e t_3 - Figuras 15b, 15c e 15d. O objetivo é analisar os resultados dos procedimentos implementados, para a determinação das coordenadas do objeto e de correspondência de imagens.

Na determinação das coordenadas do objeto, foram aplicados dois procedimentos: sem o tratamento das imagens, e aplicando o filtro da média, para remoção de ruídos. Nessas duas situações, realizaram-se testes com e sem a utilização da rotina, para determinação de uma área de melhor correspondência.

As tabelas 5 e 6 apresentam os resultados com as imagens sem tratamento e com a aplicação do filtro da média, respectivamente; nessas, não se aplicou a rotina, para determinação de uma melhor área de correspondência. As últimas colunas das tabelas 5 a 9 referem-se à percentagem de erro, em relação ao valor esperado da velocidade – 30m/s.

Tabela 5 – Resultados sem aplicação de filtro e sem a rotina de melhor correspondência.

Imagens $\Delta t(\text{seg})$	Coorden. (mm)		Correspond. (mm)		Velocid. (mm/s)	Veloc. (m/s)	% erro
	x'	y'	x''	y''			
$t_2 - t_1$ (1/30)	-0,2161	7,8093	0,1681	5,0515	4117	32,93	9,76%
$t_3 - t_1$ (1/15)	-0,2161	7,8093	0,6961	2,0253	4002	32,01	6,70%
$t_3 - t_2$ (1/30)	0,3121	4,8894	0,8401	1,8633	3858	30,86	2,86%
Erro médio							6,44%

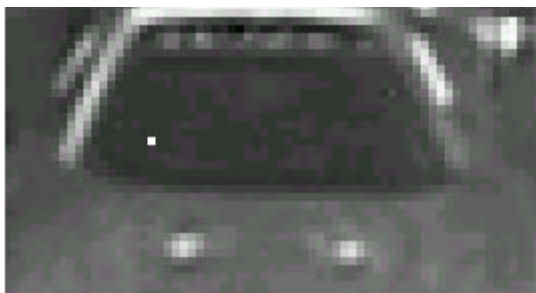
Tabela 6 – Resultados com a aplicação do filtro da média e sem a rotina para determinação de uma melhor área de correspondência.

Imagens $\Delta t(\text{seg})$	Coordenadas (mm)		Correspond. (mm)		Velocid. (mm/s)	Veloc. (m/s)	% erro
	x'	y'	x''	y''			
$t_2 - t_1$ (1/30)	-0,1681	7,8093	0,1681	4,9975	4194	33,55	11,83%
$t_3 - t_1$ (1/15)	-0,1681	7,8093	0,7441	2,0253	4003	32,02	6,73%
$t_3 - t_2$ (1/30)	0,3601	4,8353	0,8881	1,8093	3848	30,78	2,60%
Erro médio							7,05%

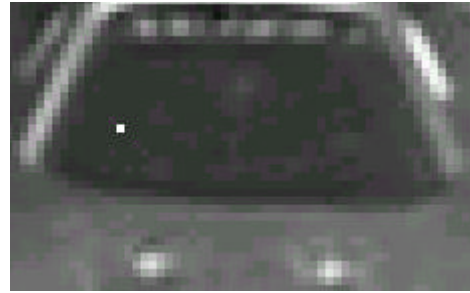
No processamento que resultou nos dados da Tabela 5, verificou-se um problema na correspondência; as coordenadas utilizadas da imagem para o instante t_1 e o instante t_2 – Figuras 30 e 32a – apresentaram resultados com erros significativos (visualmente) – Figuras 31a, 31b e 32b, respectivamente. Coincidentemente, as coordenadas da correspondência, utilizadas no processamento, para o cálculo da velocidade, apresentaram resultados de velocidade, com valores próximos ao simulado.



FIGURA 30 – Ponto (branco) para a correspondência, localizado no pára-brisa, para o instante t_1 .

