

CALIBRAÇÃO DE UM PROJETOR DE PADRÕES PARA RECONSTRUÇÃO 3D POR LUZ ESTRUTURADA

Mário Luiz Lopes Reiss¹
Antonio Maria Garcia Tommaselli¹

¹Universidade Estadual Paulista – UNESP – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas – (mreiss_tomaseli@prudente.unesp.br)

RESUMO

A Fotogrametria destina-se à reconstrução de superfícies de objetos por meio da análise das relações geométricas da luz no espaço e um elemento sensor. Basicamente, estas relações são obtidas sobre fotografias digitais ou analógicas, podendo a análise ser feita em uma única imagem (levantamento monoscópico) ou em imagens sobrepostas (levantamento estéreo). Convencionalmente, a geometria básica da fotogrametria é baseada em duas imagens tomadas em instantes diferentes, por meio do deslocamento do ponto de vista de uma única câmara, ou no mesmo instante, por meio de estéreo-câmaras. Uma alternativa às estéreo-câmaras é a utilização de um projetor de padrões de luz estruturada acoplado a um sistema sensor, no caso, uma única câmara digital. Este projetor emite um conjunto de feixes de luz estruturada sobre a superfície de um objeto e, simultaneamente, estes padrões de luz refletidos são captados pelo sensor como uma imagem digital da cena. Pelo conhecimento prévio das relações geométricas entre o projetor, o sensor e os padrões projetados, é possível reconstruir a superfície tridimensional do objeto fotografado. Para isso, as relações geométricas entre o projetor e a câmara devem ser calibradas. Um modelo específico de calibração do projetor foi desenvolvido e testado com dados reais mostrando sua aplicabilidade ao sistema de reconstrução 3D por luz estruturada.

Palavras chave: Fotogrametria à curta distância, Luz estruturada, Calibração do projetor de padrões.

CALIBRATION OF A PATTERN PROJECTOR FOR 3D RECONSTRUCTION USING STRUCTURED LIGHT

ABSTRACT

One of the aims of Photogrammetry is object surface reconstruction using the geometric relationships between the light traveling through the space and a sensor. These relationships are obtained inspecting metric photographs and this analysis can be performed in a single image or in stereopairs. The geometric principles of Photogrammetry are based in two images taken at different positions either by moving the camera or using two cameras (stereo-cameras). An alternative to the stereo approach is the replacement of the second camera by an active projector. The object is lightened by the project with an array of patterns, which are captured by the digital camera. Knowing the geometric relationships between the projector, the camera and each individual pattern the object surface can be numerically reconstructed. In order to achieve this reconstruction, the geometric relationships have to be previously determined through a calibration process. A model aimed at the projector calibration was developed and tested with real data and it is demonstrated its feasibility to the surface reconstruction with structured light.

Keywords: Close Range Photogrammetry, Structured light, Pattern projector calibration.

0 INTRODUÇÃO

A reconstrução tridimensional de objetos a partir de seus originais reais é denominada de engenharia reversa. Considerando objetos à curta distância, várias aplicações práticas da engenharia reversa de objetos podem ser destacadas, tais como: geração de animação; modelagem de objetos arqueológicos; modelagem odontológica; desenho industrial; modelagem de órgãos humanos; cinematografia; reprodução de esculturas; indústrias de brinquedos; dentre outras.

A reconstrução tridimensional de objetos é uma tarefa a que se destinam várias disciplinas do conhecimento humano. Uma delas, a Fotogrametria, visa obter seus modelos 3D a partir de fotografias e

as relações geométricas da luz, convertida em imagem, por um elemento sensor. A principal relação geométrica utilizada na Fotogrametria baseia-se em duas ou várias imagens capturadas de um mesmo objeto em pontos de vista diferentes, permitindo que pontos homólogos nas imagens tenham suas coordenadas no espaço objeto calculadas por meio de intersecção.

Uma restrição dos sistemas fotogramétricos convencionais é determinação dos pontos homólogos em superfícies de textura homogênea, tais como: pele humana e superfícies opacas, principalmente quando se trata da automação do processo de reconstrução. Como alternativa, pode-se utilizar um projetor de padrões de luz estruturada acoplado rigidamente à câmara. Este projetor emite um padrão de luz estruturada sobre a superfície do objeto a ser reconstruído e a reflexão desta luz é captada pela câmara no momento de tomada da imagem.

O sistema câmara-projetor apresenta uma geometria equivalente à de uma estéreo-câmara, e a reconstrução 3D depende das fotocoordenadas dos padrões de luz medidas na imagem, das coordenadas do centro perspectivo (CP) da câmara e dos cossenos diretores do vetor de luz estruturada, estes dois últimos no referencial da câmara. Assim, tanto as coordenadas do projetor quanto os vetores diretores dos padrões de luz estruturada devem ser determinados por um processo de calibração.

Utilizando conceitos fotogramétricos, foi desenvolvido um modelo matemático de calibração do projetor. Experimentos com dados reais serão apresentados neste artigo.

