

# AVALIAÇÃO DO SISTEMA CÂMARA DE VÍDEO + NU-VIEW PARA RECONSTRUÇÃO DE SUPERFÍCIES À CURTA DISTÂNCIA

*Assessment of video camera + Nu-View system for close-range surface  
reconstruction*

ANTÔNIO DE OLIVEIRA ALVES <sup>1</sup>  
ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI <sup>2</sup>  
MAURÍCIO GALO <sup>2</sup>

<sup>1</sup>UNOESTE – Departamento de Informática  
Rodovia Raposo Tavares KM 572  
19067-175 – Presidente Prudente – SP  
e-mail: antonio@apec.unoeste.br

<sup>2</sup>FCT/UNESP – Departamento de Cartografia  
Rua Roberto Simonsen, 305 – CP467  
19060-900 - Presidente Prudente – SP  
e-mail: {galo, tomaseli}@prudente.unesp.br

## RESUMO

A utilização de câmaras de vídeo em aplicações fotogramétricas à curta distância, proporciona alguns benefícios tais como: baixo custo do equipamento e facilidade na aquisição das imagens. O sistema Nu-View, fabricado pela 3-D Vídeo Inc., é um adaptador estereoscópico para câmaras de vídeo que, quando acoplado às lentes, gera pares de imagens estereoscópicas. Utilizando óculos de cristal líquido e uma TV comum, as cenas gravadas podem ser visualizadas no espaço tridimensional. Estas imagens gravadas também podem ser consideradas para finalidades métricas. O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial de exatidão das imagens estereoscópicas geradas pelo sistema câmara+Nu-View, na reconstrução de superfícies.

## ABSTRACT

The use of video cameras in close range photogrammetric applications provides some benefits such as low cost of the equipment and easiness in the image acquisition. The Nu-View system, manufactured by 3-D Video Inc., is a

stereoscopic adapter for video cameras that generates stereoscopic pairs of images, when coupled to the camera lenses. By using liquid crystal glasses and one standard TV, the scenes recorded can be viewed in three-dimensional space. These recorded images can also be considered for metric purposes. The aim of this paper is to evaluate the accuracy potential of the stereoscopic images generated by the video camera + Nu-view system in surface reconstruction.

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com COOPER e ROBSON (1996), o termo Fotogrametria à curta distância é usado para descrever a técnica que procura reconstruir superfícies de objetos que possuam extensões menores que 100 metros, através de medições em imagens destes objetos. Para estas aplicações podem ser utilizados diversos tipos de sensores, tais como: câmaras métricas, câmaras não-métricas, câmaras de vídeo ou câmaras digitais. Uma alternativa econômica para gerar imagens estereoscópicas é o do uso de uma câmara de vídeo VHS “*camcorder*”, em conjunto com um adaptador estereoscópico. A 3-D Vídeo Inc desenvolveu um sistema chamado de NU-View, que é um adaptador estereoscópico para câmaras de vídeo. Quando acoplado às lentes da câmara este sistema gera pares de imagens estereoscópicas, que por sua vez permitem visualização tridimensional dos objetos presentes no campo visual.

Como as câmaras de vídeo VHS e também o sistema NU-View não foram projetados para serem utilizados em aplicações fotogramétricas, há a necessidade de serem realizadas avaliações do conjunto, com o propósito de determinar a aplicabilidade do sistema na recuperação da posição tridimensional dos objetos presentes nas imagens.

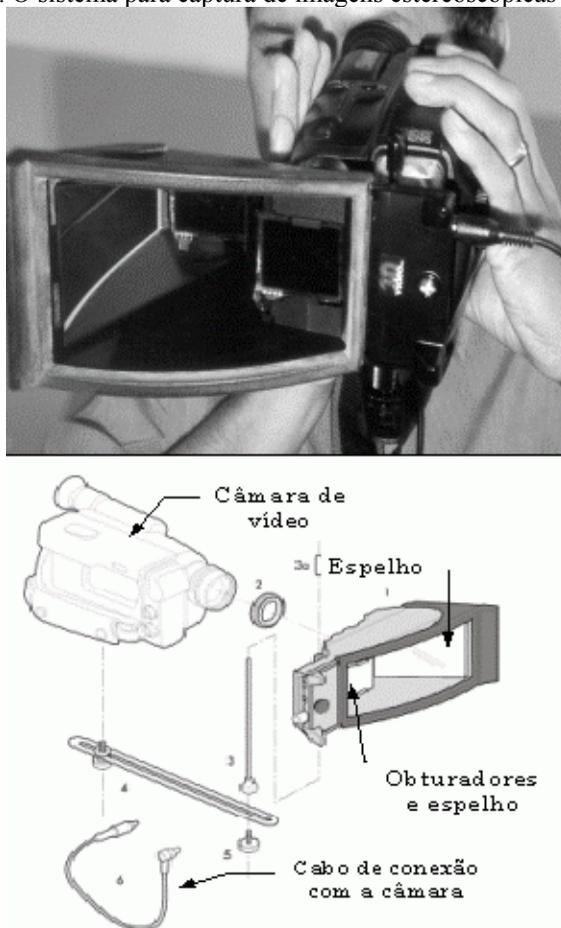
O objetivo desse trabalho é avaliar o potencial geométrico do sistema Nu-View, fabricado pela 3-D Vídeo Inc, para a reconstrução de imagens à curta distância em conjunto com uma câmara de vídeo VHS.

