

# RADAR FOTOGRAMÉTRICO: CÁLCULO DA VELOCIDADE DE UM OBJETO A PARTIR DE UMA SEQUÊNCIA DE IMAGENS DIGITAIS

**Carlos Shigueyuki Koyama**  
**Júlio Kiyoshi Hasegawa**

**Universidade Estadual Paulista – Unesp**  
**Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT**  
**Departamento de Cartografia**  
Rua Roberto Simonsen 305 – Centro Educacional  
Presidente Prudente – SP – Brasil – CEP 19060-900  
[hasegawa@prudente.unesp.br](mailto:hasegawa@prudente.unesp.br)

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo determinar a velocidade de um objeto em movimento, a partir de uma sequência de imagens, obtida por uma filmadora digital Sony DRS-200A. O cálculo da velocidade é realizado, basicamente, em duas etapas. Na primeira, técnicas de Processamento Digital de Imagens são aplicadas, para determinar automaticamente as coordenadas fotográficas do veículo nos instantes  $t_1$  e  $t_2$  (conhecidos). Na segunda, são aplicadas as equações de colinearidade modificadas, adicionadas do vetor velocidade, a fim de se calcular as coordenadas (no espaço objeto) e a velocidade constante do veículo. Os experimentos foram realizados em imagens obtidas de uma cena (maquete) que simulava um veículo em movimento. Esta metodologia foi aplicada nestas imagens na determinação da velocidade, cujos resultados mostram o potencial da técnica em aplicações métricas que façam uso de filmadoras.

**Palavras chaves:** Equações de Colinearidade, Resseção Fotogramétrica, Orientação Exterior, Orientação Interior, Detecção e Classificação de Veículos.

## ABSTRACT

The aim of this paper is the determination of the velocity of an object in movement, from a sequence of images, obtained by a digital video camera Sony DRS-200A. The velocity calculation is accomplished in two stages. In the first, techniques of Digital Processing of Images are applied, to determine automatically the photo-coordinates of the vehicle in the times  $t_1$  and  $t_2$  (known). In the second stage, the modified collinearity equations are applied the vector velocity is added, in order to calculate the coordinates (the object space) and the constant velocity of the vehicle. The experiments were carried out by using images obtained from a scene (scale model) that simulated a vehicle in movement. This methodology was applied in the images for the determination of the velocity, whose results show the potential of the technique in metric applications that use video camera.

**Key-words:** Collinearity Equation, Photogrammetry Resection, Exterior Orientation, Inner Orientation, *Vehicle Detection and Classification*.

## 1. INTRODUÇÃO

O número crescente de veículos nos centros urbanos traz uma série de problemas à população. Entre eles, o controle de tráfego. A necessidade do monitoramento contínuo da velocidade dos veículos faz com que o uso de filmadoras digitais seja uma alternativa interessante, devido à capacidade de se coletarem imagens de forma contínua e a possibilidade de tratamento dessas imagens quase em tempo real.

O uso de filmadoras digitais, para a aquisição de imagens de forma contínua, traz uma série

de vantagens, como a facilidade no processo de aquisição e a seleção de imagens. Essas vantagens têm contribuído, de forma considerável, nos últimos anos, para o crescimento do uso de filmadoras em atividades métricas.

Sullivan et al. (1997) descrevem uma metodologia, com o intuito de classificar veículos em tempo real, com base em uma câmara (fixa) posicionada numa rodovia, possibilitando o monitoramento contínuo do tráfego de veículos, classificando-os a partir da comparação das imagens

obtidas com imagens em 2D e de um histograma 1D, com modelos dos veículos previamente armazenados.

Mori et al. (1996) apresentam um trabalho envolvendo o uso de filmadoras no monitoramento de veículos. O trabalho descreve o uso de uma filmadora posicionada em um balão fixo, com o objetivo de monitorar a velocidade e o fluxo de veículos, classificando-os de acordo com o seu tamanho (normal ou grande). Para a correção do movimento dos carros provocado pelo movimento do balão causado pelo vento, utilizaram-se pontos de controle no terreno.

Nesses processos de identificação, detecção ou determinação da velocidade de um objeto “quase em tempo real”, a automação é necessária, que, por sua vez, está sendo viabilizada pelo desenvolvimento e pela disponibilidade de sistemas digitais (softwares e hardwares).

Neste sentido, com o desenvolvimento e as características das filmadoras digitais, o processo de determinação da velocidade é possível, pois podem transmitir diretamente para o computador as imagens capturadas a uma taxa de, aproximadamente, 30 quadros por segundo. Essa disponibilidade, quase imediata, das imagens, tem impulsionado os processos de automação baseados nos sensores fotográficos, pois, nas câmaras analógicas, as imagens podem ser manipuladas após vários processamentos (Por ex: revelação química e digitalização).

