# ORIENTAÇÃO DE IMAGENS SEM PONTOS DE APOIO PARA MENSURAÇÃO DE SUPERFÍCIES PLANAS

*Close range restitution with no need for controlling points in order to measure straight lines*

MÁRIO LUIZ LOPES REISS
ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI

Universidade Estadual Paulista - Unesp
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT
Departamento de Cartografia, Presidente Prudente - SP
{mreiss, tomaseli}@prudente.unesp.br
Processo FAPESP 00/00598–4

## RESUMO

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para a orientação e restituição fotogramétrica de imagens sem a necessidade de pontos de apoio no espaço objeto. A metodologia é aplicada em situações em que o objeto a ser restituído compõe-se de superfícies planas. A determinação das rotações da imagem é baseada em linhas retas que são conhecidas por serem verticais e horizontais no espaço objeto e contidas no plano de referência. Para a determinação das coordenadas do CP da câmara em relação a este plano foi desenvolvido um protótipo de coleta de dados usando um telêmetro a *laser* que mede a distância câmara-objeto no momento da tomada da imagem. A metodologia desenvolvida foi implementada em programas computacionais que permitem, em conjunto, o processo de restituição das imagens. Neste trabalho serão apresentados os resultados da aplicação do sistema em situações controladas e em aplicações potenciais, mostrado que áreas e distâncias no objeto podem ser medidas com erros da ordem de 3%, sem a necessidade de pontos de apoio.
**Palavras chaves:** Fotogrametria Digital, Restituição monoscópica sem pontos de apoio.

## ABSTRACT

A methodology aiming at close range photogrammetric restitution with no need controlling points is presented in this paper. The proposed approach is designed to work in environments flat surfaces, taken one of the planes as a reference. Image attitude is computed by using natural vertical and horizontal straight lines on the

reference plane. Coordinates of the camera perspective center (PC) are determined by using a laser device which measures the distance from camera to the reference plane. This methodology was implemented in C++ language enabling photogrammetric orientation and restitution. Practical application and its results are presented showing that accuracy within 3% in length and areas over the object can be obtained.

**Key words:** Digital Photogrammetry, Mono and Stereoplotting without control points.

## 1 INTRODUÇÃO

Na Fotogrametria convencional, a orientação exterior (OE) é obtida por métodos que necessitam de pontos de apoio no espaço objeto. Isto implica em uma restrição para as situações nas quais o objeto a ser restituído não pode ser tocado, como pode ser o caso de sítios arqueológicos e monumentos históricos, que se encontram em condições físicas de deterioração; ou aplicações nas quais o objeto de interesse tem o seu acesso dificultado, como em algumas placas de propaganda, fachadas de edificações, dentre outros. Além da restrição do contato físico com o objeto existem casos nos quais a restituição dos objetos de interesse pode ser realizada monoscopicamente, reduzindo-se o custo operacional, quanto estes forem compostos de superfícies cujas feições estejam em um mesmo plano de referência.

A metodologia proposta neste trabalho foi desenvolvida, inicialmente, a partir do pedido de uma prefeitura que solicitou o desenvolvimento de uma alternativa para medir e registrar placas de propaganda e *outdoors.* As restrições impostas foram de que a solução deveria ser rápida, fácil de usar e de baixo custo.

## 2 MÉTODOS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR DE IMAGENS

Existem vários métodos que se destinam à realização do processo de orientação exterior de imagens em Fotogrametria, sendo o mais conhecido o que utiliza as equações de colinearidade (LUGNANI, 1987) em um processo de triangulação de um conjunto de imagens (bloco ou modelo) ou pelo processo de resecção espacial de uma imagem isolada. Ambas as formas descritas necessitam de pontos de apoio com coordenadas conhecidas no espaço objeto.

Há vários outros métodos que fazem a estimação dos parâmetros de OE de uma imagem em relação a um referencial fixo pela utilização de outros elementos, como por exemplo, linhas retas. Estes métodos são citados na literatura tendo como principal vantagem o alto potencial de automação do processo de extração e medição em imagens digitais e por serem abundantes em ambientes antrópicos (HARALICK, 1989; VAN DEN HEUVEL, 1998; TOMMASELLI e LUGNANI, 1988; TOMMASELLI e TOZZI, 1996).

Liu e Huang (1988a e 1988b) desenvolveram um método para avaliar o movimento de corpos rígidos baseado no emprego de linhas retas que são conhecidas no espaço objeto e cujas homólogas são medidas no espaço imagem.

Neste método é essencial a existência de equivalência entre as retas no espaço objeto e suas correspondentes no espaço imagem. O método de Liu e Huang separa o cálculo dos parâmetros de translação dos de rotação em duas etapas distintas, sendo esta característica a principal vantagem do método; as rotações são calculadas no primeiro estágio e as translações no segundo.

Tratando apenas da determinação das rotações, primeira etapa do método de Liu e Huang, o modelo é estabelecido partindo da Equação (1), na qual $\mathbf{u}$ é o vetor das direções da reta no espaço objeto e $\mathbf{U}$ é o vetor normal ao plano projetado do espaço imagem. Sendo $\mathbf{U}$ ortogonal à linha reta no espaço objeto rotacionado, então:

$$\mathbf{u}^T \cdot \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{U} = 0 \tag{1}$$

O vetor $\mathbf{u}$ é composto pelos cossenos diretores da reta no espaço objeto e o vetor $\mathbf{U}$ pode ser calculado usando a equação da reta medida na imagem. $\mathbf{R}$ é a matriz de rotação da imagem em relação ao espaço objeto e pode ser composta pelos elementos incógnitos $r_{ij}$ ($i = 1,2,3$ e $j = 1,2,3$) em um modelo linear, ou pelos elementos $\kappa, \varphi$ e $\omega$ em um modelo não linear no qual $\mathbf{R}$ poderá ser dada pela seqüência $\mathbf{R}_Z(\kappa) \cdot \mathbf{R}_Y(\varphi) \cdot \mathbf{R}_X(\omega)$ (MIKHAIL *et al*, 2001):

$$\mathbf{R}_{\kappa\varphi\omega} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \tag{2}$$

Na metodologia apresentada neste trabalho, o segundo estágio do método de Liu e Huang (1988a e 1988b), que trata da determinação das translações, foi substituído por um processo de medida direta, usando um telêmetro a *laser* acoplado a uma câmara digital.