## 2 SISTEMA DE IMAGEAMENTO ESTEREOSCÓPICO: CÂMARA DE VÍDEO + NU-VIEW

O sistema de captura de imagens estereoscópicas da Nuvision permite a gravação de estereopares, no modo entrelaçado, que podem ser visualizados com óculos de cristal líquido. As imagens gravadas em formato VHS podem ser digitalizadas e separadas em um estereopar, para permitir a reconstrução dos objetos presentes na cena.

A Figura 1 mostra a configuração do sistema de captura, que pode ser acoplado a qualquer câmara de vídeo VHS. O sistema é composto de espelhos e de dois obturadores de cristal líquido (LCSs – *Liquid Crystal Shutters*), que são sincronizados via cabo, permitindo que estes obturadores trabalhem na mesma frequência vertical da câmara. Com isto, quando o campo par estiver sendo gerado, o obturador impede a entrada da luz proveniente do espelho e, quando o campo ímpar estiver sendo gerado somente a luz refletida pelo espelho é gravada.

Figura 1. O sistema para captura de imagens estereoscópicas em vídeo.



Pode-se imaginar o sistema como duas câmaras separadas, posicionadas a 2,2" (56 mm) uma da outra, pouco menos que a média da distância interpupilar humana. Esta distância forma a estereo-base do sistema.

Durante o processo de gravação os LCSs abrem e fecham sincronizadamente, para permitir a gravação da imagem direta e da imagem refletida pelo espelho. As duas imagens são gravadas em campos alternados da fita de vídeo. Para visualizar as imagens em uma televisão comum são utilizados óculos de cristal líquido, que consistem de dois obturadores de cristal líquido que abrem e fecham de modo sincronizado com os campos pares e ímpares gravados na fita de vídeo. O obturador da esquerda é aberto e o da direita fechado quando a imagem da esquerda é exibida,

e vice-versa com a imagem direita. (TOMMASELLI e ALVES, 2001; ALVES, 2002)

### 3 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

As equações projetivas ou de colinearidade permitem transformar as coordenadas do espaço objeto para o espaço imagem. Estas equações, acrescidas dos erros sistemáticos, são:

$$\begin{aligned} x'_m &= x_0 + \Delta x - f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ y'_m &= y_0 + \Delta y - f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (01)$$

onde:

$x'_m, y'_m$  - coordenadas observadas em um sistema com origem no centro da imagem;

$x_0, y_0$  - coordenadas do ponto principal, em relação ao centro da imagem;

$\Delta x, \Delta y$  - efeitos das distorções óticas nas coordenadas;

$m_{ij}$  - elementos da matriz rotação  $M = Mz(\kappa) My(\phi) Mx(\omega)$ ;

$f$  - distância focal da câmara;

$X, Y, Z$  - coordenadas do ponto no espaço objeto;

$X_0, Y_0, Z_0$  - coordenadas do centro perspectivo da câmara em relação ao espaço objeto.

Na Fotogrametria à curta distância os erros sistemáticos que são normalmente considerados na formação do modelo são as distorções radial, descentrada e de afinidade (modela um fator de escala em  $x$  e a não ortogonalidade entre os eixos do sistema de máquina). Os parâmetros que descrevem estes erros podem ser determinados através de um processo de calibração.

A calibração de câmara é a parametrização das discrepâncias que ocorrem na geometria de formação da imagem, em relação à geometria da projeção perspectiva central. Os parâmetros a serem determinados são:

- Distância focal ( $f$ ) e o deslocamento do ponto principal ( $x_0, y_0$ );
- Distorção radial da lente ( $K_1, K_2, K_3$ );
- Distorção descentrada ( $P_1, P_2$ );
- Parâmetros de afinidade ( $A, B$ ).

Em conjunto com os parâmetros de orientação interior, são também determinados os parâmetros de orientação e posição da câmara em relação ao sistema de coordenadas do espaço objeto (parâmetros de orientação exterior). Todos

estes parâmetros são estimados aplicando-se o método dos mínimos quadrados ao modelo (1).