Este trabalho tem como objetivo determinar a velocidade de um objeto em movimento, para tanto, considera-se que o sensor permanece estacionado (fixo) e os elementos de orientação interior e exterior sejam conhecidos. Os elementos de orientação interior são fornecidos pelo processo de calibração de câmaras e os de orientação exterior são determinados, a priori, considerando a câmara instalada numa posição fixa.

O procedimento tem duas etapas distintas: identificação automática do objeto e cálculo da velocidade real do objeto a partir das equações de colinearidade. A identificação do objeto é realizada a partir dos fundamentos das técnicas de Processamento Digital de Imagens, envolvendo, principalmente, o processo de segmentação. A determinação da velocidade passa pela aplicação das técnicas da Fotogrametria Digital, com o uso das equações de colinearidade.

A aplicação das equações de colinearidade faz-se necessária, devido à necessidade de tomadas inclinadas das imagens, para então realizar a correção da inclinação da imagem (retificação) no processo de determinação das coordenadas de pontos no espaço objeto. O sistema deverá fazer a identificação automática do objeto em duas imagens distintas, obtidas em dois instantes ( $t_1$  e  $t_2$ ), conhecidos. Uma vez detectado o objeto, o sistema deverá identificar os pixels (ponto) que correspondam ao mesmo ponto (homólogo) nas duas imagens.

A velocidade do objeto será calculada utilizando-se as equações de colinearidade modificadas com a inclusão do vetor velocidade. A inconsistência

matemática na solução dessas novas equações de colinearidade é resolvida considerando-se a superfície alvo como sendo plana.

Para validação do protótipo desenvolvido foram realizados vários experimentos simulando-se, em escala reduzida (numa maquete), cenas com objetos em movimento com velocidade média constante.

## **2. METODOLOGIA PARA A ORIENTAÇÃO DA FILMADORA**

Para a obtenção de coordenadas do espaço objeto, a partir de uma imagem, é necessário, além dos parâmetros de orientação interior, o conhecimento dos parâmetros de orientação exterior (resseção espacial), que definem a atitude e a posição da câmara no momento da tomada das imagens em relação a um sistema de coordenadas cartesiano.

### **2.1 Resseção Espacial (Orientação Exterior)**

A determinação dos parâmetros de orientação exterior permite recuperar a atitude e a posição da câmara no momento da tomada das imagens. Um dos métodos para a determinação desses parâmetros é a resseção espacial.

Segundo Lugnani (1987), a resseção espacial de uma foto é o processo que permite estimar os parâmetros de orientação exterior ( $\kappa$ ,  $\varphi$ ,  $\omega$ ,  $X^C$ ,  $Y^C$ ,  $Z^C$ ), a partir das:

- fotocoordenadas de  $n$  pontos;
- coordenadas de pontos correspondentes no espaço objeto;
- constante de calibração da câmara;
- valores aproximados dos elementos de orientação exterior.

O modelo matemático que relaciona um ponto no espaço objeto e sua imagem na fotografia são as equações de colinearidade (equação 1), que é deduzido com base na condição de que os pontos  $p$  (ponto imagem),  $P$  (ponto objeto) e (centro perspectivo) pertencem a uma mesma reta (Lugnani, 1987) – Figura 1.

$$x_p = -f \cdot \frac{m_{11}(X - X^C) + m_{12}(Y - Y^C) + m_{13}(Z - Z^C)}{m_{31}(X - X^C) + m_{32}(Y - Y^C) + m_{33}(Z - Z^C)} \quad (1)$$

$$y_p = -f \cdot \frac{m_{21}(X - X^C) + m_{22}(Y - Y^C) + m_{23}(Z - Z^C)}{m_{31}(X - X^C) + m_{32}(Y - Y^C) + m_{33}(Z - Z^C)}$$

onde:

$x_p$  e  $y_p$  são as coordenadas do ponto  $p$  no sistema fotogramétrico;

$X$ ,  $Y$  e  $Z$  são as coordenadas cartesianas do ponto  $P$  no espaço objeto;

$X^C$ ,  $Y^C$  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;

$$\begin{aligned} m_{11} &= \cos(\phi) \cos(\kappa) \\ m_{12} &= \cos(\varpi) \sin(\kappa) + \sin(\omega) \sin(\phi) \cos(\kappa) \\ m_{13} &= \sin(\varpi) \sin(\kappa) - \cos(\omega) \sin(\phi) \cos(\kappa) \\ m_{21} &= -\cos(\phi) \sin(\kappa) \\ m_{22} &= \cos(\varpi) \cos(\kappa) - \sin(\omega) \sin(\phi) \sin(\kappa) \\ m_{23} &= \sin(\varpi) \cos(\kappa) + \cos(\omega) \sin(\phi) \sin(\kappa) \\ m_{31} &= \sin(\phi) \\ m_{32} &= -\sin(\omega) \cos(\phi) \\ m_{33} &= \cos(\omega) \cos(\phi) \end{aligned}$$