## 3 ORIENTAÇÃO DE IMAGENS SEM PONTOS DE APOIO

### 3.1 PARTICULARIZAÇÃO DO MODELO DE LIU E HUANG

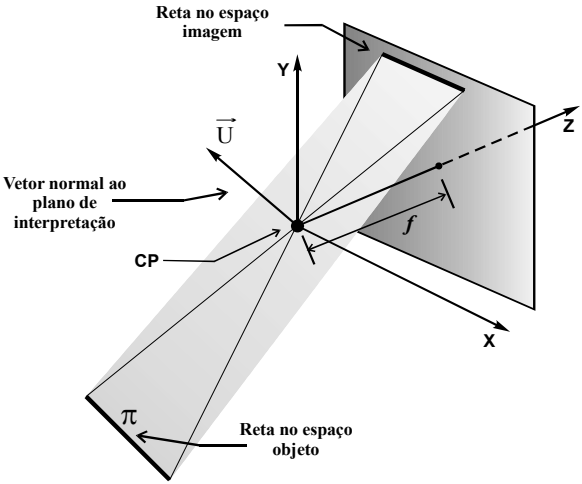
Partindo de um vetor normal ao plano $\pi$, que contém a reta no espaço imagem, o CP da câmara e a reta homóloga no espaço objeto (Figura 1), pode-se definir este vetor como sendo (TOMMASELLI, 1993):

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \cdot \cos\theta \\ f \cdot \operatorname{sen}\theta \\ -\rho \end{bmatrix} \tag{3}$$

onde: $f$ é a distância focal calibrada da câmara;

$\theta$ e $\rho$ são os parâmetros de representação das retas na sua forma normal, no espaço imagem.

Figura 1 – Representação do vetor normal ao plano projetado no espaço imagem




A equação paramétrica de uma reta qualquer no espaço objeto é dada por:

$$\begin{cases} x = x_0 + t \cdot a \\ y = y_0 + t \cdot b \\ z = z_0 + t \cdot c \end{cases} \tag{4}$$

fazendo:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} a & b & c \end{bmatrix}^T \tag{5}$$

sendo: $\mathbf{u}$ o vetor diretor da reta;

$x_0$, $y_0$ e $z_0$ as coordenadas de um ponto qualquer na reta; e

$t$ um parâmetro livre, com $t \in \Re$.

Se uma reta no espaço objeto, que por premissa do projeto se considerará no plano ($z = 0$), for vertical ou horizontal, seus respectivos vetores diretores serão $\mathbf{u}_H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ e $\mathbf{u}_V = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T$.

Aplicando-se esta restrição em (1) e considerando os elementos dados em (2) e (3) chega-se ao modelo simplificado (REISS, 2002).

$$\begin{aligned} F_H &: f \cdot \cos\theta \cdot r_{11} + f \cdot \operatorname{sen}\theta \cdot r_{21} - \rho \cdot r_{31} = 0 \\ F_V &: f \cdot \cos\theta \cdot r_{12} + f \cdot \operatorname{sen}\theta \cdot r_{22} - \rho \cdot r_{32} = 0 \end{aligned} \tag{6}$$

onde: $F_H$ é a equação para a reta horizontal e

$F_V$ é a equação para a reta vertical.

São necessárias no mínimo 3 equações para estimar $\kappa, \varphi,$ e $\omega$, com pelo menos uma delas não paralela às demais. Observando que o modelo (6) é não

linear e do tipo implícito, o método de ajustamento utilizado para estimar as incógnitas é o Combinado com iterações.

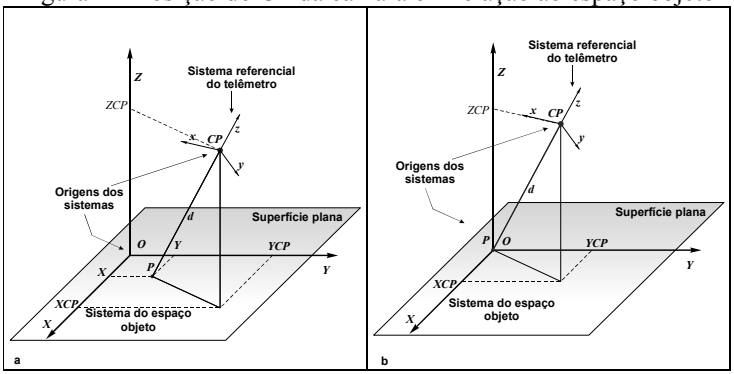
## 3.2 DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DO CENTRO PERSPECTIVO DA CÂMARA

As translações do CP são determinadas usando a medida de distância entre a câmara e uma superfície plana do objeto imageado que contém as retas utilizadas na determinação das rotações. Esta distância é obtida por um telêmetro a *laser* acoplado à câmara.

Visualizando a geometria mostrada na Figura 3, tem-se:

- $\mathbf{P}$, como sendo a interseção do eixo $z$ (imagem) com o plano $\mathbf{XOY}$;
- O sistema referencial do telêmetro paralelo ao sistema referencial da câmara, neste momento livre de excentricidade entre a câmara e o telêmetro a *laser*.