0 RECONSTRUÇÃO 3D POR LUZ ESTRUTURADA

Na modelagem tridimensional por luz estruturada, padrões de luz com características conhecidas são projetados sobre a superfície do objeto e um instrumento sensor captura a imagem dos padrões que são distorcidos pela superfície de projeção. Pela medição desta distorção e pelo conhecimento das características geométricas (e/ou radiométrica) dos padrões que são projetados se faz a determinação das coordenadas de pontos que compõem a superfície do objeto. Para isto, as relações geométricas existentes entre o sensor e os feixes de raios luminosos do padrão projetado devem ser determinadas (calibradas). Diferentes padrões de luz podem ser usados (linhas, grades, círculos, senoidais, etc.). O projetor de padrões simula uma segunda câmara, e torna a reconstrução 3D mais rápida que no processo fotogramétrico convencional. Um programa computacional específico processa estes dados e extrai as coordenadas 3D dos padrões projetados.

A fonte de luz utilizada projeta uma luz branca estruturada e, assim, não há a necessidade de cuidados especiais de segurança, ao contrário de sistemas de varredura utilizando *laser*, cuja luz possui algum nível de radiação (SIMPLE 3D, 2003). Como vantagem deste sistema há a possibilidade de se capturar todos os alvos projetados e a imagem do objeto de uma só vez, sendo desnecessário manter o objeto estático por um período longo de tempo. Este sistema produz um modelo 3D rapidamente. Também pode haver a necessidade de tomada de múltiplas posições para cobrir inteiramente um o objeto, quando ele for maior que o campo de cobertura do sensor.

A técnica de luz estruturada para a reconstrução 3D é também bastante empregada em aplicações comuns aos sistemas *lasers* e táteis de curta distância. As limitações dos sistemas variam de acordo com a forma como a luz é projetada sobre os objetos. Existem sistemas que possuem precisões compatíveis com o sistema a *laser* e tátil (até cerca de 3 mm de erro), com a vantagem de não necessitar de contato físico com o objeto.

Uma técnica utilizando luz estruturada secciona a superfície por um plano de luz fazendo a cena ser imageada continuamente à medida que a fonte de luz faz a varredura de toda a superfície do objeto (BALLARD e BROWN, 1982). A grande vantagem proporcionada por este sistema é a simplificação do processo de extração de feições, pois somente uma linha aparece por vez em cada imagem. A dificuldade encontrada relaciona-se à necessidade de imobilizar, no período de execução do processo de varredura, tanto a câmara quanto o objeto.

Um outro sistema utilizando o princípio de luz estruturada foi desenvolvido para a reconstrução tridimensional de superfícies faciais (KEEFE *et al*, 1986, *apud* DUNN *et al*, 1989). O sistema usa luz gerada por um *laser* que projeta linhas de pontos verticais e, a partir de um par de estéreo-imagens da face iluminada é possível reconstruir um único perfil vertical da face.

Dunn *et al* (1989) usaram padrões projetados por luz estruturada para recuperar a forma tridimensional de partes do corpo humano. O sistema desenvolvido utiliza uma grade de 35x35 mm que gera uma imagem distorcida devido às curvaturas do relevo e à orientação da superfície em relação à câmara. As coordenadas 3D são obtidas pela interseção das linhas da grade projetadas em uma triangulação. O processo de reconstrução deste sistema é realizado em quatro etapas, sendo elas: determinação dos parâmetros de calibração da câmara e do projetor; processamento da imagem para localizar as interseções da grade na imagem da câmara; rotação da grade e triangulação. O problema deste padrão é quando se trabalha com superfícies descontínuas, pois as retas são desconectadas na imagem.

Beumier (2001) implementou um sistema para uma verificação automática de superfícies faciais 3D com uma análise do nível de cinza. A aquisição 3D é realizada por um sistema de luz estruturada, que foi adaptado para capturar regiões faciais e possibilitar a aquisição de padrões de níveis de cinza projetados na forma de linhas. As formas faciais 3D são comparadas e o erro residual é oriundo da combinação 3D, sendo ele usado como a primeira medida de similaridade. A segunda medida de similaridade é oriunda da comparação do nível de cinza. A fusão 3D e a informação de intensidade aumentaram o desempenho da verificação. A taxa de reconhecimento foi melhorada pela combinação de dados 3D e de tons de cinza, realizada pela abordagem. O tempo de latência de 1s para adquirir a representação 3D e compará-la à referência pretendida é compatível com a aplicação prática.

Tommaselli (1997) propôs um Sistema Fotogramétrico Digital com um equipamento de baixa complexidade, que se baseia em um projetor de padrões, em uma câmara digital e programas computacionais de processamento de imagens. Para a obtenção de resultados confiáveis usando estes componentes, foram desenvolvidos modelos matemáticos específicos para o sistema. Neste sistema, as coordenadas de um ponto na superfície são determinadas pela interseção do feixe de raios projetados e o feixe imageado pela câmara digital. Um dos pontos-chaves neste sistema é a calibração da câmara e do projetor, e, para tal, foi desenvolvida uma técnica de calibração do projetor, baseada na variação paralela do plano de projeção (TOMMASELLI, 1998).

Scalco (2000) utilizou o mesmo sistema desenvolvido (TOMMASELLI, 1998) e introduziu um processo de detecção automática dos alvos projetados por meio de padrões coloridos, mas isto dificulta a identificação dos alvos caso a superfície do objeto também possua feições coloridas.

0 O SISTEMA DESENVOLVIDO DE RECONSTRUÇÃO 3D POR LUZ ESTRUTURADA E SEUS COMPONENTES

0.0 ESTRUTURA FÍSICA

O sistema de reconstrução 3D por luz estruturada tem em sua estrutura física básica uma câmara digital de pequeno formato e um projetor de padrões, ambos conectados entre si por meio de uma haste (Figura 1).