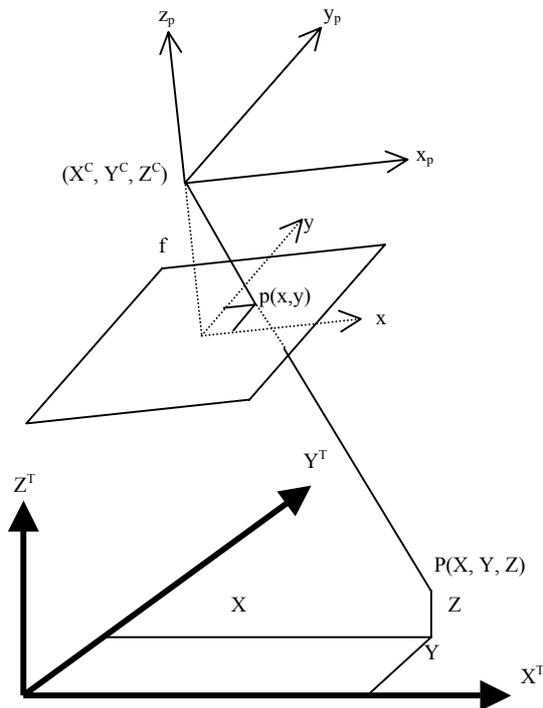


Fig. 1 – Condição de colinearidade

As coordenadas  $x_p$  e  $y_p$  do ponto na imagem devem estar isentas dos erros sistemáticos. Para aplicações métricas, com base em imagens obtidas por sensores digitais (ou não), é necessário o conhecimento dos parâmetros de orientação interior da câmara. Os parâmetros de orientação interior podem ser obtidos com a calibração da câmara.

## 2.2 Calibração Da Câmara

Segundo Tommaselli & Tozzi (1991), a calibração de uma câmara consiste na determinação de um conjunto de parâmetros que definem a geometria interna e o relacionamento do referencial imagem com o referencial do mundo real.

Os parâmetros de orientação interior definem a geometria interna da câmara e consistem na determinação: da distância focal da câmara, da posição do ponto principal e das constantes de distorção do sistema de lentes.

O ponto principal, muitas vezes confundido com o centro fiducial, pode ser definido como a interseção do eixo óptico do sistema de lentes da câmara com o plano da imagem, que na prática, não coincidem com o indicado pelas marcas fiduciais. A diferença entre a não coincidência dos pontos é conhecida como deslocamento do ponto principal (Fryer, 1996).

O deslocamento, em relação ao ponto principal, é dado pela equação (2):

$$\begin{aligned} x &= x'_f - x_0 \\ y &= y'_f - y_0 \end{aligned} \quad (2)$$

onde:

$x_0$  e  $y_0$  são as coordenadas do ponto principal, em relação ao sistema fiducial;

$x'_f$  e  $y'_f$  são coordenadas do ponto no sistema fiducial.

A distorção do sistema de lentes pode ser classificada em distorção radial simétrica e distorção descentrada. A distorção radial simétrica provoca deslocamentos na direção radial a partir do ponto principal, e, segundo Merchant (1979), as correções nas componentes em  $x$  e  $y$  são:

$$\begin{aligned} \delta x_r &= (x'_f - x_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ \delta y_r &= (y'_f - y_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{aligned} \quad (3)$$

onde:

$k_1, k_2, k_3$  são os coeficientes da distorção radial simétrica;  $r = \sqrt{(x'_f - x_0)^2 + (y'_f - y_0)^2}$

A distorção descentrada é a provocada pela imperfeição no alinhamento dos eixos das lentes de um sistema óptico (Galo, 1993); e o modelo mais aceito é o Conrady-Brown modificado, dado por:

$$\begin{aligned} \delta x_d &= P_1(r^2 + 2(x'_f - x_0)^2) + 2P_2(x'_f - x_0)(y'_f - y_0) \\ \delta y_d &= P_2(r^2 + 2(y'_f - y_0)^2) + 2P_1(x'_f - x_0)(y'_f - y_0) \end{aligned} \quad (4)$$

onde  $P_1, P_2$  são os coeficientes da distorção descentrada.

Com base nas equações (3) e (4), a equação para a correção da distorção radial simétrica e distorção descentrada pode ser modelada por:

$$\begin{aligned} x &= x'_f - x_0 - \delta x_r - \delta x_d \\ y &= y'_f - y_0 - \delta y_r - \delta y_d \end{aligned} \quad (5)$$

Segundo Galo (1993), os parâmetros  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $K_2$  e  $K_3$ , em função da pequena magnitude e da sua pequena influência na modelagem da distorção das lentes, podem ser desprezados.