Para a calibração do sistema foi utilizado o programa *CC* (Calibração de Câmaras) (GALO, 2002). O algoritmo empregado neste aplicativo é uma extensão do método de fototriangulação por feixes perspectivos, considerando-se os elementos de orientação interior e exterior e as coordenadas dos pontos no espaço objeto como parâmetros e as fotocoordenadas como observações (no sistema com origem no centro da imagem, sem a eliminação dos erros sistemáticos). O aplicativo admite injunções em quaisquer dos parâmetros, embora normalmente sejam empregadas em pontos com coordenadas conhecidas (pontos de apoio).

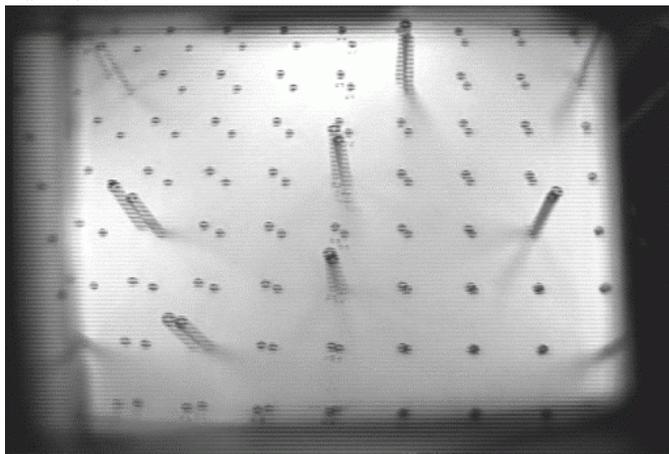
#### **4 EXPERIMENTOS COM A RECONSTRUÇÃO DE SUPERFÍCIES USANDO O SISTEMA CÂMARA DE VÍDEO + NU-VIEW**

Foi utilizado como campo de teste tridimensional uma placa de invar, que possui 88 pontos de apoio distribuídos em um arranjo matricial com espaçamento de 100 mm entre as células, dos quais 10 têm altura de 146 mm, com o objetivo de quebrar a correlação entre alguns dos parâmetros de calibração.

Na aquisição das imagens foram feitas tomadas convergentes em quatro posições diferentes do campo de teste tridimensional, e uma tomada vertical. Com o objetivo de adquirir imagens somente do campo de teste tridimensional, o ângulo de abertura utilizado na câmara de vídeo foi o maior possível, sendo mantido fixo para todas as tomadas.

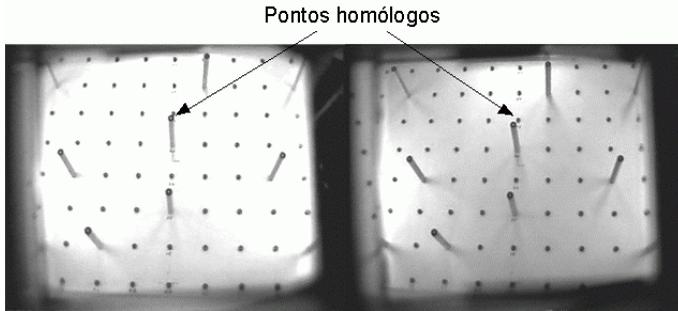
As imagens entrelaçadas (quadros) foram gravadas no formato BMP (Imagem de Bitmap) com tamanho de 720 pixels (colunas) x 480 pixels (linhas). (Figura 2)

Figura 2: Exemplo de imagem entrelaçada gerada pelo sistema câmara de vídeo + Nu-View.



O desentrelaçamento das imagens foi realizado no software Adobe Photoshop 5.5, gerando a imagem esquerda a partir das linhas ímpares, e a imagem direita com as linhas pares, para que possam ser medidas de modo independente (Figura 3).

Figura 3: Imagens desentrelaçadas geradas pelo sistema câmara de vídeo + NU-View.



Foram realizados dois grupos de experimentos, ambos usando o programa CC (Calibração de Câmaras). No primeiro grupo os experimentos foram realizados com cinco pares de imagens (processamento simultâneo dos modelos), e no segundo utilizou-se somente um par de imagens (processamento de um modelo isolado).

#### 4.1 Processamento Simultâneo dos Modelos

Inicialmente realizou-se a calibração do sistema câmara de vídeo + Nu-View (Vídeo-Estereocâmara), com o intuito de obter os parâmetros de orientação interior ( $f \ x_0 \ y_0 \ K_1 \ A \ B$ ) e orientação exterior ( $\kappa \ \varphi \ \omega \ X_0 \ Y_0 \ Z_0$ ), podendo com isto verificar se os parâmetros de orientação interior das imagens da esquerda (campos ímpares) e direita (campos pares) são os mesmos.

Para isto foram processados blocos de imagens pares e ímpares em separado e, posteriormente, foi realizado o processamento simultâneo de todas as imagens pares e ímpares.