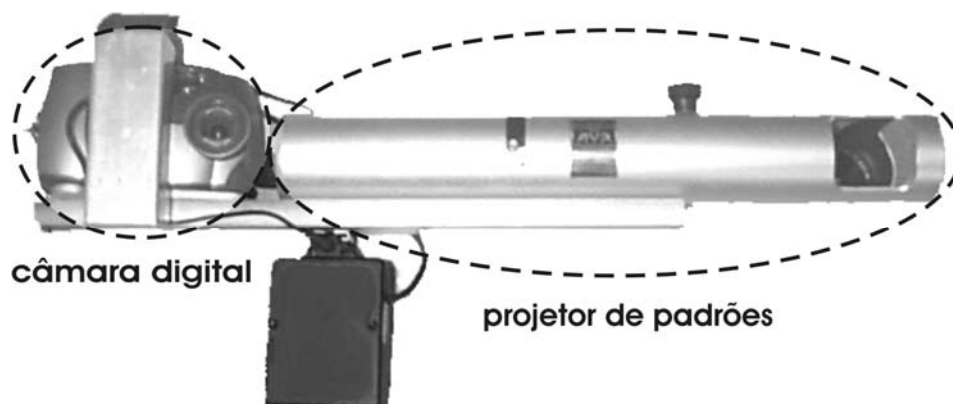


Figura 1 – Estrutura física do sistema de reconstrução

O sincronismo entre a iluminação do projetor e o disparo da câmara é realizado por meio de uma fotocélula conectada ao *flash* do projetor e acoplada ao *flash* da câmara. Detalhes sobre a concepção do sistema serão abordados nas seções seguintes.

0.0.0 CÂMARA DIGITAL

Uma câmara Kodak, modelo DX 3500, foi empregada na construção do protótipo deste sistema de reconstrução 3D por luz estruturada. Esta câmara possui distância focal nominal de 38 mm, e sua resolução máxima é de 1800x1200 píxeis, sendo o tamanho de seu elemento sensor (píxel) de 19,44 μm .

A característica proeminente para utilização desta câmara é que seu foco é fixo, implicando em maior estabilidade e confiabilidade nas coordenadas do ponto principal e na distância focal, parâmetros estes determinados por processo de calibração de câmaras. Entretanto, várias outras marcas e modelos

câmaras digitais de média resolução estão comercialmente disponíveis e poderiam ser empregadas para a construção de sistemas de reconstrução.

Uma característica importante a ser observada no sistema é o sincronismo entre a captura da imagem e a projeção dos padrões sobre a superfície do objeto. Uma possibilidade é manter o sistema de iluminação do projetor ligado continuamente durante as capturas de imagens. Entretanto, esta solução não é a mais adequada, pois consumiria mais energia do que pode ser fornecido por baterias de pequeno porte, necessitando de uma fonte de energia externa, e também poderia superaquecer o sistema projetor. Um outro problema ocorreria, caso o *flash* da câmara estivesse ligado, iluminando o objeto e diminuindo o contraste entre o fundo da imagem e os padrões projetados. Para evitar estas duas situações decidiu-se utilizar uma fotocélula que captasse o instante de tomada da fotografia por meio do *flash* da câmara e acionasse o sistema de iluminação do projetor. Esta fotocélula, posicionada em frente ao *flash* da câmara (Figura 2b) por meio de um suporte também impede que luz seja emitida pelo *flash* da câmara sobre os objetos, eliminando o problema de redução de contraste.

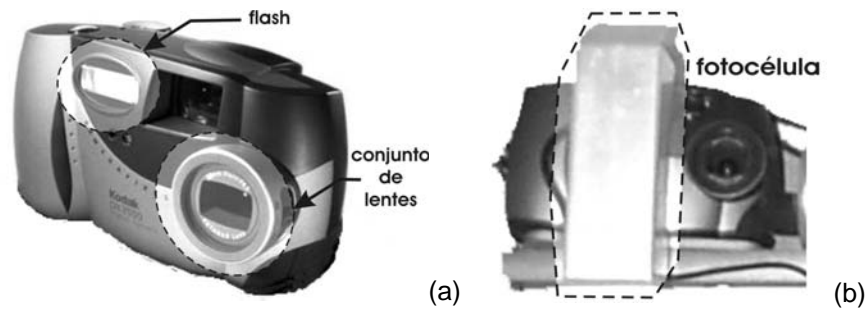


Figura 2 – Câmara digital e fotocélula. (a) flash da câmara e conjunto de lentes; (b) fotocélula em seu suporte.

Esta câmara teve seus parâmetros de orientação interior determinados por meio de um processo de calibração de câmaras por feixe de raios (bundle method) (BROWN, 1971) usando o programa CC (GALO et al, 1999). Foram considerados apenas os parâmetros mais significativos, sendo eles a distancia focal f , o deslocamento do ponto principal (x_0, y_0) e o primeiro parâmetro de distorção radial simétrica K_1 . Os resultantes são mostrados na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 – Parâmetros de orientação interior calibrados

Parâmetros	Valores estimados	Desvios-padrão estimados
f (mm)	38,329	0,012
x_0 (mm)	-0,297	0,008
y_0 (mm)	-0,226	0,013
K_1 (mm ²)	-0,000102184	$0,3984 \times 10^{-6}$

