unesp **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

Campus de Presidente Prudente

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

"USO DE VÍDEO-ESTEREOCÂMARA PARA RECONSTRUÇÃO DE SUPERFÍCIES À CURTA DISTÂNCIA"

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, Unesp, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

AUTOR: ANTÔNIO DE OLIVEIRA ALVES

ORIENTADOR: PROF. DR. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI

Presidente Prudente

fevereiro, 2002

"USO DE VÍDEO-ESTEREOCÂMARA PARA RECONSTRUÇÃO DE SUPERFÍCIES À CURTA DISTÂNCIA "

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, Unesp, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

AUTOR: ANTÔNIO DE OLIVEIRA ALVES

ORIENTADOR: PROF. DR. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI

Presidente Prudente

Janeiro, 2002

Ficha catalográfica

004
A474u

Alves, Antônio de Oliveira
Uso de vídeo-estereocâmera para reconstrução de superfícies à curta distância / Antônio de Oliveira Alves. – Presidente Prudente: UNESP/FCT, 2002.
147p.

Dissertação (mestrado). – UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2002

1. Reconstrução. 2. Estereocâmara. 3. Fotogrametria . I. Autor. IV. Título.

TERMO DE APROVAÇÃO

ANTÔNIO DE OLIVEIRA ALVES

COMISSÃO EXAMINADORA

Presidente Prudente (SP), 22 de fevereiro de 2002.

Resultado: APROVADO

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Agelita e Gabriel (*in memoriam*), que participou do início mas não presenciou o final.

Em especial a Kelly, Carolina e Mariana, pelo apoio e compreensão, os momentos em que não pude estar presente, pelas férias sem viagens e os momentos de lazer que perderam.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli, pela orientação, paciência e dedicação dispensada.

Ao professor Maurício Galo, por ter cedido gentilmente o programa de calibração utilizado neste trabalho.

Aos professores e funcionários do Curso de Pós-Graduação em Ciências cartográfica da Unesp/FCT, pelo auxílio e atenção.

Ao funcionário Willian da faculdade de Comunicação Social da UNOESTE, quando da fase de digitalização das imagens.

À todas as demais pessoas, mesmo que de forma discreta, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

		Página
FOLHA DE ROSTO		i
FICHA CATALOGRÁFICA		ii
TERMO DE APROVAÇÃO		iii
DEDICATÓRIA		iv
AGRADECIMENTOS		v
SUMÁRIO		vi
LISTA DE FIGURAS		viii
LISTA DE TABELAS		x
RESUMO		xiii
ABSTRACT		xiv

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1	CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	01
1.2	OBJETIVOS	03
1.3	JUSTIFICATIVA	04
1.4	APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO TRABALHO	04

CAPÍTULO 2 – SISTEMAS DE VÍDEO

2.1	SISTEMA VÍDEO ANALÓGICO	05
2.2	SISTEMA VÍDEO DIGITAL	16
2.3	CONVERSÃO DE SINAIS DE VÍDEO	22
2.4	CÂMARA DE VÍDEO	27
2.5	CÂMARA DE VÍDEO COM CCD	31
2.6	CAPTURA DE VÍDEO	34
2.7	SISTEMA DE VÍDEO NU-VIEW – ESTÉREO-VÍDEO-CÂMARA	39

CAPÍTULO 3 – CALIBRAÇÃO E RECONSTRUÇÃO

3.1 GEOMETRIA DO IMAGEAMENTO 43
3.2 ORIENTAÇÃO INTERIOR 61
3.3 CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS 61
3.4 ORIENTAÇÃO EXTERIOR DE UM MODELO ISOLADO ... 71
3.5 RESSEÇÃO ESPACIAL 77
3.6 INTERSECÇÃO 79
3.7 FOTOTRIANGULAÇÃO 82

CAPÍTULO 4 – RECONSTRUÇÃO DE IMAGENS USANDO VÍDEO-ESTEREO-CÂMARA

4.1 HARDWARES UTILIZADOS NO DESENVOLVIMENTO ... 85
4.2 SOFTWARES UTILIZADOS NO DESENVOLVIMENTO ... 85
4.3 METODOLOGIA DE TRABALHO 91
4.4 DISCUSSÃO GLOBAL DOS RESULTADOS 131

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

CONCLUSÔES 133
RECOMENDAÇÕES 134

ANEXOS 135

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 142

BIBLIOGRAFIA 144

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: FORMA DE UMA ONDA ELÉ TRICA. 6
FIGURA 2.2: BARRA DE CORES, DO SINAL RGB. 7
FIGURA 2.3: EVOLUÇÃO DO SINAL DE VÍDEO ANALÓGICO. 8
FIGURA 2.4: SINAL DE VÍDEO PARA U MA LINHA COMPLETA. 11
FIGURA 2.5: CONVERSÃO DE SINAL DE NTSC PARA PAL E VICE-VERSA. 13
FIGURA 2.6: CAMPO PAR E ÍMPAR DA EXPLORAÇÃO ENTRELAÇA DA. 14
FIGURA 2.7: PROCESSO DE CONVERSÃO DA EXPLORAÇÃO ENTRE LAÇADA EM PROGRESSIV A. .. 15
FIGURA 2.8: AMOSTRAGEM DO SINAL A NALÓGICO. 17
FIGURA 2.9: TRÊS NÍVEIS DE UMA IM AGEM COLORIDA. 17
FIGURA 2.10: SISTEMA PARA VÍDEO DI GITAL MÍNIMO 20
FIGURA 2.11: PROCESSO DE AMOSTRAGE M, ... 22
FIGURA 2.12: AMOSTRAGEM SEM E, COM EFEITO, DE ALIASING 23
FIGURA 2.13: FORMA DE ONDA COM E SEM EFEITO "JITTER". 24
FIGURA 2.14: TENSÃO DOS INTEVALOS DE QUANTIFICAÇÃO. 25
FIGURA 2.15: DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM CON VERSOR DAC CONVENCIONAL 26
FIGURA 2.16: SENSOR DE IMAGEM. 28
FIGURA 2.17: CARGA GERADA É ACUMUL ADA EM CAPACITORES U SANDO A TÉCNICA MOS. 29
FIGURA 2.18: VARREDURA DAS LINHAS HORIZONTAIS. 30
FIGURA 2.19: DIAGRAMA DE BLOCO DE UMA CÂMARA DE VÍDEO PADRÃO. 33
FIGURA 2.20: ELEMENTOS BÁSICOS PAR A CAPTURAR IMAGEM A TRAVÉS DE VÍDEO ANAL ÓGICO. 36
FIGURA 2.21: O SISTEMA PARA CAPTURA DE IMAGENS ESTEREOS CÓPICAS EM VÍDEO. 40
FIGURA 2.22: COMPONENTES DO SISTEM A PARA CAPTURA DE IM AGENS ESTEREOSCÓPICA S EM VÍDEO. 40
FIGURA 2.23: IMAGEM OBTIDA PELO SISTEMA MOSTRANDO O PADRÃO E NTRELAÇADO 42

FIGURA 3.1 SISTEMAS DE REFERÊNCIA NO ESPAÇO OBJETO E IMAGEM. 43

FIGURA 3.2 SISTEMA DE MÁQUINA. 44

FIGURA 3.3 SISTEMA COM ORIGEM NO CENTRO DO FRAME. 45

FIGURA 3.4 SISTEMA DO ESPAÇO IMAGEM OU FOTOGRAMÉTRICO. 46

FIGURA 3.5 PROJEÇÃO PERSPECTIVA CENTRAL 50

FIGURA 3.6 CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE 51

FIGURA 3.7 CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE OPP 54

FIGURA 3.8 DISTORÇÃO RADIAL. 58

FIGURA 3.9 RELAÇÃO ENTRE DISTORÇÃO RADIAL δR E SUAS COMPONENTES $\delta X_R, \delta Y_R$. 59

FIGURA 3.10 EFEITO DOS ERROS DE NÃO ORTOGONALIDADE E ESCALA. 61

FIGURA 3.11 MODELO PRODUZIDO PELA ORIENTAÇÃO RELATIVA 76

FIGURA 3.12 ORIGEM DO SISTEMA DE COORDENADAS DO MODELO EM RELAÇÃO AO SISTEMA DE COORDENADAS DO TERRENO. 78

FIGURA 3.13 INTERSECÇÃO ENTRE 2 PONTOS HOMÓLOGOS 82

FIGURA 4.1: ETAPAS COMUNS AOS DOIS MÉTODOS DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO. 92

FIGURA 4.2: IMAGEM ENTRELAÇADA GERADA PELO SISTEMA CÂMARA DE VÍDEO + NU-VIEW 93

FIGURA 4.3: IMAGEM DESENTRELAÇADA GERADA PELA CÂMARA DE VÍDEO. 94

FIGURA 4.4: IMAGEM DESENTRELAÇADA GERADA PELO NU-VIEW. 94

FIGURA 4.5: ETAPAS DO MÉTODO 1. 95

FIGURA 4.6: NUMERAÇÃO DAS CÉLULAS DO CAMPO DE TESTE TRIDIMENSIONAL. 96

FIGURA 4.7: ERROS VERDADEIROS DAS COORDENADAS NA AUTO-CALIBRAÇÃO, RECONSTRUÍDOS NO SURFER; (A) COORDENADAS XY ERRO EM X; (B) COORDENADAS XY ERRO EM Y; (C) COORDENADAS XY ERRO EM Z. 109

FIGURA 4.8: OBJETO A SER RECONSTRUÍDO NO SURFER COM PONTOS NUMERADOS. 126

FIGURA 4.9: OBJETO RECONSTRUÍDO NO SURFER CONSIDERANDO 5 PONTOS DE APOIO 127

FIGURA 4.10: OBJETO RECONSTRUÍDO NO SURFER CONSIDERANDO TODOS OS PONTOS DA PLACA COMO PONTOS DE APOIO. 127

FIGURA 4.11: ERROS VERDADEIROS DAS COORDENADAS NA FOTOTRIANGULAÇÃO, RECONSTRUÍDOS NO SURFER; (A) COORDENADAS XY ERRO EM X; (B) COORDENADAS XY ERRO EM Y; (C) COORDENADAS XY ERRO EM Z. 130

FIGURA 4.12: PONTOS HOMÓLOGOS DO PAR DE IMAGENS 130

FIGURA 4.13: OBJETO RECONSTRUÍDO NO GEOMETRA.. 131

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – PADRÕES DE ESTÚDIO DE VÍDEO DIGITAL 21
TABELA 4.1 – ESTRUTURA DO ARQUIVO DE PARÂME TROS 98
TABELA 4.2 – PARÂMETROS DA ORIENTA ÇÃO INTERIOR DA CALI BRAÇÃO. 101
TABELA 4.3 – DISCREPÂNCIAS DOS PAR ÂMETROS DA ORIENTAÇÃ O INTERIOR DA CALIBR AÇÃO. 101
TABELA 4.4 – ESTATÍSTICA DA CALIBR AÇÃO DE TODAS AS IMA GENS JUNTAS. 102
TABELA 4.5 – PONTOS COM COORDENADA S NÃO INJUNCIONADAS NA CALIBRAÇÃO 102
TABELA 4.6 – PARÂMETROS EXTRÍNSECO S (□.□.□ DAS IMAGENS ÍMPARES NA CALIBRAÇÃO 103
TABELA 4.7 – PARÂMETROS EXTRÍNSECO S (X Y Z) DAS IMAGENS ÍMPARES NA CALIBRAÇÃO . 103
TABELA 4.8 – PARÂMETROS EXTRÍNSECO S (□.□.□ DAS IMAGENS PARES N A CALIBRAÇÃO. 103
TABELA 4.9 – PARÂMETROS EXTRÍNSECO S (X Y Z) DAS IMAGENS PARES NA CALIBRAÇÃO 104
TABELA 4.10 – DIFERENÇA DOS PARÂMET ROS EXTRÍNSECOS NA C ALIBRAÇÃO. 104
TABELA 4.11 – PARÂMETROS DA ORIENTA ÇÃO INTERIOR DA AUTO -CALIBRAÇÃO (PROCESSAMENTO SIMULT ÂNEO). 105
TABELA 4.12 – PARÂMETROS DA ORIENTA ÇÃO INTERIOR PARA A CALIBRAÇÃO E AUTO - CALIBRAÇÃO (PROCESSAMENTO SIMULT ÂNEO). 106
TABELA 4.13 – ESTATÍSTICA DA AUTO -CALIBRAÇÃO COM TODAS AS IMAGENS. 106
TABELA 4.14 – ERROS MÉDIOS QUADRÁTICOS (EMQ) NA AUTO-CALIBRAÇÃO COM O PROCESSAMENTO DE TOD AS AS IMAGENS. 107
TABELA 4.15 – PARÂMETROS EXTRÍNSECOS (ÂNGULOS DE ROTAÇÃO) DA FOTOTRIANGULAÇÃO COM TODAS AS IMAGENS , USANDO PARÂMETROS IN TRÍNSECOS CALCULADOS NA CALIBRAÇÃO. 110
TABELA 4.16 – PARÂMETROS EXTRÍNSECO S (COORDENADAS DOS CENT ROS PERSPECTIVOS) OBTIDOS NA FOTOTRIANGULAÇÃO C OM TODAS AS IMAGENS , USANDO PARÂMETROS INTRÍNSECOS CALCULAD OS NA CALIBRAÇÃO. 110
TABELA 4.17 – DIFERENÇA DOS PARÂMET ROS EXTRÍNSECOS DA F OTOTRIANGULAÇÃO COM TODAS AS IMAGENS , USANDO PARÂMETROS IN TRÍNSECOS CALC ULADOS NA CALIBRAÇÃO 111
TABELA 4.18 – ESTATÍSTICA DA FOTOTR IANGULAÇÃO (CALIBRAÇÃO). 111
TABELA 4.19 – ERROS MÉDIOS QUADRÁTICOS (EMQ) NA FOTOTRIANGULAÇÃO COM CALIBRAÇÃO COM O PRO CESSAMENTO DE TODAS AS IMAGENS. 112
TABELA 4.20 – PARÂMETROS EXTRÍNSECO S (ÂNGULOS DE ROTAÇÃO) DA FOTOTRIANGULAÇÃO COM TODAS AS IMAGENS , CONSIDERANDO PARÂMET ROS INTRÍNSECOS CALC ULADOS NA CALIBRAÇÃO COM DESVI OS PADRÃO DE 10^{-7} MM. 113

TABELA 4.21 – PARÂMETROS EXTRÍNSECOS (COORDENADAS DOS CENTROS PERSPECTIVOS) OBTIDOS NA FOTOTRIANGULAÇÃO COM TODAS AS IMAGENS, CONSIDERANDO PARÂMETROS INTRÍNSECOS CALCULADOS NA CALIBRAÇÃO COM DESVIOS PADRÃO DE 10^{-7} MM. 113
TABELA 4.22 – DIFERENÇAS DOS PARÂMETROS EXTRÍNSECOS DA FOTOTRIANGULAÇÃO COM TODAS AS IMAGENS, CONSIDERANDO PARÂMETROS INTRÍNSECOS CALCULADOS NA CALIBRAÇÃO COM DESVIOS PADRÃO DE 10^{-7} MM. 114
TABELA 4.23 – ESTATÍSTICA DA FOTOTRIANGULAÇÃO COM TODAS AS IMAGENS, CONSIDERANDO PARÂMETROS INTRÍNSECOS CALCULADOS NA CALIBRAÇÃO COM DESVIOS PADRÃO DE 10^{-7} MM. 114
TABELA 4.24 – ERROS MÉDIOS QUADRÁTICOS (EMQ) DA FOTOTRIANGULAÇÃO COM TODAS AS IMAGENS, CONSIDERANDO PARÂMETROS INTRÍNSECOS CALCULADOS NA CALIBRAÇÃO COM DESVIOS PADRÃO DE 10^{-7} MM. 115
TABELA 4.25 – PARÂMETROS EXTRÍNSECOS (ÂNGULOS DE ROTAÇÃO) DA FOTOTRIANGULAÇÃO COM TODAS AS IMAGENS, CONSIDERANDO PARÂMETROS INTRÍNSECOS CALCULADOS NA AUTO-CALIBRAÇÃO COM DESVIOS PADRÃO DE 10^{-7} MM. 115
TABELA 4.26 – PARÂMETROS EXTRÍNSECOS (COORDENADAS DOS CENTROS PERSPECTIVOS) OBTIDOS NA FOTOTRIANGULAÇÃO COM TODAS AS IMAGENS, CONSIDERANDO PARÂMETROS INTRÍNSECOS CALCULADOS NA AUTO-CALIBRAÇÃO COM DESVIOS PADRÃO DE 10^{-7} MM... 116
TABELA 4.27 – DIFERENÇA DOS PARÂMETROS EXTRÍNSECOS NA FOTOTRIANGULAÇÃO COM TODAS AS IMAGENS, CONSIDERANDO PARÂMETROS INTRÍNSECOS CALCULADOS NA AUTO-CALIBRAÇÃO COM DESVIOS PADRÃO DE 10^{-7} MM. 116
TABELA 4.28 – ESTATÍSTICA NA FOTOTRIANGULAÇÃO COM TODAS AS IMAGENS, CONSIDERANDO PARÂMETROS INTRÍNSECOS CALCULADOS NA AUTO-CALIBRAÇÃO COM DESVIOS PADRÃO DE 10^{-7} MM. 117
TABELA 4.29 – ERROS MÉDIOS QUADRÁTICOS (EMQ) OBTIDOS NA FOTOTRIANGULAÇÃO COM TODAS AS IMAGENS, CONSIDERANDO PARÂMETROS INTRÍNSECOS CALCULADOS NA AUTO-CALIBRAÇÃO COM DESVIOS PADRÃO DE 10^{-7} MM. 117
TABELA 4.30 – DISTÂNCIA ENTRE OS VIZINHOS NA FOTOTRIANGULAÇÃO COM AUTO-CALIBRAÇÃO. 117
TABELA 4.31 – COMPARAÇÃO DOS ERROS MÉDIOS QUADRÁTICOS 118
TABELA 4.32 – COMPARAÇÃO DOS EMQ COM E SEM PONTOS COM VALORES NA COORDENADA Z. 119
TABELA 4.33 – PARÂMETROS DA ORIENTAÇÃO INTERIOR DO MODELO 119
TABELA 4.34 – PARÂMETROS EXTRÍNSECOS (□□□ DAS IMAGENS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO. 120
TABELA 4.35 – PARÂMETROS EXTRÍNSECOS (X Y Z) DAS IMAGENS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO. 120

TABELA 4.36 – DIFERENÇA DOS PARÂMET ROS EXTRÍNSECOS DA C ALIBRAÇÃO DO MODELO . ..120
TABELA 4.37 – PARÂMETROS EXTRÍNSECO S (□.□.□ DAS IMAGENS NA FOTO TRIANGULAÇÃO DO MODELO..... 121
TABELA 4.38 – PARÂMETROS EXTRÍNSECO S (X Y Z) DAS IMAGENS NA FOTOT RIANGULAÇÃO DO MODELO..... 121
TABELA 4.39 – ERROS MÉDIOS QUADRÁTICOS – EMQ DA FOTOTRIANGULAÇÃO COM 5 PONTOS DE APOIO E COM OS PARÂME TROS DE ORIENTAÇÃO I NTERIOR DA TABELA 4.33..... 122
TABELA 4.40 – ERROS MÉDIOS QUADRÁTICOS – EMQ DA FOTOTRIANGULAÇÃO COM 5 PONTOS DE APOIO E COM OS PA RÂMETROS DE ORIENTAÇ ÃO INTERIOR DA TABEL A 4.2..... 122
TABELA 4.41 – ERROS MÉDIOS QUADRÁTICOS – EMQ DA FOTOTRIANGULAÇÃO COM 5 PONTOS DE APOIO E COM OS PA RÂMETROS DE ORIENTAÇ ÃO INTERIOR DA AUTO -CALIBRAÇÃO DE 1 MODELO..... 123
TABELA 4.42 – VALORES UTILIZADOS PA RA A PREVI SÃO DE PRECISÃO DAS COORDENADAS DOS PONTOS NO ESPAÇO OBJ ETO. 125
TABELA 4.43 – VALORES ESPERADOS E O S CALCULADOS DOS ERR OS MÉDIOS QUADRÁTICO S. 125
TABELA 4.44 – ERROS MÉDIOS QUADRÁTICOS (EMQ) CALCULAD OS NOS PROCESSAMENTO S REALIZADOS..... 132

ALVES, A.O.. Uso de vídeo-estereocâmara para reconstrução de superfícies à curta distância. Presidente Prudente, 2002. 147 p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus de Presidente Prudente, Universidade Estadual Paulista.

RESUMO

A utilização de câmara de vídeo na reconstrução de objetos à curta distância, proporciona alguns benefícios, tais como: baixo custo do equipamento, facilidade na aquisição das imagens e o processamento das cenas pode ser controlado através de computadores. A aplicação do sistema Nu-View, fabricado pela 3-D Vídeo Inc, à reconstrução de imagens à curta distância, incrementa esses benefícios. Este sistema é um adaptador estereoscópico para câmaras de vídeo que, quando acoplado às lentes, gera imagens tridimensionais dos objetos.

O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial do sistema câmara+Nu-View, na coleta e reconstrução de imagens tridimensionais de objetos. A câmara de vídeo usada é uma JVC Compact VHS, modelo GR-AX94.

Foi analisada a ***confiabilidade*** final proporcionada pelo sistema, utilizando softwares comerciais e acadêmicos, para a reconstrução das superfícies, identificando o nível de acurácia das coordenadas; e as ***aplicações potenciais***, utilizando softwares para gerar imagens tridimensionais que possam ser utilizadas em áreas de realidade virtual e/ou na reconstrução de pequenos objetos, como os arqueológicos.

Palavras-chave: Reconstrução; Estereocâmara; Estereoscópica.

ALVES, A.O.. Uso de vídeo-estereocâmara para reconstrução de superfícies à curta distância. Presidente Prudente, 2002. 147 p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus de Presidente Prudente, Universidade Estadual Paulista.

ABSTRACT

The use of video camera in close range object reconstruction, provides some benefits, such as: low cost of the equipment, easiness in the image acquisition and the scenes processing can be computers controlled. The application of the Nu-View system, manufactured by 3-D Video Inc., for close range object reconstruction increases these benefits. This system is a stereoscopic adapter for video cameras that generates three-dimensional pictures, when coupled to the lenses.

The aim of this project is to evaluate the potential of the camera+Nu-View system, in the acquisition and reconstruction of three-dimensional images. The video camera used is a JVC Compact VHS, model GR-AX94.

The final reability achieved by the system is analyzed, using commercial and scientific software, identifying the level of accuracy of the generated 3D coordinates; and the potential applications, using softwares to generate three-dimensional pictures that can be used in areas such as virtual reality and/or the reconstruction of small objects, such as the archaeological artifacts.

Keywords: reconstruction; stereocamera; stereoscopic.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

A Fotogrametria procura reconstruir superfícies de objetos através de medições em imagens, adquiridas por meio de diferentes tipos de sensores, com o propósito de se obter informações sobre posição, tamanho e forma desses objetos. Quando os objetos são pequenos, menores que 100 metros, e os sensores estão posicionados próximos e/ou ao redor desses objetos, a Fotogrametria é chamada de *Fotogrametria à curta distância*.

Na fase de aquisição das imagens em Fotogrametria à curta distância, usualmente são utilizadas câmaras fotográficas métricas, devido à alta qualidade geométrica das imagens, mas dependendo da aplicação pode-se utilizar câmaras não-métricas, vídeos e estéreo-vídeos.

Em áreas do conhecimento como Engenharia industrial, Medicina, Arqueologia e Informática (realidade virtual), pode-se ter imagens com uma qualidade geométrica inferior, sem o comprometimento nas aplicações. O custo do sensor utilizado para a aquisição dessas imagens é inferior, quando comparado ao custo das câmaras métricas. As *camcorders* ou câmaras de vídeo VHS, que são câmaras de vídeo analógicas, são um exemplo desse tipo de sensor.

Compreender o imageamento de vídeo realizado pelas câmaras de vídeo analógicas, é um fator relevante no processamento de imagens com esse tipo de sensor. Envolve inicialmente o processo de aquisição das imagens, que compreende a transformação de raios luminosos incidentes nas lentes de uma câmara de vídeo, em impulsos elétricos. A transformação em impulsos elétricos é realizada por um ou

mais CCDs, que são capazes de quantificar a intensidade do brilho dos raios luminosos, nos diferentes pontos de uma imagem.

Os raios luminosos sofrem distorções geradas pelas características da câmara e a calibração modela essas distorções que ocorrem na geometria de formação da imagem em uma câmara.