##### 4.1.1 Calibração

O processamento foi definido como bloco variante, isto é, admitiu-se que os parâmetros de orientação interior permanecem estáveis para o bloco de imagens, sendo determinados os seguintes parâmetros de orientação interior: distância focal, posição do ponto principal, coeficiente  $K_1$  da distorção radial simétrica e parâmetros de afinidade  $A$  e  $B$ .

Nas opções utilizadas acima, levou-se em conta experimentos realizados por GALO (1993), onde concluiu-se que na calibração da câmara de vídeo os

parâmetros  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $P_1$  e  $P_2$  não contribuem para a melhoria da solução dos parâmetros de calibração.

O experimento foi realizado em três etapas:

1. No início foi realizada a calibração de cada imagem do par de imagens isoladamente, com o objetivo apenas de verificar os valores aproximados dos parâmetros  $f$ ,  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $K_1$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $\kappa$ ,  $\varphi$ ,  $\omega$ ,  $X_0$ ,  $Y_0$  e  $Z_0$ . As coordenadas dos pontos no espaço objeto ( $X, Y, Z$ ) também foram consideradas como parâmetros e aplicadas injunções, excetuando-se 5 pontos que não foram fixados com o objetivo de verificar as discrepâncias em suas coordenadas;
2. Processou-se a calibração das imagens agrupadas em dois conjuntos: um com as imagens pares e outro com as imagens ímpares. Posteriormente foi realizada a calibração simultânea considerando todas as imagens, sendo utilizados os mesmos pontos de verificação da etapa 1;
3. Nesta etapa realizou-se a auto-calibração, determinando-se os parâmetros da orientação interior, orientação exterior e as coordenadas de pontos no espaço objeto, num único processamento. Os processamentos foram realizados de modo análogo às etapas anteriores, ou seja: com as imagens pares, com as imagens ímpares e com todas as imagens, sendo fixados apenas cinco pontos de apoio.

#### 4.1.2 Resultados da Calibração

Foram processadas simultaneamente as imagens pares e ímpares em blocos separados, com cinco imagens em cada bloco. Posteriormente, agruparam-se em um bloco todas as imagens (10 imagens). Os valores determinados nas calibrações em separado foram utilizados como parâmetros aproximados para a calibração de todas as imagens simultaneamente.

Do total de setenta e oito pontos do espaço objeto, cinco deles não tiveram suas coordenadas fixadas, para serem usados como pontos de verificação. Os pontos de apoio foram injuncionados com desvios padrão de 0,05 mm.

Na Tabela 1 são mostrados os resultados obtidos para os parâmetros de orientação interior das imagens ímpares, pares e do conjunto todo. Pode-se verificar que os desvios padrão são aceitáveis; o desvio padrão da distância focal, por exemplo, está na casa de  $3 \times 10^{-2}$  mm. Além disso, os desvios padrão no conjunto com todas as imagens são os menores, podendo-se supor que os parâmetros da orientação interior deste grupo são os mais confiáveis.

As diferenças entre parâmetros, mostradas na Tabela 1, sinalizam que os resultados da calibração para os três grupos considerados estão sempre dentro de um intervalo, confirmando que estes resultados são consistentes e podem ser usados para processamentos futuros.

Outro valor que comprova a consistência dos resultados é a variância da unidade de peso a posteriori (Tabela 2), sinalizando que os valores das coordenadas

observadas tiveram desvios padrão abaixo de um pixel (tamanho do pixel = 0,007 mm).

Tabela 1 – Parâmetros da orientação interior obtidos nos experimentos de calibração.

		CALIBRAÇÃO					
		Parâmetros					
		f (mm)	x <sub>0</sub> (mm)	y <sub>0</sub> (mm)	K <sub>1</sub> (mm <sup>-2</sup> )	A	B
Imagens	Ímpares	6,21990	0,00240	0,09180	-0,00409	0,09317	-0,00134
	Pares	6,19950	0,01610	0,06540	-0,00313	0,09282	-0,00131
	Todas	6,21190	0,00340	0,08200	-0,00365	0,09301	-0,00134
Desvios padrão	Ímpares	0,03370	0,01260	0,02970	0,00020	0,00070	0,00070
	Pares	0,03534	0,01411	0,02866	0,00020	0,00069	0,00066
	Todas	0,02438	0,00940	0,02077	0,00013	0,00049	0,00046
Diferenças	Ímpares e Pares	0,02040	0,01370	0,02640	0,00095	0,00035	0,00003
	Ímpares e Todas	0,00800	0,00100	0,00980	0,00040	0,00020	0,00000
	Pares e Todas	0,01240	0,01270	0,01660	0,00050	0,00019	0,00003

Tabela 2 – Estatística da calibração de todas as imagens juntas.