0.0.0 PROJETOR DE PADRÕES

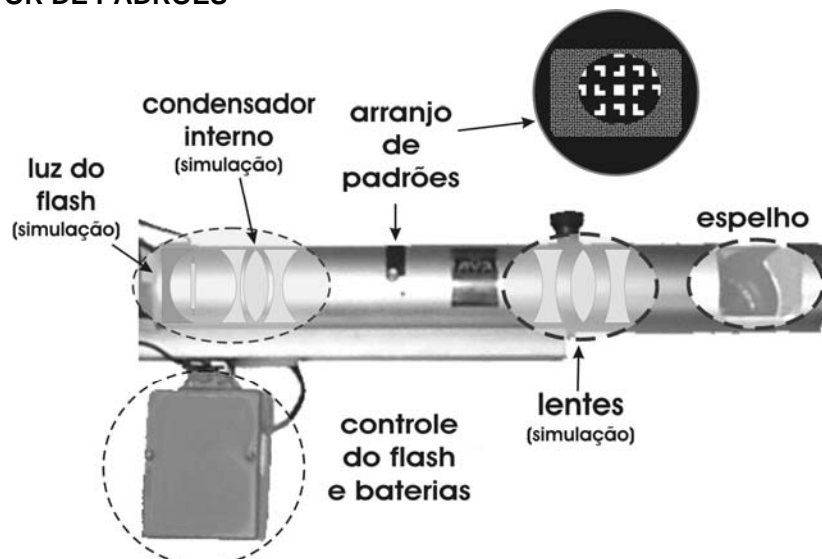


Figura 3 – Estrutura do projetor de padrões

0.0.0 DEFINIÇÃO DOS PADRÕES

Os padrões a serem projetados devem permitir que o seu reconhecimento automático baseado nas características que os constituem, pois cada um deve poder ser identificado individualmente entre os demais. Um problema de reconhecimento restrito e bem definido, com pequenas variações entre os elementos de uma classe e grandes variações entre as classes dos elementos, acarretará em uma representação compacta dos padrões e em uma estratégia de tomada de decisão mais simples (JAIN, *et al*, 2000). Baseado nessas considerações, e devido a grande quantidade de padrões que deveriam ser projetados para dar maior consistência ao modelo 3D a ser reconstruído, viu-se dificuldade de se encontrar padrões distintos entre si para todo o conjunto de padrões necessário e, ao mesmo tempo, manter as variações interclasses máxima e as variações intraclasses mínima. Assim, pensou-se em criar um conjunto de padrões com variações de forma e disposição em arranjos combinatórios, propiciando-se, assim a possibilidade de identificação unívoca. Cinco classes de padrões foram criadas e designadas pelas cinco primeiras letras do alfabeto: (A), (B), (C), (D) e (E), como mostra a Figura 4.

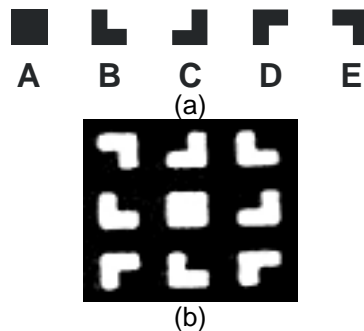


Figura 4 – Padrões projetados: (a) Cinco primitivas de padrões; (b) Exemplo de um arranjo de 9 padrões obtidos em uma imagem real.

A disposição em arranjos proporciona uma relação de vizinhança entre os padrões, tornando possível a identificação unívoca de cada padrão. A região de vizinhança de padrões mínima estabelecida, denominada de célula de padrões, corresponde a uma máscara de elementos de dimensão 3x3 com um padrão (A) no seu centro e das demais classes nas outras posições. Desta forma, uma primeira heurística estabelecida é que não há um padrão (A) ao lado de outro (A). Denominando o padrão (A) de pivô, devido a sua posição central, a segunda heurística estabelecida é que não há uma célula semelhante à outra dentro de um raio de 4 pivôs, e onde há semelhança, ela é de no máximo 50%. Com nestas heurísticas estabelecidas, foi gerada uma matriz de padrões, com o auxílio de um programa computacional criado especificamente para esta tarefa, de 36 linhas por 54 colunas, num total de 1944 padrões. São eles 216 (A), 434 (B), 429 (C), 424 (D) e 441 (E).

Para o processo de reconstrução, além dos centros de massas dos padrões projetados, podem ser utilizados os pontos dos cantos dos padrões; desta forma tem-se um total de 11232 pontos disponíveis para a reconstrução além dos 1944 centros de massa. Cada um destes pontos representa um vetor diretor do projetor que deve ser conhecido.

0 CALIBRAÇÃO DO PROJETOR

Foi desenvolvido um método para a calibração do sistema projetor baseado em dois passos principais. Antes de calibrar o projetor é necessário determinar os parâmetros de orientação externa da câmara no instante de tomadas das imagens para a calibração do projetor.

Este primeiro passo é realizado por meio de um processo de ressecção espacial. O segundo passo, trata da determinação dos parâmetros de calibração do projetor, que são os cossenos diretores de cada padrão projetado e as coordenadas do projetor, todos no referencial da câmara.

Foi criado um modelo específico que faz a relação entre as coordenadas 3D dos padrões projetados sobre uma superfície plana com os parâmetros de orientação exterior das imagens e os parâmetros de calibração do projetor.

A metodologia de calibração é seqüencial, com as etapas mostradas na Figura 5.