Figura 2 – Posição do CP da câmara em relação ao espaço objeto




O cálculo das coordenadas do CP baseia-se nas relações entre dois sistemas referenciais: o do telêmetro e o do espaço objeto (Figura 2), que são dadas, genericamente, pela seguinte transformação de corpo rígido:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} X - X_{CP} \\ Y - Y_{CP} \\ Z - Z_{CP} \end{bmatrix} \tag{7}$$

na qual: $X_{CP}$, $Y_{CP}$ e $Z_{CP}$ são as coordenadas do CP da câmara em relação ao referencial do objeto;

$X$, $Y$ e $Z$ são as coordenadas do ponto $\mathbf{P}$ no referencial do objeto;

$x$, $y$ e $z$ são as coordenadas do ponto $\mathbf{P}$ no referencial da telêmetro;

$\mathbf{R}$ é a matriz de rotação.

Analisando a Figura 3, como a superfície do objeto é plana, podem ser feitas algumas considerações na Equação (7) sem prejuízo no cálculo de distâncias e áreas sobre a superfície, uma vez que a escala dos objetos será dada unicamente pela coordenada $Z_{CP}$. Uma destas considerações é que a origem $Z$ do espaço objeto é nula ( $Z = 0$ ) e a origem **XY** do espaço objeto e também as coordenadas $(X_{CP}, Y_{CP})$ no mesmo espaço, podem ser arbitradas com qualquer valor. As coordenadas imagem ( $x$, $y$ ) da origem também são nulas, sendo a distância inclinada medida a partir da origem do referencial do telêmetro. Desta forma, o modelo (7) pode ser reescrito como:

$$\begin{bmatrix} X_{CP} \\ Y_{CP} \\ Z_{CP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{31}d \\ r_{32}d \\ r_{33}d \end{bmatrix} \tag{8}$$

onde: $d = -z$ é a distância medida com o telêmetro, livre do efeito da excentricidade;

$\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^{T}$ ($\mathbf{R}$ é ortogonal).

## 3.3 PROTÓTIPO DE COLETA DE IMAGENS CamDigTel

### 3.3.1 COLETOR DE IMAGENS

Com a finalidade de se obter a distância entre a câmara e o plano a ser fotografado, foi realizada a acoplagem de um telêmetro a *laser* a uma câmara digital com a construção de um suporte metálico. Este suporte foi projetado e executado de forma que o eixo óptico da câmara e o feixe *laser* fossem os mais paralelos possíveis, tentando assim minimizar as rotações do telêmetro em relação à câmara (Figura 4).

Foi utilizada uma câmara Kodak DX 3500, com foco fixo, resolução de 1800x1200 e um píxel quadrado de 19,44 μm, para uma distância focal de 38 mm. O telêmetro é um medidor de distâncias a *laser* modelo DISTO memo de marca Leica. O seu erro de medida é de ± 5mm (probabilidade de 95,4%, $2\sigma$ ) e seu erro típico (probabilidade de 68,27%, $\sigma$ ) é de ± 3mm. Seu alcance de medida é de 0,3m a pouco mais de 100m (Disto Memo, 1998).

Figura 3 – CamDigTel: Integração Câmara Digital Telêmetro

Há uma excentricidade entre os dois sensores, que produz uma diferença entre a distância medida com o telêmetro e a distância do CP da câmara ao objeto. A modelagem desta excentricidade será mostrada na próxima seção.

### 3.3.2 MODELAGEM DA EXCENTRICIDADE

A distância medida pelo telêmetro *laser*, no instante da tomada da imagem não corresponde à real distância entre o CP da câmara e o objeto imageado, que é definida sobre o eixo óptico da câmara. Isto ocorre pelo fato de o CP da câmara e o centro de fase (CF) de medida do telêmetro não serem coincidentes fisicamente existindo entre eles uma excentricidade e rotações entre os eixos. Para fins práticos, é necessário apenas determinar as translações entre os sensores, pois o feixe *laser* e o eixo óptico da câmara podem ser alinhados de forma a serem paralelos, ou com rotações muito pequenas (Figura 2).

Com base na Figura 4, podem ser extraídas as seguintes relações:

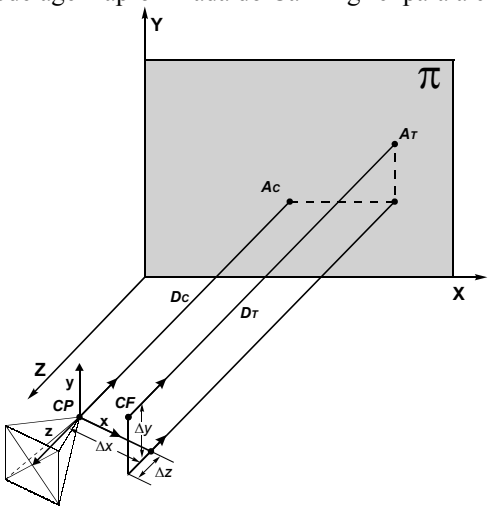
$$\overline{CP\ A_C} = D_C \tag{9}$$

e

$$\overline{CF\ A_T} = D_T \tag{10}$$

Nas Equações (8) e (9) e na Figura (5):

Figura 4 – Modelagem aproximada do CamDigTel para a coleta de dados




$CP$ e $CF$ representam as posições do CP da câmara e do centro de fase do telêmetro, respectivamente;

$A_C$ representa o ponto de interseção entre o prolongamento do eixo óptico da câmara e o plano **XY** no espaço objeto, sobre o qual serão feitas as medidas;

$A_T$ representa o ponto de interseção entre o prolongamento do feixe *laser* do telêmetro e o plano **XY** no espaço objeto;
$D_C$ é a distância do CP da câmara ao plano do espaço objeto;
$D_T$ é a distância do CF do telêmetro ao plano do espaço objeto.
$\Delta x$, $\Delta y$ e $\Delta z$ são as translações.