A correção das fotocoordenadas é realizada, aplicando-se a equação (6).

$$\begin{aligned} x &= x'_f - x_0 - (x'_f - x_0) * K_1 r^2 \\ y &= y'_f - y_0 - (y'_f - y_0) * K_1 r^2 \end{aligned} \quad (6)$$

onde:

$x$  e  $y$  são as coordenadas de um ponto na imagem isento dos erros sistemáticos;

$K_1$  – coeficiente da distorção radial simétrica;

O problema do não alinhamento e variação no espaçamento entre sensores produz um efeito exclusivo das câmaras digitais, denominados de parâmetros de afinidade que modelam a possibilidade de não ortogonalidade e diferença de escala entre os eixos  $X$  e  $Y$  do sistema de coordenadas da imagem.

Sua correção é feita pelo seguinte conjunto de equações (GALO, 1993):

$$\delta a_x = A * (y_f)$$

$$\delta a_y = B * (x_f)$$

Esses erros são de pequena magnitude em relação à qualidade métrica proporcionada pelas filmadoras digitais (Galo et al 1999). Portanto, eles, aqui, não serão considerados.

### 3. METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE

O procedimento adotado neste trabalho na determinação da velocidade de um objeto, parte do princípio de que o sensor permanece estacionado (fixo) e os elementos de orientação interior e exterior são conhecidos. Nesse sentido, o procedimento tem duas etapas distintas: identificação automática do objeto e cálculo da velocidade real do objeto com equações de colinearidade modificadas. Essas equações estão apresentadas em 3.3.

#### 3.1 Identificação Automática Do Objeto

A detecção automática de objetos, com base em duas imagens, pode ser realizada, aplicando-se a diferença entre essas imagens (Gonzales & Woods, 1993).

O resultado da diferença entre as imagens, representada pela equação (7), gera uma imagem binária, cujos pixels unitários representam um novo objeto na cena.

$$d(i, j) = \begin{cases} 0 & \text{se } |I'(i, j) - I''(i, j)| < \tau \\ 1 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (7)$$

onde:

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

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

$\tau$ , um limiar.

A Fig. 2 mostra uma imagem inicial (Fig. 2a), sem a presença do veículo, e uma imagem da mesma cena, com a presença do veículo. O resultado da diferença entre essas imagens é uma imagem binária (Fig. 2c).

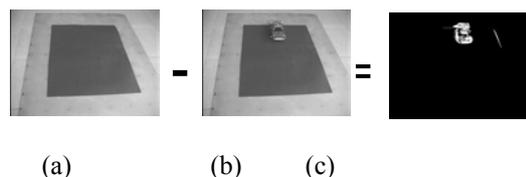


Fig. 2 – Diferença de imagens: a) cena sem o veículo; b) cena com o veículo; e c) imagem binária resultante.

#### 3.2 Determinação Das Coordenadas Do Veículo

A determinação das coordenadas de um objeto em dois instantes ( $t_1$  e  $t_2$ ) pode ser realizada, utilizando-se uma imagem (inicial) padrão, obtida da cena sem (nenhum) objeto, e outras duas consecutivas ( $I_1$  e  $I_2$ ), com o objeto.

As coordenadas do objeto, na primeira imagem, são determinadas, partindo-se da diferença entre a imagem inicial e a  $I_1$ . A imagem binária resultante é útil, para se definir uma janela limitante (*bounding box*) (Fig. 3) – que serve, para determinar as coordenadas do objeto na imagem  $I_1$ , a partir do centro de massa.

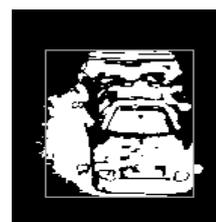


Fig. 3 – Janela limitante (*bounding box*).

O processo de correspondência pode apresentar problemas, quando se define uma área da imagem que apresente valores dos pixels homogêneos para a correspondência. Como forma de minimizar este problema, foi implementado uma rotina, com o objetivo de se determinar um ponto mais adequado (coordenadas do objeto na imagem  $I_1$ ) para a realização do processo de correspondência ou *matching* (para a determinação das coordenadas do objeto na imagem  $I_2$ ).

A rotina desenvolvida procura (na imagem  $I_1$ ), na área do enquadramento, a partir do centro de massa (calculada originalmente), uma janela (15x15 pixels), na direção ascendente, cujo valor do desvio padrão seja

maior que um limiar – cujo valor inicial adotado foi de 50. Esse valor foi determinado, após a realização de alguns experimentos. 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.