PARÂMETRO	VALOR
Variância da unidade de peso a priori (mm)	0,00700
Variância da unidade de peso a posteriori (mm)	0,00484
Razão entre variância posteriori e priori	0,6910

As discrepâncias entre os valores fototriangulados e os valores verdadeiros das coordenadas dos pontos de verificação na calibração são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 – Discrepâncias nos pontos de verificação (em cada componente).

DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO			
Ponto	Ex (mm)	Ey (mm)	Ez (mm)
20	-0,75	0,39	-1,53
81	0,51	-0,44	0,10
93	-1,46	2,06	2,39
27	1,56	-0,20	-0,47
87	-1,23	0,33	-2,96
EMQ	1,18	0,97	1,85

Pode-se observar que o maior erro médio quadrático (EMQ) entre as coordenadas calculadas é de 1,85 mm, confirmando a consistência dos valores determinados para os parâmetros de orientação interior. As Tabelas 4 e 5 relacionam os parâmetros de orientação exterior calculados e seus desvios padrão para somente um par de imagens, do conjunto de 5 pares.

Tabela 4 – Parâmetros de orientação exterior (ângulos de rotação) de um par de imagem, obtidos na calibração.

ÂNGULOS DE ROTAÇÃO OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO					
$\kappa^\circ$	$\varphi^\circ$	$\omega^\circ$	Desvios padrão (Graus)		
0,692	2,006	23,379	0,047	0,126	0,215
-0,119	5,699	24,026	0,052	0,132	0,220

Tabela 5 – Coordenadas dos centros perspectivos de um par de imagem obtidos na calibração.

COORDENADAS DOS CPs					
$X_0$ (mm)	$Y_0$ (mm)	$Z_0$ (mm)	Desvios padrão (mm)		
560,132	-241,042	1274,868	2,993	3,519	5,165
641,964	-267,300	1323,765	3,292	3,767	5,383

Pode-se observar pelos resultados da Tabela 4 uma pequena convergência dos eixos ( $\square$ ), uma vez que  $\Delta\square \cong 3,7^\circ$ .

#### 4.1.3 Resultados com Auto-Calibração

Após a realização do processamento da calibração, e com os valores da orientação interior e exterior conhecidos, passou-se ao processamento do mesmo conjunto de dados com o método da auto-calibração.

Na calibração são conhecidos praticamente todos os pontos de apoio, enquanto na auto-calibração somente alguns pontos de apoio são conhecidos.

Foram usados os mesmos procedimentos usados na calibração, isto é, em primeiro lugar foram processadas simultaneamente as imagens pares e ímpares, em blocos separados, e posteriormente agruparam-se em um bloco todas as imagens. Os valores determinados no processamento em separado foram utilizados como parâmetros aproximados para o processamento simultâneo.

Apenas cinco pontos do espaço objeto tiveram suas coordenadas injuncionadas, com desvios padrão iguais a 0,05 mm, sendo os demais tratados como incógnitas.

Comparando-se os resultados da orientação interior obtidos na calibração (Tabela 1) com os da auto-calibração (Tabela 6), considerando o processamento

simultâneo de todas as imagens (Tabela 7), verifica-se uma discrepância pequena em alguns parâmetros ( $f$ ,  $K_1$ ,  $A$  e  $B$ ). As maiores diferenças são observadas nas coordenadas do ponto principal ( $x_0$ ,  $y_0$ ), provavelmente devido à não estabilidade do sistema. Pode-se considerar aceitáveis os dois métodos de obtenção dos parâmetros da orientação interior, mas quando se deseja um maior rigor geométrico deve-se considerar os parâmetros da calibração, visto que foram aplicadas injunções em quase todos os pontos de apoio.

Tabela 6 – Parâmetros da orientação interior obtidos na auto-calibração.

		Parâmetros					
		$f$ (mm)	$x_0$ (mm)	$y_0$ (mm)	$K_1$ (mm <sup>-2</sup> )	A	B
Imagens	Ímpares	6,36940	-0,03780	0,18890	-0,00360	0,09130	-0,00110
	Pares	6,39240	-0,03610	0,21120	-0,00310	0,09130	-0,00110
	Todas	6,41210	-0,03380	0,21650	-0,00345	0,09117	-0,00117
Desvios padrão	Ímpares	0,07520	0,01440	0,05550	0,00060	0,00110	0,00070
	Pares	0,07461	0,01685	0,05430	0,00050	0,00102	0,00073
	Todas	0,05516	0,01064	0,04199	0,00034	0,00082	0,00050

Tabela 7 – Comparação entre parâmetros de orientação interior obtidos com calibração e auto-calibração.