Usando as equações de colinearidade inversas, demonstra-se que a seguinte equação relaciona a coordenada $Z_{CP}$ com a distância medida pelo telêmetro, as translações de excentricidade e a matriz de rotação da câmara em relação ao sistema de referencia (Reiss, 2002):

$$Z_{CP} = D_T \cdot r_{33} - \left(r_{13} \cdot \Delta x + r_{23} \cdot \Delta y + r_{33} \cdot \Delta z\right) \tag{11}$$

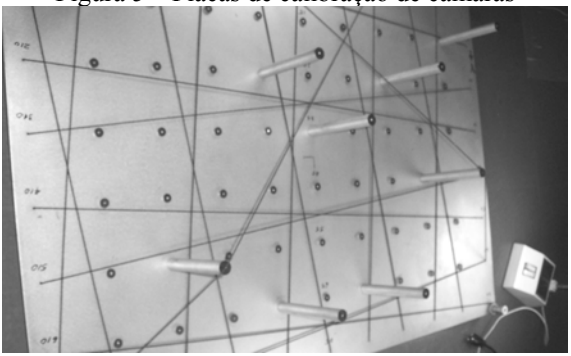
Observando-se a Figura 3 pode-se notar que as coordenadas $X_{CP}$ e $Y_{CP}$ não exercem influência sobre as medidas de áreas e distâncias que podem ser calculadas no espaço objeto a partir da imagem. No entanto, a posição $Z_{CP}$ tem influência como um fator de escala.

### 3.3.3 DETERMINAÇÃO DA EXCENTRICIDADE

Para que se possa determinar a posição $Z_{CP}$ da câmara em relação ao espaço objeto, no instante da coleta da imagem por meio do sistema CamDigTel, devem ser conhecidos os elementos que constam na Equação (11). Os elementos $r_{ij}$, que contêm as rotações da imagem ($\kappa$, $\varphi$ e $\omega$) em relação ao espaço objeto, serão obtidos pela orientação da imagem, por meio do Método de Liu e Huang adaptado (Seção 3.1). O elemento $D_T$ será obtido pelo telêmetro a *laser* do CamDigTel. Já os elementos $\Delta x$, $\Delta y$ e $\Delta z$, que correspondem à excentricidade do sistema CamDigTel deverão ser conhecidos, sendo obtidos previamente por um processo de calibração.

O processo de calibração da excentricidade é realizado em duas principais etapas: a calibração da câmara e a determinação da excentricidade. Inicialmente, várias imagens são obtidas de uma placa de calibração que possuem pontos precisamente sinalizados e com coordenadas conhecidas (Figura 5). Estas imagens são obtidas com o CamDigTel e, para cada uma delas, é medida uma distância com pontaria feita sobre o plano da placa, em um dos pontos com coordenadas conhecidas.

Figura 5 – Placas de calibração de câmaras



Os pontos sinalizados e registrados na imagem têm suas coordenadas medidas por meio de um leitor de coordenadas e estas são utilizadas para a calibração da câmara. No processo de calibração de câmaras são obtidos três tipos de parâmetros: os de orientação interior (OI), os de orientação exterior (OE) e as coordenadas dos pontos de apoio ajustados. Os parâmetros de OE, mais especificamente a coordenada $Z$ do CP, em conjunto com a distância obtida com o CamDigTel são utilizados para a calibração da excentricidade.

Os parâmetros de excentricidade são calculados usando o Método Paramétrico sem a necessidade de iterações, pois o modelo (11) é linear, sendo $\Delta x$, $\Delta y$ e $\Delta z$ os elementos incógnitos e $Z_{CP}$ considerado como observação (é obtido por um processo de calibração, recessão espacial ou por fototriangulação). Os outros elementos, $D_T$ , $\kappa$, $\varphi$ e $\omega$ são considerados como constantes.

## 4 IMPLEMENTAÇÕES

Foram realizadas implementações de programas computacionais com os métodos desenvolvidos e discutidos. Estes programas, em conjunto, executam os processos de orientação de imagens e restituição de superfícies planas sem a necessidade de pontos de apoio.

Ao todo, foram implementadas três ferramentas computacionais, sendo elas:

- Um monocomparador de imagens digitais;
- Um programa de calibração da excentricidade entre a câmara digital e o telêmetro a *laser*, no sistema CamDigTel; e,
- Um restituidor de superfícies planas por linhas verticais e horizontais (RESPA).

A seguir será descrita a implementação do programa RESPA com suas principais características.

## 4.1 FERRAMENTA PARA RESTITUIÇÃO UTILIZANDO ORIENTAÇÃO POR LINHAS RETAS VERTICAIS E HORIZONTAIS

A principal ferramenta implementada é o programa computacional RESPA (Restituição Sem Pontos de Apoio), sendo ele um dos objetivos principais do trabalho realizado (REISS, 2002).

Sua implementação se deu em linguagem de programação C++ no ambiente *Builder* e nela foram utilizadas técnicas de programação orientada a objetos (POO), com os recursos da biblioteca de componentes visuais (VCL – *Visual Components Library*).

O programa RESPA é um restituidor digital que realiza as operações de orientação e restituição pela metodologia de linhas verticais e horizontais sem a necessidade de pontos de apoio.

Basicamente, o programa RESPA opera em duas fases distintas do projeto: orientação e restituição.

No processo de determinação das rotações da imagem, o programa RESPA tem implementado algoritmos de extração manual e automática de feições retas.

A restituição de pontos em projetos monoscópicos é feita utilizando o modelo de *colinearidade inversa* (MIKHAIL *et al*, 2001) e para projetos estereoscópicos é feita por interseção fotogramétrica (REISS, 2002).

Para auxiliar no processo de orientação pela metodologia proposta, foram implementados algoritmos de extração automática de feições retas. Foram testadas varias seqüências de procedimentos para a execução da extração de feições retas e a que mostrou melhores resultados, sendo ela utilizada, foi (ARTERO, 1999; SONKA, 1998):

- Suavização pela mediana com máscara 3x3;
- Detecção pelo operador Nevatia e Babu;
- Limiarização pelo método OTSU;
- Afinamento por Supressão Não-Máxima;
- Conexão por Varredura e Rotulação;
- Ajustamento de retas pelo MMQ com refinamento prévio das coordenadas.