Neste trabalho, aplicou-se o método de 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:

1. definição de uma janela alvo (*template*) - define-se uma sub-imagem de coordenadas com  $l_1$  linhas e  $c_1$  colunas, correspondendo ao alvo de interesse;
2. definição da janela de busca - define-se uma área maior numa outra imagem, com  $l_2$  linhas e  $c_2$  colunas contendo o alvo a ser localizado (com  $l_1 < l_2$  e  $c_1 < c_2$ );
3. pesquisa - a partir da janela alvo na janela de busca, aplicando-se uma função de correlação, busca-se o ponto de melhor correspondência.

A função implementada foi o coeficiente de correlação, utilizando a equação (8), segundo Gonzales & Woods (1993) e Fonseca & Manjunath (1996), para quem o ponto de máxima correlação será aquele cujo valor do coeficiente  $r$  mais se aproximar de 1, com  $-1 \leq r \leq 1$ .

$$\gamma(s,t) = \frac{\sum_x \sum_y [f(x,y) - \bar{f}(x,y)] [w(x-s,y-t) - \bar{w}]}{\sqrt{\sum_x \sum_y [f(x,y) - \bar{f}(x,y)]^2 \sum_x \sum_y [w(x-s,y-t) - \bar{w}]^2}} \quad (8)$$

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 média aritmética dos valores de intensidade dos pixels da janela alvo;

$f(x,y)$  é o valor da intensidade do pixel da janela alvo;

$w(x-s,y-t)$  é o valor da intensidade do pixel da janela de busca;

$\bar{w}$  é a média aritmética dos valores da intensidade dos pixels da janela de busca.

### 3.3 Equações De Colinearidade Modificadas

No trabalho de Gosh (1985), é apresentada uma variação das equações de colinearidade, com acréscimo do vetor velocidade, tendo em vista a correção das coordenadas do centro perspectivo, provocada pelo arrasto (deslocamento), em virtude do tempo de exposição do obturador da câmara, no momento da tomada da imagem.

Neste trabalho, essas equações foram modificadas, com o objetivo de determinar a velocidade de um objeto.

Considerando-se as coordenadas do veículo no espaço objeto  $X,Y,Z$ , para o instante  $t_1$ , e  $X^c Y^c Z^c$ , para o instante  $t_2$ , pode-se escrever:

$$\begin{aligned} S_x &= X' - X \\ S_y &= Y' - Y \\ S_z &= Z' - Z \end{aligned} \quad (9)$$

onde,

$S_x, S_y, S_z$  são os vetores deslocamento em  $X, Y$  e  $Z$  respectivamente.

Considerando as equações de colinearidade para o instante  $t_1$ :

$$\begin{aligned} x &= -f \cdot \frac{m_{11}(X - X^c) + m_{12}(Y - Y^c) + m_{13}(Z - Z^c)}{m_{31}(X - X^c) + m_{32}(Y - Y^c) + m_{33}(Z - Z^c)} \\ y &= -f \cdot \frac{m_{21}(X - X^c) + m_{22}(Y - Y^c) + m_{23}(Z - Z^c)}{m_{31}(X - X^c) + m_{32}(Y - Y^c) + m_{33}(Z - Z^c)} \end{aligned} \quad (10)$$

e para o instante  $t_2$ :

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

as equações (9), substituídas nas equações (11), para o instante  $t_2$  podem ser escritas como:

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

Tomando-se por base a equação da velocidade constante, pode-se escrever:

$$S_x = V_x \Delta t \quad (13)$$

$$S_y = V_y \Delta t \quad (14)$$

$$S_z = V_z \Delta t \quad (15)$$

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 média;

e, substituindo-se as equações (13), (14) e (15) nas equações (12), tem-se:

$$x' = -f \cdot \frac{m_{11}(X + V_x \Delta t - X^c) + m_{12}(Y + V_y \Delta t - Y^c) + m_{13}(Z + V_z \Delta t - Z^c)}{m_{31}(X + V_x \Delta t - X^c) + m_{32}(Y + V_y \Delta t - Y^c) + m_{33}(Z + V_z \Delta t - Z^c)}$$

$$y' = -f \cdot \frac{m_{21}(X + V_x \Delta t - X^c) + m_{22}(Y + V_y \Delta t - Y^c) + m_{23}(Z + V_z \Delta t - Z^c)}{m_{31}(X + V_x \Delta t - X^c) + m_{32}(Y + V_y \Delta t - Y^c) + m_{33}(Z + V_z \Delta t - Z^c)}$$

(16)

que representam as equações de colinearidade modificadas, com acréscimo do vetor velocidade. A rigor essa velocidade não será necessariamente constante, mas por se tratar de intervalos de tempos pequenos, assume-se que, sem perda da qualidade, velocidade é constante nesse intervalo.