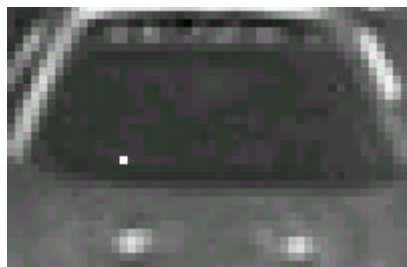


(a)

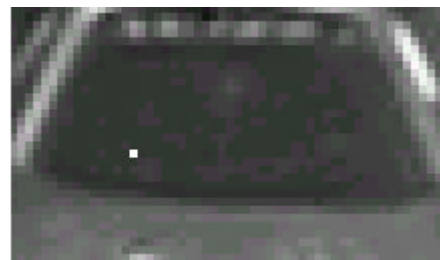


(b)

FIGURA 31 – Correspondência com: a) instantes $t_2 - t_1$; e b) instante $t_3 - t_1$.



(a)



(b)

FIGURA 32 – a) Ponto para correspondência para o instante t_2 e b) Correspondência t_3-t_2 .

As tabelas 7 e 8 apresentam os resultados com as imagens originais, mediante a aplicação do filtro da média e sem a aplicação do filtro da média; em ambas, utilizou-se a rotina, para determinação de uma melhor área de correspondência.

Tabela 7 - Resultados sem a aplicação de filtros, utilizando a rotina, para determinação de uma melhor área de correspondência.

Imagens $\Delta t(\text{seg})$	Coorden. (mm)		Correspond. (mm)		Velocid. (mm/s)	Veloc. (m/s)	% erro
	x'	y'	x''	y''			
$t_2 - t_1$ (1/30)	-0,2161	8,5667	0,1681	5,8084	4294	34,35	14,50%
$t_3 - t_1$ (1/15)	-0,2161	8,5667	0,6962	2,7817	4167	33,33	11,10%
$t_3 - t_2$ (1/30)	0,3122	5,6462	0,8882	2,6736	3944	31,55	5,16%
Erro médio							10,25%

Tabela 8 - Resultado com filtro da média e a rotina, para determinação de uma melhor área de correspondência.

Imagens $\Delta t(\text{seg})$	Coorden. (mm)		Correspond. (mm)		Velocid. (mm/s)	Veloc. (m/s)	% erro
	x'	y'	x''	y''			
$t_2 - t_1$ (1/30)	-0,1681	8,5667	0,2161	5,8084	4295	34,36	14,50%
$t_3 - t_1$ (1/15)	-0,1681	8,5667	0,7922	2,7817	4168	33,34	11,13%
$t_3 - t_2$ (1/30)	0,3602	5,5921	0,9362	2,6196	3933	31,46	4,80%
Erro médio							10,14%

Os resultados apresentados pelas tabelas 5, 6, 7 e 8, em relação à velocidade, mostram que, no intervalo $t_2 - t_1$, o erro é maior, e diminui nos intervalos $t_3 - t_1$ e $t_3 - t_2$. Isto pode ser atribuído ao problema da variação de escala, em virtude do afastamento do objeto e da inclinação da câmara - quanto mais distante, menor a escala.

Como forma de avaliar a correspondência de imagens, realizou-se um experimento em que foi escolhido, manualmente, um ponto do objeto, cuja área era bem heterogênea para a realização da correspondência – Figura 33, efetuando-se, assim, todas as combinações possíveis entre as imagens. Os resultados são apresentados na Tabela 9.



FIGURA 33 – Ponto indicado para correspondência.

Tabela 9 – Resultados, a partir da coordenada do objeto, indicada para o instante t_1 .

Imagens $\Delta t(\text{seg})$	Coorden. (mm)		Correspond. (mm)		Velocid. (mm/s)	Veloc. (m/s)	% erro
	x'	y'	x''	y''			
$t_2 - t_1$ (1/30)	-0,3122	8,6208	0,0720	5,8625	4305	34,44	14,80%
$t_3 - t_1$ (1/15)	-0,3122	8,6208	0,6001	2,8357	4178	33,42	11,40%
$t_3 - t_2$ (1/30)	0,0720	5,8625	0,6001	2,8357	4052	32,41	8,03%
Erro médio							11,41%

A correspondência realizada, nessas condições, apresentou bons resultados, como se pode observar na Tabela 9, para os instantes $t_3 - t_1$ e $t_3 - t_2$ e, visualmente, pelas Figuras 34a e 34b.