As câmaras de vídeo VHS gravam as imagens no formato analógico. Para que sejam utilizadas nos microcomputadores é necessária a conversão para o formato digital. As placas de capturas de vídeo, “frame grabbers”, fazem esta conversão.

Para o ser humano ter uma visão realística das imagens, precisa-se gerar imagens estereoscópicas, também designadas de imagens tridimensionais. A percepção de profundidade é associada à visão estereoscópica ou espacial, onde cada olho registra uma imagem diferente e o cérebro usa o pequeno deslocamento lateral das imagens para medir a profundidade, proporcionando a visão estereoscópica.

As imagens tridimensionais geradas por câmaras de vídeo, para serem exibidas em uma televisão ou em um monitor de computador, além de proporcionar efeitos especiais de grande impacto, possuem um custo menor em relação às câmaras fotográficas digitais matriciais e as métricas.

A 3-D Vídeo Inc desenvolveu um sistema designado por NU-View que, é um adaptador estereoscópico para câmaras de vídeo. Quando acoplado às lentes gera imagens tridimensionais. Este conjunto procura simular a aquisição de imagens por duas câmaras distintas. Como a câmara de vídeo VHS e também o sistema NU-View não foram projetados para serem utilizados em Fotogrametria, há a necessidade de serem realizadas avaliações do conjunto com o propósito de determinar a aplicabilidade do sistema NU-View em conjunto com uma câmara de vídeo na reconstrução das imagens.

A fase inicial na reconstrução das imagens para aplicações fotogramétricas engloba a avaliação do conjunto câmara de

vídeo e sistema NU-View. Esta avaliação pode ser de natureza radiométrica (cor, tom de cinza), ou geométrica (distâncias, ângulos, coordenadas). Com esse procedimento determina-se o nível de resposta do conjunto câmara de vídeo e sistema NU-View em relação à realidade física. Na análise radiométrica deve-se verificar se o nível de ruídos e a estabilidade térmica não prejudicam a resposta espectral do conjunto e, na análise geométrica deve-se determinar os parâmetros que corrigem os erros sistemáticos, isto é, os parâmetros *intrínsecos*.

A fase seguinte na reconstrução das imagens é a que determina os parâmetros *extrínsecos*. Duas imagens tomadas de duas câmaras distintas possuem movimentos lineares e rotacionais independentes. Esses movimentos lineares e rotacionais são os parâmetros *extrínsecos*

Na reconstrução das imagens, tanto automaticamente como manualmente, é gerado um modelo numérico da superfície. Sobre este modelo as imagens podem ser superimpostas, para permitir a visualização realística da cena em um computador.

As coordenadas do modelo numérico podem ser utilizadas para verificar a acurácia do sistema câmara de vídeo e sistema NU-View em relação à realidade física.

1.2. OBJETIVOS

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 de uso doméstico. A avaliação constará dos itens abaixo:

Exatidão – identificar geometricamente o nível de acurácia das imagens geradas;

Aplicação – verificar aplicações relevantes nas áreas de realidade virtual e/ou na reconstrução de pequenos objetos, como os objetos arqueológicos.

1.3. JUSTIFICATIVA

Devido ao baixo custo das Camcorders e do sistema Nu-View, caso o sistema câmara de vídeo + sistema Nu-View tenha uma avaliação geométrica aceitável para fins fotogramétricos, este tipo de sistema será de grande utilidade para a disseminação da Fotogrametria.

1.4. APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado da seguinte forma:

a) No capítulo dois há uma revisão da literatura sobre sistema de vídeo analógico, sistema de vídeo digital, conversão de sinais de vídeo, câmara de vídeo, captura de vídeo e o, sistema NU-View.
b) No capítulo três a revisão da literatura contempla a geometria do imageamento, a orientação interior, a calibração de câmaras, a orientação exterior (orientação relativa e orientação absoluta), a resseção espacial, a intersecção e a fototriangulação.
c) No capítulo quatro é feita uma breve descrição dos equipamentos, sistemas, metodologias empregadas e experimentos com dados reais, das imagens adquiridas com o sistema câmara de vídeo e NU-View.
d) A elaboração de uma conclusão geral sobre os objetivos e resultados alcançados encontra-se no capítulo cinco.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE VÍDEO

2.1 SISTEMA DE VÍDEO ANALÓGICO

A palavra *vídeo* está relacionada à informação visual, incluindo imagens estáticas e imagens dinâmicas. Em TEKALP (1995), define-se imagem estática como a que têm sua intensidade de distribuição espacial constante em relação ao tempo, enquanto a imagem dinâmica muda a sua intensidade espacial no decorrer do tempo.

Seqüência de imagens, é também um termo empregado para a tecnologia de vídeo, significando que uma imagem variante com o tempo é representada por uma seqüência de imagens estáticas (fotos).

O sinal de vídeo é um sinal unidimensional analógico ou digital no tempo, onde a informação espaço-temporal é ordenada como uma função do tempo, de acordo com convenção de varredura predefinida. Tradicionalmente o vídeo é gravado, armazenado e transmitido no formato analógico.

Segundo VALLEJO (1998), no sistema analógico a informação é transmitida como uma variação finita de um parâmetro contínuo, podendo ser a modulação em amplitude, freqüência ou fase. Ocorrendo qualquer variação em algum parâmetro do sinal, será gerado um outro sinal que dificilmente poderá ser reconhecido como uma *cópia fiel* da informação transmitida. Esta variação é conhecida como ruído ou interferência, e não pode ser identificada em um sistema analógico.

Os sinais de vídeo são ondas elétricas que transmitem imagens em movimento, do transmissor até o receptor. A forma de uma onda elétrica é bidimensional, e leva uma *tensão* que muda com relação ao tempo (figura 2.1).

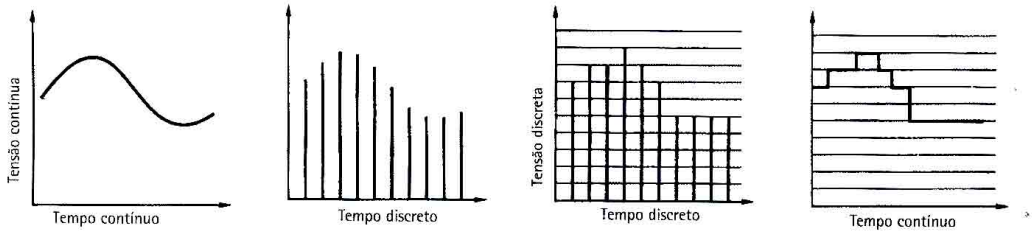


Figura 2.1: Forma de uma onda elétrica.
Fonte: Adaptado de WATKISON (1994).

Na realidade as imagens não estão em movimento; a ilusão de movimento deve-se ao fenômeno da percepção humana denominada persistência retiniana. As imagens que chegam à retina, não desaparecem bruscamente, elas se desvanecem paulatinamente. Como conseqüência deste fenômeno, uma sucessão rápida de imagens será interpretada pelo cérebro como uma imagem em movimento. Entretanto este processo produz um tremor, durante a passagem de uma imagem clara e o intervalo de escuridão. Para evitar este incomodo, a velocidade de exposição das imagens deve ser aumentada.

Algumas câmaras coloridas têm três sensores individuais, um para cada cor primária do sistema de tratamento de sinais RGB. Para diminuir a *largura de banda*, que é a quantidade de informação passível de ser transmitida por unidade de tempo num determinado meio de comunicação (fio, onda de rádio, fibra óptica, etc.), trabalha-se com os sinais de diferença de cor, pois o olho humano utiliza o brilho (luminância) para obter os detalhes de uma imagem, sendo necessário uma resolução menor na informação de cor. Para se obter o sinal Y de luminância, cria-se uma matriz com os sinais RGB. Nesta matriz os sinais de diferença de cor, R-Y e B-Y, também são gerados, (figura 2.2). O novo sinal gerado é composto pelo sinal de luminância Y, e o sinal de croma, que é a informação de cor que surge a partir dos sinais de diferença de cor, R-Y e B-Y. A largura de banda desse novo sinal, equivale a dois terços do que precisa o sinal RGB.

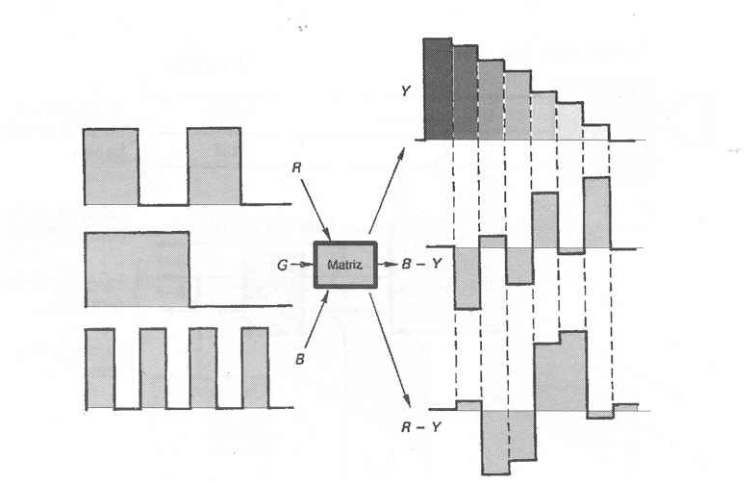


Figura 2.2: Barra de cores, do sinal RGB.
Fonte: Adaptado de VALLEJO (1998).

Na transmissão dos sinais de vídeo analógicos, os seguintes sistemas de transmissão são utilizados: NTSC, PAL e SECAM.

2.1.1 Padrões de vídeo analógico

De acordo com OZER (1994), quando do advento da TV colorida, houve a necessidade da criação de um padrão de sinal, compatível com a TV branco-e-preto e com a colorida. Foi criado um padrão que envia um sinal de luminância (Y) para o branco e preto, e juntamente outros sinais com a informação de cor, chamados de coloração e saturação, ou U e V.

Existem vários padrões de sinal de vídeo analógico, possuindo diferentes parâmetros das imagens. Eles diferem no modo de tratar a cor e podem ser agrupados em:

- Vídeo analógico de componentes;
- Vídeo composto;
- S-vídeo (Y/C vídeo).

A figura 2.3 representa a evolução do sinal de vídeo analógico colorido. Durante a captura da imagem com uma câmara colorida é utilizado o padrão RGB, mantendo um canal para cada cor primária.

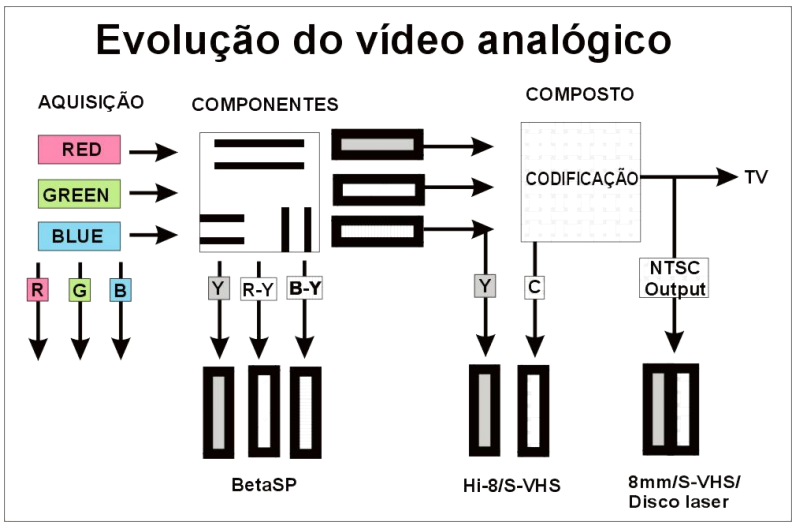


Figura 2.3: Evolução do sinal de vídeo analógico.
Fonte: Adaptado de OZER (1994).

Armazenar o sinal de vídeo no formato RGB, é ineficiente, porque os três canais de cores precisam ter igual largura de banda, e como cada pixel é a soma dos valores vermelho, verde e azul, uma modificação no pixel força o ajuste dos três valores, enquanto no formato YUV, o pixel pode ser modificado usando somente um dos valores.

No vídeo analógico de componentes (CAV), cada cor primária (vermelho (R), verde (G) e azul (B)) é considerada como um sinal separado de vídeo monocromático. Pode ser o sinal das cores primárias ou uma transformação delas, suas luminância e crominância. A crominância (C), é a combinação dos canais U e V.

O componente luminância (Y) corresponde à representação do nível de cinza do vídeo.

$$Y = 0,30R + 0,59G + 0,11B \quad (2.1)$$

Os componentes crominância (U e V), contêm a informação da cor.

$$U = 0,60R - 0,28G + 0,32B \quad (2.2)$$

$$V = 0,21R - 0,52G + 0,31B$$

Ou

$$Cr = R - Y \quad (2.3)$$

$$Cb = B - Y$$

Na prática estes componentes dependem da normalização e da correção gama. O padrão CAV produz a melhor reprodução em cores, mas sua transmissão requer a sincronização perfeita dos três componentes, dos três tempos e da largura de banda.

O formato do sinal de vídeo composto coloca os componentes crominância no topo do sinal de luminância, como um sinal simples que têm a mesma largura de banda do sinal luminância. Este formato normalmente resulta em erros na tradução das cores, conhecidos como erros de coloração e saturação, devido à imprecisão na separação dos sinais da cor. Existem diferentes formatos de vídeo composto, tais como: NTSC, PAL e SECAM.

O sinal de vídeo, S-vídeo, é um ajuste entre o vídeo composto e o por componentes. Neste tipo de sinal, o vídeo é representado por dois componentes: um sinal de luminância e um de crominância composto. O sinal S-vídeo é usado em equipamentos de melhor qualidade e as imagens obtidas são melhores do que as do vídeo composto.

2.1.2 Sistema de transmissão NTSC

O primeiro padrão conhecido como RS-170 ou NTSC para televisão monocromática, foi definido pelo National Television Systems Committee (NTSC). Posteriormente o mesmo padrão sofreu melhorias e foi adotado para a televisão colorida.

Este padrão é compartilhado pelos Estados Unidos, Canadá, Groenlândia, México, Cuba, Panamá, Japão, Porto Rico, e alguns países da América do Sul.

O sistema é um sinal entrelaçado 2:1, com 262,5 linhas por campo (525 linhas por quadro) e 30 quadros por segundo, com relação de aspecto de 4:3 (relação entre largura e altura de um CRT – Tubo de Raios Catódicos).

Sendo a transmissão em 30 quadros por segundo, têm-se 60 campos. Com isso a freqüência de varredura horizontal é de 15,75 KHz (525 x 30) e , portanto, demora 1/15750 segundos (= 63,5 μs) para cada varredura de linha horizontal.

O retraço horizontal, retorno do final da linha varrida para o início da próxima linha, consome 10 μs da varredura de linha horizontal, sobrando 53,5 μs para ativar o sinal de vídeo por linha. No intervalo do retraço horizontal é inserido um pulso black , para branquear o CRT no retraço das linhas. O pulso de sincronismo horizontal (sync) é colocado no topo do pulso de branqueamento horizontal, e dura 5 μs, sincronizando os circuitos de varredura horizontal e vertical. A figura 2.4 mostra um sinal de vídeo analógico para uma linha completa.

Somente 485 linhas das 525 são ativadas, visto que 20 linhas por campo são branqueadas para o retorno vertical. A resolução vertical, definida como o número de linhas horizontais percebidas, é 485 x 0,7 (340) linhas por quadro. O fator 0,7 é conhecido como fator de Kell. (ver item 2.1.6)

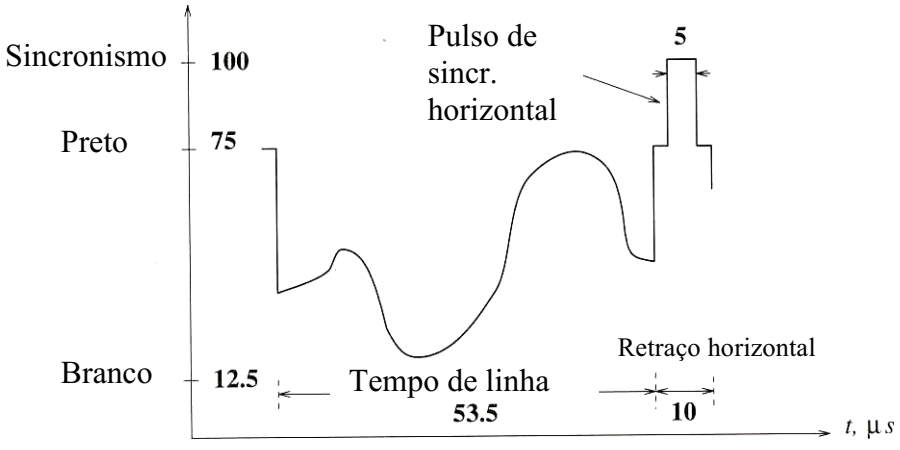


Figura 2.4: Sinal de vídeo para uma linha completa.
Fonte:Adaptado de TEKALP (1995)

Com a relação de aspecto de 4:3, a resolução horizontal é definida por 340 x 4 / 3 (452 elementos por linha). Portanto, a largura de banda do sinal de luminância é de 452 / 2 x 53,5 x 10^{-6} (4,2 MHz).

2.1.3 Sistema de transmissão PAL e SECAM

Os sistemas PAL e SECAM, são utilizados em mais da metade dos países do mundo. No Brasil é adotado o sistema PAL-M. Estes sistemas possuem 625 linhas e 25 quadros por segundo (50 campos).

As 100 linhas a mais dos sistemas PAL e SECAM, aumentam os detalhes e a clareza da imagem de vídeo, mas quando comparados com o sistema NTSC, pode-se notar uma ligeira oscilação (flicker) na imagem desses sistemas.

A resolução vertical e temporal desses sistemas, é diferente em comparação com o NTSC; a largura de banda é maior (8 MHz), e trata-se diferentemente a informação sobre cor.

Uma das diferenças entre os sistemas PAL e SECAM, é como eles representam a informação de cor. Ambos utilizam a crominância, mas a integração do sinal de luminância é diferente.

Os formatos de vídeo composto, normalmente resultam em erros na reconstrução da cor, conhecidos como coloração e erros de saturação, devido a ineficiência na separação dos sinais de cor. O S-vídeo é usado em videocassetes, gravadores e camcorders de melhor qualidade, pois as imagens obtidas são melhores do que as do vídeo composto.

2.1.4 Conversão de padrões

A diferença essencial entre os sistemas NTSC, PAL e SECAM para sinais monocromáticos é o número de linhas na horizontal e a freqüência de transmissão.

Devido à existência de padrões de transmissão diferentes, para o intercâmbio de vídeos, é necessária a utilização de um transcodificador, que converte eletronicamente os padrões. A figura 2.5 ilustra essa transcodificação.

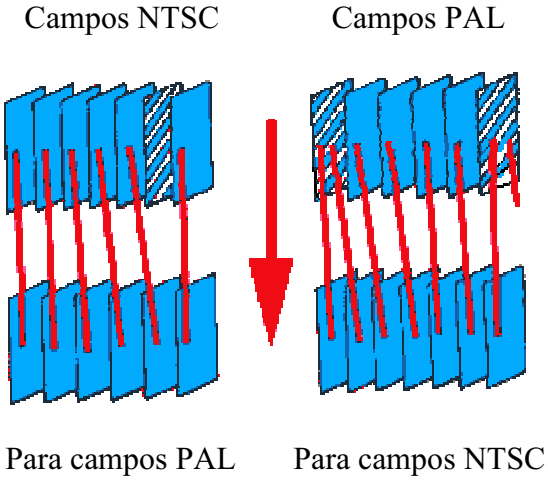


Figura 2.5: Conversão de sinal de NTSC para PAL e vice-versa.
Fonte: Adaptado de www.cybercollege.com/port/tvp009.htm.

2.1.5 Formas de transmissão de sinais de vídeo

Existem basicamente duas formas de exploração do sinal de vídeo: entrelaçada e progressiva.

- **Exploração entrelaçada**

A exploração consiste em varreduras horizontais rápidas, em conjunto com varreduras verticais mais lentas; quando se completa a varredura vertical o processo se repete. Este sistema reduz a cintilação e as variações no brilho da imagem, pois cada quadro de vídeo é dividido em dois segmentos entrelaçados. As linhas ímpares são codificadas primeiro da esquerda para a direita e de cima para baixo, e as pares depois.

O termo entrelaçado descreve o método de alternância das linhas ímpares e pares, no processo de varredura do número total de linhas de uma imagem completa. Esses meios-quadros compostos pelas linhas pares ou ímpares são denominados por *campo de vídeo*. A imagem completa, formada pelos dois campos de vídeo, é chamada de um *quadro de vídeo*.

O primeiro campo ou varredura vertical demora a metade do tempo e possui a metade das linhas. Sua varredura começa com uma linha completa e termina na metade de outra linha, e o segundo campo começa na metade de uma linha e termina com uma linha completa. Somente com números de linhas ímpares isto é possível (Figura 2.6).

Deste modo as linhas dos dois campos se entrelaçam verticalmente de forma automática.

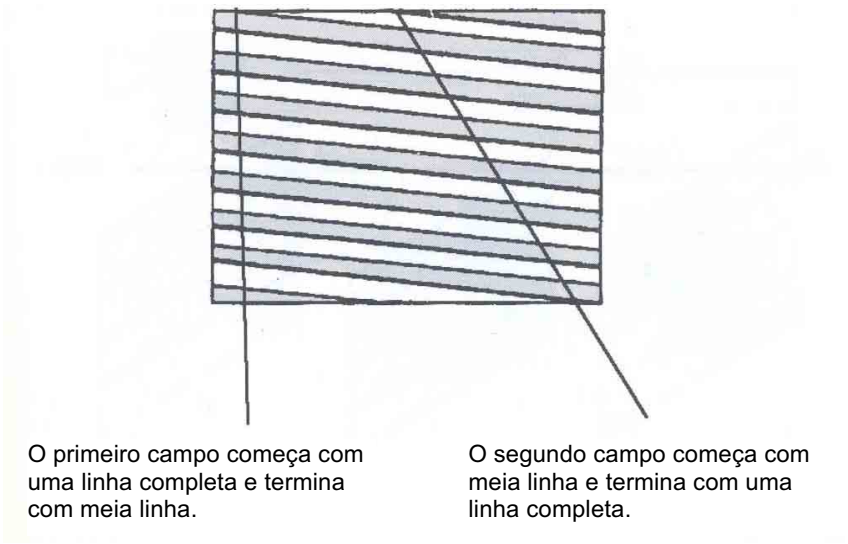


Figura 2.6: Campo par e ímpar da exploração entrelaçada.
Fonte: Adaptado de VALLEJO (1998).

- **Exploração progressiva**

Uma outra forma de eliminar as cintilações na transmissão PAL, é converter a exploração entrelaçada em progressiva ou não entrelaçada. Os campos, de linhas pares e ímpares, são combinados e reproduzidos ao mesmo tempo, na sua própria seqüência. A freqüência de visualização é de 50 Hz. A figura 2.7 ilustra o processo básico de converter a exploração entrelaçada em progressiva. As linhas dos campos se interpolam com o propósito de obter as 576 linhas contidas em um quadro no sistema PAL. Para evitar a cintilação, notável a

25 Hz, utiliza-se uma memória com a finalidade de apresentar os campos com uma freqüência de 100 Hz.

Uma câmara com exploração progressiva dobra sua capacidade de resolução vertical. Os modernos sistemas de visualização (Plasma display Panel – PDP, Liquid Crystal Display – LCD, Digital Micromirror Devices – DMD e Direct Image Light Amplifier – D-ILA) se baseiam na exploração progressiva.

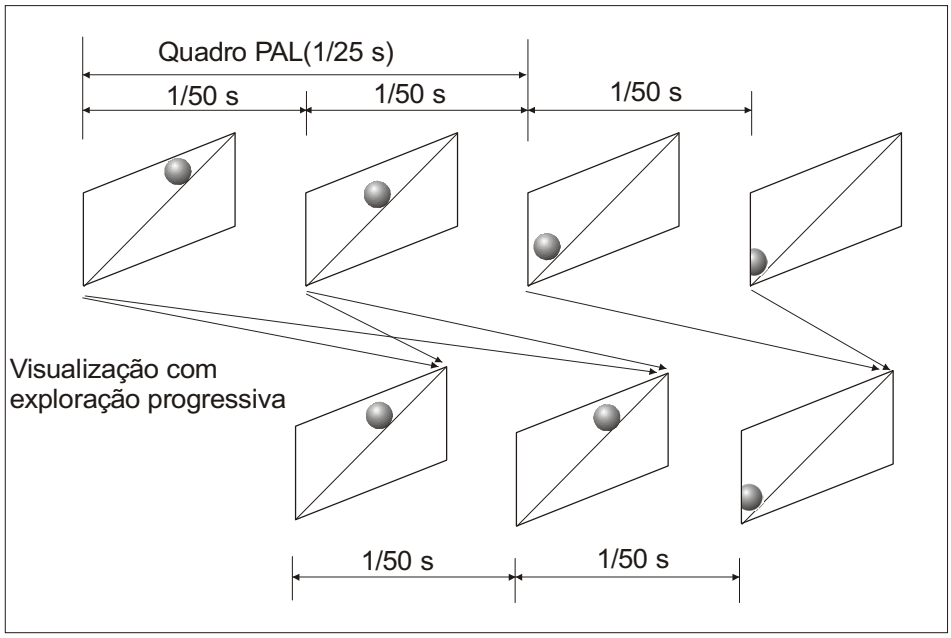


Figura 2.7: Processo de conversão da exploração entrelaçada em progressiva.
Fonte: Adaptado de OZER (1994).