Para este trabalho, considerou-se o terreno plano. Portanto, Z é constante e o vetor velocidade  $V_z$  tende a zero. A variável  $\Delta t$  é conhecida e as incógnitas a serem determinadas dessa forma são  $V_x$ ,  $V_y$ , vetores velocidade média e o par de coordenadas (X, Y) do ponto no espaço objeto. A partir das equações (10) e (16), o sistema com quatro incógnitas e quatro equações, pode ser resolvido por:

$$X = A^{-1}B \quad (17)$$

onde:

- X é o vetor das incógnitas:  $\begin{bmatrix} X \\ Y \\ V_x \\ V_y \end{bmatrix}$
- A é a matriz dos coeficientes das incógnitas;
- B a matriz dos termos independentes.

A determinação da velocidade resultante é dada por:

$$V = \sqrt{V_{x1}^2 + V_{y1}^2} \quad (18)$$

onde V é a velocidade média do objeto.

#### 4. TESTES E RESULTADOS

A necessidade de obtenção de medidas com exatidão, a partir de imagens, premissa para a validação deste trabalho, requer o conhecimento do grupo de parâmetros necessários para a reconstrução do feixe perspectivo, gerador da imagem fotográfica no instante da exposição.

#### 4.1 Parâmetros De Orientação Interior

Definidos os valores do tamanho do pixel (0,048mm x 0,054mm), os parâmetros de orientação interior foram determinados com o software de Calibração de Câmara – CC (Galo, 1998), cujos valores são apresentados pela tabela 1.

**TABELA 1: PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR.**

Parâmetros	Valores	Desvio Padrão
Dist. Focal	42,7519mm	0,1044mm
$x_0$	-0,02mm	0,0604mm
$y_0$	0,2734mm	0,1186mm
$k_1$	0,00011274mm <sup>-2</sup>	0,000002933mm <sup>-2</sup>

As metodologias aplicadas para a calibração foram:

- a) de campos misturados que, segundo Andrade & Olivas (1981), se fundamenta 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. Neste caso, os alvos utilizados (placa de invar) simulavam os campos misturados, com a colocação de pinos, com altura de 145 mm, em alguns pontos da placa (Figura 04);
- b) câmaras convergentes, que, segundo Olivas (1980), se baseiam “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,  $90^\circ$ .

A Fig. 4 mostra uma das imagens utilizada para a calibração e a Fig. 5 mostra os vários ângulos em que as imagens para calibração foram obtidas.

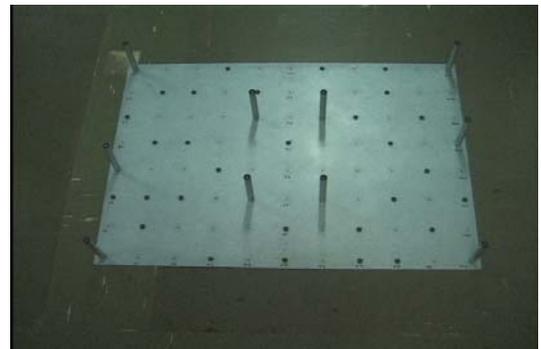


Fig. 4 – Uma das imagens utilizadas para a calibração da câmara com pontos de controle.



Fig. 5 - Ângulos das imagens para calibração.

#### 4.2 Ambiente Simulado

Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se uma filmadora digital Sony DRS-200A, para a obtenção de uma seqüência de imagens. Simulou-se um veículo deslocando-se em linha reta, a uma velocidade média de 30 m/s.

A Fig. 6 mostra o ambiente de simulação para a obtenção das imagens com uma escala reduzida de, aproximadamente, 8 vezes (1/8), com a filmadora fixa sobre um tripé, uma placa de aço com pontos de controle (espaçadas em 100 mm) para efetivação da orientação exterior, uma cartolina preta e um veículo (carro de brinquedo).



Fig. 6 – Ambiente de simulação.

A aplicação, desenvolvida em linguagem C++ e ambiente de programação Builder 4.0, determina automaticamente as fotocoordenadas do veículo em dois instantes, com técnicas de Processamento Digital de Imagens: diferença de imagens e correspondência de imagens – *matching*.

A determinação da velocidade, entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$  (conhecidos), é realizada aplicando-se as equações de colinearidade, com acréscimo do vetor velocidade proposta no item 3.3.

#### 4.3 As Imagens Utilizadas

Foram selecionadas quatro imagens (tons de cinza) para o processamento (Fig. 7) considerando-se um intervalo de tempo de  $\Delta t=1/30s$  entre as imagens (figuras 7b, 7c e 7d). Simulou-se um veículo a uma velocidade média de 30m/s ou 108 Km/h, o que corresponde a um deslocamento de 12,5cm do veículo na cena, a cada intervalo.