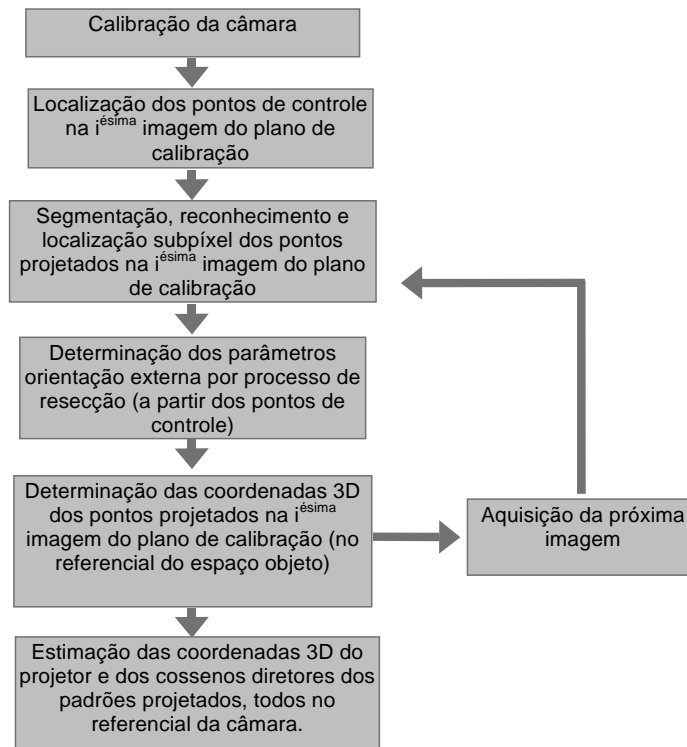


Figura 5 – Principais etapas do método de calibração do sistema projetor.

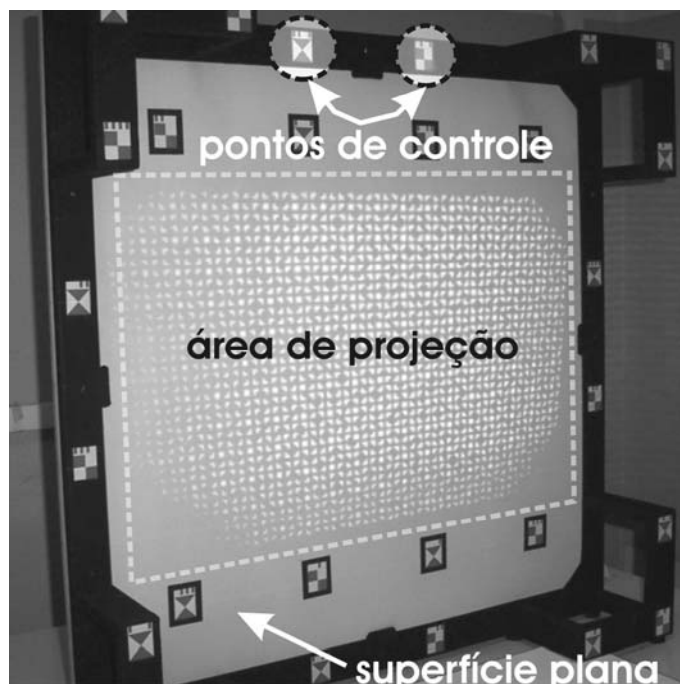


Figura 6 – Plano de calibração do projetor

Inicialmente, várias imagens são tomadas de um plano de calibração construído especificamente para esta finalidade (Figura 6). Alguns pontos de controle foram sinalizados sobre a placa e as medidas de suas fotocoordenadas foram utilizadas para o processo de resecção espacial com a determinação dos parâmetros de orientação exterior das imagens. Com estes parâmetros e as respectivas fotocoordenadas dos padrões projetados, obtidas em um processo de localização automático (KOKUBUM, 2003), foram calculadas as coordenadas 3D dos padrões projetados sobre o plano da central da placa, referenciadas ao sistema do espaço objeto. Como a nuvem de pontos é projetada sobre um plano, a coordenada **Z** dos padrões é arbitrada como zero e as coordenadas **XY** são obtidas por meio do modelo de colinearidade inversa.

Uma vez determinados os parâmetros de OE para todas as imagens, pode-se passar à etapa de calibração do projetor por meio do modelo específico desenvolvido.

0.0 MODELO DE CALIBRAÇÃO

Considerando o sistema de referência da imagem representado pela letra C , com origem no ponto C , o do projetor pela letra P , com origem no ponto P , e o do espaço objeto pela letra G , ao observar a geometria entre estes três sistemas, representada pela Figura 7, para ($i = 1, \dots$, número de imagens; $t = 1, \dots$, número de padrões), tem-se os seguintes elementos (REISS e TOMMASELLI, 2003):

\mathbf{p}_t é o vetor diretor do padrão t no projetor;

$\mathbf{A}_{i,t}$ é a interseção do vetor diretor \mathbf{p}_t com o plano de referência G , na imagem i ;

$\mathbf{a}_{i,t}$ é a projeção de $\mathbf{A}_{i,t}$ na imagem i .