2.1.6 Fator de Kell

Em 1940, Ray Davis Kell, realizou investigações sobre a resolução subjetiva e objetiva das imagens de televisão. Ficou constatado que o telespectador visualiza uma resolução inferior à real. A relação entre a resolução subjetiva, percebida pelo telespectador, e a resolução objetiva, a real, é conhecida como o *fator de Kell* ou *relação de utilização*.

O fator de Kell leva em consideração efeitos psicovisuais, pois o cérebro absorve menos informação do que existe na realidade.

Nos sistemas de exploração entrelaçada, o fator de Kell é de 0.7, e nos sistemas de exploração progressiva é de 0.9.

2.2 VÍDEO DIGITAL

A maioria dos sistemas de vídeo digital, usam a representação de componentes do sinal da cor. Muitas câmaras de vídeo coloridas possuem saídas RGB que são individualmente digitalizadas. A representação de componentes proporciona os meios que resultam na codificação composta. No vídeo digital não é preciso branqueamento ou pulsos sync, desde que um computador conheça exatamente onde uma nova linha se inicia e o número de pixels por linha. O branqueamento e pulsos sync são eliminados no conversor analógico/digital.

A modulação por codificação de impulsos (PCM) é usada para codificar o sinal de vídeo analógico com o objetivo de efetuar seu tratamento digital.

Para gerar o sinal digital são feitas medidas em intervalos regulares da forma de onda do sinal analógico, processo definido como *amostragem*, e a freqüência com que essas medidas são realizadas é a *freqüência de amostragem*. A figura 2.8 ilustra o processo.

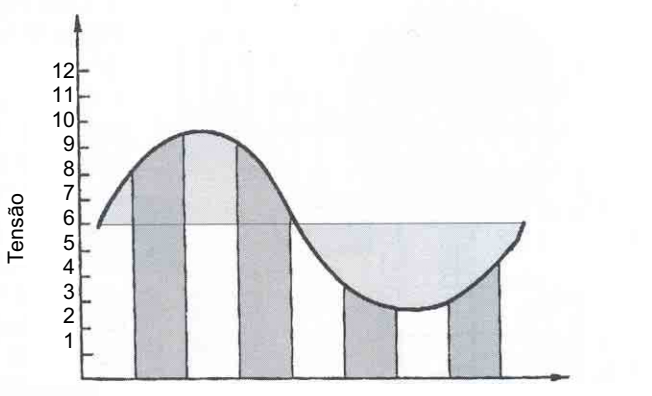


Figura 2.8: Amostragem do sinal analógico.
Fonte: Adaptado de VALLEJO (1998).

De acordo com GONZALEZ (1992), uma imagem representada por uma função contínua f(x,y) precisa ser digitalizada tanto espacialmente quanto em amplitude. A digitalização das coordenadas espaciais (x,y) é denominada *amostragem* e a digitalização da amplitude é chamada de *quantização em níveis de cinza*. As amostras são arranjadas na forma de uma matriz bidimensional, em que cada elemento é uma quantidade discreta. Esses elementos são denominados de *pixel* (picture element).

Uma imagem em preto e branco poderá ser formada de uma matriz de pontos que representam o brilho em forma numérica. Os pixels estão separados entre si por uma distância regular e dispostos em linhas e colunas.

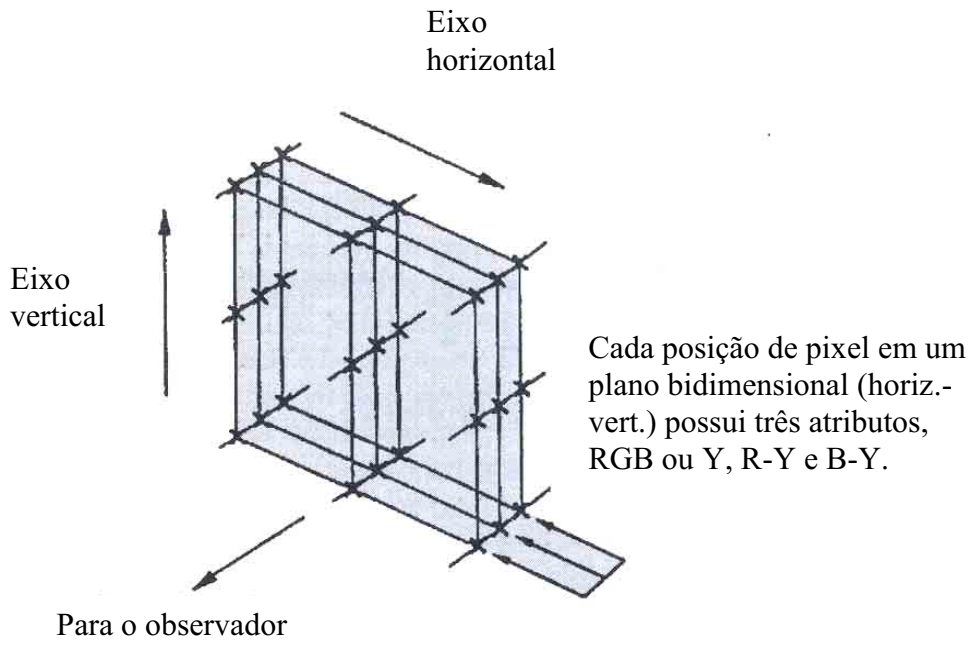


Figura 2.9: Três níveis de uma imagem colorida.

Fonte: Adaptado de WATKINSON (1994).

Uma imagem colorida gera para cada pixel as informações correspondentes às cores RGB ou Y, R-Y e B-Y, (figura 2.9). Cada imagem consiste de três camadas superimpostas das amostras, uma para cada componente. Cada pixel é um vetor que, para o formato RGB, possui três valores que representam a proporção de cada cor primária naquele ponto da imagem. Trabalhando-se com diferença de cor, cada pixel também contém três números que representam o brilho, o tom da cor e a saturação. (WATKINSON, 1994).

No sistema digital, o valor do pixel é um número inteiro que representa o comprimento da amostra. Esse valor é representado no sistema binário. As amostras de vídeo representadas por números inteiros, podem ser transmitidas de modo confiável, sem a perda de informação. Para a transmissão dos pixels representando as amostras, é usual o envio em série de dígitos ou bits (0 e 1); essa é a definição de *modulação por codificação de pulsos*.

Na detecção de erros no sistema digital é utilizada uma *codificação dos dados*, método que acrescenta bits de codificação (redundância) aos bits de uma imagem. Quanto maior for a probabilidade de erros, mais redundância será necessária. Caso o grau de erros exceda ao grau de redundância, a correção não pode ser feita e procede-se à aplicação de uma técnica que tende a ocultar erros.

A partir de amostras vizinhas, pode-se calcular o valor de um amostra perdida. Essa técnica é realizada mesclando-se a seqüência de amostras antes da gravação. Na reprodução, as amostras voltam a combinar-se, obedecendo a seqüência natural. O erro passa a ser dividido e a imagem será apresentada com a metade da freqüência, com uma certa perda de precisão. Praticamente todos os equipamentos digitais de gravação utilizam a redistribuição de pares e ímpares para efetuar a ocultação dos erros.

A seguir são relacionadas algumas vantagens do sistema digital em relação ao analógico:

1. Na gravação digital as cópias são fiéis ao original;
2. Caso alguns dígitos estiverem defeituosos por causa de ruído ou perda de sinal, o sistema de correção de erros restitui o valor original;
3. Gravações digitais ocupam menos espaço e possuem qualidade superior;
4. Os circuitos eletrônicos digitais custam menos;
5. Melhoramentos de imagem podem ser aplicados;
6. Operações podem ser realizadas em tempo real;
7. Possibilidade da criação de efeitos sobre a imagem.

Na Fotogrametria à curta distância, a flexibilidade e o baixo custo das câmaras são os fatores preponderantes na aceitação dos sistemas digitais.

Um sistema para **vídeo** digital mínimo é representado pela figura 2.10. Os sinais analógicos de vídeo entram no sistema e são transformados em sinais digitais pelo conversor analógico-digital, ADC. Na realidade, converte-se o vídeo analógico em digital e posteriormente gera-se este sinal no formato analógico novamente. Consiste de um par de conversores e hardware que padronizam as amostras com sinal de transmissão em série. Isto é necessário quando vários dispositivos estão conectados entre si.

O *laço fechado em fase* é um oscilador que se auto sincroniza com a média da freqüência do relógio, mas filtra o “jitter” (tremulação) na saída.

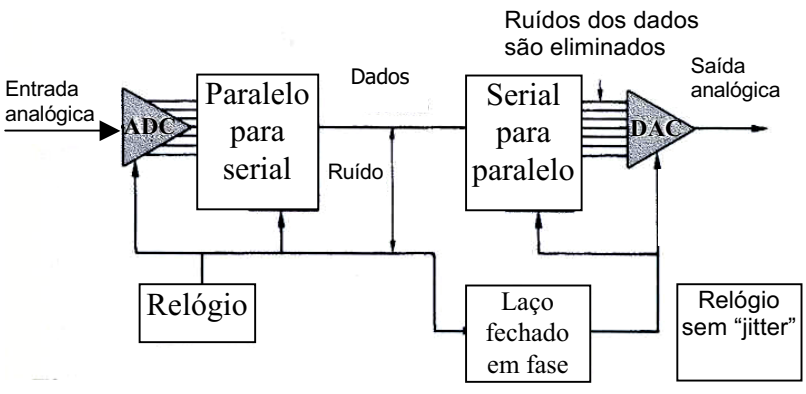


Figura 2.10: Sistema para vídeo digital mínimo
Fonte: Adaptado de WATKINSON (1994).

Acrescentando um circuito de memória RAM ao sistema anterior, é possível a gravação da seqüência de imagens.

As resoluções horizontal e vertical do vídeo digital são relacionadas ao número de pixels por linha e o número de linhas por quadro. Os efeitos no vídeo digital devido à baixa resolução são diferentes dos de vídeo analógico. No vídeo analógico, a baixa resolução gera embaçamento da imagem na respectiva direção. No vídeo digital, têm-se a pixelização (aliasing).

As maiores dificuldades na popularização do vídeo digital, atualmente, são a enorme quantidade de memória e a largura de banda na transmissão. A viabilidade do vídeo digital, depende da tecnologia de compressão de imagem.

2.2.1 Padrões de vídeo digital

Para o intercâmbio de vídeo digital, entre diferentes aplicações e produtos, são necessários formatos de padrões de vídeo. Os dados do vídeo precisam ser comprimidos para esse intercâmbio, necessitando com isto, de padrões de compressão.

Na indústria de computadores, padrões nas resoluções dos monitores; na indústria de TVs, padrões de estúdio digital; e na indústria de comunicações, padrões para os protocolos de redes já são estabelecidos. Devido ao vídeo digital estas indústrias estão começando uma padronização (Tabela 2.1).

Nos estúdios das TVs transmitidas, o vídeo digital não é novidade. Edições e efeitos especiais são gerados em vídeo digital, porque é mais fácil manipular imagens digitais. Nas regravações de vídeo digital não ocorrem degradações nas imagens como nos vídeos analógicos.

Tabela 2.1 – Padrões de estúdio de vídeo digital
Fonte: TEKALP (1995)

Parâmetro	**CCIR601 525/60 NTSC**	**CCIR601 625/50 PAL/SECAM**	**CIF**
Número de pixels ativos/linha			
Lum (Y)	720	720	360
Croma (U,V)	360	360	180
Número de linhas ativos/quadro			
Lum (Y)	480	576	288
Croma (U,V)	480	576	144
Entrelaçamento	2:1	2:1	1:1
Taxa temporal	60	50	30
Relação de aspecto	4:3	4:3	4:3

A tabela 2.1 contém os parâmetros dos padrões do CCIR 601 (Comitê Internacional Consultivo para Rádios). Devido à taxa de transferência de dados para os formatos CCIR 601 ser de 165 Mbps, muito alta para muitas aplicações, o CCITT (Comitê Internacional Consultivo para Telefones e Telégrafos) propôs um novo formato de vídeo digital, o Formato Comum Intermediário (CIF). O formato CIF é progressivo, e requer aproximadamente 37 Mbps na taxa de transferência de dados.

Na indústria de computadores os padrões das resoluções dos monitores são definidos pela VESA (Associação de Padrões de Vídeos Eletrônicos). O padrão atual SVGA suporta dois modos: 1280

pixels/linha x 1024 linhas ou 1024 pixels/linha x 768 linhas, com uma taxa de atualização de 72 quadros/segundo.

Várias aplicações com vídeo digital são possíveis, tais como, televisão de alta resolução, serviços de multimídia, videoconferência, fotojornalismo, etc.

2.3 - CONVERSÃO DE SINAIS DE VÍDEO

No processo de conversão de sinal analógico para digital são geradas as principais fontes de degradação no sinal, a degradação ocorre na entrada e na saída do domínio digital.

A amostragem de uma forma de onda de vídeo analógico, ocorre no domínio temporal de um ADC (conversor analógico-digital). A imagem fica amostrada espacialmente em duas dimensões (linhas e pixels) e temporalmente em campos, em uma terceira dimensão.

O processo de amostragem pode ser realizado com um conjunto de pulsos, tendo amplitude e período constantes (Figura 2.11a).

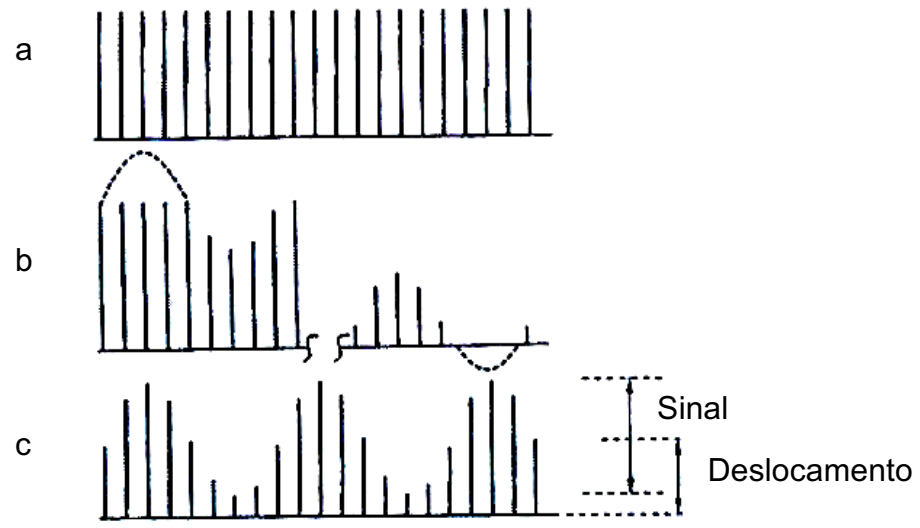


Figura 2.11: Processo de amostragem,
Fonte: Adaptado de VALLEJO (1998).

A figura 2.11b apresenta um processo de amostragem, gerando uma sobremodulação do conjunto de pulsos, devido a amplitude de amostragem não estar compatível com a amplitude da forma de onda do sinal analógico. Para se evitar a sobremodulação, aplica-se um deslocamento à forma de onda analógica (figura 2.11c), com o auxílio de uma tensão contínua. A sobremodulação produz o efeito de *aliasing*, ou serrilha.

O “Aliasing” também pode ser produzido no domínio da freqüência, como mostra a figura 2.12b. Este efeito não aparece quando a freqüência de entrada for igual ou menor à metade da freqüência de amostragem (Figura 2.12a). Este efeito pode ser observado numa seqüência de imagens em movimento, na qual a velocidade de um objeto é maior que a metade da velocidade de captura dos quadros. As rodas de um carro em movimento são um exemplo.

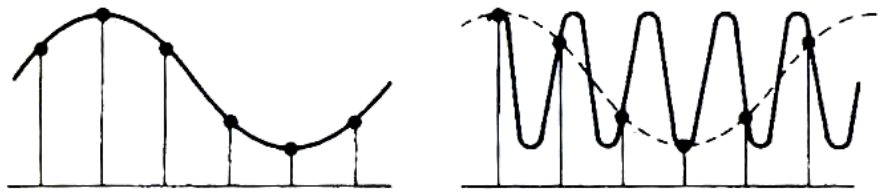


Figura 2.12: Amostragem sem e, com efeito, de aliasing
Fonte: Adaptado de VALLEJO (1998).

Para reduzir o efeito de “aliasing” produzido no domínio da freqüência, são utilizados filtros de passa baixa. Esses filtros deixam passar somente as freqüências baixas.

Quando se tomam amostras em ADC (conversor analógico-digital) ou em DAC (conversor digital-analógico), as conversões devem estar espaçadas de modo regular para que não introduzam sinais indesejados nos componentes de vídeo. A figura 2.13a mostra o efeito

provocado pelo “jitter” (tremulação) do relógio sobre uma forma de onda; como resultado as amostras são tomadas em instantes incorretos. A tremulação é a flutuação que um sinal sofre como conseqüência da tomada de amostras em intervalos incorretos. A figura 2.13b representa a amostra corrigida desse efeito.

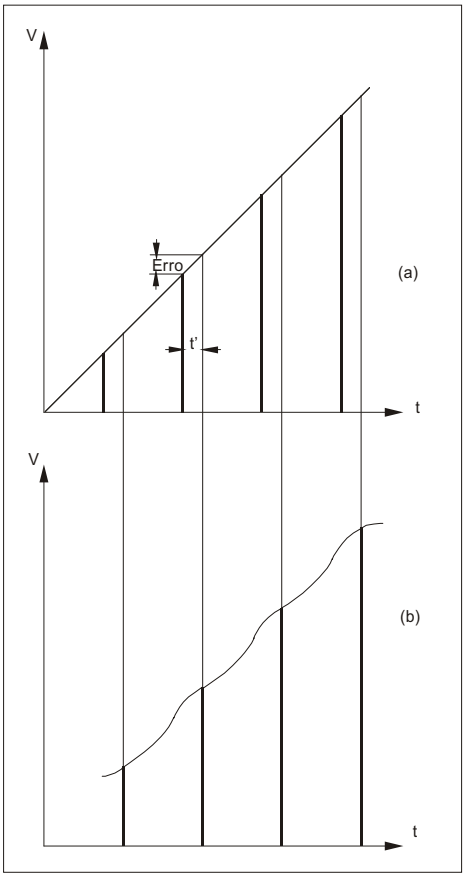


Figura 2.13: Forma de onda com e sem efeito “jitter”.
Fonte: Adaptado de WATKINSON (1994).

Na quantificação, expressa-se com valores discretos (codificáveis), uma amostra obtida de um sinal que varia continuamente com o tempo. Como exemplo, temos o tempo que varia de maneira contínua. No entanto, o mostrador de um relógio digital muda repentinamente a cada minuto, pois o relógio está quantificando o tempo.

Em vídeo os valores a serem quantificados são tensões que variam de modo contínuo, procedentes de um sinal analógico.

A figura 2.14 mostra que o processo de quantificação divide a faixa de tensão em intervalos de quantificação Q, denominados também de degraus S.

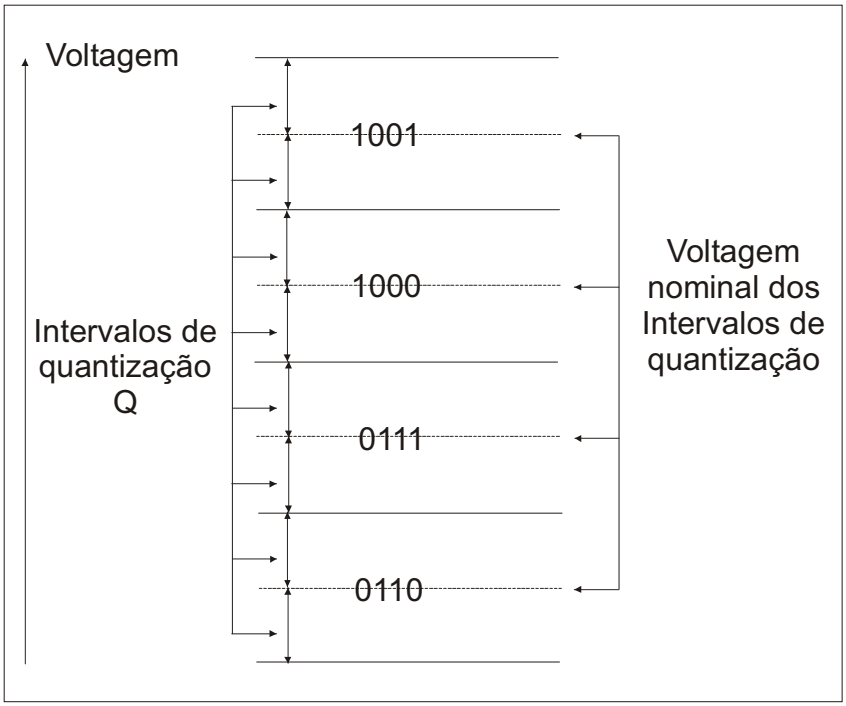


Figura 2.14: Tensão dos intevalos de quantificação.
Fonte: Adaptado de VALLEJO (1998).

Para o vídeo digital, os intervalos de quantificação devem ser idênticos; portanto, os números binários resultantes são proporcionais à tensão analógica original. Na figura 2.14, o nível de quantificação 1 codifica-se mediante a palavra 0110, o nível 2 com 0111 e assim sucessivamente.

2.3.1 Conversores Digitais/Analógicos e Analógicos/Digitais

Um conversor digital-analógico gera uma forma de onda contínua. Através de valores numéricos, converte um sinal digital em um correspondente sinal analógico. A figura 2.15 mostra o diagrama de blocos de um conversor DAC convencional. O “jitter” do sinal de relógio é eliminado pelo VCO (oscilador controlado por tensão).

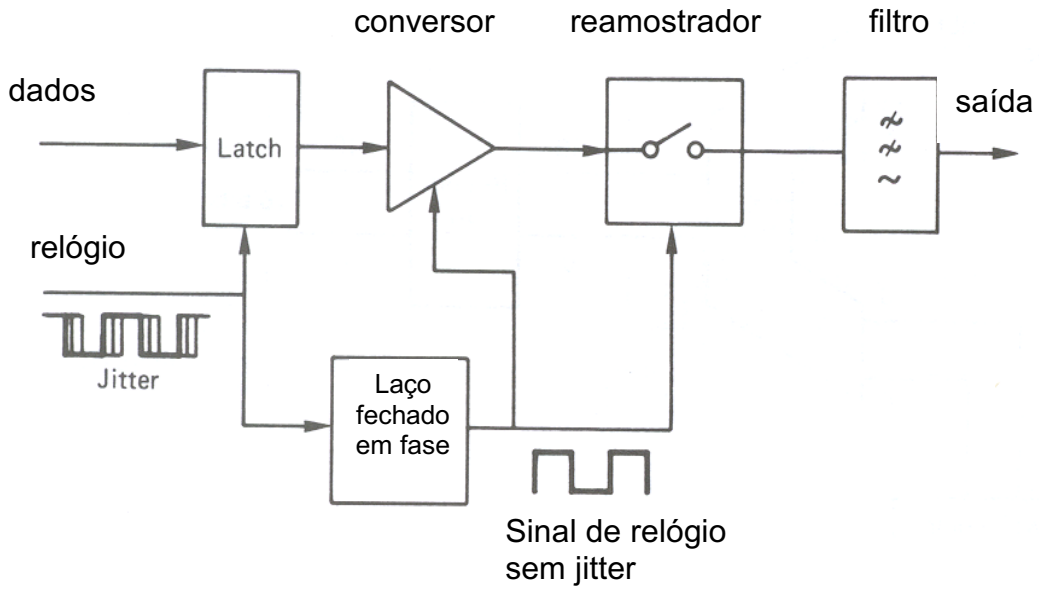


Figura 2.15: Diagrama de blocos de um conversor DAC convencional.
Fonte: Adaptado de VALLEJO (1998).