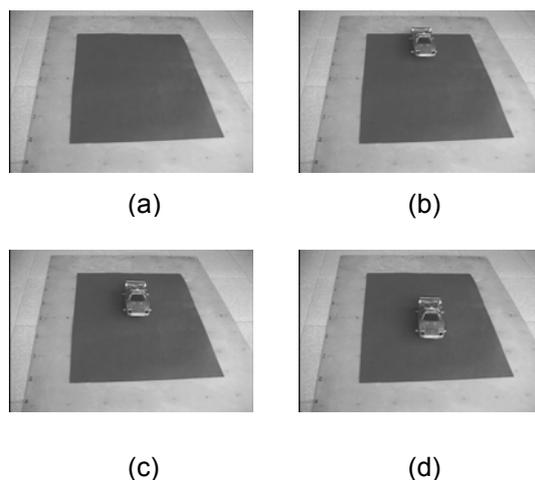


Fig. 7 - a) imagem sem a presença do veículo; b) imagem no instante  $t_1$ ; c) imagem no instante  $t_2$ , d) imagem no instante  $t_3$ .

Uma imagem inicial (sem a presença do veículo) – Fig. 7a – foi utilizada no processo de detecção do objeto, enquanto as demais simulavam o veículo deslocando-se a uma velocidade constante, numa trajetória em linha reta, e, devido à planura do terreno,  $Z$  é tido como constante. Com isto, a componente vertical  $V_z$  tende a zero.

Foram feitas combinações entre essas imagens para determinação da velocidade, apresentadas na tabela 2.

TABELA 2: COMBINAÇÕES POSSÍVEIS DAS IMAGENS

Imagens	$\Delta t(s)$
Fig 7c – 7b	0,033333
Fig 7d – 7b	0,066666
Fig 7d – 7c	0,033333

#### 4.4 Parâmetros De Orientação

O conhecimento dos parâmetros de orientação do sensor no momento da tomada das imagens é necessário para a determinação da velocidade do objeto.

Os parâmetros de orientação exterior da câmara foram determinados partindo da rotina adaptada de Arruda et al. (2000), sendo calculados uma única vez, em virtude de o sensor permanecer fixo. Os valores obtidos foram:

- atitude da câmara:
- $\omega = 49^\circ 48' 48,96''$
- $\varphi = -9^\circ 09' 22,40''$
- $\kappa = -1^\circ 03' 09,70''$

- e posição do centro perspectivo da câmara:

- $X^c = 1159,9376$  mm
- $Y^c = 656,4861$  mm
- $Z^c = 871,2729$  mm

#### 4.5 Experimentos Realizados

A partir da combinação de imagens da Tabela 1, foram realizados alguns experimentos com vistas à determinação da velocidade do veículo.

Os resultados do processamento para determinação da velocidade são apresentados, comparando-se os valores da velocidade obtidos nos experimentos, com o esperado (30 m/s).

Nos experimentos iniciais, verificou-se um problema no processo de correspondência. Os resultados apresentaram erros, que podiam ser visualmente observados - Fig. 8 e 9.

A Fig. 8 mostra o ponto (coordenadas do veículo) para o instante  $t_1$ , determinado pelo centro de massa da área de enquadramento do objeto. A figura 9 mostra o ponto homólogo na imagem 2, obtido pelo processo de correspondência automático. Visualmente, pode-se verificar um erro significativo no processo automático de correlação.

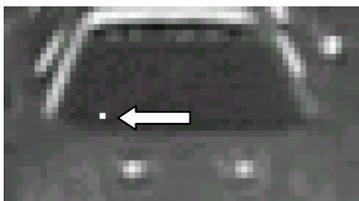


Fig. 8 – Ponto (branco) para a correspondência localizado no pára-brisa.

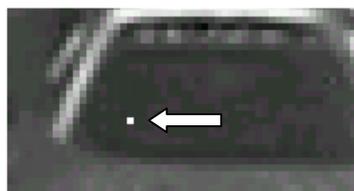


Fig. 9 – Resultado da correspondência.

O problema de correspondência pode ser atribuído ao fato de a área utilizada para correspondência conter pixels com valores homogêneos. Para minimizar esse problema, utilizou-se a rotina, visando à determinação de uma melhor área de correspondência, descrita no item 3.2 deste trabalho.

Os resultados dos experimentos, utilizando-se essa rotina, são apresentados nas Figuras 10a e 10b, que, visualmente, mostram a eficiência do processo.

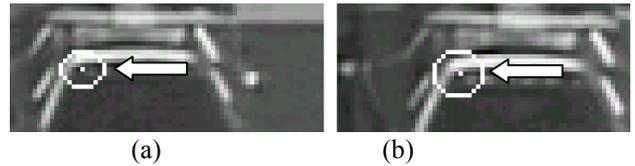


Fig. 10 – Resultado da rotina para melhor correspondência: a) ponto de melhor correspondência; b) correspondência realizada.