Durante a implementação do programa RESPA, verificou-se que é possível realizar uma restituição estéreo em um objeto complexo, formado por superfícies irregulares, mas com no mínimo uma delas plana e contendo feições verticais e horizontais, e tomando-se ainda esta superfície plana como referência no processo de orientação. Para isso, basta tomar duas imagens de pontos de vista diferentes e com suas respectivas medidas de distâncias entre o CP da câmara e o mesmo plano alvo, e depois de determinadas as rotações das imagens, indicar nas imagens um ponto homólogo a elas como origem do sistema de coordenadas do espaço objeto. Construiu-se então no programa RESPA um módulo que permite a execução deste

processo: a restituição 3D baseada em um par de imagens, mas sem a necessidade de visualização estereoscópica.

Figura 6 – RESPA: Interface de Restituição

Os dois módulos, tanto o monoscópico quanto o estéreo, utilizam-se de linhas verticais e horizontais para a determinação das rotações da imagem, e os modelos (8) e (11) para a determinação das coordenadas do CP da câmara em relação ao plano da superfície.

## 4.2 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA CAMDIGTEL

Foram realizados testes com o sistema para verificar a sua funcionalidade e a exatidão de seus resultados. Inicialmente, foi realizada a calibração da excentricidade entre a câmara digital do sistema CamDigTel.

A câmara foi calibrada considerando-se 10 parâmetros: $f, x_o, y_o, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, A$ e $B$, em um processo bloco variante, usando o programa CC (Galo, 1993). Foram utilizadas 9 imagens (com 54 pontos de apoio), sendo os parâmetros de OI ajustados mostrados na Tabela 1. Uma das imagens utilizadas no processo de calibração pode ser vista na Figura 6.

Os dados obtidos da calibração da câmara foram empregados na determinação da excentricidade do CamDigTel juntamente com as distâncias medidas com o telêmetro. Da calibração do sistema resultaram os valores mostrados na Tabela 2.

Tabela 1 – Parâmetros de OI da câmara Kodak DX 3500

| Parâmetros | Parâmetros de OI | Valor | Desvio-padrão |
|---|---|---|---|
| Distância focal (mm) | $f$ | 38,3630 | 0,06429 |
| Coordenadas do PP (mm) | $x_0$ | -0,2968 | 0,04792 |
| | $y_0$ | -0,3676 | 0,07739 |
| Distorção Radial Simétrica | $K_1$ ($mm^2$) | $-0{,}1035144 \times 10^{-03}$ | $0{,}1296 \times 10^{-04}$ |
| | $K_2$ ($mm^4$) | $-0{,}4698471 \times 10^{-07}$ | $0{,}7087 \times 10^{-07}$ |
| | $K_3$ ($mm^6$) | $0{,}1382242 \times 10^{-09}$ | $0{,}1148 \times 10^{-09}$ |
| Distorção Descentrada | $P_1$ | $-0{,}9376122 \times 10^{-07}$ | $0{,}1249 \times 10^{-04}$ |
| | $P_2$ | $-0{,}3768544 \times 10^{-04}$ | $0{,}1425 \times 10^{-04}$ |
| Afinidade | $A$ | $-0{,}6033824 \times 10^{-03}$ | $0{,}4204 \times 10^{-03}$ |
| | $B$ | $-0{,}4812652 \times 10^{-03}$ | $0{,}4268 \times 10^{-03}$ |

Os valores obtidos são compatíveis com as medições aproximadas que foram feitas diretamente entre o telêmetro e a câmara. O maior desvio padrão dos parâmetros ajustados, mostrados na Tabela 2, foi 4,059 mm, estando dentro da ordem de grandeza esperada, uma vez que a média dos erros da coordenada $Z_{CP}$, obtidos na calibração, é superior a 1,5 mm e os erros da medida da distância pelo telêmetro a *laser*, dada por suas especificações técnicas, são de 3 mm.

Tabela 2 – Dados da Calibração da Excentricidade do CamDigTel

| $\Delta x$ (mm) | $\sigma_{\Delta x}$ (mm) | $\Delta y$ (mm) | $\sigma_{\Delta x}$ (mm) | $\Delta z$ (mm) | $\sigma_{\Delta z}$ (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| -19,652 | 4.059 | 117,753 | 2.403 | 51,118 | 2.187 |

No processo de calibração do CamDigTel foram utilizadas 9 distâncias medidas com o telêmetro, ou seja, 9 imagens, o que proporciona um grau de liberdade de valor 6. Fazendo a análise de qualidade do ajustamento com um nível de significância de 5%, ou seja, 95% de probabilidade, o valor de $\chi^2$ teórico para este nível de significância foi de 12,59. Comparando-se o valor de $\chi^2$ amostral obtido no processo de ajustamento, que é de 12,24, com o valor tabulado, verifica-se que o $\chi^2$ amostral é menor que o $\chi^2$ teórico, mostrando assim que a hipótese básica não é rejeitada ao nível de significância analisado e os parâmetros ajustados têm 95% de probabilidade de estarem corretos.

# 5 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE RESTITUIÇÃO

## 5.1 CONDIÇÕES CONTROLADAS

Para avaliar a metodologia monoscópica do sistema de restituição proposto, foram utilizadas as mesmas imagens da placa usadas na calibração da câmara, uma vez que seus parâmetros de OE foram determinados por uma metodologia efetivamente consolidada e com boa acurácia. Estas imagens foram então orientadas considerando-se retas ligando os pontos nas direções verticais e

horizontais, e foram usadas as distâncias medidas com o telêmetro durante a coleta das imagens para a calibração do CamDigTel.