Os valores das amostras são armazenados em um registrador (*latch*), e passados para o conversor. A saída é uma tensão proporcional ao número das amostras. O reamostrador elimina os transitórios de comutação. A comutação é o processo pelo qual um sinal de vídeo pode ser introduzido em outro para substituir parte da imagem por outra imagem distinta.

2.4 – CÂMARA DE VÍDEO

O coração de uma câmara de vídeo é o seu dispositivo de formação de imagem. As primeiras câmaras utilizavam tubo de raios catódicos. As primeiras câmaras coloridas possuíam 4 tubos (vermelho, azul, verde e luminância). Hoje a maioria das câmaras utiliza um chip de computador chamado Charged-Coupled Device (CCD) ou dispositivo de Carga Acoplado. Os tamanhos mais comuns de CCD são 1/4”, 1/3”, 1/2” e 2/3”.

Segundo TOMPSETT at al (1970/1971), citado por Shortis e Beyer em ATKINSON (1996), o primeiro CCD construído consistia de somente oito elementos de óxido de metal semicondutor, tendo sido montada uma matriz linear de 96 fotodiodos que produziram as primeiras imagens úteis.

Atualmente a quantidade de elementos sensores que compõem um CCD, está na faixa de dezenas de milhões. De acordo com JANESICK at al (1990), citado por Shortis e Beyer em ATKINSON (1996), a maior matriz de sensores possuía aproximadamente 20 milhões de elementos sensores.

2.4.1 CCD - Charged-Coupled Device

Os CCDs são sensores dispostos como matrizes lineares ou em matrizes bidimensionais. Sendo os bidimensionais empregados na Fotogrametria à curta distância. O CCD converte a luz que incide sobre sua superfície em elétrons, que são acumulados em capacitores e convertidos no formato digital.

O tamanho da matriz e o tamanho do pixel são as características mais importantes de uma câmara para uso na Fotogrametria. A faixa dinâmica, as características geométricas (principalmente a distorção das lentes), a transferência dos dados do

sensor para serem armazenados e o tempo de gravação da imagem também constituem características importantes.

A quantidade de dados que precisam ser armazenados de uma imagem no formato digital depende do tamanho do CCD. Um sensor com uma matriz de 752 x 480 pixels, precisará de 360 Kbytes e uma matriz de 3000 x 2000 pixels precisará de 6 Mbytes.

2.4.2 Funcionamento do CCD

Um CCD é composto por diodos fotocondutores; esses elementos sensíveis a luz estão em um primeiro plano de um circuito integrado (Figura 2.16).

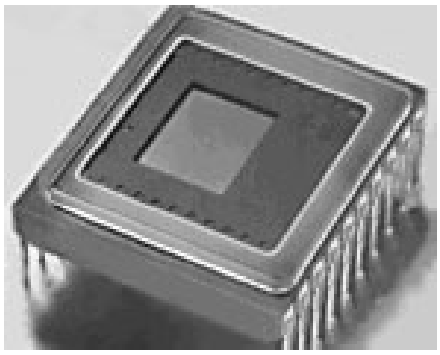


Figura 2.16: Sensor de imagem.
Fonte: www.cybercollege.com/port/tvp008.htm

Cada posição de um quadro de imagem recebido do sistema ótico da câmara é transformada por cada um destes elementos em uma carga elétrica. A dimensão desta carga elétrica é proporcional à quantidade de luz recebida.

A carga gerada é acumulada em capacitores MOS (Metal Oxide Semiconductor) dentro do circuito integrado (Figura 2.17a). Esta carga é transferida para uma outra área capacitiva para ser *lida* e

colocada disponível no terminal de saída do integrado, enquanto novo quadro de imagem está sendo gerado (Figuras 2.17b e 2.17c).

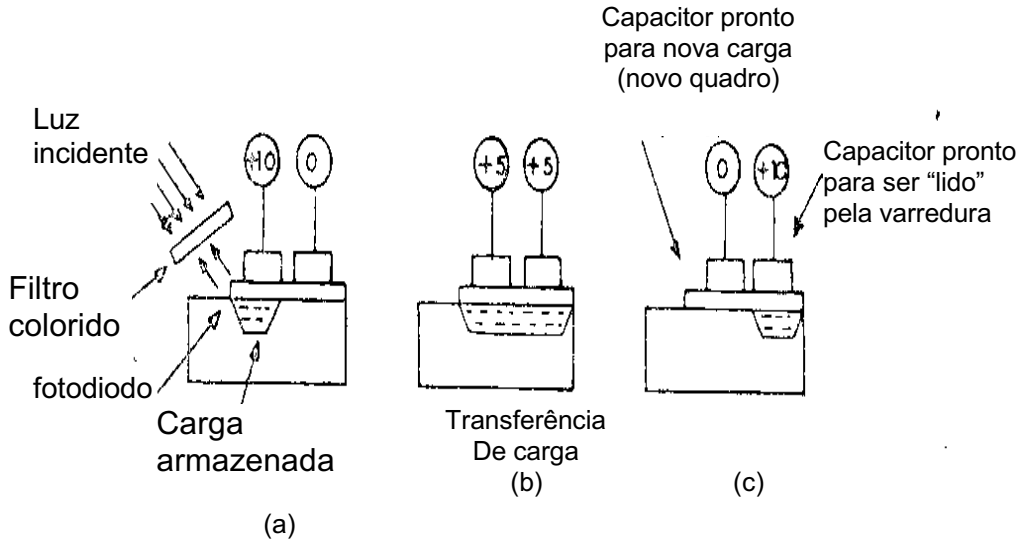


Figura 2.17: Carga gerada é acumulada em capacitores usando a técnica MOS.
Fonte: Adaptado de MARCHI (1988).

A leitura de cada carga disponível em cada capacitor, correspondente a cada elemento de imagem, é feita através de varredura digital com registradores de deslocamento (shift register), ou seja, as tensões dos elementos da linha são colocadas no terminal de saída seqüencialmente, até completar uma linha.

Terminada a linha, o registrador de deslocamento vertical desloca todas as linhas de forma que a segunda linha passe a ser primeira; a tensão do primeiro elemento da segunda linha é colocada no terminal de saída e novos deslocamentos horizontais são realizados (Figura 2.18). Esse processo continua até que todas as linhas do quadro tenham sido transferidas. Um novo quadro é transferido dos capacitores acoplados aos diodos fotocondutores, para os capacitores comandados pelos registradores de deslocamento, e assim sucessivamente.

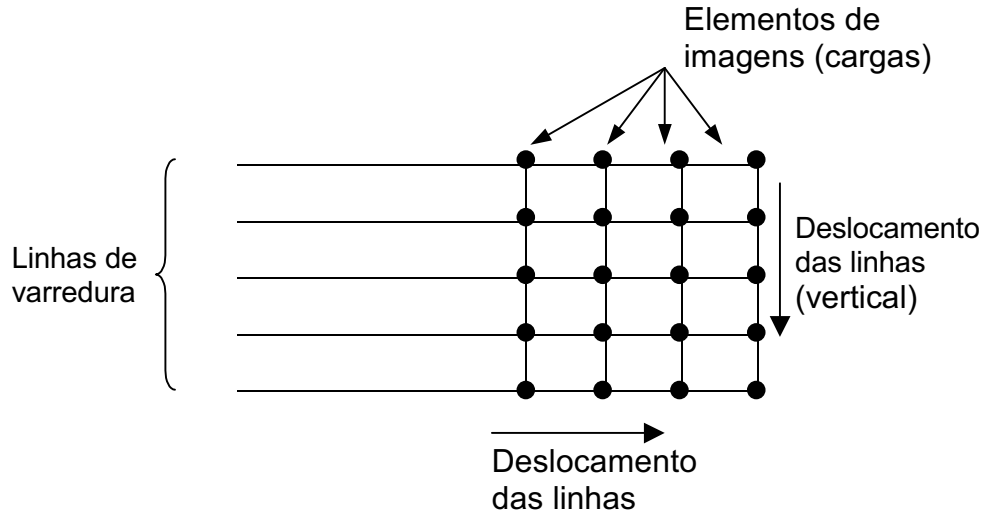


Figura 2.18: Varredura das linhas horizontais.
Fonte: Adaptado de MARCHI (1988).

2.4.3 Propriedades geométricas e radiométricas do CCD

De acordo com Shortis e Beyer em ATKINSON (1996), a homogeneidade dos elementos sensores e a superfície linear do sensor, são os fatores mais importantes caso o CCD seja usado para aplicações fotogramétricas. A acurácia na fabricação do sensor tem um impacto direto sobre a aplicação do princípio de colinearidade.

Os CCDs são fabricados pela superposição de camadas sobre o substrato de silício. Cada camada serve para um propósito. A geometria das camadas depositadas, é controlada por um processo fotolitográfico, comum na fabricação de todos os circuitos integrados baseados sobre fatias de silício.

O limite da acurácia e precisão geométrica dos CCDs, pode ser deduzido através da acurácia e precisão do processo fotolitográfico. Microprocessadores fabricados com objetivos de projetos de 0,3-0,5 μm necessitam de acurácia melhor do que 0,1 μm.

Medições diretas e indiretas dos sensores também indicam níveis similares de acurácia e precisão. Medições em um sensor

matricial CID usando um microscópio indicaram que o espaçamento principal estava entre 0,2 μm para uma especificação de 0.45 μm.

A superfície linear do CCD é um assunto relacionado à forma completa do substrato de silício e também da superfície microtopográfica. Estudos indicam que os efeitos da não linearidade são manifestados como uma degradação na performance total do CCD, mas não podem ser modelados e eliminados através da auto-calibração. (GALO, 1993)

A microtopografia é causada pela superfície inicial do silício e pela estrutura das portas usadas para o dispositivo de carga acoplada. A regularidade da superfície inicial foi estimada através da microscopia de elétrons de silício, e indicou uma variação de 0,5 μm.

2.5 CÂMARA DE VÍDEO COM CCD

O tipo mais comum de câmara de estado sólido é a baseada no formato da televisão transmitida; é chamada de CCTV ou câmara de vídeo. Este tipo de câmara é usado para a transmissão de televisão, filmadora de vídeo doméstico, sistemas de segurança para vigilância, Visão de Máquina, Fotogrametria em tempo real e Metrologia industrial.

O formato de radiodifusão adotou a relação 4:3 da largura para a altura, originada das câmaras de vídeo de tubos. Os primeiros sensores CCD para padrão de vídeo eram equivalentes a um tubo de 2/3", correspondente ao formato do sensor de estado sólido de 8,8 x 6,6 mm. Com o aperfeiçoamento na tecnologia de fabricação, os CCDs geralmente são disponíveis nos formatos de ½" e 1/3", correspondendo respectivamente à 6,4 x 4,8 mm e 4,9 x 3,7 mm.

A resolução do CCD em termos de elementos sensores, depende do padrão de vídeo. Resoluções típicas são na ordem de 700

pixels na horizontal e 500 pixels na vertical. Em conseqüência o espaçamento dos elementos sensores varia de 10 μm para o formato de 2/3" , para menos de 5 μm para o formato de 1/3". É improvável a fabricação de elementos sensores menores que 5 μm, devido ao decréscimo em sua capacidade e conseqüente perda do alcance dinâmico.

Os CCDs para a televisão de alta definição (HDTV) adotam novos formatos para os padrões de vídeo. O tamanho do CCD é 14 x 8 mm e tem uma relação de 16:9.

Uma câmara de vídeo padrão incorpora placas eletrônicas para prover várias funções. Uma dela é processar o sinal apropriado para diminuir o ruído e manter uma voltagem de referência constante para o sinal de saída. A sincronização dos sinais de entrada e saída é crítica para câmaras de vídeo com sinal analógico na saída, e com altas freqüências tipicamente maiores que 10 MHz.

A figura 2.19 mostra um diagrama de bloco de uma câmara de vídeo padrão. Para converter corrente alternada externa para corrente contínua interna é necessária uma unidade de potência, gerando várias voltagens para os componentes eletrônicos. O *detector de sincronização externa* possui duas tarefas. A primeira é detectar um sinal de sincronização externo e ativar a câmara para usar este sinal ou o relógio interno. A segunda é converter os sinais de sincronização externos em sinais internos.

O sinal de saída de vídeo é pré-processado, para redução de ruído. Pode ser através de uma amostragem simples ou um esquema avançado de amostragem múltipla.

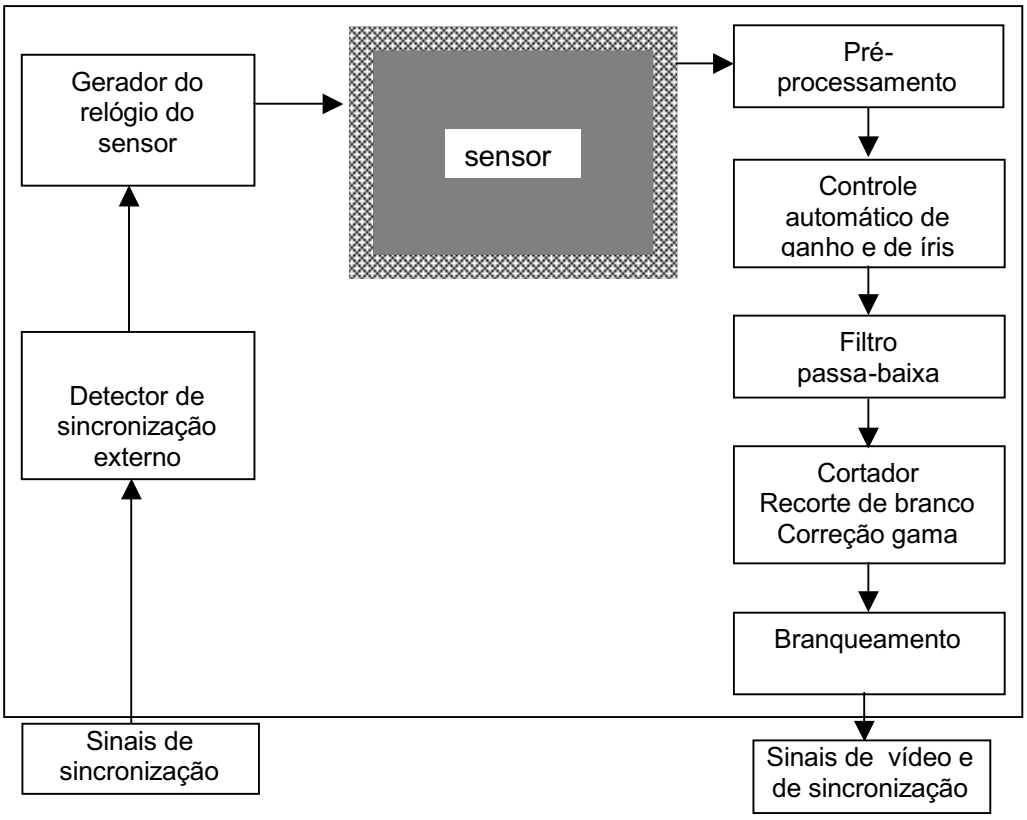


Figura 2.19: Diagrama de bloco de uma câmara de vídeo padrão.
Fonte:Adaptado de SHORTIS E BEYER (1996).

O *controle automático de ganho e de* íris ajusta o brilho médio da imagem. Ele procura compensar o efeito da luz ambiente, mas pode gerar efeitos indesejáveis no nível de sinal de uma área da imagem, caso as condições de iluminação mudem em outro lugar na imagem. Esta função é controlada por um interruptor, pois não é aceitável em condições desfavoráveis de iluminação ou onde a radiometria é importante. O *filtro passa-baixa* é usado para remover transientes, efeitos de alta freqüência na imagem, ocasionados por erros de relógio. O *Cortador* remove quaisquer componentes que poderiam resultar em um sinal negativo, com respeito à um nível de referência zero. O *recorte de branco* remove qualquer sinal acima do máximo do padrão de vídeo. A função *correção*

gama é usada para compensar a conduta não linear dos monitores de televisão. Esses monitores possuem um gama de aproximadamente 2, e requerem um fator de correção gama de 0,5 com a câmara. Normalmente, as câmaras são chaveadas com fator de correção gama entre 0,5 e 1.

A função *branqueamento* introduz o nível zero de referência no sinal de saída. Conforme o tipo de padrão de saída, uma informação de sincronização também é adicionada ao sinal de saída.

A inovação nas câmaras CCTV é a varredura progressiva, normalmente combinada com a saída digital. As câmaras com varredura progressiva habilitam as imagens à serem transmitidas entrelaçadas ou como quadro completo.

A varredura progressiva possui duas vantagens:

1. É compatível com formatos de telas não entrelaçados, como as telas dos computadores;
2. O quadro completo da imagem, é independente do problema relacionado ao movimento da câmara ou do objeto.

2.6 CAPTURA DE VÍDEO

O dispositivo que faz a captura de imagens de vídeo para um microcomputador é uma placa de circuito impresso denominada *frame grabber*. A função desta placa é amostrar a saída de um sensor de estado sólido, que é transmitido por um padrão de vídeo analógico. Este sinal de vídeo analógico poderá ser retransmitido e visualizado em um monitor de vídeo ou gravado continuamente.

As amostras coletadas por *frame grabber* são armazenadas em memórias de estado sólido, que, posteriormente, podem ser acessadas por outros computadores.

Dependendo do tipo de aplicação das imagens amostradas, a *frame grabber* precisa amostrar intermitentemente e

armazenar os quadros individuais, ou coletar pequenas seqüências de quadros, ou, ainda, ler continuamente o sinal de vídeo e processar as imagens em tempo real.

A quantidade de memória disponível necessária para o *frame grabber* dependerá do propósito das aplicações, como também da sua capacidade em adquirir imagens coloridas nos padrões de vídeo existentes. Capacidades avançadas incluem captura sincronizada através de um número de canais para coletar várias bandas ou imagens de múltiplas câmaras.

Os *Frame grabbers* que trabalham em tempo real possuem estas capacidades avançadas, devido aos processadores de sinais digitais existentes em suas placas. Estes processadores podem executar tarefas básicas de processamento de imagens na mesma faixa de freqüência dos quadros recebidos.

A necessidade de que a *frame grabber* fique residente no computador forçou os fabricantes a desenvolverem vários tipos desses equipamentos. A mesma *frame grabber* precisa ser compatível com PCs, Macintoshs e estações de trabalho Unix. Conseqüentemente há uma grande variedade de frame grabbers no mercado. Entretanto todas possuem os elementos funcionais básicos apresentados na figura 2.20. É o mínimo necessário para capturar uma imagem através de vídeo analógico.

A função *comparação de impedância* restaura a impedância do sinal de vídeo, e deriva o sinal para a sincronização e módulos de pré-processamentos analógicos. O *restaurador de corrente contínua* restaura o nível de voltagem zero. Aplica-se um filtro passa baixa para remover os distúrbios da freqüência alta no sinal, e finalmente faz-se as correções de deslocamento e ganho.

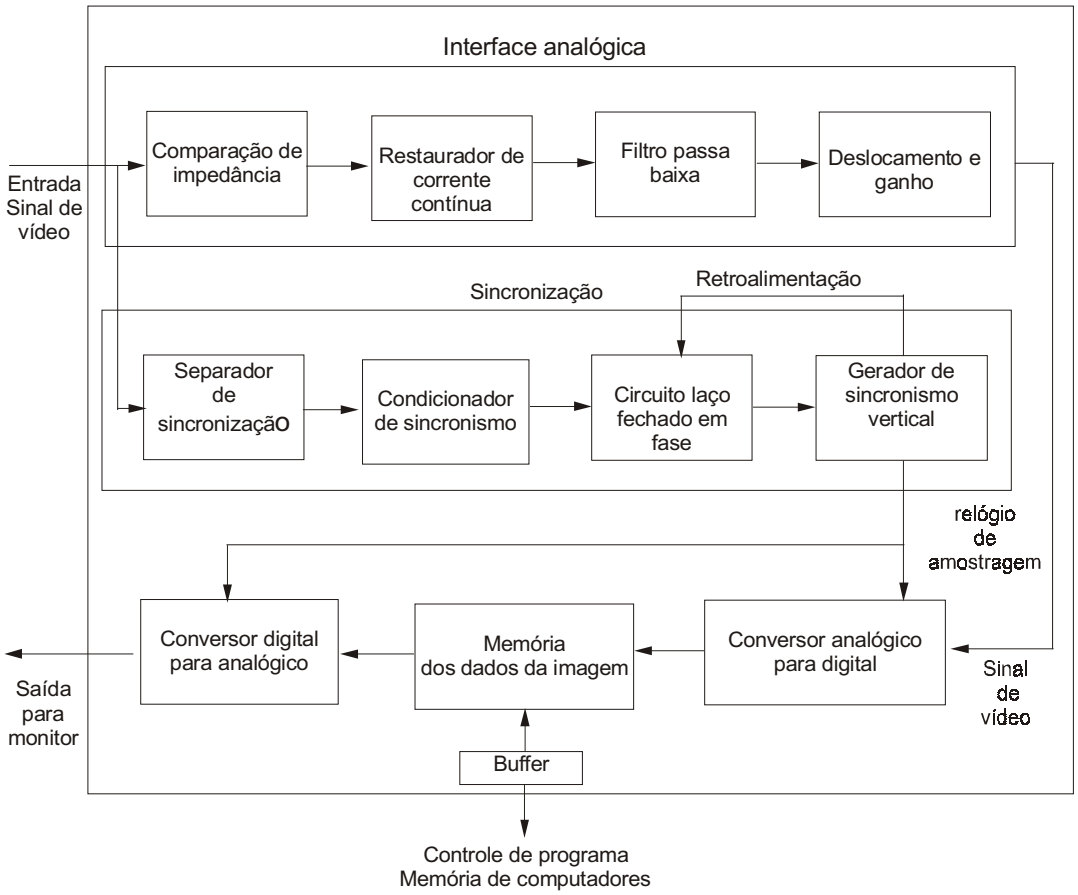


Figura 2.20: Elementos básicos para capturar imagem através de vídeo analógico.
Fonte:Adaptado de SHORTIS E BEYER (1996).

Devido ao tamanho da banda ser grande no sinal de entrada é importante que as impedâncias dos cabos coaxiais de transmissão sejam compatíveis com as impedâncias da *frame grabber*, e os cabos estejam conectados corretamente. Impedâncias e conecções incorretas produzem degradação no sinal.

O *restaurador de corrente contínua* é necessário para manter consistente o nível de branco na presença de mudanças da média de brilho na imagem. O *filtro passa-baixa* remove os distúrbios, mas pode produzir efeitos de deslocamentos e tremores nas imagens. Os ajustes de

deslocamento e ganho são necessários para ajustar a média do brilho nas imagens.

2.6.1 Sincronização e resolução.

Sem separar a sincronização dos sinais, a *frame grabber* deriva a sincronização das entradas de vídeo composto. A precisão da sincronização é fundamental para a fidelidade das imagens capturadas.

O módulo de sincronização remove a informação da imagem de vídeo usando um *separador de sincronização.* Do resultado da sincronização do sinal composto são removidos a equalização e os sinais transmitidos. O sinal através do separador de sincronização é direcionado para o circuito que detecta os pulsos de sincronismo vertical (Vsync), usando uma combinação de filtro passa baixa e detector de bordas. Os pulsos de sincronismo horizontal (Hsync) são detectados usando um *circuito laço fechado em fase* (PLL). O circuito PLL possui um loop de retroalimentação que restaura uma alta freqüência, do pulso de amostragem do relógio interno para os pulsos Hsync. O PLL usa uma comparação de fase para direcionar os pulsos para o sinal Hsync.

Em decorrência da natureza do sinal de transmissão, se a resolução vertical da câmara e da frame *grabber* não coincidirem, algumas linhas horizontais no final de cada campo serão descartadas ou branqueadas. Algumas *frames grabbers* possuem a capacidade de ajustar a relação entre os pixels da imagem do sensor e a imagem mostrada.

2.6.2 Line jitter.

A freqüência do relógio gerada pelo PLL flutuará por algum tempo depois da captura da imagem, até que uma parada estável sobre os pulsos Hsync seja obtida. Uma imprecisão na fase de comparação ou PLL resultará no fenômeno conhecido como *line jitter*.

Este fenômeno causa deslocamentos nas linhas de varredura da imagem, e é gerado por ruído no sinal, flutuação na voltagem ou pulso do relógio. O uso somente do Hsync elimina as perturbações no retraço vertical, mas os sinais de sincronização em separado não eliminam o line jitter.