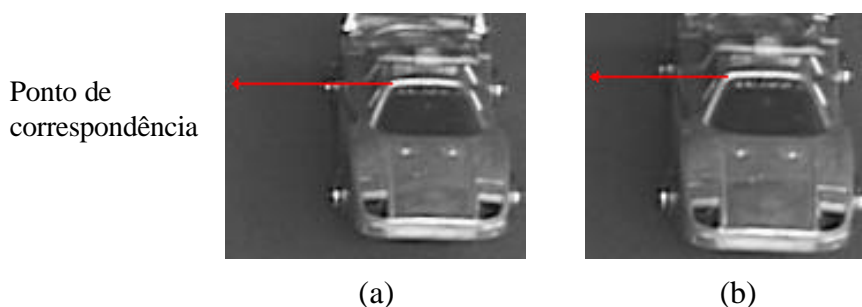


FIGURA 34 – Correspondência com: a) instante t_2 ; b) instante t_3 .

Para avaliar a rotina de correspondência, calculou-se o percentual da diferença dos valores da velocidade da Tabela 9 com os valores apresentados pelas tabelas 5, 6, 7 e 8, nas diversas combinações. A Tabela 10 mostra os resultados, dividindo-os, de acordo com as características dos experimentos: aplicação ou não do filtro da média e do uso ou não da rotina, para a determinação da área de melhor correspondência.

Tabela 10– Resultado das comparações com os valores da velocidade da Tabela 9.

Tabela 9		sem a rotina, para determinação da área de melhor correspondência		com a rotina, para determinação da área de melhor correspondência	
Imagem	Velocidade (m/s)	Diferença %		Diferença %	
		s/ filtro da média	c/ filtro da média	s/ filtro da média	c/ filtro da média
t_2-t_1	34,44	4,58%	2,65%	0,26%	0,23%
t_3-t_1	33,42	4,40%	4,37%	0,27%	0,23%
t_3-t_2	32,41	5,02%	5,29%	2,72%	3,01%
Erro médio		4,66%	4,10%	1,08%	1,15%

Com apoio nos valores apresentados na Tabela 10, pode-se fazer algumas observações:

- ✓ o uso da rotina, para determinação da área de melhor correspondência, obteve bons resultados;
- ✓ os resultados da correspondência, tem um aumento do percentual de erro à medida que o objeto fica mais próximo da filmadora;
- ✓ o filtro da média, quando combinado com a rotina para determinação da área de melhor correspondência, apresentou ótimos resultados na correspondência, no entanto, quando não combinado, demonstrou problemas na correspondência.

Um estudo mais minucioso nas rotinas de determinação da área de melhor correspondência pode trazer melhores resultados, assim como a avaliação de outras técnicas de correspondência.

Os resultados dos experimentos, com relação à velocidade calculada, não se mostraram satisfatórios, principalmente quando se utilizou a combinação de imagens das figuras 15b e 15c. Um dos fatores que explicam esses resultados pode ser atribuído à não consideração da altura do objeto.

Um experimento foi realizado, em que se determinou um ponto do objeto, cuja localização apresentasse pouca elevação, em relação ao solo, e uma área heterogênea, em relação aos pixels vizinhos (quanto aos tons de cinza) – Figura 35. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 11.

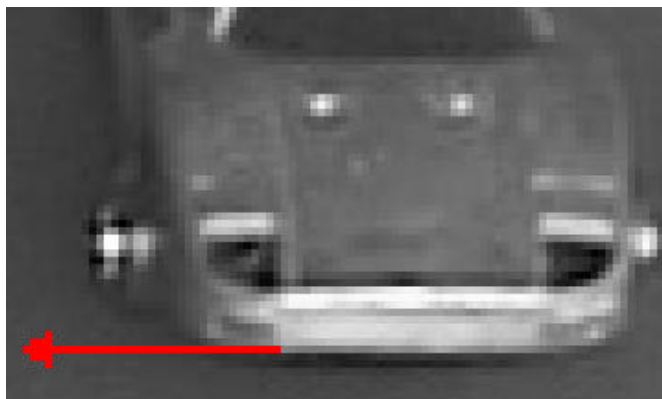


FIGURA 35 – Ponto do objeto escolhido com pouca elevação.