As rotações obtidas pelo programa de restituição com o método de Liu e Huang adaptado (Seção 3.1) foram comparadas com as rotações obtidas na calibração. Apenas as coordenadas $Z$ do CP foram comparadas, uma vez que as coordenadas $(X,Y)$ no sistema do programa RESPA são obtidas em um referencial arbitrário.

Com as imagens das placas orientadas foram medidas distâncias e áreas de feições poligonais formadas ao se ligar pontos com coordenadas conhecidas na placa. As medidas de distâncias e áreas destas feições, respectivamente, foram comparadas. Foram realizados vários experimentos nos quais se variou o número de retas usadas na orientação, sendo apresentados apenas um dos 3 mais significativos, com 11 retas. Foram utilizados quatro imagens com seus respectivos parâmetros de OE. Um exemplo de dados dos experimentos realizados pode ser visto na Tabela 3.

Observou-se pela comparação dos erros entre os valores conhecidos da placa de calibração e os valores obtidos pelo sistema de restituição que eles variam em escala com a medida da grandeza sobre a placa, ou seja, quanto maiores as áreas e distâncias, maior será o erro obtido. Este efeito é causado pelos erros decorrentes da determinação da coordenada $Z$ entre o CP da câmara e o plano da superfície do objeto, que gera uma variação de escala proporcional à distância ou à área medida. Por isso, na avaliação das áreas e distâncias foram calculadas porcentagens de erro em relação às medidas conhecidas, de forma que valores comparados pudessem ser significativos e comparáveis entre si.

Mas este efeito de escala não se apresenta como regra geral, pois em algumas situações, provavelmente devido à conformação geométrica e/ou a iluminação das feições medidas no espaço imagem, ou por operação do usuário, as medidas podem sofrer variação diferenciada, piorando ou melhorando a medida; um exemplo disto é a feição $D_2$, que sofreu variação conforme descrito. Entretanto, verificou-se que a melhor forma de avaliar os erros de medida é realmente pela comparação entre porcentagem de erro em relação à grandeza medida.

Para cada experimento foram feitas variações do número de retas utilizadas na orientação da imagem. Foram calculados os erros médios quadráticos da porcentagem de erro obtida para os parâmetros analisados (EMQ $\%\varepsilon$). Também foram calculados valores de EMQ $\%\varepsilon$ para os parâmetros, considerando-se todos os resultados obtidos (mesmo os não mostrados neste trabalho) para os experimentos realizados (Tabela 4).

Tabela 3 – Experimentos com a utilização de 11 retas usadas para a orientação da imagem

| Nº Retas | Experimento 1 – Imagem 01 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Distância medida com o telêmetro | | | 973 mm | | |
| 11 | Rotações | | | | | |
| | | Valores do Sistema | | Valores da Calibração | | ε |
| | κ | 202º02'39,855'' | ± 02'23,983'' | 202º01'07,947'' | ± 01'22,872" | 01'31,908'' |
| | φ | 013º54'05,851'' | ± 16'32,462'' | 013º54'44.008" | ± 03'35,388" | -38,157'' |
| | ω | 358º48'29,678'' | ± 09'55,187'' | 359º05'49.883" | ± 05'12,696" | -17'20,205'' |
| | Translações | | | | | |
| | | Valores do Sistema (mm) | | Valores da Calibração (mm) | ε (mm) | %ε |
| | Z | 907,561 | | 905,029 | 2,532 | 0,280 |
| | Áreas | | | | | |
| | | Valores do Sistema (mm²) | | Valores Conhecidos (mm²) | ε (mm²) | %ε |
| | $A_1$ | 10.047,239 | | 10.000 | 47,239 | 0,472 |
| | $A_2$ | 40.167,809 | | 40.000 | 167,809 | 0,420 |
| | $A_3$ | 90450,489 | | 90.000 | 450,489 | 0,501 |
| | Distâncias | | | | | |
| | | Valores do Sistema (mm) | | Valores da Conhecidos (mm) | ε (mm) | %ε |
| | $D_1$ | 100,035 | | 100 | 0,035 | 0,035 |
| | $D_2$ | 201,281 | | 200 | 1,281 | 0,641 |
| | $D_3$ | 400,940 | | 400 | 0,940 | 0,235 |

Com estas grandezas de erro, foram calculados erros médios quadráticos, denominando-se de erros médios quadráticos da porcentagem de erro de medida (EMQ %ε).

Como dito, para cada experimento foram feitas variações do número de retas utilizadas na orientação da imagem e calculados os EMQ %ε em áreas, distâncias e coordenadas $Z$, calculadas a partir da Equação 10. Estes EMQ %ε, apresentados na Tabela 4, consideram todos os resultados obtidos.

Tabela 4 – Resumo dos resultados obtidos

| Dados | EMQ %ε |
|---|---|
| Coordenada Z calculada (mm): | 0,103 |
| Áreas (mm²) | 0,368 |
| Distâncias (mm) | 0,145 |

Pelos resultados dos experimentos realizados, algumas outras considerações podem ser levantadas. A discussão a seguir aborda todos os resultados obtidos com os experimentos realizados com sistema, mesmo aqueles não mostrados neste artigo pela sua extensão:

– **Coordenada Z calculada a partir da distância medida:**

A média das distâncias entre o CP da câmara e o plano da superfície foi de 1.014 mm. Foram calculados os EMQ %ε entre o valor de $Z$, conhecido da calibração da câmara e o calculado pelo sistema. O maior valor obtido foi de 0,293%ε e o valor médio obtido foi de 0,103%ε.

– **Rotações calculadas usando retas:**

Foram calculadas discrepâncias entre as rotações obtidas com o sistema e as calibradas. Pela análise, nota-se que a qualidade das rotações não está associada apenas ao número de retas observadas nas placas, mas sim à geometria envolvida no sistema: inclinação da placa, distância entre a placa e a câmara, etc.