	Calibração	Auto-calibração	Discrepância
$f$ (mm)	6,21190	6,41210	-0,20020
$x_0$ (mm)	0,00340	-0,03380	0,03720
$y_0$ (mm)	0,08200	0,21650	-0,13450
$K_1$ (mm <sup>-2</sup> )	-0,00365	-0,00345	-0,00020
A	0,09301	0,09117	0,00184
B	-0,00134	-0,00117	-0,00017

Na Tabela 8 são mostrados os EMQ nas coordenadas dos pontos de verificação obtidos na auto-calibração. Comparando os resultados da Tabela 8 com os resultados da calibração da Tabela 3, verifica-se um aumento no erro médio quadrático de todas as coordenadas calculadas na auto-calibração, resultados estes já esperados, pois na calibração foram usados 73 pontos de apoio, ao passo que na auto-calibração foram usados somente 5 pontos de apoio. Isto mostra que para processamentos que exijam um maior rigor geométrico, deve-se utilizar os valores da orientação interior definidos na calibração do sistema, ou realizar a auto-calibração com mais pontos de apoio (calibração “*on-job*”). A vantagem da auto-calibração é que poucos pontos de apoio são necessários.

Tabela 8 – Erros Médios Quadráticos (EMQ) dos erros verdadeiros nas coordenadas dos pontos de verificação, na auto-calibração com o processamento de todas as imagens.

Coordenada	EMQ(mm)
X	1,214
Y	1,139
Z	2,110

#### 4.1.4 Fototriangulação

Com o objetivo de testar os parâmetros de orientação interior calculados no processo de calibração, foram realizados experimentos com os mesmos dados, mas considerando estes parâmetros fixos, através do uso de injunções absolutas, o que corresponde à uma Fototriangulação.

Os resultados da fototriangulação usando os parâmetros de orientação interior como injunção estão nas Tabelas 9, 10 e 11, onde são mostrados os resultados dos parâmetros de orientação exterior para um par de imagem, dentre os 5 pares utilizados.

Tabela 9 – Parâmetros de orientação exterior de um par de imagens, obtidos na fototriangulação usando parâmetros de orientação interior calculados na calibração.

ÂNGULOS DE ROTAÇÃO					
$\kappa^\circ$	$\varphi^\circ$	$\omega^\circ$	Desvios padrão (Graus)		
0,69141	2,01788	23,69632	0,05380	0,13220	0,13490
-0,11789	5,69878	24,35173	0,05615	0,13600	0,13850
COORDENADAS DO C.P.					
$X_0$ (mm)	$Y_0$ (mm)	$Z_0$ (mm)	Desvios padrão (mm)		
560,563	-248,748	1273,123	3,309	2,942	2,052
642,127	-275,503	1321,808	3,529	3,129	2,220

Tabela 10 – Estatísticas da fototriangulação com todas as imagens, considerando parâmetros de orientação interior calculados na calibração como injunção absoluta.

PARÂMETRO	VALOR
Variância da unidade de peso a priori (mm)	0,00700
Variância da unidade de peso a posteriori (mm)	0,00413
Razão entre variância posteriori e priori	0,5900

Tabela 11 – Erros Médios Quadráticos nas coordenadas de pontos de verificação obtidos por fototriangulação com todas as imagens, usando os parâmetros calculados na calibração.

Coordenada	EMQ (mm)
X	1,045
Y	1,024
Z	2,093

#### 4.1.5 Fototriangulação usando parâmetros de orientação interior da auto-calibração

Processou-se novamente a fototriangulação, com a diferença que foram utilizados os parâmetros da orientação interior calculados na auto-calibração do sistema. A Tabela 12 apresenta os EMQ da fototriangulação com parâmetros da auto-calibração, podendo-se verificar que são maiores que os do experimento usando os parâmetros calculados na calibração.

Tabela 12 – Erros Médios Quadráticos (EMQ) nos pontos de verificação obtidos por fototriangulação com todas as imagens, considerando parâmetros de orientação interior calculados na auto-calibração.

Coordenada	EMQ(mm)
X	1,214
Y	1,140
Z	2,110

Para verificar a precisão local das coordenadas obtidas com este processamento, foram calculadas as distâncias entre pontos vizinhos. A Tabela 13 mostra as diferenças entre as distâncias calculadas e as distâncias reais para dois pontos (63 e 25) e seus vizinhos.

As diferenças médias das distâncias em torno dos pontos 63 (no centro da imagem) e 26 (na periferia da imagem) são semelhantes e melhores que a acurácia de 1,1 a 2,11 mm (Tabela 12), indicando que os erros calculados são devidos a erros sistemáticos.