A partir das observações realizadas no experimento, realizou-se a determinação da velocidade do objeto, cujos resultados são apresentados na Tabela 3.

**TABELA 3: VELOCIDADE CALCULADA COM A ROTINA DE MELHOR ÁREA PARA CORRESPONDÊNCIA.**

Imagens	$\Delta t$ (seg)	Velocidade (m/s)	% erro
Fig. 7c-7b	1/30	34,35	14,50%
Fig. 7d-7b	1/15	33,33	11,10%
Fig. 7d-7c	1/30	31,55	5,16%

Nos resultados apresentados pela Tabela 3, observa-se que o percentual de erro diminui, à medida que se utilizam combinações de imagens cujos objetos estão mais próximos da câmara. Isto pode ser justificado, em razão da variação da escala, que, em virtude do afastamento do objeto, tem uma escala menor devido à inclinação da câmara.

Outro fato a ser considerado diz respeito ao ponto que determinou a coordenada do objeto, que se localiza próximo ao teto do carro. As coordenadas  $z$  são bem diferentes do adotado no processo, podendo, dessa forma, afetar a determinação da coordenada do ponto.

Devido à consideração da planura do terreno e os pontos - coordenadas do veículo - ficarem bem acima do solo, foi realizado um experimento em que foi indicado um ponto mais próximo do solo - Fig. 11.

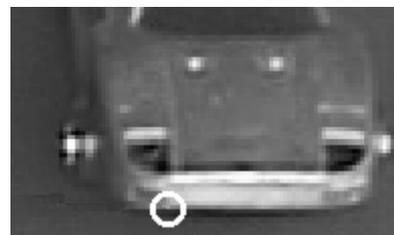


Fig. 11 – Ponto escolhido com pouca elevação, em relação ao solo.

Os resultados desse experimento são apresentados na Tabela 4.

**TABELA 4: VELOCIDADE CALCULADA COM PONTO DO VEÍCULO DE BAIXA ELEVAÇÃO.**

Imagens	$\Delta t$ (seg)	Velocidade ( m/s)	% erro
Fig. 7c-7b	1/30	33,44	11,46%
Fig. 7d-7b	1/15	32,12	7,06%
Fig. 7d-7c	1/30	30,80	2,66%

Os resultados desse experimento mostram que a influência da altura do ponto escolhido no veículo, na determinação da velocidade, é significativa, condição que pode ser verificada, comparando-se as tabelas 3 e 4.

## 5. CONCLUSÕES

Os experimentos mostraram que a variação da escala foi um dos fatores que mais influenciaram nos resultados, em relação ao percentual de erro da velocidade calculada e à simulada, pois, em todos os experimentos, o menor erro ocorreu, quando se utilizou a combinação das imagens - Figuras 7d-7c; imagens essas mais próximas da câmara, enquanto os maiores erros foram apresentados, quando se utilizou a combinação das imagens nas Figuras 7c-7b e 7d-7b.

O fator altura do veículo (do ponto escolhido, para se realizar a correspondência), também influenciou no cálculo da velocidade, o que pode ser observado, comparando-se os resultados apresentados nos experimentos.

O processo de correspondência é um aspecto que deve ser mais bem estudado e avaliado, inclusive com a implementação de outros métodos de correspondência.

A metodologia, para a aplicação proposta, apresentou bons resultados, com erro de apenas 2,66%, em relação à velocidade simulada. Esse resultado mostra o potencial do modelo aplicado das equações de colinearidade, acrescido do vetor velocidade, e abre caminho para o uso da metodologia no desenvolvimento de aplicações que envolvam o uso de filmadoras e a necessidade de se determinar a velocidade de objetos.

## 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.

FONSECA, L. M. G.; MANJUNATH, B. S.: **Registration Techniques for Multisensor Remotely Sensed Imagery; Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Vol. 62, nº 9, September, 1049-1056, 1996.

FRYER, J. G.; **Close Range Photogrammetry and Machine Vision**. K. B. Atkinson – Whittles Publishing, London, 156-179, 1996.

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.

GALO, M.; HASEGAWA, J. K.; TOMMASELLI, A. M. G.: **Avaliação Geométrica de Câmaras de Vídeo para uso em Fotogrametria Digital**. In: **XIX Congresso Brasileiro de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto**. Recife. 1999

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, 1014-1017, 1985.

LUGNANI, J. B.: **Introdução à Fototriangulação**, Curitiba, 1987.

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

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, 378-383, 1996.

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.

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

SULLIVAN, G. D. et al: **Model-based Vehicle Detection and Classification Using Orthographic Approximations**, **Image and Vision Computing**, 649-654, 1997.