A maioria das discrepâncias se enquadra dentro do desvio-padrão indicado pelo sistema. As precisões dadas pelo sistema são inferiores às obtidas pela calibração uma vez que os graus de liberdade da orientação utilizando retas (o maior foi 15) são muito inferiores ao da calibração (689 graus de liberdade). Mesmo assim, as discrepâncias são compatíveis com os desvios-padrão dos valores estimados utilizando retas.

– **Áreas:**

Considerando todas as áreas avaliadas, o erro ficou em 0,368% da área medida, para uma distância média medida com o telêmetro de 1014 mm entre a câmara e o objeto.

– **Distâncias**

No cômputo de distâncias sobre a placa, o maior erro observado foi de 0,730%, com 16 retas utilizadas na orientação da imagem. Entretanto, o maior EMQ %ε obtido foi de 0,264%. Considerando todos os experimentos, foi verificado que o EMQ %ε de distância é 0,145%, para uma distância média medida com o telêmetro de 1014 mm.

## 5.2 EXPERIMENTO COM APLICAÇÃO REAL

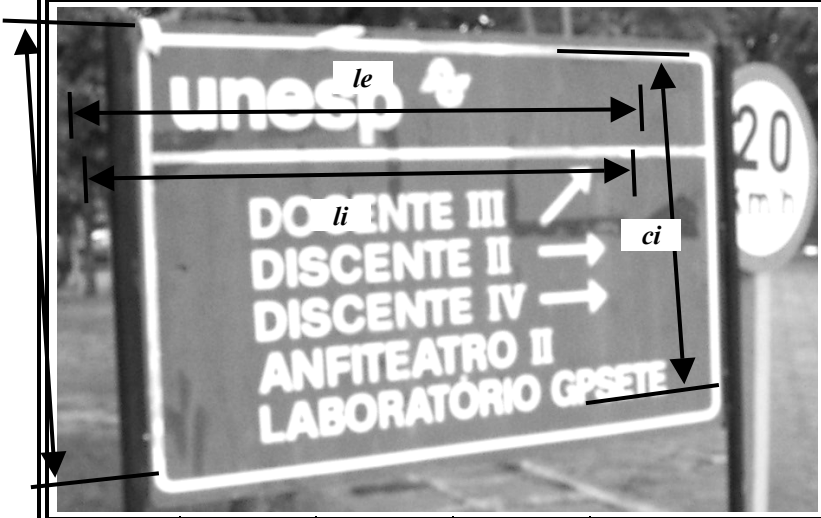
Foram realizados testes com aplicações potenciais do sistema, um deles, apresentados neste trabalho, foi a medição uma placa de sinalização.

A aplicação trata-se da medição de uma placa localizada no Campus da FCT/Unesp, na entrada do Bloco III, que foi escolhida devido à facilidade de se efetuar medidas diretas sobre ela para comparação dos dados obtidos com a restituição.

### 5.2.1 PLACA DE SINALIZAÇÃO

A placa de sinalização foi medida diretamente com uma trena de aço, sendo a conformação de suas medidas mostrada na Figura 7. Uma imagem foi tomada com o sistema CamDigTel, com uma distância medida pelo telêmetro de 2382 mm.

Figura 7 – Conformação das medidas da placa de sinalização




| *le(mm)* | *ce(mm)* | *li (mm)* | *ci (mm)* | Distância CamDigTel (mm) |
|---|---|---|---|---|
| *565* | *975* | *543* | *945* | *2382* |

Pode ser notado (Tabela 5) que o valor de EMQ %ε para as distâncias foi de 0,389% para uma distância medida com o telêmetro de 2.382 mm. Isto equivale a dizer que, para uma distância de 1.000 mm no espaço objeto, que corresponde a 830,174 píxeis no espaço imagem, o EMQ %ε esperado seria de 0,063 mm ou 3,229 píxeis. Projetando o EMQ obtido com uma distância de 2.382 mm para uma distância de 1.014 mm (igual à média das distancias avaliadas na Seção 5.1), o resultado seria 0,166%, bastante próximo ao obtido com dados reais controlados que foi de 0,145%.

Apesar de neste exemplo de aplicação ter-se verificado que a qualidade dos resultados de medição de áreas e distâncias estava dentro das expectativas de aplicação do sistema, e mostrada nos experimentos com dados reais controlados (Seção 5.1), notou-se que os erros de medidas de distâncias sobre a placa sofreram variação diferenciada em relação à variação da grandeza de medida conhecida. Este efeito ratifica que a conformidade geométrica e/ou a iluminação da imagem aliados com a pontaria do usuário afetam, a qualidade dos resultados.

Tabela 5 – Resultados da orientação e medição da placa de sinalização

| Rotações | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Valores do Sistema | | | Desvio-padrão | |
| 353º12'36,829'' | | | 11'28,650'' | |
| 325º04'14,548'' | | | 43'01,031'' | |
| 351º37'16,817'' | | | 17'56,574'' | |
| Áreas | | | | |
| | Valores do Sistema (mm²) | Valores Conhecidos (mm²) | ε (mm²) | %ε |
| $A_1$ | 9.942,257 | 10.000 | -57,743 | -0,577 |
| $A_2$ | 39.821,615 | 40.000 | -178,385 | -0,445 |
| | | | EMQ | 0,531 |
| | Valores do Sistema (mm) | Valores Conhecidos (mm) | ε (mm) | %ε |
| $D_1$ | 540,037 | 543 | -2,963 | -0,546 |
| $D_2$ | 538,230 | | -4,770 | -0,878 |
| $D_3$ | 537,049 | | -5,951 | -1,096 |
| $D_4$ | 945,530 | 945 | 0,530 | 0,056 |
| $D_5$ | 942,561 | | -2,439 | -0,258 |
| $D_6$ | 941,146 | | -3,854 | -0,408 |
| $D_7$ | 570,086 | 565 | 5,086 | 0,900 |
| $D_8$ | 569,672 | | 4,672 | 0,827 |
| $D_9$ | 568,827 | | 3,827 | 0,677 |
| $D_{10}$ | 978,208 | 975 | 3,208 | 0,329 |
| $D_{11}$ | 977,830 | | 2,830 | 0,290 |
| $D_{12}$ | 973,767 | | -1,233 | -0,126 |
| | | | EMQ %ε | 0,389 |

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo do trabalho foi criar uma ferramenta simples, de fácil aplicação e utilização, e de custo baixo, tanto em relação aos equipamentos utilizados quanto operacionalmente, visando a extração de medidas que representasse precisamente, dentro da qualidade exigida pela aplicação, as medidas reais de placas de propaganda, e que, ao mesmo tempo, pudesse registrar o conteúdo anunciado.