Nessas condições – ponto de pouca elevação do objeto e área heterogênea, para correspondência - a velocidade calculada pode ser mais bem avaliada, tomando-se, por base, os resultados apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados, utilizando-se um ponto do objeto com pouca elevação.

Imagens $\Delta t(\text{seg})$	Coorden. (mm)		Correspond. (mm)		Velocid. (mm/s)	Veloc. (m/s)	% erro
	x	y	x	y			
$t_2 - t_1$ (1/30)	-0,2161	5,5381	-0,0240	2,3494	4181	33,44	11,46%
$t_3 - t_1$ (1/15)	-0,2641	5,5381	0,4560	-1,1072	4015	32,12	7,06%
$t_3 - t_2$ (1/30)	-0,02400	2,3494	0,4080	-1,1072	3851	30,80	2,66%
Erro médio							7,06%

A diferença, em relação à velocidade simulada, pode ser atribuída a alguns fatores:

- existência, embora reduzida, de uma elevação do ponto escolhido, em relação ao solo;
- erros de posicionamento do objeto;
- variação de escala: em virtude do afastamento do objeto, quanto mais distante, menor a escala, devido à inclinação da câmara;

O fato de a diferença da velocidade calculada diminuir pode ser associada ao fator de escala; à medida que o intervalo de tempo aumenta, o objeto se aproxima da filmadora e essa diferença tende a diminuir.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou e testou uma metodologia, para a determinação da velocidade de um objeto, tendo, como ponto de partida, uma seqüência de imagens obtidas por uma filmadora, baseada em procedimentos que envolvem o Processamento Digital de Imagens e a Fotogrametria.

A aplicação do modelo de colinearidade modificado, acrescido do vetor velocidade, apresentou, nos experimentos realizados, resultados que indicam o potencial do modelo, para realizar a estimativa da velocidade. No melhor resultado, a velocidade estimada foi de 30,78 m/s, com erro de 2,60%, em relação à velocidade esperada (30 m/s).

Os problemas apresentados pelo processo de correspondência de imagens assim como na aplicação de filtros de suavização mostram a necessidade de uma investigação maior, inclusive com a avaliação de outras técnicas.

A variação da escala e a determinação de um ponto na imagem que corresponda a uma parte do carro com pouca elevação foram identificados como fatores que, com um estudo mais pormenorizado, podem trazer melhores resultados.

O protótipo implementado e testado em condições controladas, com as devidas considerações, demonstra que a metodologia é válida; porém recomenda-se a realização de mais testes, o que não foi possível, devido ao fato de o desenvolvimento do algoritmo para determinação da velocidade ter-se prolongado além do prazo previsto.

Algumas recomendações são propostas para estudos futuros:

- realização de testes, para avaliação de outras técnicas de correspondência de imagens e de filtros de suavização;
- um estudo do problema causado pelo fator de escala e altura do objeto;
- o uso de imagens com uma resolução maior pode melhorar os resultados;
- avaliação da influência da iluminação.

Para aplicação a uma situação real, vários fatores devem ser considerados e sujeitos a uma investigação maior, como, por exemplo:

- iluminação natural/artificial – a influência da sombra causada pelo sol e de faróis dos veículos, entre outros;
- a aquisição e processamento, em tempo real, das imagens;
- o tratamento de mais de um objeto na cena;
- técnicas de correspondência – como se observou nos resultados, trata-se de um problema a ser mais bem estudado;
- melhoria do código, no que diz respeito ao processamento digital de imagens, otimizando-o.

O trabalho abre caminho, para que se desenvolvam outras aplicações, usando-se essa metodologia, em que seja possível o uso de filmadoras e medições nas imagens geradas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, J.B.; OLIVAS, M. A. A.: *Calibração de Câmeras Aerofotogramétricas*, Boletim da Universidade Federal do Paraná, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, 1981.