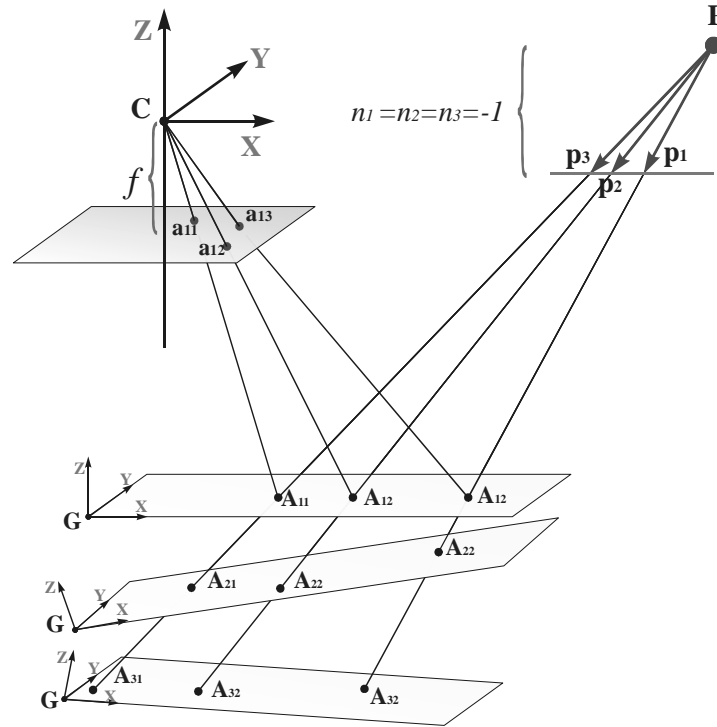


Figura 7 – Conceito geométrico do método de calibração do projetor

Considerando que há uma dependência linear entre os componentes do vetor diretor (l, m, n) , o componente n pode ser considerado um valor unitário. Além disso, n é negativo, pois a orientação do sistema referencial da câmara é negativo em Z em relação ao Z do referencial do objeto. Assim $n = -1$.

Pelos elementos da Figura 7 mencionados, a seguinte relação é observada:

$$\mathbf{R}_i \cdot \begin{bmatrix} X_{i,t}^G - X_{C_i}^G \\ Y_{i,t}^G - Y_{C_i}^G \\ Z_{i,t}^G - Z_{C_i}^G \end{bmatrix} = \lambda_{i,t} \cdot \begin{bmatrix} l_t^C \\ m_t^C \\ n_t^C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_P^C \\ Y_P^C \\ Z_P^C \end{bmatrix} \quad (1)$$

no qual:

\mathbf{R}_i é a matriz de rotação da câmara em relação ao espaço objeto para a tomada de imagem i ;

$X_{i,t}^G, Y_{i,t}^G$ e $Z_{i,t}^G$ são as coordenadas do padrão t projetadas no espaço objeto para a tomada de imagem i ;

$X_{C_i}^G, Y_{C_i}^G$ e $Z_{C_i}^G$ são as coordenadas do centro perspectivo da câmara no referencial do espaço objeto para a tomada de imagem i ;

l_t^C, m_t^C e n_t^C são as componentes do vetor diretor t ;

X_P^C, Y_P^C e Z_P^C são as coordenadas do projetor no referencial da câmara.

Em (1), considerando-se a seguinte simplificação:

$$\mathbf{R}_i \cdot \begin{bmatrix} X_{i,t}^G - X_{C_i}^G \\ Y_{i,t}^G - Y_{C_i}^G \\ Z_{i,t}^G - Z_{C_i}^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ J \\ K \end{bmatrix} \quad (2)$$

Depois de algumas manipulações de (2) em (1), tem-se:

$$\begin{aligned} I &= l_i^C \cdot (K + Z_P^C) - X_P^C \\ J &= m_i^C \cdot (K + Z_P^C) - Y_P^C \end{aligned} \quad (3)$$

Nas equações (3), os elementos da matriz de rotação e o centro perspectivo da câmara são determinados em um passo anterior mencionado. As coordenadas do projetor e os dois componentes do vetor diretor expressados em (3), (l, m) são estimados em um processo de ajustamento de observações e parâmetros, iterativo e simultâneo (MIKHAIL, 1976). A matriz variância-covariância dos elementos (I, J) é obtida por propagação de covariâncias. Os elementos K são considerados como constantes, e (I, J) são considerados como pseudo-observações. A estimativa dos (l_i, m_i) e (X_P, Y_P, Z_P) é realizada usando o Método dos Quadrados Mínimos.

São necessárias, no mínimo, duas imagens do plano de calibração com padrões projetados e com orientações diferentes. Também é necessário um mínimo de quatro padrões projetados para a determinação das coordenadas do projetor. Um mesmo padrão projetado deve aparecer em pelo menos duas imagens para que seu vetor diretor seja determinado. Cada um dos vetores diretores deve ser normalizado considerando $n = -1$.

0 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

0.0 EXPERIMENTOS COM DADOS SIMULADOS

Extensivos experimentos foram realizados com dados simulados para verificar a viabilidade do modelo de calibração (REISS e TOMMASELLI, 2003), mostrando que o modelo obtido poderia ser aplicado ao propósito de calibração do projetor. A ordem de grandeza da diferença entre o valor conhecido e os valores obtidos para as componentes dos vetores diretores foi inferior a $1,8 \cdot 10^{-4} \text{mm}$. Para as coordenadas do CP do projetor, a maior diferença foi inferior a 1,0mm. O ajustamento com a utilização do modelo recuperou os vetores diretores dos padrões projetados e as translações do projetor em relação à câmara, mostrando que a metodologia funcionaria dentro do esperado.