Para eliminar o line jitter utiliza-se um circuito de *amostragem de sincronia de pixel* no lugar do PLL. O sinal Hsync é transformado por um circuito detetor de borda e o relógio interno de amostragem é substituído por um *relógio de pixel*. A desvantagem do circuito de *amostragem de sincronia de pixel* é que o *relógio de pixel* limita a taxa de transmissão do sinal.

2.6.2 Efeito do aumento da temperatura.

As *frames grabbers* e as câmaras CCD ficam expostas aos efeitos de aquecimento nos circuitos eletrônicos, até que a placa adquira o equilíbrio térmico.

Estudos realizados por DAHLER (1987), *apud* GALO (1993), comprovaram o efeito do aumento da temperatura (warm-up effects) durante o processo de aquisição de dados em uma câmara CCD. Foi observado que as imagens adquiridas logo após o ligamento da câmara, apresentaram translações nas direções x e y. Decorrido algum tempo essas translações diminuíram, até estabilizarem em torno de zero.

O tempo de aquecimento para uma placa frame grabber ou uma câmara CCD pode durar até 2 horas, e durante este tempo podem ser geradas imagens deslocadas na ordem de vários pixels.

2.6.3 Fator de escala (Sx).

A freqüência de transmissão dos dados no sinal analógico, produzido por uma câmara de vídeo ou um videocassete, geralmente não é igual à freqüência do conversor A/D de uma “frame grabber”. Esta diferença de freqüências provoca uma alteração no fluxo dos dados transmitidos, isto é, gera uma diferença entre elementos

sensores e elementos da imagem (pixel) de uma linha. O fator de escala no sentido horizontal (Sx) é devido a esta diferença. Este fator de escala é determinado no procedimento de calibração.(GALO, 1993)

2.6.4 Quantização.

No processo de aquisição das imagens por uma câmara CCD, ou na captura de imagens analógicas por uma "frame grabber", ocorre uma etapa de quantização espacial e uma quantização em termos de tons de cinza (radiométrica). A quantização (discretização) é devida à transformação de uma função contínua para uma função discreta; neste procedimento sempre há perda de alguma informação. Para a minimização deste erro deve-se utilizar câmaras ou digitalizadores com maior resolução, ou seja, com um número maior de elementos sensores e com uma menor dimensão.

2.7 SISTEMA NU-VIEW – ESTÉREO-VÍDEO-CÂMARA

O sistema de captura de imagens estereoscópicas da Nuvision, tem sido usado na captura e reprodução de imagens estereoscópicas para televisão. Este sistema permite a gravação de estereopares em frames entrelaçados, que podem ser visualizados com óculos especiais, de cristal líquido. Os frames gravados em formato VHS podem ser digitalizados e separados, para permitir a reconstrução da cena.

Figura 2.21: O sistema para captura de imagens estereoscópicas em vídeo.

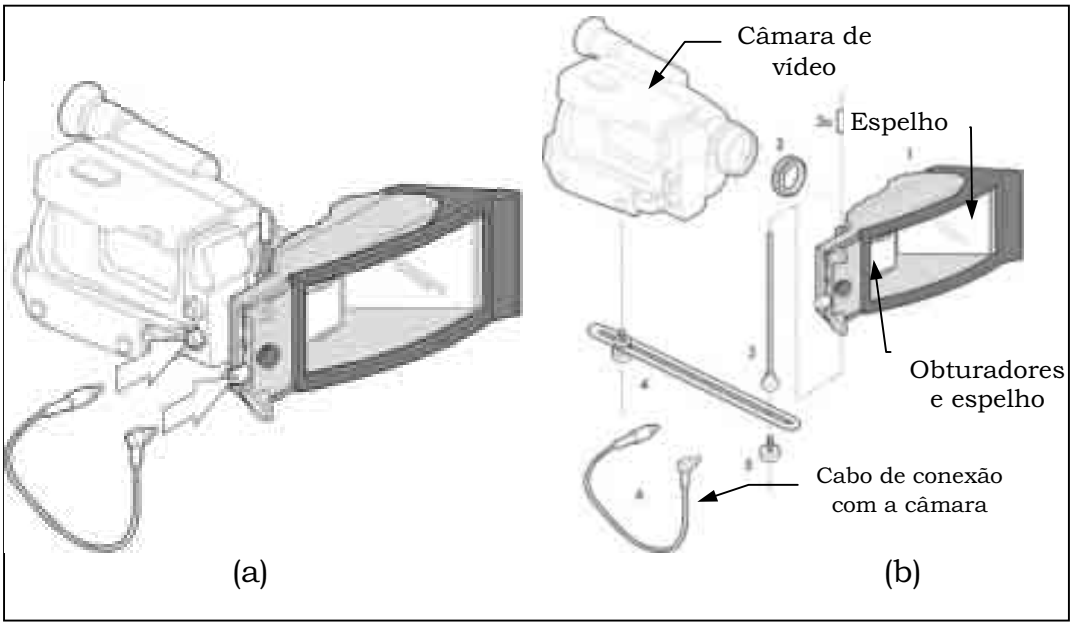


Figura 2.22: Componentes do sistema para captura de imagens estereoscópicas em vídeo.

As figuras 2.21 e 2.22 mostram a configuração do sistema de captura, que pode ser acoplado a qualquer câmara de vídeo VHS. Os sistema é composto de espelhos e de dois obturadores de cristal líquido, que são sincronizados por cabo com a câmara, permitindo que estes obturadores trabalhem na mesma freqüência 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 do espelho é gravada. Este sistema possui ainda uma característica importante, que é o ajuste dinâmico da convergência

Pode-se imaginar o sistema como duas janelas, uma para a visão do olho esquerdo e outra para a visão do olho direito. Eles são posicionados a 2.2” (56 mm) um do outro, um pouco menos que a média da distância interpupilar humana, que é em média de 2.6” (66 mm). Esta distância forma a estereo-base do sistema.

Quando o Nu-View está conectado à câmara, são vistas duas imagens sobrepostas que se movem horizontalmente uma em relação a outra quando o botão de ajuste de convergência for girado. Pode-se alinhar as duas imagens para objetos à longa distância ou para objetos à curta distância, mas nunca para ambas as distâncias ao mesmo tempo. As imagens criadas e armazenadas são similares às vistas com os olhos. Quando o ser humano olha uma cena natural, os olhos fixam-se sobre os objetos da cena, isto é, eles convergem para o mesmo ponto do objeto e ajustam seus focos para aquela distância (acomodação).

Durante o processo de gravação, os LCSs abrem e fecham sincronizadamente, para permitir a gravação da imagem direta e da refletida pelo espelho. As duas imagens são gravadas em campos alternados da fita. Para visualizar as imagens em uma televisão são utilizados óculos de cristal líquido LCS (“Liquid Cristal Shutters”). Os óculos de LCS consistem de dois obturadores de cristal líquido que abrem

e fecham a partir de um comando gerado pelo sinal de sincronismo dos campos, gravado na fita de vídeo. O obturador da esquerda é aberto e o da direita fechado quando a imagem da esquerda é exibida, e inversamente com a imagem direita.

O sinal de saída de uma câmara de vídeo é um sinal unidimensional que segue alguns padrões, adequados para a transmissão e visualização nas televisões (NTSC, PAL-M, SECAM E RGB). Este sinal analógico é entrelaçado, isto é, possui campos alternados, que é um artifício usado nos primórdios da TV para compatibilizar a melhor resolução com os limites impostos pelas taxas de transmissão. No padrão entrelaçado a transmissão da imagem se dá de modo alternado entre as linhas: as linhas pares são transmitidas como um campo e, em seguida é transmitido o campo correspondente às linhas impares (Galo et al, 1990). A figura 2.23 mostra uma imagem tomada com o sistema, onde percebe-se claramente a paralaxe provocada pela mudança de ponto de vista entre os campos. A imagem apresentada foi digitalizada e os campos podem ser facilmente separados em imagens distintas.

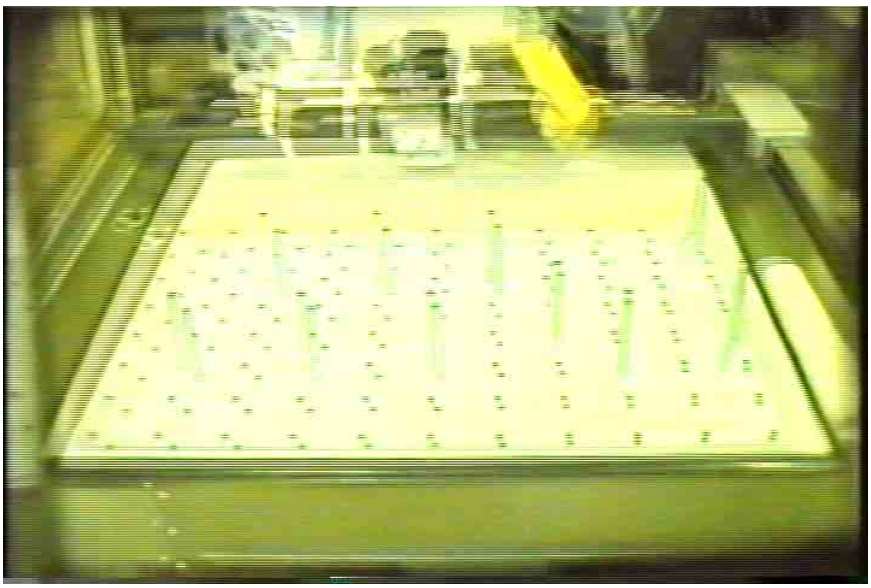


Figura 2.23: Imagem obtida pelo sistema mostrando o padrão entrelaçado.

CAPÍTULO 3

CALIBRAÇÃO E RECONSTRUÇÃO

3.1 – GEOMETRIA DO IMAGEAMENTO

3.1.1 Referenciais

A definição adequada de um referencial é um dos primeiros procedimentos para a orientação do sensor. Os referenciais utilizados em Fotogrametria podem ser bidimensionais ou tridimensionais e, podem estar relacionados aos instrumentos, às imagens e aos objetos. A figura 3.1 ilustra alguns sistemas de referência: dois sistemas de coordenadas fotogramétricos (x y z e z' y' z') e um sistema de coordenadas objeto (X Y Z).

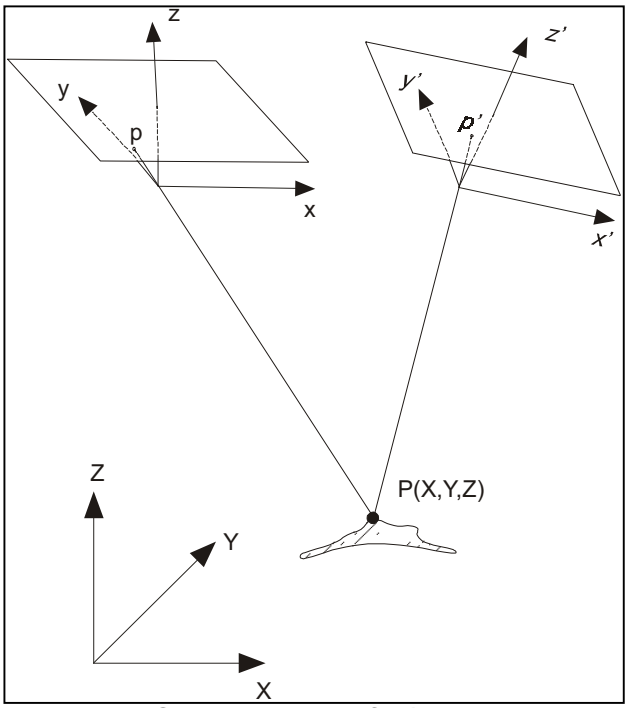


Figura 3.1 Sistemas de referência no espaço objeto e imagem.
Fonte: Adaptado de GHOSH(1988).

Quando as imagens utilizadas são digitais, os instrumentos utilizados para as medições são os computadores. As coordenadas dos pontos são fornecidas em pixels do “frame buffer”, memória de alta velocidade reservada para armazenar imagens em um microcomputador, e o canto superior esquerdo é a origem do sistema. Um ponto P com coordenadas (x_m,y_m) representado no sistema do “frame buffer”, ou sistema de máquina, possui o eixo x variando ao longo das linhas, da esquerda para a direita, e o eixo y variando ao longo das colunas, da parte superior para a inferior. (Figura 3.2)

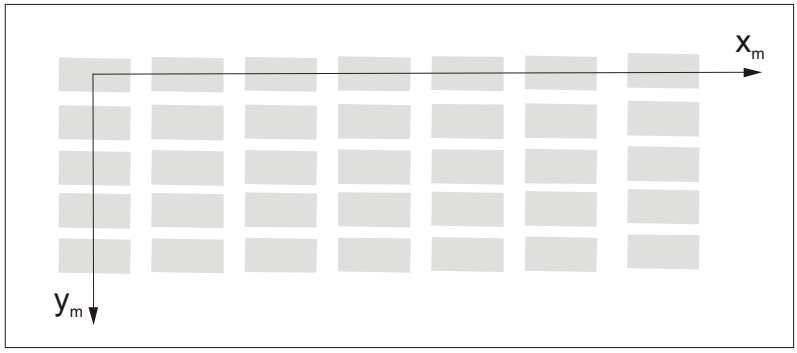


Figura 3.2 Sistema de máquina.

As coordenadas de máquina lidas no “frame buffer” são transformadas para um sistema dextrógiro paralelo ao sistema de máquina, e com origem no pixel central da imagem (x_c,y_c). O eixo y'_m sofre uma reflexão em relação ao eixo y_m do sistema de máquina. Este novo sistema é chamado de sistema com origem no centro do “frame” (Figura 3.3). As coordenadas de um ponto P neste novo sistema são representadas por (x'_m,y'_m). (GALO,1993). Se forem aplicados dois fatores de escala (dx e dy) correspondentes aos tamanhos dos pixels, em milímetros, na direção x e y respectivamente, então a expressão que transforma de coordenadas de máquina do “frame buffer” para coordenadas no sistema com origem no centro do “frame” (sistema centrado) seria:

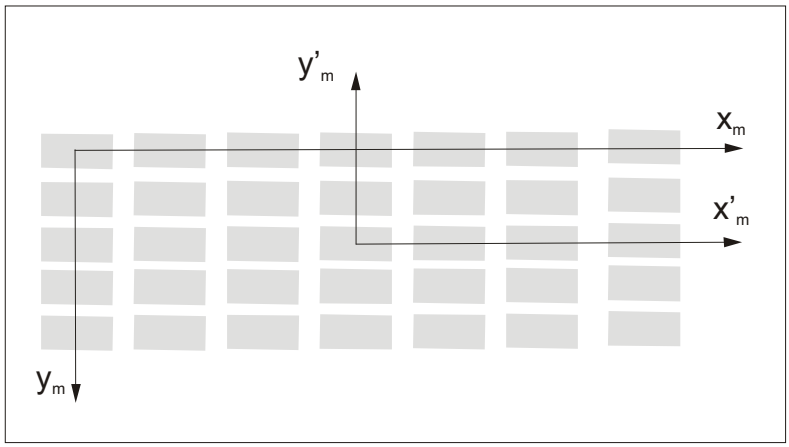


Figura 3.3 Sistema com origem no centro do frame.

$$\begin{bmatrix} x'_m \\ y'_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx & 0 \\ 0 & -dy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m - x_c \\ y_m - y_c \end{bmatrix}$$

(3.1)

onde:

x'_m, y'_m - coordenadas de um ponto com origem no ponto (x_c, y_c) em milimetros;

x_m, y_m - coordenadas no sistema de máquina;

x_c, y_c - coordenadas do centro da imagem (centro do “frame-buffer”).

Para o cálculo das coordenadas x_c e y_c necessita-se do tamanho da imagem em pixels, isto é, a largura (L) e a altura (A). As coordenadas do centro da imagem são:

$$x_c = \frac{L-1}{2}$$

$$y_c = \frac{A-1}{2}$$

(3.2)

O sistema fotogramétrico ou sistema do espaço imagem é um sistema tridimensional, dextrógiro e com origem no centro perspectivo do sensor. Possui o eixo x paralelo ao eixo x_m do sistema de máquina e com mesmo sentido. O eixo y é paralelo ao eixo y_m do sistema de máquina e com sentido contrário. O eixo z é definido de tal forma que o sistema seja dextrógiro. LUGNANI (1987) definiu espaço imagem como sendo o espaço compreendido entre o ponto nodal anterior do sistema de lentes e o plano do negativo. Para câmaras com sensores CCD deve-se substituir “plano do negativo” por “plano dos sensores”.

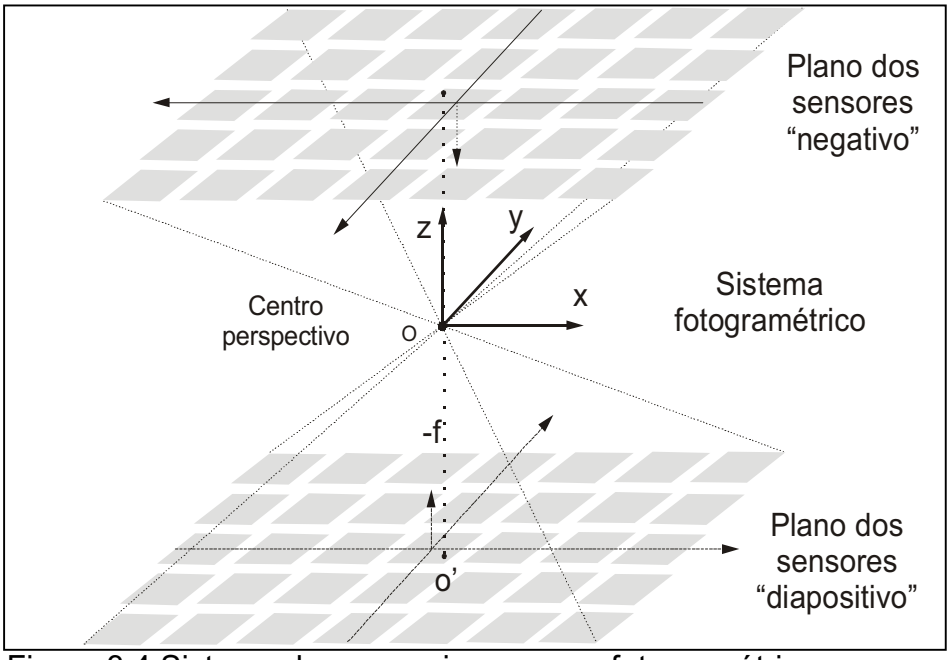


Figura 3.4 Sistema do espaço imagem ou fotogramétrico.
Fonte: Adaptado de GHOSH(1988).

O sistema fotogramétrico do diapositivo é definido com origem no ponto nodal anterior, o eixo x paralelo ao eixo x_m do sistema de máquina e com mesmo sentido. O eixo y é paralelo ao eixo y_m do sistema de máquina e com sentido contrário. O eixo z é definido de tal forma que o sistema seja dextrógiro. (Figura 3.4)

A projeção ortogonal do centro perspectivo (O) sobre o plano dos sensores determina o ponto principal (O') com coordenadas (x_0,y_0).

Para transformar as coordenadas (x'_m,y'_m) de um ponto da imagem no sistema centrado para o sistema fotogramétrico (x,y), é necessário fazer uma translação para o ponto principal. Na forma matricial a transformação é representada por:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_m - x_0 \\ y'_m - y_0 \end{bmatrix}$$

(3.3)

onde:

x,y - coordenadas não refinadas de um ponto no sistema fotogramétrico em milímetros;

x'_m,y'_m - coordenadas no sistema de máquina centrado em milímetros;

x_0,y_0 - coordenadas do ponto principal, em relação ao centro da imagem em milímetros, definidas na calibração.

O sistema de coordenadas do modelo refere-se às coordenadas espaciais dos pontos que formam um modelo estereoscópico. Este sistema normalmente relaciona sua posição com referência ao sistema fotogramétrico da foto da esquerda.

O sistema de coordenadas do espaço objeto é um sistema cartesiano, tridimensional e freqüentemente dextrógiro. Este sistema pode ser escolhido do modo mais conveniente para a aplicação. Portanto a origem, a escala e a orientação são arbitrárias. Com isto é necessária a conversão entre coordenadas originárias de sistemas que possuem diferentes origens, orientações e escalas.

3.1.2 Transformações

As transformações de coordenadas podem ser decompostas em: mudança na escala, translações e rotações.

Uma mudança de escala λ ao longo de cada um dos três eixos pode ser representada pela equação vetorial abaixo:

$$x = \lambda X \tag{3.4}$$

onde:

$X = [X\ Y\ Z]^t$ - é o vetor posição do ponto no sistema de coordenadas primário;

$x = [x\ y\ z]^t$ é o vetor posição do ponto no sistema de coordenadas secundário (escalado).

A translação dos eixos pode ser representada através da equação vetorial (3.5).

$$x = X - X_o \tag{3.5}$$

onde:

$X = [X\ Y\ Z]^t$ - é o vetor posição do ponto no sistema de coordenadas primário;

$X_o = [X_o\ Y_o\ Z_o]^t$ - é o vetor posição da origem do sistema de coordenadas secundário relativo ao primário;

$x = [x\ y\ z]^t$ - é o vetor posição do ponto no sistema de coordenadas secundário

As rotações em relação aos três eixos podem ser representadas pela matriz de rotação abaixo:

$$\begin{bmatrix} +\cos\varphi.\cos\kappa & +sin\omega.sin\varphi.\cos\kappa + \cos\omega.sin\kappa & -\cos\omega.sin\varphi.\cos\kappa + sin\omega.sin\kappa \\ -\cos\varphi.sin\kappa & -sin\omega.sin\varphi.sin\kappa + \cos\omega.\cos\kappa & +\cos\omega.sin\varphi.sin\kappa + sin\omega.\cos\kappa \\ +sin\varphi & -sin\omega.\cos\varphi & +\cos\omega.\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

ou

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Onde:

m_{ij} - elementos da matriz de rotação M, admitindo-se a seguinte seqüência de rotações: M = Mz(κ)My(φ)Mx(ω) sendo que Mx(ω), My(φ) e Mz(κ) representam respectivamente: rotação primária, secundária e terciária.

Após a definição dos referenciais define-se o modelo matemático que será utilizado, pois todo processo físico que se queira representar analiticamente necessita da definição de uma modelagem matemática.

3.1.3 Modelo matemático

A geometria de um par de fotos permite a formação de modelo por intersecção dos raios homólogos. Para se construir um

modelo funcional na Fotogrametria à curta distância o ponto inicial é a *projeção perspectiva central*. (Figura 3.5)

Nesta projeção, um ponto *A* no espaço objeto tridimensional é projetado no plano de projeção pela linha *AOa*; esta linha tem sua origem no ponto A e passa através do centro perspectivo *O*. O eixo perspectivo *Pop* é ortogonal ao plano de projeção e o ponto p, ponto principal, representa a intersecção do eixo *Pop* com o plano de projeção. A distância *Op* do centro perspectivo ao plano de projeção é a distância principal, também denotada por distância focal, normalmente representada pelas letras *c* ou *f*. Os pontos *A* e *a* são *pontos homólogos*.

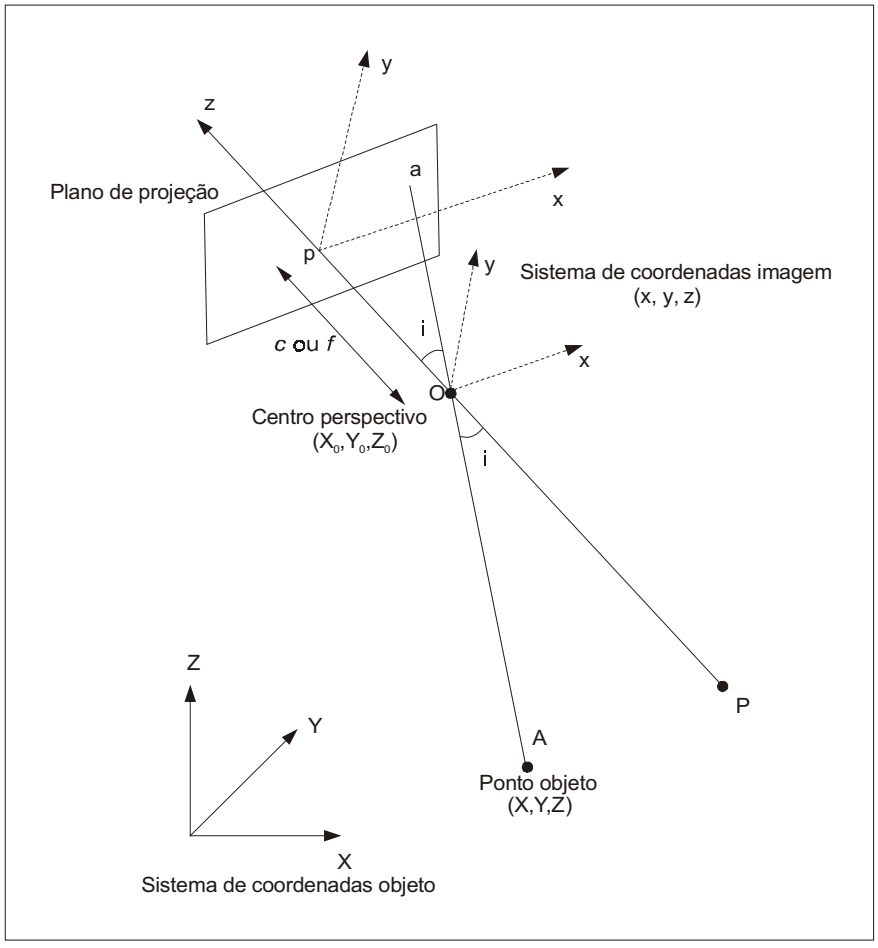


Figura 3.5 Projeção perspectiva centra l
Fonte: Adaptado de COOPER E ROBSON(1996).