A metodologia criada evita a necessidade de um operador experiente e altamente qualificado para a operação do sistema, que pode ser facilmente instruído para operá-lo.

Outras metodologias poderiam ser aplicadas para evitar a necessidade de contato com o objeto, como o uso de interseção a vante com Topografia para o levantamento dos pontos de apoio e de Fotogrametria convencional, para a restituição das feições, monoscópica ou com várias imagens. Contudo, isto tornaria o processo restritivo, devido aos custos e à demora da utilização de tais técnicas, além de necessitar de um técnico especializado.

A solução do sistema, que usa um telêmetro a *laser* para dar o fator de escala da imagem, depois que esta tem suas rotações determinadas pela utilização de linhas verticais e horizontais, é outro fator que dá ao sistema agilidade e praticidade.

Pode-se afirmar que os objetivos gerais da proposta foram atingidos, pois foi criada e estudada uma metodologia que realiza a restituição 2D ou 3D sem a necessidade de pontos de apoio no espaço objeto, dentro das especificações iniciais.

Os resultados experimentais indicam que a distância câmara-objeto não é o único fator que determina o erro obtido nas medidas sobre a imagem, e que o erro na determinação da coordenada $Z$ do CP da câmara gera um fator de escala sobre os erros de medida, fazendo com que eles sejam proporcionais à grandeza mensurada, e também à distância câmara-objeto.

Verificou-se pelas aplicações realizadas que a metodologia pode ser empregada na medição de objetos à curta distância que possuam feições verticais e horizontais, como a medição de placas de propaganda, fachadas de edificações e monumentos, etc.

Um erro da ordem de 3% da grandeza a ser medida é facilmente obtido com o sistema.

Foram verificados alguns cuidados que devem ser tomados para se obter melhores resultados:

- A tomada de imagens, se possível, com o eixo óptico da câmara formando ângulos normais com o plano da superfície do objeto a ser restituído, minimizando os efeitos da não parametrização das rotações na calibração do sistema do telêmetro em relação à câmara e de inclinação da imagem, pois estes efeitos são acentuados à medida que o ângulo se torna muito oblíquo;
- Evitar movimentar o sistema de coleta de imagem CamDigTel no momento de tomada de imagens e de distância, para não prejudicar a pontaria do feixe *laser* e a pontaria no processo de restituição da imagem

## AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seus agradecimentos à FAPESP (Fundação de Amparo de Pesquisa do Estado de São Paulo) pela concessão de bolsa de Mestrado para o desenvolvimento do projeto "*Restituição Fotogramétrica Flexível de Imagens de Curta Distância: Estudo de Métodos e Desenvolvimento de Protótipo*", do qual este trabalho é baseado.

## BIBLIOGRAFIA

ARTERO, A, O. **Técnicas para a Extração Automática de Feições Retas em Imagens Digitais.** Presidente Prudente, 1999, 117p, Dissertação de Mestrado – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus de Presidente Prudente, Universidade Estadual Paulista.

GALO, M. **Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais**, Curitiba, 1993, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR.

HARALICK, R. M. **Determining Camera Parameters From The Perspective Projection of a Rectangle.** Pattern Recognition, Vol. 22, No. 3, pp. 225- 230, Great Britan, 1989.

HEUVEL, F. A. VAN DEN. **3D Reconstrucion from a Single Image Using Geometric Constraints.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998, Vol 53. No. 6, 354 - 368.

LIU, Y.; HUANG, T. S. **Estimation of Rigid Body Motion Using Straight-line Correspondences,** Computer Vision, Graphics and Image Processing, v,43(1), pp. 37-52, July 1988a.

LIU, Y.; HUANG, T, S. **A Linear Algorithm for Motion Estimation Using Straight Line Correspondences.** Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 44(1), pp. 35-57, October 1988b.

LUGNANI, J. B. **Introdução à Fototriangulação.** Curitiba: Ed. da UFPR, 1987, 134 p.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCCLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry.** John Wiley & Sons Inc, New York, 2001

REISS, M. L. L. **Restituição Fotogramétrica Flexível de Imagens à Curta Distância: Estudo de Método e Desenvolvimento de Protótipo.** Presidente Prudente, 2002, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Estadual Paulista, 161p.

SONKA, M.; HLAVAC, V.; BOYLE, R. **Image Processing, Analysis, and Machine Vision.** Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 2nd ed. 1998, 770p.

TOMMASELLI, A, M, G. **Um Método Recursivo Aplicado ao Problema de Localização em Visão de Máquina.** Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Unicamp, Campinas, 1993, 155p.

TOMMASELLI, A. M. G.; LUGNANI, J. B. **An Alternative Mathematical Model to the Colinearity Equation Using Straight Features.** Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, KYOTO, 1988, COMMISSION III, PP, 756-774.

TOMMASELLI, A. M. G.; TOZZI, C. L. **A Recursive Approach to Space Resection Using Straight Lines.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, January 1996, Vol 62, No, 1, pp, 57-66.

(Recebido em 25/10/02. Aceito para publicação em 30/05/03.)