ARRUDA JR., E.R.; HASEGAWA, J. K.; IMAI, N. N.: *Atualização Cartográfica Baseada em Imagens Digitais Retificadas*, Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

ARTERO, A. O.; *Técnicas para a Extração Automática de Feições Retas em Imagens Digitais*, Tese (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 1999.

CHANDLER, J. H.; STIRLING D. M.; *Estimation of Heights of Robbers Using Photographic and video security imagery*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1992, pp. 832-838.

CHIKATSU, H.; TURUOKA, M; MURAI, S.; *Sports Dynamics of Carl Lowis through 100 m Race using Video Imagery*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1992, pp. 875-879.

CROSTA, A.P.; *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*. UNICAMP, Campinas, 1993.

DAL POZ, A. P.; GALO, M.; *A Utilização do Conceito de Geometria Epipolar em Correlação de Imagens Digitais*; Instituto de Geociências – UFRGS, Porto Alegre, 1993.

- FONSECA, L. M. G.; MANJUNATH, B. S.; *Registration Techniques for Multisensor Remotely Sensed Imagery*; Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, nº 9, September 1996, pp. 1049-1056.
- GALO, M.; *Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais*, Tese (Mestrado) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.
- GALO, M.; *Estrutura dos Dados do Programa de Calibração de Câmaras (CC)*, Publicação interna do Departamento de Cartografia, UNESP/FCT, Presidente Prudente, 1998.
- GOMES, J.; VELHO, L.: *Computação Gráfica: Imagem*, Sociedade Brasileira de Matemática-SBM, Rio de Janeiro, 1994.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R.E.: *Digital Image Processing*, Addison Wesley, New York, 1993.
- GOSH, S. K.; *Image Motion Compensation Through Augmented Collinearity Equations*, Optical Engineering; Vol. 24, n.6, 1985, pp. 1014-1017.
- GOSH, S. K.; *Analytical Photogrammetry 2nd ed.*, Pergamon Press, 1989.
- HABIB, A.: *Motion parameter estimation by tracking stationary three-dimensional straight lines in image sequences*, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 1998, pp. 174-182.
- HASEGAWA, J. K.; *Shape From Shading com Projeção Perspectiva e Calibração de Câmara*, Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 1997.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H.: *Processamento Digital de Imagens*, Editora Brasport, 1999.

MASCARENHAS, N. D. A.; VELASCO, F. R. D.: *Processamento Digital de Imagens*, 2ª Edição, Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE, Termas de Rio Hondo - Argentina, 1989.

MERCHANT, D. C.: *Analytical Photogrammetry – Theory and Practice – Part I*. Dept. of Geodetic Science, The Ohio State University, 1979.

MERCHANT, D. C.: *Analytical Photogrammetry – Theory and Practice – Part II*. Dept. of Geodetic Science, The Ohio State University, 1980.

MORI, M.; SETOJIMA, M.; AKAMATSU, Y.: *Discussion on the Automatic Measurement of Traffic Flow by Video Camera Mounted on Balloon*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI Part B5, Vienna, 1996, pp. 378-383.

OLIVAS, M. A. de A.: *Calibração de câmaras Fotogramétricas*, Dissertação de mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1980.

ROSENFELD, A.; KAK, A. C.: *Digital Picture Processing, Second Edition*, Vol. 2, Academic Press, 1982.

SMITH, S. W.: *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing, 1997.

STRAUCH, J. C. M.; LUGNANI, J. B.: *Correlação de imagens digitais*, Anais do XV Congresso Brasileiro de Cartografia, vol. II, 1991, pp. 250-258

- SULLIVAN, G. D. et al: *Model-based Vehicle Detection and Classification Usign Orthographic Approximations*, Image and Vision Computing, 1997, pp. 649-654.
- TOMMASELLI, A. M. G.; TOZZI, C. L.: *Calibração de Câmaras Digitais*, XV Congresso Brasileiro de Cartografia, 1991, pp. 239-249.
- TOMMASELLI, A. M. G.: *Um Método Recursivo Aplicado ao Problema de Localização em Visão de Máquina*, Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.
- WOLF, P. R.: *Elements of Photogrammetry*, Second Edition, McGraw-Hill Book Company, 1988.