Na determinação do relacionamento funcional entre a posição do ponto objeto *A* e a posição de sua projeção, o ponto *a*, introduz-se dois sistemas de coordenadas tridimensionais. O sistema de coordenadas primário (XYZ) é localizado arbitrariamente no espaço objeto. No sistema primário as coordenadas do centro perspectivo (*O*) do sistema secundário (fotogramétrico) são (X_0, Y_0, Z_0) e as coordenadas do ponto *A* são (X, Y, Z). O sistema cartesiano secundário (xyz) possui sua origem no centro perspectivo (*O*); seu eixo z coincide com o eixo principal e está direcionado para o plano de projeção; seus eixos x e y são paralelos ao plano de projeção e são direcionados de maneira que formem um sistema dextrógiro; o fator de escala é unitário.

As coordenadas do ponto *a* no sistema secundário são (x, y, f). A figura 3.6 ilustra a colinearidade dos pontos *A*, *O* e a.

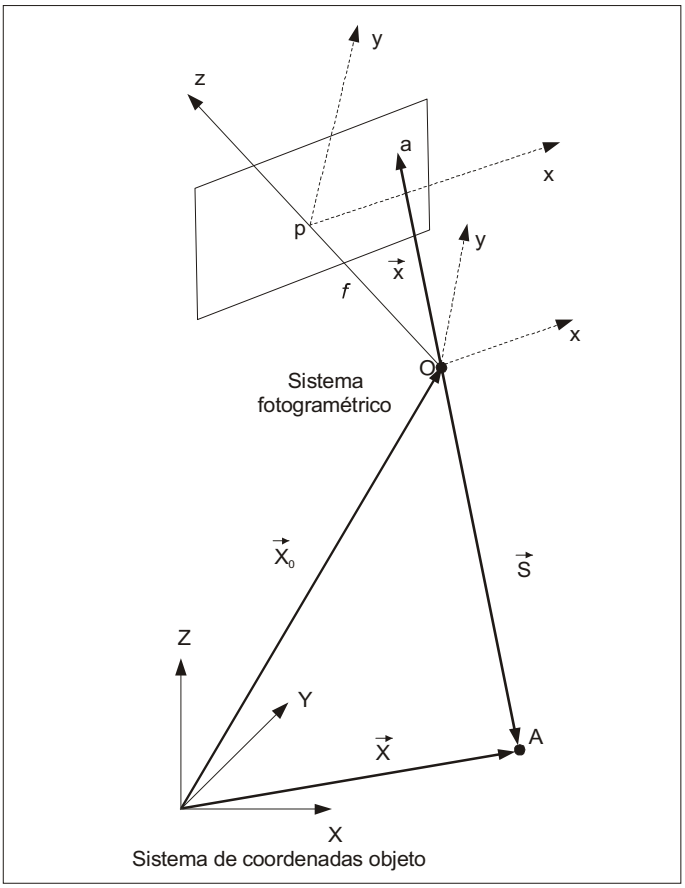


Figura 3.6 Condição de colinearidade

Fonte: Adaptado de COOPER E ROBSON(1996).

Os vetores relativos ao sistema de coordenadas primário são:

$$\vec{X} = \vec{X}_0 + \vec{S} \qquad (3.8)$$

O vetor $\vec{S}$ ($\overline{OA}$) é o vetor posição do ponto *A* relativo ao *O*. É colinear com o vetor $\vec{x}$ ($\overline{Oa}$), mas de sentido oposto. Portanto a equação (3.8) pode ser escrita como:

$$\vec{X} = \vec{X}_0 - \lambda M^t \vec{x}$$

(3.9)

Na forma matricial a equação (3.9) é representada por:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} m_{11} & m_{21} & m_{31} \\ m_{12} & m_{22} & m_{32} \\ m_{13} & m_{23} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ f \end{bmatrix}$$

(3.10)

Onde λ é uma quantidade escalar maior do que zero e os elementos m_{ij} da matriz de rotação são dados pelas equações (3.6) e (3.7). O vetor $\vec{x}$ fica conforme abaixo:

$$\vec{x} = \lambda^{-1} M(\vec{X} - \vec{X}_0)$$

(3.11)

ou na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ f \end{bmatrix} = \lambda^{-1} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}$$

(3.12)

Explicitando λ^{-1} na terceira equação de (3.9) e substituindo nas duas primeiras de (3.10), obtém-se as *equações de colinearidade*.

$$x = f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$
$$y = f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

(3.13)

Em LUGNANI (1987) as equações de colinearidade são definidas através da semelhança de triângulos, com a utilização do diapositivo. (Figura 3.7)

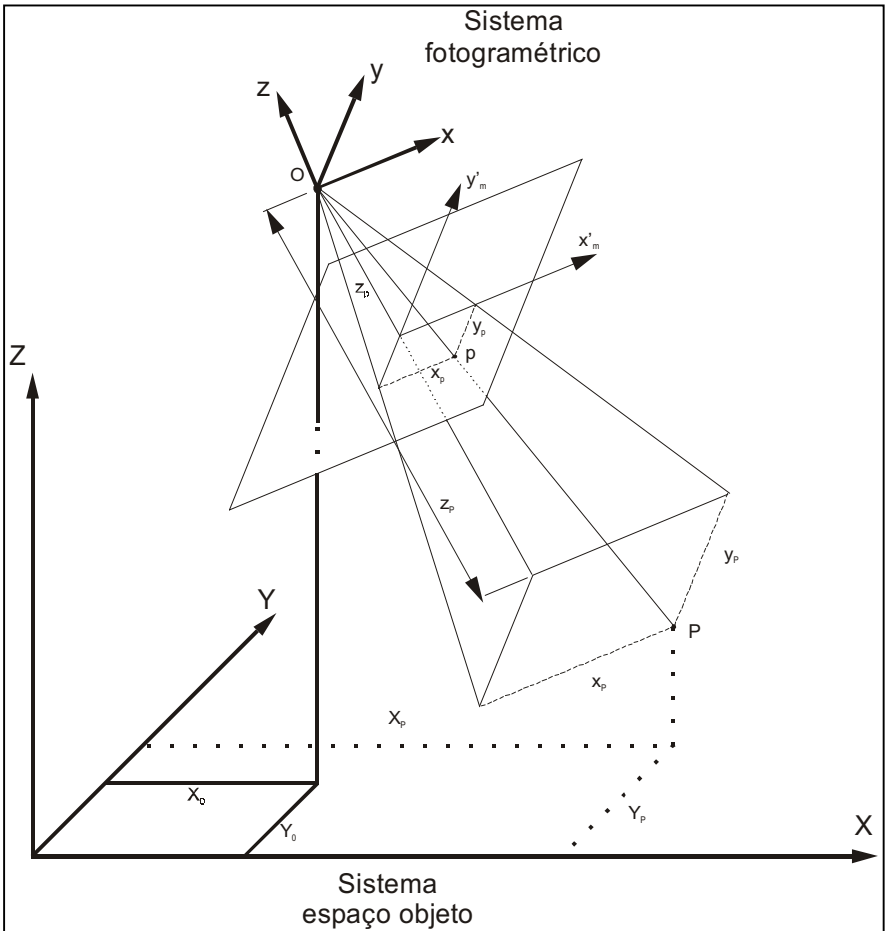


Figura 3.7 Condição de colinearidade OpP
Fonte: Adaptado de LUGNANI(1987).

O sistema fotogramétrico é representado por (xyz); O é o centro perspectivo; (XYZ) é o sistema no espaço objeto; p é o ponto imagem e P o ponto objeto. Da semelhança de triângulos tem-se:

$$\frac{x_p}{x_P} = \frac{y_p}{y_P} = \frac{z_p}{z_P}$$

(3.14)

Isolando as coordenadas do ponto p na equação (3.14):

$$x_p = z_p \frac{x_P}{z_P} \qquad (3.15)$$

$$y_p = z_p \frac{y_P}{z_P}$$

Como o sistema do espaço objeto (XYZ) não é paralelo, está em uma escala diferente e possui outra posição em relação ao sistema do espaço imagem (xyz), para representar as coordenadas de um sistema em relação ao outro a transformação de similaridade pode ser usada.

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \lambda' M^T \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$

(3.16)

Invertendo a transformação:

$$\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} = \lambda' M \begin{bmatrix} X_P - X_0 \\ Y_P - Y_0 \\ Z_P - Z_0 \end{bmatrix}$$

(3.17)

Ignorando o índice p e substituindo os valores de x, y e z dados pela equação (3.17) na equação (3.15) (a matriz M representa as rotações e z_p é a distância focal) têm-se as equações de colinearidade (3.13) com a distância focal negativa (-f). Portanto as equações de colinearidade considerando o diapositivo são representadas por:

$$x = -f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$
$$y = -f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

(3.18)

A projeção perspectiva central, quando usada para definir um modelo matemático em Fotogrametria, difere da geometria gerada por um sensor real. Esta discrepância está relacionada com os materiais utilizados na construção do sensor. As lentes utilizadas em uma câmara também geram discrepâncias que são denominadas de erros sistemáticos.

3.1.4 Erros sistemáticos

Devido à imperfeição do sistema de lentes de uma câmara, *aberrações* ou desvios dos modelos teoricamente exatos, precisam ser considerados.

Existem *aberrações* que reduzem a qualidade da imagem e outras que alteram a **localização** dos pontos da imagem. As distorções radial e descentrada são as aberrações que afetam a localização na imagem, e que devem ser modeladas. Essas distorções podem ser definidas por um grupo de parâmetros que descrevem seus efeitos sobre a localização das imagens.

Quando a imagem de um alvo é mostrada radialmente mais perto ou mais longe do ponto principal, ela está tendo uma distorção radial. A distorção radial é causada pela forma imperfeita das superfícies das lentes.

A distorção descentrada é causada pelo desalinhamento dos elementos de um sistema de lentes.

Os parâmetros de afinidade modelam as diferenças de escalas nos eixos x e y.

Na Fotogrametria à curta distância os erros sistemáticos que são considerados na formação do modelo são as distorções: radial, descentrada e por afinidade. Considerando que as distorções são representadas por (Δx,Δy) e que (x'_m, y'_m) representam as coordenadas observadas no sistema de máquina centrado, as coordenadas fotogramétricas refinadas no espaço imagem são representadas pela função matricial abaixo:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_m \\ y'_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}$$

(3.19)

Combinando as equações (3.18) e (3.19) obtém-se:

$$x'_m = x_0 + \Delta x - f\frac{m_{11}(X-X_0)+m_{12}(Y-Y_0)+m_{13}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0)+m_{32}(Y-Y_0)+m_{33}(Z-Z_0)}$$
$$y'_m = y_0 + \Delta y - f\frac{m_{21}(X-X_0)+m_{22}(Y-Y_0)+m_{23}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0)+m_{32}(Y-Y_0)+m_{33}(Z-Z_0)} \quad (3.20)$$

Como as distorções são representadas por (Δx,Δy), o modelo de erro pode ser escrito como:

$$\begin{bmatrix}\Delta x\\ \Delta y\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\delta x_r\\ \delta y_r\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\delta x_d\\ \delta y_d\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\delta x_a\\ \delta y_a\end{bmatrix}$$

(3.21)

A distorção radial δr (δx_r,δy_r) pode ser definida como a parcela não desejável da refração sofrida por um raio de luz ao atravessar uma lente. Na figura 3.8, assumindo que o ponto principal coincide com a projeção do centro perspectivo no plano imagem, α é o ângulo produzido por um feixe de raios com o eixo ótico do conjunto de lentes e, r é a distância do ponto imagem até o ponto principal. A distorção radial δr é a distância entre a localização atual do ponto imagem (p') e a ideal (p).

A figura 3.9 representa a distorção radial δr através de suas componentes (δx_r,δy_r) em uma imagem. As componentes são definidas por:

$$\delta x_r = (x'_m - x_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)$$

(3.22)

$$\delta y_r = (y'_m - y_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)$$

Onde:

K_1 K_2 K_3 – são os parâmetros da distorção radial;

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

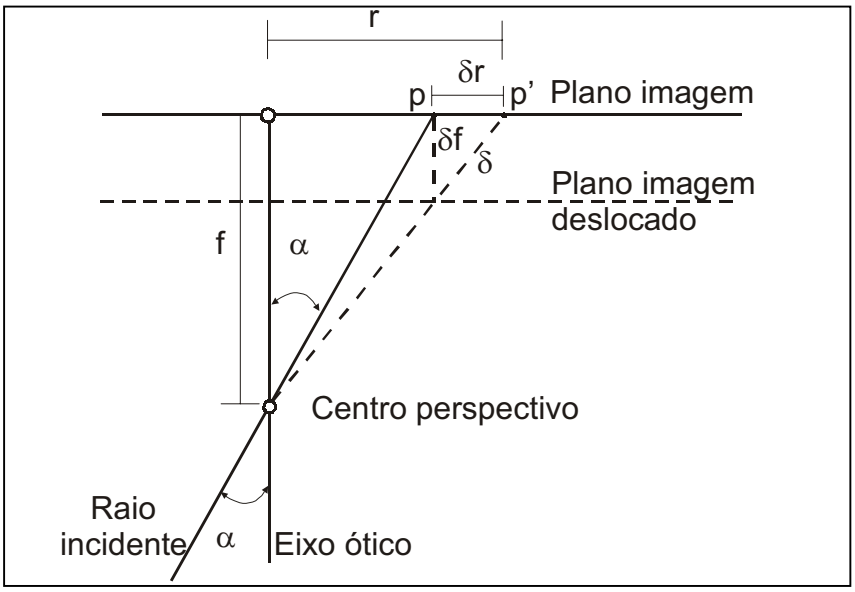


Figura 3.8 Distorção radial.
Fonte: Adaptado de LUGNANI(1987).

Da figura 3.8 pode-se verificar que a distorção radial está geometricamente relacionada à distância focal por:

$$\frac{\delta_r}{r} = \frac{\delta_f}{f}$$

(3.23)

Fica evidente da relação 3.23 que é possível anular a distorção radial δr num dado r, variando a distância focal f de um dado δf. Este procedimento é utilizado na calibração de câmaras métricas e a

distância focal determinada é chamada de distância focal calibrada. (LUGNANI, 1987).

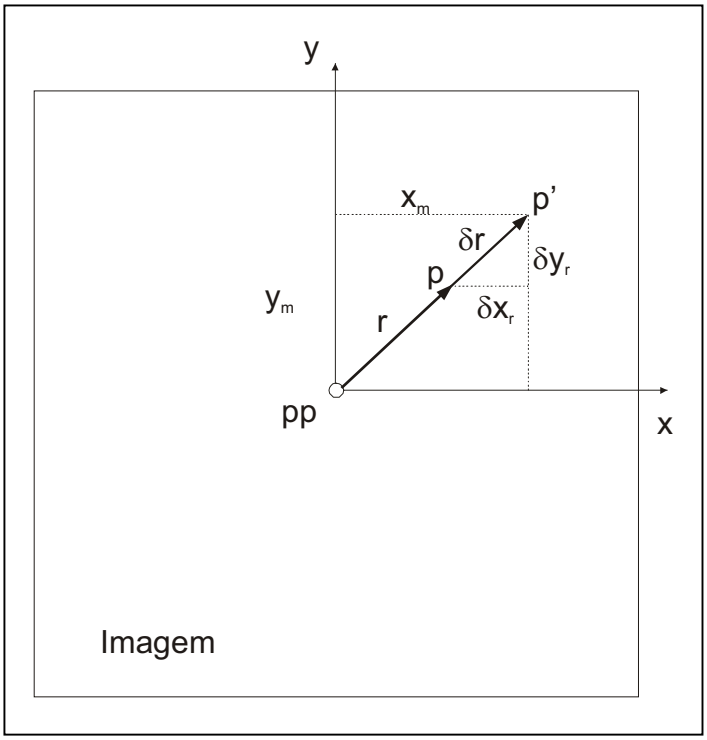


Figura 3.9 Relação entre distorção radial δr e suas componentes $\delta x_r, \delta y_r$.
Fonte: Adaptado de LUGNANI(1987).

A distorção descentrada (δx_d δy_d) é causada pela impossibilidade de se obter um alinhamento perfeito dos eixos ópticos das lentes, resultando com isto deslocamentos da imagem. O modelo Conrady-Brown modificado é o mais aceito. (GALO,1993). A distorção descentrada é representada por:

$$\delta x_d = P_1(r^2 + 2(x'_m - x_0)^2) + 2P_2(x'_m - x_0)(y'_m - y_0)$$

(3.24)

$$\delta y_d = P_2(r^2 + 2(y'_m - x_0)^2) + 2P_1(x'_m - x_0)(y'_m - y_0)$$

Além dos elementos das distorções radial e descentrada, pode-se considerar mais dois parâmetros de afinidade (A e B) que modelam as diferenças de escalas nos eixos x e y.

Para a calibração de câmaras não métricas, MONIWA (1972) apud GALO (1993) definiu as componentes de afinidade admitindo que a escala na direção do eixo x é invariável, e que na direção do eixo y a escala varia. Além disso, considerou que o eixo y real forma um ângulo β com o eixo y ideal (Figura 3.10). As expressões que modelam os componentes A e B são:

$$\delta x_a = A(y'_m - y_0)$$
$$\delta y_a = B(y'_m - y_0) \quad (3.25)$$

onde:

$$A = (1 + dS)\ \text{sen}\ (\beta)$$
$$B = (1 + dS)\ \cos\ (\beta) - 1 \quad (3.26)$$

β - não ortogonalidade dos eixos

dS – escala em x.

TOMMASELLI *et al* (1990) modificaram as equações 3.25 para se determinar o fator de escala em x, pois se sabe que a escala em y é mantida, devido haver uma correspondência entre linhas na matriz de sensores e linhas no frame buffer, e que existe um diferencial de escala (dS) na direção x. Neste caso a distorção por afinidade (δx_a,δy_a) é representada por:

$$\delta x_a = A(x_m - x_0)$$
$$\delta y_a = B(x_m - x_0) \quad (3.27)$$

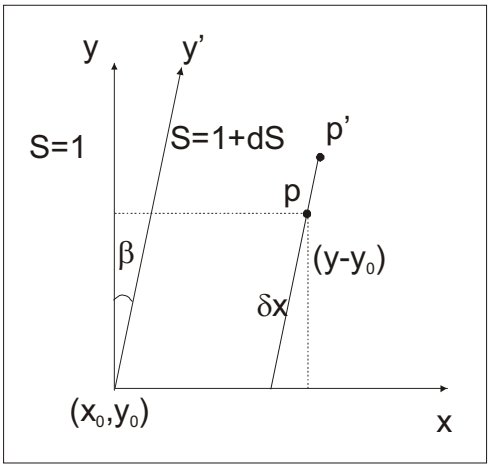


Figura 3.10 Efeito dos erros de não ortogonalidade e escala.
Fonte: Adaptado de TOMMASELLI(1990).

No caso de sensores CCD, pode-se afirmar que os elementos sensores estão alinhados ortogonalmente, podendo-se desprezar o parâmetro B. Deste modo:

$$\delta x_a = A(x_m - x_0)$$
(3.28)
$$\delta y_a = 0$$

TOMMASELLI *et al* (1990) chamou este parâmetro A de dSx.

Com o modelo matemático e os erros sistemáticos definidos, pode-se fazer a orientação do sensor. Esta orientação compreende a orientação interior e a exterior. De acordo com SILVA (1997), o problema de orientação engloba a determinação no espaço da posição do feixe de raios que formou a imagem no instante de sua aquisição.

3.2 ORIENTAÇÃO INTERIOR

A *orientação interior* é a descrição da configuração geométrica interna de um sistema de câmara e lentes, ou de acordo com FRYER (1989) apud GALO (1993), é a configuração geométrica da passagem de um feixe de raios de luz através das lentes para o plano imagem, que pode ser descrito matematicamente por um grupo de parâmetros.

Esses parâmetros são: a distância principal ou focal (f), os deslocamentos (x_0,y_0) do ponto principal em relação ao centro da imagem, os elementos da distorções radial (K_1, K_2, K_3), descentrada (P_1, P_2) e por afinidade (A,B).

A distância principal é o elemento chave na orientação interior de uma câmara; é definida como a distância perpendicular do centro perspectivo do sistema de lentes ao plano imagem.

Assumindo que o plano focal é perpendicular ao eixo óptico, o ponto principal é uma imagem formada no plano imagem por um feixe de raios na direção do eixo ótico e que passa pelo centro perspectivo de um sistema de lentes.

Os parâmetros de orientação interior juntamente com os erros sistemáticos é definida na calibração da câmara.

3.3 - CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS

A calibração de câmara é a determinação das discrepâncias que ocorrem na geometria de formação da imagem em uma câmara, em relação à geometria da *projeção perspectiva central*. Os dados a serem calibrados 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 anteriores, parâmetros inerentes à característica da câmara, são também determinados os parâmetros de orientação e posição da câmara em relação ao sistema de coordenadas objeto.

3.3.1 - Métodos de calibração de câmaras

Nas últimas décadas os métodos usados para a calibração de câmaras à curta distância têm evoluído substancialmente, devido à diminuição dos custos dos computadores, ao acesso facilitado de programas de calibração de câmaras, e as técnicas conhecidas como *auto-calibração* e calibração *"on-the-job"*.

A calibração *"on-the-job"* é a técnica aplicada para determinar os parâmetros de calibração da câmara e lentes ao mesmo tempo em que as fotografias para medições do objeto são realizadas. O ideal é que os objetos não sejam grandes (não maior que um motor de carro, por exemplo), que a placa com alvos de coordenadas conhecidas seja colocada sob o objeto, e sejam fotografados simultaneamente. Desta forma as informações de controle estarão disponíveis à cada exposição. A vantagem da calibração *"on-the-job"* é evidente para câmaras não-métricas, onde o foco da lente é variável para cada fotografia. (FRYER, 1996)

A *auto-calibração* é uma extensão do conceito de calibração *"on-the-job"*. Neste tipo de calibração, as observações dos pontos pré-visualizados sobre o objeto, são usadas como dados necessários tanto para a determinação das coordenadas dos pontos objeto como para os parâmetros de calibração da câmara. As equações

de distorções das lentes são adicionadas nas equações de colinearidade e são resolvidas simultaneamente.

Os parâmetros relacionados à câmara normalmente são chamados de parâmetros intrínsecos ou de orientação interior, e os parâmetros que definem a posição e orientação da câmara em relação ao sistema do espaço objeto são os parâmetros extrínsecos ou de orientação exterior. Portanto a *auto-calibração* é o processo de determinação dos parâmetros intrínsecos, extrínsecos e, de alguns pontos do espaço objeto, simultaneamente.

Quando todos os pontos de apoio do espaço objeto possuem suas coordenadas conhecidas e, forem determinados apenas os parâmetros intrínsecos e extrínsecos, o procedimento é denominado de *pré-calibração* (ou simplesmente *calibração*), permitindo que os parâmetros calculados sejam utilizados para o refinamento das coordenadas. (GALO, 1993)

A pré-calibração normalmente é utilizada em câmaras métricas, onde a distância focal é fixa. A pré-calibração não é comum para câmaras não-métricas, pois devido a distância focal ser variável nestas câmaras, os parâmetros K_1, K_2, e K_3 relacionados com a distância focal sofreriam variações. (ver equação (3.23)).

Nos casos em que a distância focal da câmara é alterada no decorrer da aquisição das imagens, casos das câmaras não-métricas, o método de *auto-calibração* é o mais adequado. A diferença deste procedimento com o da pré-calibração é que somente alguns pontos do espaço objeto são conhecidos e os parâmetros de orientação interior são considerados instáveis.