0.0 EXPERIMENTOS COM DADOS REAIS

Foram adquiridas seis imagens do plano de calibração. Os pontos de controle foram medidos interativamente em um monocomparador digital. A Tabela 2 apresenta um exemplo de grupo de parâmetros de orientação exterior e seus respectivos desvios-padrão estimados.

Tabela 2 – Parâmetros de orientação exterior estimados e seus respectivos desvios-padrão

Imagem	Rotações estimadas (graus)		Desvios-padrão estimados (graus)	Translações estimadas (mm)		Desvios-padrão estimados (mm)
1	κ	0,541	0,025	X_C^G	476,6	2,2
	φ	4,791	0,112	Y_C^G	336,0	2,0
	ω	359,736	0,102	Z_C^G	1079,6	0,8

Devido à grande quantidade de vetores diretores, foram considerados apenas os centros de massa dos padrões para a calibração do projetor. Os 1944 padrões foram detectados, 123 foram eliminados e 1821 foram medidos usando o centro de massa. Em seguida, os vetores diretores destes padrões e as coordenadas do centro perspectivo do projetor foram calibrados utilizando o método desenvolvido e mencionado.

As coordenadas do projetor e seus respectivos desvios-padrão estimados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Coordenadas do projetor calibradas e seus respectivos desvios-padrão.

Coordenadas do projetor (mm)			Desvios-padrão estimados (mm)		
X_P^C	Y_P^C	Z_P^C	$\sigma_{X_P^C}$	$\sigma_{Y_P^C}$	$\sigma_{Z_P^C}$
479,126	-27,729	534,052	1,150	0,739	4.355

A Tabela 4 mostra alguns dos vetores diretores estimados no passo de calibração.

Tabela 4 – Cossenos estimados dos vetores diretores dos padrões.

Identificação do vetor diretor				Vetores diretores (considerando n=-1)		Desvios-padrão estimados	
linha	coluna	ponto	classe	$l_{i,j}^C$	$m_{i,j}^C$	$\sigma_{l_{i,j}^C}$	$\sigma_{m_{i,j}^C}$
01	06	0	B	0,077	0,128	0,001	0,003
07	02	0	B	0,050	0,085	0,001	0,005
14	11	0	A	0,115	0,036	0,001	0,001
29	40	0	E	0,337	-0,073	0,001	0,001

Como resultado do processo de estimação, o χ^2 amostral foi 192,5 com 17429 graus de liberdade. Considerando que o χ^2 teórico para 1000 graus de liberdade e 5% de significância é 107 os parâmetros estimados podem ser aceitos com o nível de significância de 5%.

0.0.0 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Uma vez que as coordenadas reconstruídas a partir dos padrões projetados sobre uma das placas de calibração deveriam gerar uma superfície plana perfeita, a forma encontrada para avaliar os resultados da calibração dos vetores diretores foi a seguinte:

- Executar o processo de reconstrução sobre uma dessas imagens;
- Efetuar uma regressão de uma superfície plana sobre as coordenadas 3D reconstruídas; e,
- Comparar as coordenadas Z da reconstrução com as da regressão por meio de discrepâncias. A partir das discrepâncias obtidas foi calculado o erro médio quadrático.

Ao imprimir o gráfico da superfície reconstruída (Figura 7) de uma das placas de calibração, foi verificada a existência de um conjunto de pontos com erros grosseiros. Após perscrutar a causa destes erros sobre o conjunto de dados da calibração, foram encontrados erros grosseiros de medida das coordenadas do centro de massa dos padrões projetados.

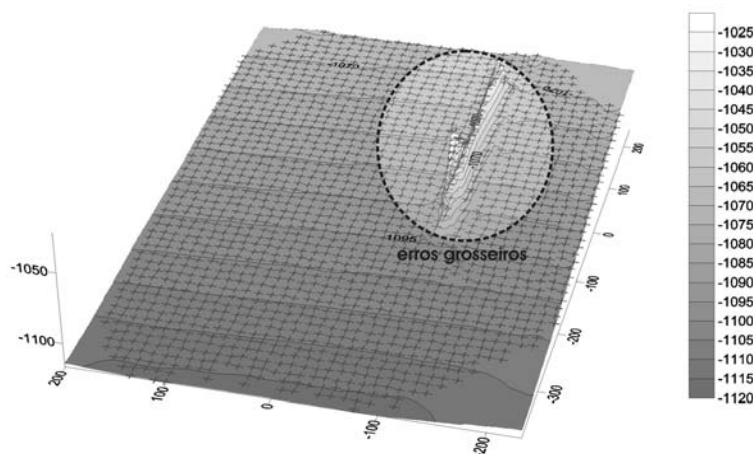


Figura 8 – Reconstrução de um modelo 3D mostrando alguns erros grosseiros.

Duas linhas inteiras, as 25 e 27, onde os erros de medida ocorreram, foram eliminadas do modelo. Em uma das linhas, a de número 26, que possui uma seqüência de pivôs (A), observou-se que os padrões (A) estavam corretos. Sendo assim, os demais tipos de padrões desta linha foram eliminados, permanecendo os padrões (A).

Com isso, o modelo de superfície foi novamente gerado, com as devidas correções, resultando no que pode ser visto na Figura 9.