Tabela 13 – Distância entre os vizinhos na fototriangulação com auto-calibração.  
 DISTÂNCIAS ENTRE VIZINHOS NA FOTOTRIANGULAÇÃO  
 COM PARÂMETROS AUTO-CALIBRAÇÃO

Ponto	Coord. Calculadas			Coord. conhecidas			Distância		Diferença * (mm)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Calculada (mm)	Real (mm)	
<b>63</b>	<b>600,42</b>	<b>299,59</b>	<b>2,949</b>	<b>600</b>	<b>300</b>	<b>0</b>			
62	600,56	198,96	1,45	600	200	0	100,64	100,00	0,64
53	500,40	299,58	2,38	500	300	0	100,03	100,00	0,03
64	600,21	399,93	1,52	600	400	0	100,35	100,00	0,35
73	700,20	300,07	1,51	700	300	0	99,79	100,00	0,21
								<b>Média</b>	0,31
<b>25</b>	<b>200,31</b>	<b>500,80</b>	<b>0,74</b>	<b>200</b>	<b>500</b>	<b>0</b>			
24	201,10	401,13	2,20	200	400	0	99,68	100,00	0,32
15	100,72	501,59	2,49	100	500	0	99,61	100,00	0,39
26	200,90	600,25	2,16	200	600	0	99,46	100,00	0,54
35	300,31	500,17	0,71	300	500	0	100,00	100,00	0,00
								<b>Média</b>	0,31

\* Diferenças em valor absoluto.

#### 4.2 Experimento com um Modelo Isolado

Neste experimento somente um par de imagens (1 modelo) foi utilizado. As imagens continham a placa utilizada para a calibração e sobre a placa um objeto, objetivando a reconstrução deste através das coordenadas calculadas de seus pontos por fototriangulação.

Inicialmente foi feito o procedimento da calibração usando apenas duas imagens, obtendo como parâmetros de orientação interior os valores mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros da orientação interior do modelo obtidos com duas imagens.

Parâmetro	Valor	Desvio padrão
f (mm)	6,39230	0,08637
x <sub>0</sub> (mm)	0,03720	0,01777
y <sub>0</sub> (mm)	0,17740	0,05619
K <sub>1</sub> (mm <sup>-2</sup> )	-0,00308	0,00027
A	0,09501	0,00142
B	-0,00677	0,00128

Foram realizados dois processamentos para a fototriangulação do modelo. Um processamento foi idêntico ao realizado na fototriangulação com várias imagens, isto é, foram utilizados somente 5 pontos de apoio no espaço objeto. No

segundo processamento todos os pontos do espaço objeto conhecidos (pontos da placa) foram utilizados, sendo determinados como incógnitas somente os pontos lidos no objeto à reconstruir.

A Tabela 15 relaciona os EMQ nos pontos de verificação considerando a fototriangulação com somente 5 pontos de apoio, utilizando os parâmetros de orientação interior: da calibração com 1 modelo (2 imagens), da calibração de todas as imagens juntas (10 imagens) e da auto-calibração com um modelo (2 imagens).

Dos valores mostrados na Tabela 15 os menores EMQ são os obtidos com a calibração de duas imagens. Como era de se esperar, os EMQ obtidos pelo processo de auto-calibração com duas imagens foram maiores do que os da calibração. Estes aumentos foram da ordem de 26,0%, 20,3% e 21,6% para as componentes X, Y e Z, respectivamente. Quando foram utilizados os parâmetros de calibração obtidos com o processamento das 10 imagens os aumentos foram inferiores (9,2% para X, 11,4% para Y e 10,7% para Z).

Tabela 15 – EMQ da fototriangulação com 5 pontos de apoio e com os parâmetros de orientação interior da Tabela 14.

Coordenada	EMQ (calibração de 2 imagens) (mm)	EMQ (calibração de 10 imagens) (mm)	EMQ (auto-calibração de 2 imagens) (mm)
X	13,370	14,605	16,849
Y	5,993	6,675	7,213
Z	19,997	22,137	24,314

Os erros desta magnitude podem ser explicados por:

- na auto-calibração com 2 imagens, há uma configuração geométrica pobre, do mesmo modo que na calibração com apenas um modelo (poucas imagens e base pequena);
- pela modelagem imperfeita dos parâmetros de orientação interior, pois o sistema não é estável. Os parâmetros calibrados anteriormente podem não ser adequados, pois mudam devido à acomodação física do sistema de lentes cada vez que a câmara é ligada ou movimentada (auto-foco);
- erro observacional grande em relação à magnitude dos parâmetros.

#### 4.2.1 Verificação da precisão esperada para um modelo – caso normal

Para verificar a precisão do sistema câmara de vídeo + Nu-View, comparou-se os erros médios quadráticos gerados em um experimento real com os erros médios quadráticos obtidos a partir da propagação da covariância para o caso normal ( $\kappa$ ,  $\varphi$  e  $\omega$  iguais a zero). As expressões utilizadas podem ser encontradas em KRAUS (1993).

Para a realização da propagação considerou-se o ponto imagem 42, cuja posição (coluna, linha) é (452, 334) na imagem ímpar. Na Tabela 16 são apresentados os valores esperados (propagados), os valores obtidos de modo experimental e as diferenças.