O termo *foto variante* é usado nestes casos, significando que cada imagem têm uma distância focal diferente.

De acordo com BROWN (1971), apud GALO (1993), caso sejam conhecidos os coeficientes de distorção para duas distâncias focais

diferentes, pode-se determinar estes coeficientes para qualquer outro valor de (f).

Quando se considera que os parâmetros intrínsecos não sofrem alterações, o termo utilizado é *bloco invariante*.

Para uma consistência na determinação dos valores dos deslocamentos do ponto principal (x_0,y_0), usa-se rotacionar a câmara em 90^o, capturando duas imagens para cada ponto de vista. O uso de imagens convergentes é fundamental na determinação da distância principal, pois elas permitem a quebra da dependência linear entre os parâmetros. Pode-se verificar essa dependência através do valor do coeficiente de correlação. Quando o coeficiente de correlação está próximo dos extremos (+1,-1) há dependência linear.

3.3.2 Modelo Matemático de Calibração

O modelo matemático para calibração baseia-se nas equações de colinearidade. O mapeamento de um ponto P(X,Y,Z) do espaço objeto para um ponto p(x,y) do sistema fotogramétrico, sem considerar as *distorções*, pode ser representado pelas equações (3.18).

Considerando que as distorções são representadas por (Δx,Δy), que as coordenadas observadas (observações) no sistema de máquina e transformadas para o sistema do centro da imagem são identificadas por (x'_m,y'_m), e que (x_0,y_0) são as coordenadas do ponto principal no sistema de máquina, as equações das observações são as (3.20).

A equação (3.20) explicitou as coordenadas de máquina, combinando as equações (3.18) e (3.19). Esta separação é importante para a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados, pois possibilita a aplicação do método paramétrico, cuja resolução é menos dispendiosa computacionalmente. TOMMASELLI *et al* (1990).

3.3.3 Estimação dos parâmetros de auto-calibração pelo Método Dos Mínimos Quadrados (MMQ)

O Método dos Mínimos Quadrados propicia o cálculo de valores únicos de coordenadas e de outros elementos na Fotogrametria à curta distância, quando estão disponíveis mais medições do que o mínimo necessário. Estas medições podem ser de vários tipos e precisões. O MMQ permite que a MVC dos valores estimados seja calculada a partir da MVC das observações. Fazendo-se uma análise da matriz de covariância das observações, é possível projetar uma configuração câmara/objeto e um esquema de observações, para encontrar padrões relacionados à precisão, confiabilidade e acurácia mais adequados.

O MMQ é flexível quando permite que diferentes elementos possam ser tratados como incógnitas, observações ou constantes, dependendo das circunstâncias.

O modelo funcional da calibração é baseado nas equações de colinearidade (3.18). Considerando a influência dos erros sistemáticos o modelo funcional utilizado na auto-calibração é representado pelas equações (3.20). São funções consideradas como explícitas das observações, ou seja, as quantidades observadas, coordenadas dos pontos imagens no sistema de máquina centrado, são uma função explícita das quantidades a determinar, ou seja, orientação interior, parâmetros de orientação exterior das imagens e coordenadas dos pontos no espaço objeto. (TOMMASELLI,1985)

A equação não é linear, pois existem produtos entre parâmetros e funções trigonométricas envolvendo parâmetros, havendo a necessidade da linearização por Série de Taylor e, assim iterações devem ser efetuadas. Portanto, são necessários valores aproximados para os parâmetros (SILVA, 1997).

Inicialmente define-se o vetor das observações ajustadas:

$$\mathbf{L_a} = \mathbf{L_b} + \mathbf{V}$$

(3.29)

onde:

$\mathbf{L_b}$ - vetor dos valores observados;

V – vetor dos resíduos; possuem o mesmo valor dos erros das observações, mas com sinal trocado;

$\mathbf{L_a}$ - vetor dos valores observados ajustados.

No caso da calibração o vetor $\mathbf{L_b}$ é constituído pelas coordenadas de máquina centradas:

$$\mathbf{L_b} = [x_1 y_1 x_2 y_2 \ldots x_n y_n]^T$$

(3.30)

O vetor dos parâmetros ajustados (estimativa para os valores reais) é:

$$\mathbf{X_a} = \mathbf{X_0} + \mathbf{X}$$

(3.31)

onde:

$\mathbf{X_0}$ - vetor dos valores aproximados para os parâmetros;

X – vetor das correções aos parâmetros aproximados;

$\mathbf{X_a}$ - vetor dos valores dos parâmetros ajustados.

Na calibração o vetor $\mathbf{X_a}$ é um vetor correspondente às variáveis incógnitas (os parâmetros de orientação interior e exterior da câmara), variando de 1 até n; e as coordenadas dos pontos no espaço objeto, variando de 1 até m). Considerando o caso como bloco variante, e os parâmetros de distorções da câmara, tem-se:

$$\mathbf{X_a} = [\, f\, x_0 y_0 K_1 K_2 K_3 P_1 P_2 AB \kappa_1 \varphi_1 \omega_1 X_{01} Y_{01} Z_{01}\ \kappa_2 \varphi_2 \omega_2 X_{02} Y_{02} Z_{02}\ .....$$
$$\kappa_n \varphi_n \omega_n X_{0n} Y_{0n} Z_{0n}\ X_1 Y_1 Z_1\ X_2 Y_2 Z_2 ..... X_m Y_m Z_m]^T \quad (3.32)$$

O modelo matemático no ajustamento das observações, através do método paramétrico, é do tipo:

$$\mathbf{L_a} = \mathbf{F(X_a)} \quad (3.33)$$

Fazendo a substituição de $\mathbf{L_a}$ (equação (3.29)) e $\mathbf{X_a}$ (equação (3.31)):

$$\mathbf{L_b} + \mathbf{V} = \mathbf{F(X_0} + \mathbf{X)} \quad (3.34)$$

Linearizando o segundo membro da equação (3.34), usando o método de Taylor:

$$\mathbf{L_b} + \mathbf{V} = \mathbf{F(X_0} + \mathbf{X)} = \mathbf{F(X_0)} + \left.\frac{\delta F}{\partial X_a}\right|_{\mathbf{X_a} = \mathbf{X_0}} X \quad (3.35)$$

Chamando a matriz das derivadas parciais de A:

$$A = \left.\frac{\delta F}{\partial X_a}\right|_{\mathbf{X_0}} \quad (3.36)$$

Substituindo $\mathbf{F(X_0)}$ por $\mathbf{L_0}$:

$$\mathbf{L_b + V = L_0 + AX}$$

(3.37)

Reordenando a equação (3.37) e substituindo ($\mathbf{L_0}$ - $\mathbf{L_b}$) por **L**, obtém-se o modelo matemático linearizado no método paramétrico:

$$\mathbf{V = AX + L}$$

(3.38)

O MMQ procura obter uma solução única, dentre as possíveis, e uma estimativa de precisão. O critério adotado no MMQ é produzir a solução que minimize o somatório do quadrado dos resíduos, que matricialmente é representado pela forma quadrática $V^T PV$. A matriz P, matriz peso das observações é dada por:

$$P = \sigma_0^2 \cdot \sum_{L_b}^{-1}$$

(3.39)

Onde:

σ_0^2 – variância da observação de peso unitário a priori; atua como um fator de proporcionalidade na matriz peso;

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

Minimizando a forma quadrática $V^T PV$:

$$V^T PV = (A.X + L)^T P (A.X + L) = \min$$

(3.40)

Fazendo a diferenciação e algumas manipulações da forma quadrática, obtém-se o vetor das correções aos parâmetros aproximados:

$$X = - (A^T PA)^{-1} (A^T PL) \quad (3.41)$$

ou

$$X = - N^{-1} U \quad (3.42)$$

Onde:

$N = A^T PA$

$U = A^T PL$

Substituindo os valores do vetor **X** na equação (3.31), calcula-se os parâmetros ajustados. Devido à linearização do modelo, adotando-se aproximações para os parâmetros, é necessário realizar iterações para à determinação do valor final do vetor $\mathbf{X_a}$. O vetor dos parâmetros aproximados da iteração **i** é dado por:

$$\mathbf{X_0^i = X_a^{i-1}} \quad (3.43)$$

Portanto o vetor dos parâmetros ajustados na iésima iteração é:

$$\mathbf{X_a^i = X_a^{i-1} + X^i} \quad (3.44)$$

Realizam-se iterações até o critério de convergência ser atingido, isto é, $\mathbf{X^i} \leq$ Critério.

Para a verificação da qualidade dos parâmetros, calcula-se a matriz variância-covariância dos parâmetros ajustados:

$$\sum_{X_a} = \sum_X = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A)^{-1}$$

(3.45)

O valor da variância a priori (σ_0^2) é arbitrado no início do processo. Ao final do ajustamento a estimativa do valor da variância a priori ($\hat{\sigma}_0^2$) pode ser calculado, sendo denominada de variância a posteriori:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{n - u}$$

(3.46)

onde:

n – número de observações;

u – número de parámetros incógnitos.

3.3.4 Método paramétrico com injunções

Como nenhum sistema de referencial foi definido, a matriz N é singular e para resolver este problema é necessário o conhecimento prévio de alguns pontos (coordenadas). Os valores das coordenadas desses pontos serão injuncionados, utilizando-se injunções relativas, que relacionam cada parâmetro à um valor fixo e um peso, proporcional à confiança que se tenha no mesmo.

O modelo matemático da injunção é:

$L_x = G(X_a)$

(3.47)

L_x é um vetor contendo os valores dos parâmetros de injunção observados ajustados.

Linearizando o modelo da equação (3.47) obtém- se:

$$AX + L = V$$

(3.48)

$$CX + L_x' = V_x$$

Onde:

$L_x' = L_0 - L_x$

$L_0 = G(X_0)$ ou $L_0 = X_0$

L_x' – é a diferença entre o valor do parâmetro estimado e seu valor fixado pela injunção.

Fazendo as mesmas considerações no desenvolvimento do método paramétrico, tem-se:

$$X = -(A^T P A + C^T \overline{P} C)^{-1}(A^T P L + C^T \overline{P} L_x')$$

(3.49)

$$\overline{P} = \frac{\sigma_0^{\,2}}{\sigma_{x_i}^{\,2}} = \sum_{x_i}^{-1}$$

Onde:

$\overline{P}$ - Matriz peso das injunções

σ_0^2 – variância da observação de peso unitário;

$\sigma_{x_i}^{\,2}$ - variância correspondente ao parâmetro a ser fixado.

A matriz C é formada pelas derivadas parciais da função de injunção $G(X_a)$ em relação aos parâmetros na primeira iteração (X_a^0).

A equação (3.48) é o modelo linearizado geral (com injunções) do método paramétrico para se realizar o processamento com MMQ.

O processo de determinação das coordenadas dos alvos e dos parâmetros de orientação exterior das câmaras, usando mínimos quadrados baseado nas equações de colinearidade, é conhecido como *ajustamento por feixes perspectivos*. Quando os parâmetros que definem a calibração da câmara também são determinados, o processo é chamado de *ajustamento por feixes perspectivos com auto-calibração* ou simplesmente *calibração*.

3.4 ORIENTAÇÃO EXTERIOR DE UM MODELO ISOLADO

Duas imagens tomadas de duas posições distintas possuem movimentos lineares e rotacionais independentes. No processamento fotogramétrico convencional é necessário que um modelo seja formado para poder ser restituído. A completa formação do modelo envolve a solução da orientação exterior. Uma das maneiras de se obter a orientação exterior é através do processamento da *orientação relativa* e da *orientação absoluta*.

3.4.1 Orientação relativa

A orientação relativa de um modelo tridimensional é obtida pela determinação da orientação de uma imagem em relação à outra, isto é, orienta-se em posição e atitude o par de imagens entre si, não levando em consideração o referencial terrestre. O objetivo dessa etapa é formar o modelo tridimensional, fazendo com que pelo menos cinco raios homólogos se interceptem no espaço do modelo. No processamento analítico isto é conseguido através da solução dos sistemas de equações de colinearidade ou de coplanaridade a cinco incógnitas.

Uma das possibilidades de desenvolvimento da orientação relativa é através da fixação de uma imagem arbitrariamente, atribuindo valores aos seis parâmetros de orientação exterior (ω^1 φ^1 κ^1 X^1_0 Y^1_0 Z^1_0). Fixa-se também X^2_0 arbitrando o valor da base, isto é, a distância entre os centros perspectivos das imagens no eixo x ($bx = X^2_0 - X^1_0$). O parâmetro bx é conhecido como o parâmetro de escala, pois influi diretamente na escala do modelo.

Com os sete parâmetros arbitrados restam cinco parâmetros a determinar na orientação relativa (by bz ω^2 φ^2 κ^2). Estes cinco parâmetros podem ser determinados usando-se as equações de colinearidade, através de um ajustamento parámetrico pelo método dos mínimos quadrados, sendo necessários no mínimo cinco pontos observados nas imagens. Entretanto, recomenda-se a medição de mais pontos.

A medição de 5 pontos em cada uma das imagens, gera 20 equações de observação, para 20 incógnitas, sendo 5 incógnitas correspondentes aos parâmetros de orientação do modelo (by bz ω^2 φ^2 κ^2) e, mais 15 parâmetros relacionados às coordenadas (X,Y,Z) do modelo. No entanto, quando num sistema de equações o número de incógnitas é igual ao número de equações, não é possível a detecção de erros de medição (LUGNANI, 1987). Este é o motivo para recomendar-se a medição de pelo menos 6 pontos de modelo, gerando 24 equações de observações para 23 incógnitas.

Os pontos devem ser escolhidos bem distribuídos pelo modelo. Na prática recomenda-se que pelo menos seis pontos sejam medidos (pontos de Grübber).

Com a orientação relativa determinada pode-se solucionar a orientação absoluta, desde que as coordenadas de alguns pontos de apoio sejam conhecidas.

3.4.2 Orientação absoluta

A orientação absoluta referencia o modelo relativamente orientado ao sistema de coordenadas do espaço-objeto. A solução final da orientação absoluta determina um fator de escala (λ) do modelo em relação ao objeto, as rotações ($\mathrm{K}\ \Phi\ \Omega$) dos eixos do sistema referencial do modelo em relação ao sistema referencial do objeto e a posição da origem do sistema referencial do modelo ($X_0\ Y_0\ Z_0$) em relação à origem do sistema referencial do objeto.

A orientação relativa produz coordenadas no referencial do modelo de pontos homólogos. O modelo apresentado na figura 3.11 precisa ser escalado, rotacionado e então transladado com respeito aos seus próprios eixos, tal que as coordenadas de qualquer ponto X_i , Y_i , Z_i no sistema do modelo ($X_m Y_m Z_m$) venham a ser iguais àquelas do ponto objeto correspondente no sistema do objeto (XYZ); este procedimento é resolvido pela orientação absoluta.

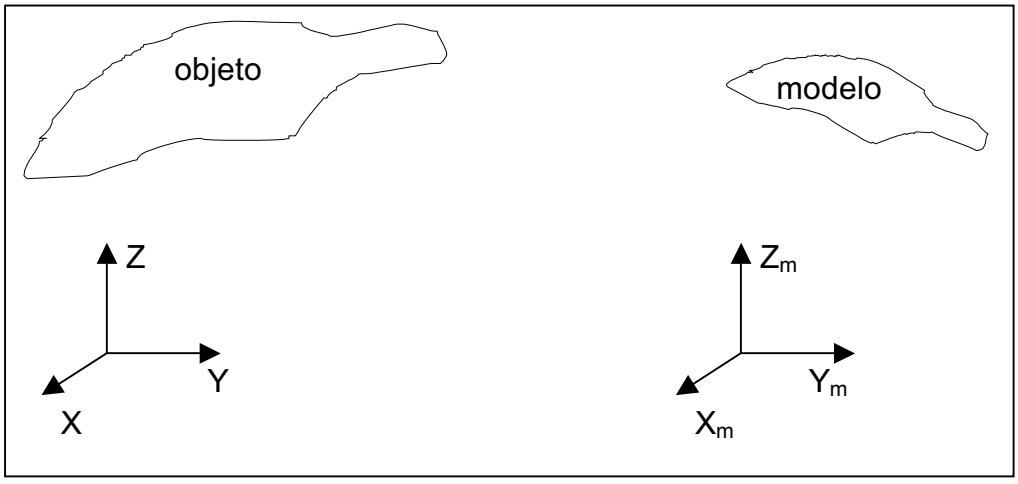


Figura 3.11 Modelo produzido pela Orientação relativa.

Analiticamente a orientação absoluta ou de similaridade é resolvida através da transformação isogonal no espaço (TIE), isto é, o modelo tridimensional é referenciado ao sistema de coordenadas do objeto, mediante o relacionamento matemático das coordenadas-modelo e coordenadas-terreno através da TIE.

A transformação isogonal no espaço é uma transformação matemática que conserva os ângulos, conservando com isso a forma. É caracterizada por possuir 7 parâmetros a serem determinados que, são: λ, Ω, Φ, K, X_0 , Y_0 , Z_0.

Escala (λ), relação entre a distância de dois pontos no modelo e a distância dos mesmos pontos no terreno, fator de escala.

Rotação (Ω, Φ, K), é necessário rotacionar o modelo para que o mesmo fique paralelo em relação ao terreno, Ω é o ângulo em relação ao eixo X_0, Φ é o ângulo em relação ao eixo Y_0 e K está relacionado com o eixo Z_0. Ω e Φ resulta no nivelamento do modelo e K em uma rotação azimutal.

Translação (X_0 , Y_0 , Z_0) posicionar a origem do sistema referencial do modelo tridimensional em relação à origem do sistema referencial do terreno.

Esta transformação resume-se em definir as proporções entre o objeto e o modelo tridimensional usando o fator de escala (λ), as rotações (Ω, Φ, K) em torno dos eixos das coordenadas do modelo para que os dois sistemas referenciais fiquem paralelos e as translações (X_0 , Y_0 , Z_0) em relação à origem do sistema referencial do terreno. (Figura 3.12)

A expressão matemática da TIE pode ser representada pela equação (3.16):

Onde:

$X_p\ Y_p\ Z_p$ – coordenadas dos pontos medidos no terreno;

$x_p\ y_p\ f_p$ – representam as coordenadas $X_m\ Y_m\ Z_m$ dos pontos no modelo tridimensional;

$X_0\ Y_0\ Z_0$ – coordenadas origem do sistema de referência do modelo tridimensional;

λ' – fator de escala do modelo tridimensional em relação ao objeto;

M – matriz de rotação. M = Mz(κ)My(φ)Mx(ω) sendo que Mx(ω), My(φ) e Mz(κ) representam respectivamente: rotação primária, secundária e terciária.

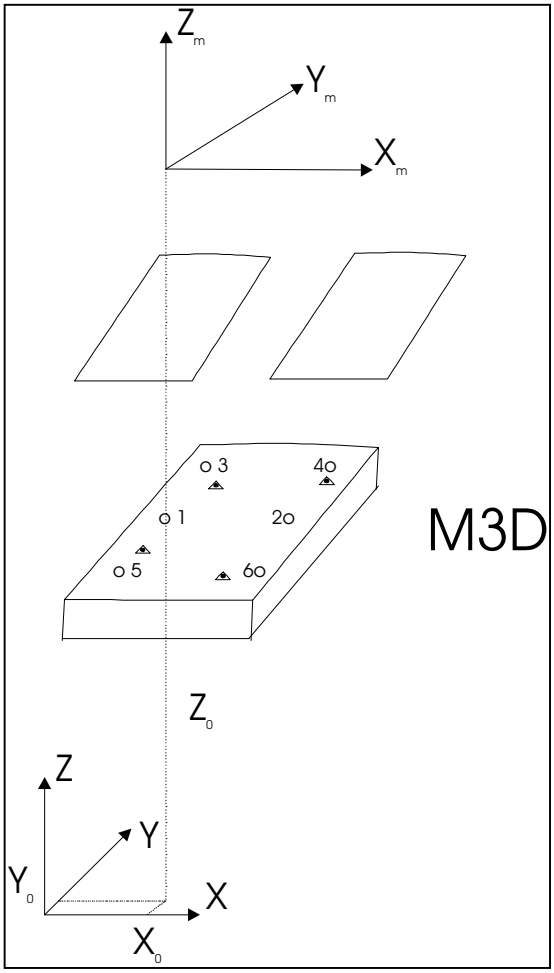


Figura 3.12 Origem do sistema de coordenadas do modelo em relação ao sistema de coordenadas do terreno.

Os sete parâmetros (λ, Ω, Φ, K, X_0, Y_0, Z_0) da TIE são incógnitos e precisam ser determinados. Fazendo a transformação inversa da equação (3.16) por ser mais apropriada para o ajustamento das observações e a estimativa dos parâmetros, pois permite uma solução pelo método paramétrico, obtém-se a equação (3.17), levando em consideração que o vetor (x_p y_p z_p) representa o vetor das coordenadas (X_m Y_m Z_m) dos pontos no modelo tridimensional.

Solução da orientação absoluta pelo MMQ.

Para cada ponto-objeto há um ponto no modelo e para a determinação de sete parâmetros são necessários no mínimo sete equações. Resolve-se o problema com 4, ou no mínimo 3, pontos de apoio (espaço objeto). Gerando 3 x 4 = 12 equações. Como são 7 incógnitas, resulta em 5 graus de liberdade (gl), ocorrendo um problema de ajustamento de observações de 12 equações a sete incógnitas. O problema é não linear e pode ser resolvido através da solução desenvolvida no item 3.3.3. O vetor dos valores das observações ($\mathbf{L_b}$) e o vetor dos valores dos parâmetros ajustados ($\mathbf{X_a}$) para a orientação absoluta são:

$$\mathbf{L_b} = [X_m^1\ Y_m^1\ Z_m^1\ X_m^2\ Y_m^2\ Z_m^2\ \cdots\ X_m^n\ Y_m^n\ Z_m^n]^T \qquad (3.50)$$
$$\mathbf{X_a} = [\lambda\ \Omega\ \Phi\ K\ X_0\ Y_0\ Z_0\ X^1\ Y^1\ Z^1\ X^2\ Y^2\ Z^2\ \cdots\ X^n\ Y^n\ Z^n]^T$$

Onde:

$X^1\ Y^1\ Z^1\ X^2\ Y^2\ Z^2\ \cdots\ X^n\ Y^n\ Z^n$ – coordenadas dos pontos ajustados no terreno;

$X_m^1\ Y_m^1\ Z_m^1\ X_m^2\ Y_m^2\ Z_m^2\ \ldots\ X_m^n\ Y_m^n\ Z_m^n$ – coordenadas dos pontos no modelo tridimensional;

$X_0\ Y_0\ Z_0$ – coordenadas origem do sistema de referência do modelo tridimensional;

λ – fator de escala do modelo tridimensional em relação ao objeto;

$K\ \Phi\ \Omega$ - as rotações dos eixos do sistema referencial do modelo em relação ao sistema referencial do objeto.

3.5 – RESSEÇÃO ESPACIAL

As coordenadas imagens de um ponto geram duas equações de colinearidade e, caso sejam conhecidas as coordenadas desse ponto no espaço objeto (através de medições de campo por exemplo), as duas equações terão seis incógnitas: três rotações e as três coordenadas do centro perspectivo. Estes seis parâmetros são os elementos da orientação exterior ($\omega\ \varphi\ \kappa\ X_0\ Y_0\ Z_0$), e a sua determinação é conhecida como *resseção espacial*, quando somente uma imagem de um projeto fotogramétrico for utilizada no processamento.

Para o processamento da resseção espacial são necessárias as coordenadas imagens e suas respectivas coordenadas no espaço objeto de no mínimo três pontos, a distância focal e valores aproximados dos parâmetros incógnitos. As equações de colinearidade (3.11) podem ser empregadas no processamento. Com três pontos são geradas seis equações, dando solução única. Na prática usa-se superabundância de observações.

De acordo com LUGNANI (1987) pode-se utilizar um método com menor rigor matemático para simplificar a solução. Este método admite que os pontos observados no espaço objeto são isentos de erro. O problema é não linear e pode ser resolvido através da solução desenvolvida no item 3.3.3. O vetor dos valores das observações ($\mathbf{L_b}$) e o

vetor dos valores dos parâmetros ajustados ($\mathbf{X_a}$) para a resseção espacial são:

$$\mathbf{L_b} = [x_1 y_1 x_2 y_2 \ldots x_n y_n]^T \quad (3.51)$$

$$\mathbf{X_a} = [\omega\ \varphi\ \kappa\ X_0\ Y_0\ Z_0]^T$$

Onde:

$x_1 y_1 x_2 y_2 \ldots x_n y_n$ – coordenadas fotogramétricas refinadas;

$X_0\ Y_0\ Z_0$ – coordenadas origem do sistema fotogramétrico (centro perspectivo);

$\omega\ \varphi\ \kappa$ - rotações dos eixos do sistema fotogramétrico em relação ao sistema do espaço objeto.