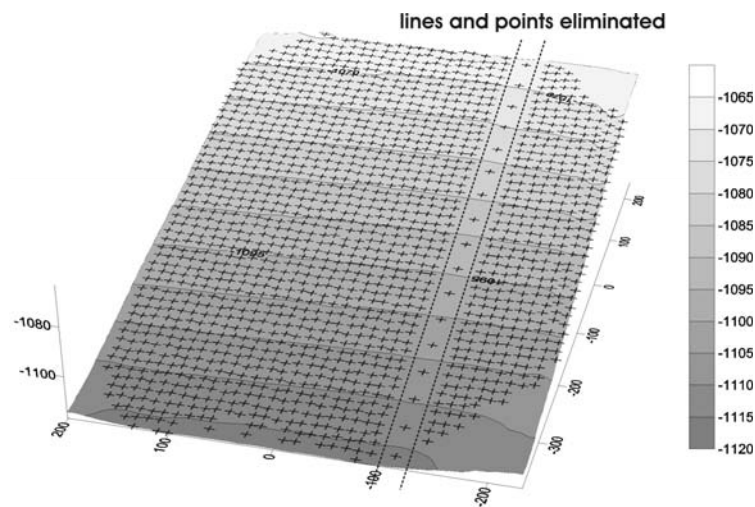


Figura 9 – Reconstrução de um modelo 3D sem erros grosseiros.

Partindo dos dados do modelo corrigido, foi realizada a regressão da superfície plana. Comparando as coordenadas **Z** ajustadas e reconstruídas, o erro médio quadrático em **Z** obtido foi de **0,44 mm**, com um máximo de 3,74 mm.

0 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um método para a calibração do projetor de um sistema de luz estruturada. Este método procurou resolver alguns problemas em relação às versões anteriores. A restrição de que os planos de projeção fossem paralelos (TOMMASELLI, 1998) foi relaxada; o modelo de calibração original (REISS e TOMMASELLI, 2003) foi adaptado para utilizar um modelo estocástico que permitiu a estimação pelo método paramétrico, o que resultou em menor custo computacional.

A precisão na reconstrução de um plano mostrou a exeqüibilidade do processo e sua confiabilidade submilimétrica. Pode-se afirmar que esta precisão pode ser melhorada, estando em desenvolvimento algoritmos de extração das coordenadas dos cantos dos padrões, com exatidão sub-pixel. Isto terá impacto no processo de calibração, pois o número de pontos a serem usados será quadruplicado e a qualidade das medidas de cada ponto também será melhorada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALLARD, D. H.; BROWN, C. M. **Computer Vision**. Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1982.

BROWN, D., "Close-Range Camera Calibration", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 37(8), (1971),855-866.

BEUMIER, C.; ACHEROY, M. **Face Verification from 3D and Grey Level Clue**. Pattern Recognition Letters, Elsevier, 22, 2001, 1321-1329.

DUNN, S. M.; KEIZER, R. L.; YU, J. **Measuring the Area and Volume of the Human Body with Structured Light**. IEEE Translations on Systems, Man, And Cybernetics, V. 19, nº 6, November/December 1989.

GALO, M.; TOMMASELLI, A.M.G.; HASEGAWA, J.K. **Avaliação geométrica de câmaras de vídeo para uso em Fotogrametria Digital**. In: XIX Congresso Brasileiro de Cartografia, Recife, 1999, Anais de Congresso, Recife 1999. v. 1, p. 1-10.

GEMAEL, CAMIL, **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**, Curitiba: Ed, UFPR, 1994, 314p.

KOKUBUM, C. N. C; TOMMASELLI, A. M. G. **Reconhecimento automático de alvos**. In XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, Belo Horizonte – MG, 2003, Anais de Congresso, 2003, Belo Horizonte – MG.

REISS, M. L. L.; TOMMASELLI, A. M. G. **Reconstrução 3D por Luz Estruturada: Calibração dos Vetores Diretores do Feixes de Padrões Projetados**. In XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, Belo Horizonte – MG, 2003, Anais do Congresso, Belo Horizonte, 2003 – MG.

SCALCO, P. A. P. **Determinação Automática de Correspondência em Um Sistema de Reconstrução com Luz Estruturada**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Unesp, Presidente Prudente, 2000, 74p.

SIMPLE 3D. **3D Scanners, Digitizers, and Software for making 3D Models and 3D Measurements**. Web Site: [HTTP://WWWX.NETHEAVEN.COM/~SIMPLE3D/INDEX.HTML](http://WWWX.NETHEAVEN.COM/~SIMPLE3D/INDEX.HTML), Janeiro – 2003.

TOMMASELLI, A. M. G. **Implementação de Um Sistema Fotogramétrico Digital Para Reconstrução de Imagens**. Relatório Final de Bolsa de Pesquisa, nível 2c, apresentado ao CNPq, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Unesp, Presidente Prudente, 1997, 115p.

TOMMASELLI, A. M. G. **Caracterização Geométrica de um Sistema Fotogramétrico Digital para Reconstrução de Imagens de Superfícies à Curta Distância**. Tese de Livre Docência, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Unesp, Presidente Prudente, 1998.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seus agradecimentos à FAPESP (Fundação de Amparo de Pesquisa do Estado de São Paulo) pela concessão de bolsa de Doutorado para o desenvolvimento do projeto “*Reconstrução Tridimensional Digital de Objetos a Curta Distância por Meio de Luz Estruturada*”, no qual este trabalho é baseado. Processo FAPESP 02/01886-8.