Tabela 16 – Valores esperados (obtidos por propagação) e os calculados dos erros médios quadráticos.

EMQ	Valor esperado (mm)	Valor calculado Ponto 42 (mm)	Diferença (mm)
$\sigma_X$	9,08	13,37	4,29
$\sigma_Y$	6,76	5,99	-0,77
$\sigma_Z$	18,17	19,99	1,82

Da Tabela 16 deduz-se que o sistema possui uma boa acurácia para a coordenada Y e regular para a coordenada Z, levando-se em consideração que os erros médios quadráticos calculados estão próximos dos valores esperados, com exceção do erro médio quadrático da coordenada X que ficou acima do valor esperado. Isto se deve a vários fatores:

- Erros nos parâmetros de orientação interior;
- As rotações reais não são nulas, existindo inclusive um  $\Delta\phi$  da ordem de  $3,7^\circ$ ;
- O fator de escala em X (parâmetro A) pode não ter sido modelado adequadamente.

### 4.3 Discussão Global dos Resultados

Considerando os experimentos realizados, pode-se afirmar que é possível fazer a reconstrução com o sistema, e obter erros máximos da ordem de 2 mm com fototriangulação, para uma distância câmara-objeto de 1 metro aproximadamente. Uma síntese dos erros experimentais obtidos é apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 – Erros Médios Quadráticos (EMQ) calculados nos processamentos realizados.

Tipo de processamento	EMQ		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Calibração	1,180	0,970	1,850
Auto-calibração	1,214	1,139	2,110
Fototriangulação com calibração	1,045	1,024	2,093
Fototriangulação com auto-calibração	1,214	1,140	2,110

Algumas conclusões importantes podem ser obtidas após a análise dos experimentos:

- Os parâmetros da orientação interior podem ser considerados os mesmos para as imagens ímpar e par;
- Como nem todos os parâmetros de orientação interior são estáveis, considera-se que a melhor solução é fazer auto-calibração (quando se tem poucos pontos de apoio) ou calibração “*on job*” (quando se tem muitos pontos de apoio). A calibração “*on job*” é a que dará melhores resultados;
- O sistema é flexível, fácil de usar e permite a gravação de milhares de quadros estereoscópicos em fita de vídeo; entretanto, a resolução das imagens é baixa;
- Na auto-calibração e na fototriangulação com auto-calibração, para múltiplas imagens, os resultados são praticamente iguais, podendo-se utilizar a auto-calibração na reconstrução de superfícies;
- Pode-se ter inúmeras aplicações, como gravações e a reconstrução de pequenos objetos.

## 5 CONCLUSÕES

Na avaliação geométrica dos equipamentos de aquisição de imagens, com o propósito de reconstrução de objetos para aplicações fotogramétricas, é relevante estudar as diversas fontes de erro envolvidas no processo de aquisição dessas imagens, como também definir modelos matemáticos que possam parametrizar os erros mais significativos.

Os resultados obtidos no processo de reconstrução das imagens com o sistema câmara de vídeo + Nu-View indicam erros nas coordenadas  $x$  e  $y$  na ordem de 1 mm, enquanto na coordenada  $Z$  este erro está em torno de 2 mm, para uma distância aproximada de 1400 mm com o processamento simultâneo de 5 pares de imagens. Estes valores indicam que o sistema câmara de vídeo+Nu-View não deve ser utilizado para aplicações em que precisões maiores do que estas sejam requeridas. Nos demais casos, pode-se utilizar o sistema sem qualquer restrição, pois o sistema câmara de vídeo+Nu-View é de fácil manuseio e de custo relativamente baixo. Uma das aplicações possíveis é a reconstrução de objetos para o desenvolvimento de ambientes virtuais.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, A. O. **Uso de vídeo-estereocâmara para reconstrução de superfícies à curta distância.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente SP, 2002.
- COOPER, M. A. R., ROBSON, S. Theory of close range photogrammetry. In: ATKINSON, K. B. **Close Range Photogrammetry and Machine Vision.** Whittles, 1996.
- GALO, M. **Calibração e aplicação de Câmaras Digitais.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, da Universidade Federal do Paraná, Curitiba PR, 1993.
- GALO, M. **Manual do Programa CC (Calibração de Câmaras).** Departamento de Cartografia, UNESP/FCT, Presidente Prudente, 2002.
- KRAUS, K. **Photogrammetry.** Fundamentals and Standard Process. Ferd Dummler Verlag, Bonn, 1993.
- TOMMASELLI, A. M. G., ALVES, A. O. **Calibração de uma estereocâmara baseada em vídeo: uma avaliação experimental.** In: Séries em Ciências Geodésicas V. 1, 2001, p. 199-213.

(Recebido em 21/04/02. Aceito para publicação em 02/09/02.)