A resseção é somente um estágio intermediário no processamento fotogramétrico. É seguida da interseção ou de um ajustamento por feixe perspectivos, que usam os valores dos elementos da orientação exterior como valores iniciais aproximados.

3.6 – INTERSECÇÃO

Determinando-se os elementos da orientação exterior de duas câmaras através de duas resseções independentes, por exemplo, pode-se calcular as coordenadas no espaço objeto de um ponto A (X, Y, Z), pelas medições das coordenadas (x_1, y_1) e (x_2,y_2) de seus homólogos a_1 e a_2 no espaço imagem. (Figura 3.13)

As coordenadas medidas no espaço imagem geram quatro equações de colinearidade, para três incógnitas, podendo ser usada uma estimação por mínimos quadrados ou uma solução algébrica, como será descrito adiante. O processo é conhecido como *intersecção*. (COOPER E ROBSON, 1996)

Para o desenvolvimento da intersecção são utilizadas as coordenadas de um ponto qualquer no referencial de máquina (frame buffer), em linhas e colunas, devendo transformá-las para o sistema com origem no centro do frame (centro da imagem), e eliminar os erros sistemáticos, como a distorção ótica e o fator de escala em x. Todos estes elementos, além da distância focal são obtidos no processo de calibração TOMMASELLI (1990).

O procedimento para a transformação de referenciais pode ser verificado no item 3.1.1. O processo de eliminação dos erros sistemáticos encontra-se no item 3.1.4. Os cálculos da calibração encontram-se no item 3.3.

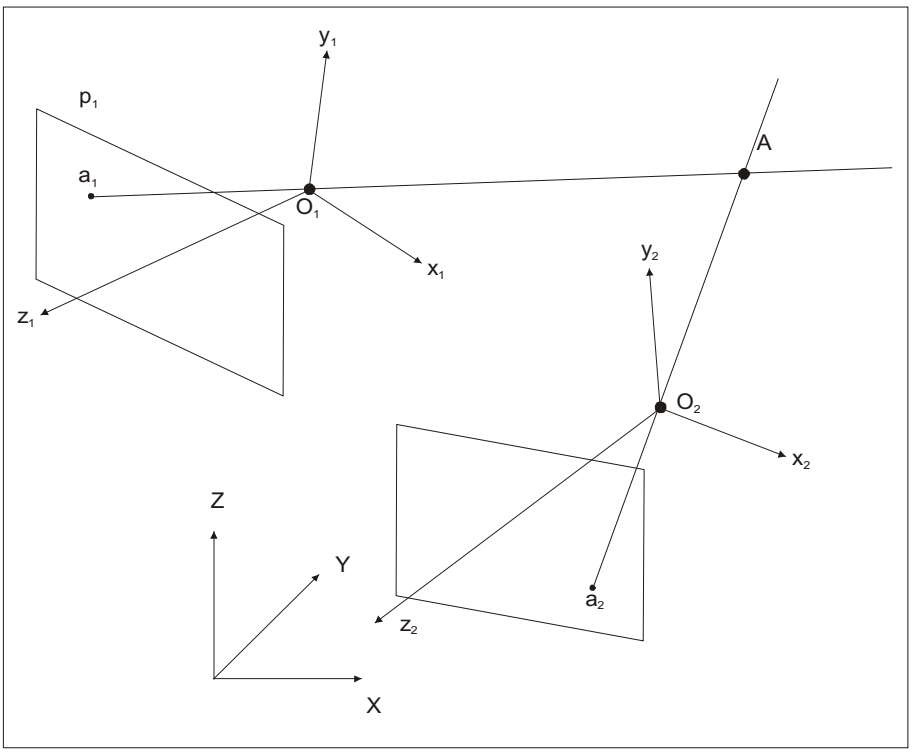


Figura 3.13 Intersecção entre 2 pontos homólogos.

Conhecendo-se os parâmetros de orientação exterior das câmaras (calibração, fototriangulação ou resseção) e suas coordenadas imagem devidamente refinadas (or. interior e refinamento), pode-se calcular as coordenadas de um ponto no espaço objeto por intersecção. Para o desenvolvimento dos cálculos da intersecção serão utilizados índices para diferenciar as imagens da esquerda e da direita. Os dados da imagem da esquerda terão o índice *e*. Os dados da imagem da direita terão o índice *d*. A transformação de similaridade representada pela equação (3.10) pode ser modificada para representar os dados da imagem da direita; o vetor das coordenadas dos pontos objeto será:

$$\begin{aligned} X_A &= \lambda_d \cdot u_d + X_0^d \\ Y_A &= \lambda_d \cdot v_d + Y_0^d \\ Z_A &= \lambda_d \cdot w_d + Z_0^d \end{aligned} \tag{3.52}$$

onde:

$$\begin{aligned} u_d &= m_{11}^d\, x^d + m_{21}^d\, y^d + m_{31}^d\, f \\ v_d &= m_{12}^d\, x^d + m_{22}^d\, y^d + m_{32}^d\, f \\ w_d &= m_{13}^d\, x^d + m_{23}^d\, y^d + m_{33}^d\, f \end{aligned} \tag{3.53}$$

X^d_0, Y^d_0, Z^d_0 - coordenadas do centro perspectivo da câmara da direita;

x,y – coordenadas imagem refinadas;

f – distância focal calibrada;

m_{ij} - elementos da matriz de rotação.

O fator de escala λ é calculado através dos elementos das imagens da esquerda e da direita, da equação (3.37) obtém-se:

$$\lambda_d = \frac{(X_0^d - X_0^e)\cdot w_e - (Z_0^d - Z_0^e)\cdot u_e}{w_d \cdot u_e - w_e \cdot u_d} \tag{3.54}$$

onde:

$$\begin{aligned} u_e &= m_{11}^e\, x^e + m_{21}^e\, y^e + m_{31}^e\, f \\ v_e &= m_{12}^e\, x^e + m_{22}^e\, y^e + m_{32}^e\, f \\ w_e &= m_{13}^e\, x^e + m_{23}^e\, y^e + m_{33}^e\, f \end{aligned} \tag{3.55}$$

Pode-se desenvolver os cálculos das coordenadas usando os elementos da imagem da esquerda:

$$\begin{aligned} X_A &= \lambda_e \cdot u_e + X_0^e \\ Y_A &= \lambda_e \cdot v_e + Y_0^e \\ Z_A &= \lambda_e \cdot w_e + Z_0^e \end{aligned} \tag{3.56}$$

onde:

$$\lambda_e = \frac{(X_0^d - X_0^e)\cdot w_d - (Z_0^d - Z_0^e)\cdot u_d}{w_d \cdot u_e - w_e \cdot u_d} \tag{3.57}$$

3.7 – FOTOTRIANGULAÇÃO

Resseções independentes de câmaras seguidas por intersecções de alvos do espaço objeto, usando pares de câmaras e pontos homólogos, são procedimentos comuns na Fotogrametria à curta distância. Tais procedimentos não produzem, entretanto, a acurácia e

precisão necessária das estimativas das coordenadas dos alvos no espaço objeto. A fototriangulação utilizando um ajustamento por feixes perspectivos produz resultados com qualidade superior, mas com maior custo computacional. No ajustamento por feixes perspectivos as foto-coordenadas são processadas simultaneamente, determinando-se os elementos da orientação exterior, dados de calibração da câmara (opcional) e coordenadas no espaço objeto. A Resseção e intersecção são alternativas mais rápidas, mas poucos graus de liberdade são possíveis (na intersecção há somente 1 grau de liberdade), acarretando resultados com baixa confiabilidade. No ajustamento por feixes perspectivos normalmente usam-se medições e várias centenas de incógnitas, obtendo-se vários graus de liberdade.

Com o incremento no uso de câmaras digitais na Fotogrametria à curta distância o ajustamento por feixes perspectivos possui vantagens em relação a resseção e intersecção. Ele permite a determinação dos elementos de calibração da câmara e da orientação interior com maior confiabilidade. A fototriangulação analítica proporciona a mais alta precisão no processamento fotogramétrico. O tratamento matemático tem início a partir de coordenadas medidas nas imagens LUGNANI (1987).

Pode-se adotar dois procedimentos na fototriangulação:

1. Fazer o refinamento das coordenadas imagem antes do processamento e utilizar as equações de colinearidade conforme equações (3.18), procedimento este definido como fototriangulação analítica com pré-refinamento;
2. Adicionar parâmetros às equações de colinearidade que modelem os erros sistemáticos, como as equações (3.20). Este método recebe a definição de fototriangulação analítica com parametrização de distorções sistemáticas.

O procedimento 2 engloba os métodos analíticos de calibração de câmaras, enquanto o procedimento 1 engloba todas as aplicações da equação de colinearidade à fototriangulação que não dispõe de recursos de calibração e parametrização.

Na fototriangulação o ajustamento mais utilizado é o ajustamento por feixes de raios (“bundle method”). Detalhes desse ajustamento pode ser visto no item 3.3.3; equações (3.29) até (3.49). O vetor dos valores das observações ($\mathbf{L_b}$) e o vetor dos valores dos parâmetros ajustados ($\mathbf{X_a}$) para a fototriangulação são:

$$\mathbf{L_b} = [x_1 y_1 x_2 y_2 \ldots x_n y_n]^T$$

$$\mathbf{X_a} = [\ \kappa_1 \varphi_1 \omega_1 X_{01} Y_{01} Z_{01}\ \kappa_2 \varphi_2 \omega_2 X_{02} Y_{02} Z_{02} \ldots\ \kappa_n \varphi_n \omega_n X_{0n} Y_{0n} Z_{0n}\ X_1 Y_1 Z_1\ X_2 Y_2 Z_2 \ldots\ X_m Y_m Z_m]^T \qquad (3.58)$$

Onde:

$x_1 y_1 x_2 y_2 \ldots x_n y_n$ - coordenadas fotogramétricas refinadas;

$X_0\ Y_0\ Z_0$ - coordenadas origem do sistema fotogramétrico (centro perspectivo);

$\kappa\ \omega\ \varphi$ - rotações dos eixos do sistema fotogramétrico em relação ao sistema do espaço objeto.

CAPÍTULO 4

RECONSTRUÇÃO DE IMAGENS USANDO VÍDEO-ESTEREO-CÂMARA

4.1 HARDWARES UTILIZADOS NO DESENVOLVIMENTO

Para a coleta das imagens utilizou-se um sistema que integra uma câmara de vídeo JVC Compact VHS em conjunto com o sistema Nu-View da 3-D Vídeo Inc. O modelo da câmara de vídeo é o GR-AX94, a qual possui um CCD de ¼" e distância focal variável entre 4.2 mm à 50.4 mm.

Uma placa de aço com 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 parâmetros de calibração, foi utilizada como um campo de teste tridimensional.

Na captura das imagens foi utilizada uma placa frame grabber DV500 da Pinnacle, instalada em um microcomputador HP-266 Mhz.

4.2 SOFTWARES UTILIZADOS NO DESENVOLVIMENTO

O software de captura das imagens utilizado foi o Adobe Premier 5.1 RT da Adobe Systems incorporated.

No software *Adobe Photoshop 5.5*, da Adobe Systems incorporated, as imagens foram selecionadas e desentrelaçadas, e posteriormente as coordenadas dos pontos imagens foram lidas.

O *Microsoft Excel 2.000* foi usado para gerar os arquivos textos necessários para os processamentos.

No processo de reconstrução das imagens geradas pelo sistema câmara de vídeo + Nu-View, utilizou-se do software desenvolvido pelo Prof. Maurício Galo da UNESP/FCT do campus de Presidente Prudente e outros softwares específicos para reconstrução de imagens.

4.2.1 Calibração de Câmaras (CC)

O programa de calibração (CC), desenvolvido pelo Prof. Maurício Galo da UNESP/FCT de Presidente Prudente e utilizado no processamento dos dados, tem como base o modelo funcional das equações de colinearidade acrescidas do modelo de erro (ver seção 3.3.2). O método de estimação empregado é o método paramétrico com injunções, podendo ser selecionados os parâmetros a serem fixados e mesmo os parâmetros a serem omitidos no processamento (GALO, 1993). Os elementos da orientação interior que podem ser parametrizados são:

f - distância focal;
x_0 y_0 - coordenadas do ponto principal;
K_1 K_2 K_3 - parâmetros da distorção radial simétrica;
P_1 P_2 - parâmetros da distorção descentrada;
A B - parâmetros de afinidade.

Dependendo das opções de entrada pode-se ter como parâmetros somente os elementos da orientação exterior ($\kappa\ \varphi\ \omega\ X_0\ Y_0\ Z_0$) e as coordenadas (X Y Z) dos pontos no espaço objeto.

Os parâmetros adequados à câmara em uso podem ser selecionados, podendo-se escolher a determinação como foto-variante ou bloco-variante. A escolha pode ser realizada através dos parâmetros, que foram divididos em sete grupos:

Grupo 1 : f

Grupo 2 : x_0 y_0

Grupo 3 : K_1 K_2 K_3

Grupo 4 : P_1 P_2

Grupo 5 : A B

Grupo 6 : κ φ ω X_0 Y_0 Z_0

Grupo 7 : X Y Z

Para os grupos de 1 a 5 pode-se utilizar as seguintes opções:

Grupo 1 : f

1 – Não considerar.

2 – bloco variante.

3 – foto variante.

Grupo 2 : x_0 y_0

1 – Não considerar.

2 – bloco variante.

3 – foto variante.

Grupo 3 : K_1 K_2 K_3

1 – Não considerar.

2 – K_1 bloco variante.

3 – K_1 e K_2 bloco variante.

4 – K_1, K_2 e K_3 bloco variante.

5 – K_1 foto variante.

6 – K_1 e K_2 foto variante.

7 – K_1, K_2 e K_3 foto variante.

Grupo 4 : P_1 P_2

1 – Não considerar.

2 – P_1 e P_2 bloco variante.

3 – P_1 e P_2 foto variante.

Grupo 5 : A B

1 – Não considerar.

2 – A e B bloco variante.

3 – A e B foto variante.

Dependendo das opções escolhidas para esses grupos o programa pode processar uma fototriangulação. Para isto deve-se escolher as opções 1,1,1,1 e 1. Com estas mesmas opções e com dados de entrada somente de uma imagem processa-se a resseção fotogramétrica, com a diferença que na fototriangulação alguns pontos no espaço objeto são incógnitas.

Para se fazer injunções nos parâmetros das coordenadas dos pontos no espaço objeto, são usados os valores do desvio padrão de cada coordenada. Dependendo do valor do desvio padrão as coordenadas dos pontos são consideradas como injunção ou como incógnita, pois existe uma opção no programa que verifica o valor do desvio padrão e considera como incógnita apenas as coordenadas dos pontos que possuam o valor do desvio padrão menor ou igual ao valor limite colocado na opção.

O vetor dos parâmetros ajustados, tomando como exemplo o caso de calibração bloco-variante e, considerando os parâmetros de orientação interior f, x_0 , y_0 e K_1, será:

$$\mathbf{X_a} = [f\ x_0\ \ y_0\ K_1\ \kappa_1\varphi_1\omega_1 X_{01}Y_{01}Z_{01}\ \kappa_2\varphi_2\omega_2 X_{02}Y_{02}Z_{02}\ .....\ \kappa_n\varphi_n\omega_n X_{0n}Y_{0n}Z_{0n}\ X_1Y_1Z_1\ X_2Y_2Z_2.....\ X_mY_mZ_m]^T \quad (4.1)$$

Caso se considere o processamento foto variante, ou seja, um conjunto de parâmetros da orientação interior para cada imagem, o vetor será:

$$\mathbf{X_a} = [f_1\ f_2\ ...\ f_n\ x_{01}\ y_{01}\ x_{02}\ y_{02}\ ...\ x_{0n}\ y_{0n} K_{11}\ K_{12}\ ...\ K_{1n} \kappa_1 \varphi_1 \omega_1 X_{01} Y_{01} Z_{01}$$
$$\kappa_2 \varphi_2 \omega_2 X_{02} Y_{02} Z_{02}\ ...\ \kappa_n \varphi_n \omega_n X_{0n} Y_{0n} Z_{0n}\ X_1 Y_1 Z_1\ X_2 Y_2 Z_2 ...\ X_m Y_m Z_m]^T \quad (4.2)$$

4.2.2 GEOMETRA

Através de imagens gravadas em um computador no formato Bitmap (BMP) ou compactado (JPG), o Geometra cria modelos tridimensionais. As imagens podem ser obtidas através dos seguintes meios: da digitalização de fotografias tiradas com câmaras fotográficas comuns; de arquivos gerados por câmaras fotográficas digitais; e pela captura de imagens gravadas em uma fita de vídeo.

Todos os pontos que estão em uma imagem e são visíveis nas outras imagens, ou pelo menos em uma outra, podem ter suas posições trianguladas. A escala do objeto pode ser definida através da determinação de uma linha no Geometra, caso conheça-se a medida de qualquer segmento de reta pertencente ao objeto em uma das imagens.

O processo de geração de um modelo básico segue as seguintes etapas:

1. Coletar um número de imagens do objeto a ser modelado pelo Geometra, e importá-lo no formato BMP ou JPG;
2. Marcar pontos característicos nas imagens;
3. Calcular o modelo através do Geometra.

Um modelo tridimensional gerado pelo Geometra consiste de posições tridimensionais de alguns pontos e de informações das estruturas (linhas e superfícies) que serão ligadas para formar o objeto ou

objetos. O Geometra pode extrair texturas das imagens usadas, e aplicá-las em perspectiva na construção do modelo.

Após ser calculado o modelo pode ser visualizado. Caso medições sobre o objeto sejam necessárias, elas podem ser feitas através da interface que o Geometra possui com o usuário.

O modelo pode ser visto através de um visualizador interno, ou exportado no formato VRML (linguagem de modelagem para realidade virtual) que é suportado pela Internet, ou em formato DXF para programas CAD. Também é possível exportar dados numéricos de coordenadas, para serem processados em programas de análises numéricas.

Algumas características do software:

- Um projeto pode utilizar várias imagens, sendo limitado somente pela capacidade de memória do computador;
- O visualizador do modelo tridimensional possibilita a visualização na forma *wireframe* ou em textura.

A versão “free” do Geometra 1.1 produzida pela AEA Technology Products & Systems, gera os arquivos VRML que podem ser visualizados utilizando o plug-in Cosmo Player, da Silicon graphics.

4.2.3 SURFER

O programa SURFER versão 6.0, desenvolvido pela Golden Software Inc, é um programa que faz várias operações sobre superfícies tridimensionais a partir das coordenadas tridimensionais de pontos espaciais. São operações como geração de malhas regulares, geração de curvas de nível, visualização em vários frames, exportação em vários formatos.

Neste trabalho o SURFER foi usado para a geração de malhas regulares de objetos, através de pontos tridimensionais calculados na fototriangulação.

4.3 METODOLOGIA DO TRABALHO

Dois métodos de trabalho foram utilizados para o desenvolvimento do projeto, sendo que as etapas comuns podem ser vistas na figura 4.1.

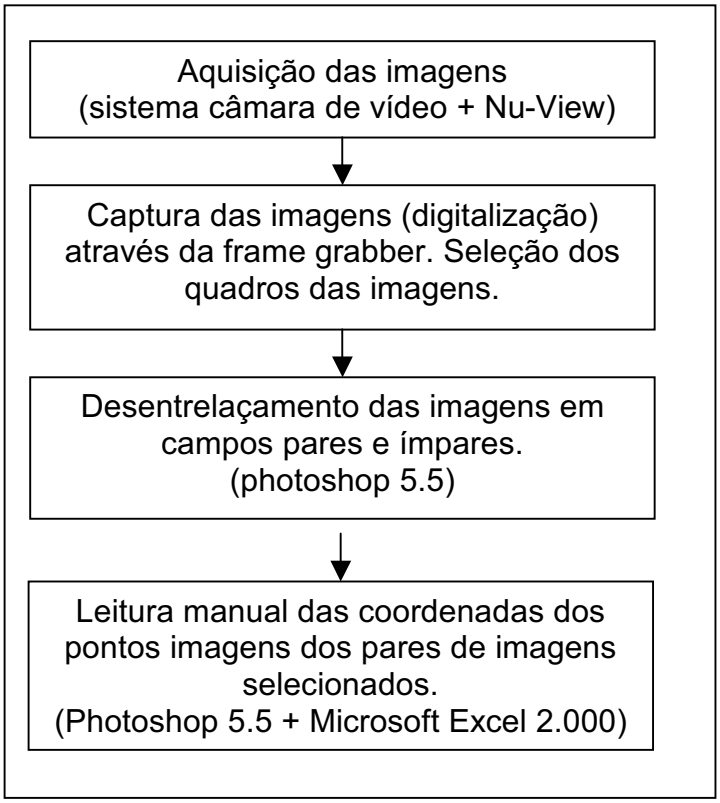


Figura 4.1: Etapas comuns aos dois métodos de desenvolvimento do projeto.

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 que permaneceu fixo para todas as tomadas.

Alguns objetos foram colocados no campo de teste tridimensional, para que possam ser restituídos usando as várias metodologias.

A etapa de captura das imagens foi realizada no laboratório de Rádio e TV da UNOESTE. O software Adobe Premier permite a captura e seleção dos quadros das imagens em tempo real. Para cada posição de tomada das imagens foram selecionados 5 quadros, possibilitando com isso uma flexibilidade maior na escolha da melhor imagem. As imagens entrelaçadas (quadros) foram gravadas no formato BMP (Imagem de Bitmap) com tamanho de 720 pixels (colunas) x 480 pixel (linhas). (Figura 4.2)

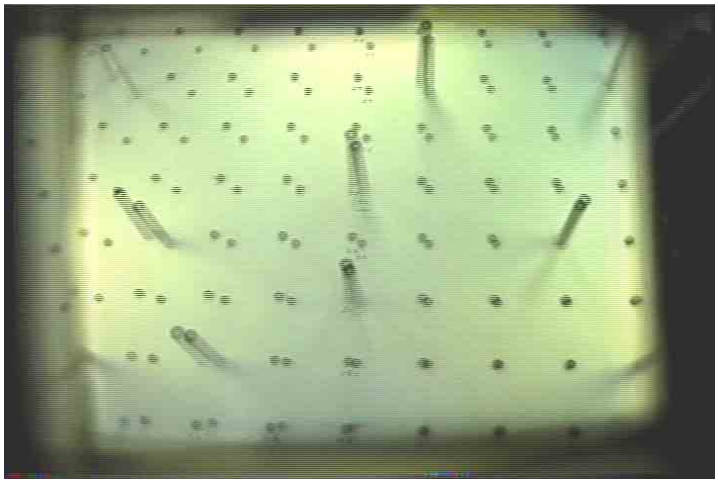


Figura 4.2: Imagem entrelaçada gerada pelo sistema câmara de vídeo + Nu-View.

O desentrelaçamento das imagens realizado no Adobe Photoshop 5.5 gerou uma imagem esquerda através das linhas ímpares, que foram capturadas pela câmara de vídeo (Figura 4.3), e uma imagem direita com as linhas pares, que foram capturadas pelo sistema Nu-View (figura 4.4). Quando foi realizado o desentrelaçamento utilizou-se a opção de *interpolação* para criar as imagens da direita e da esquerda, com a mesma resolução da imagem original; na prática, as linhas suplementares foram interpoladas pelo próprio software.

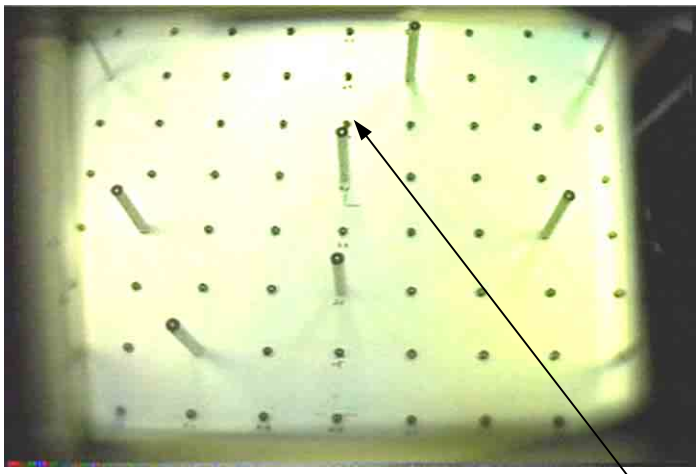


Figura 4.3: Imagem desentrelaçada gerada pela câmara de vídeo.

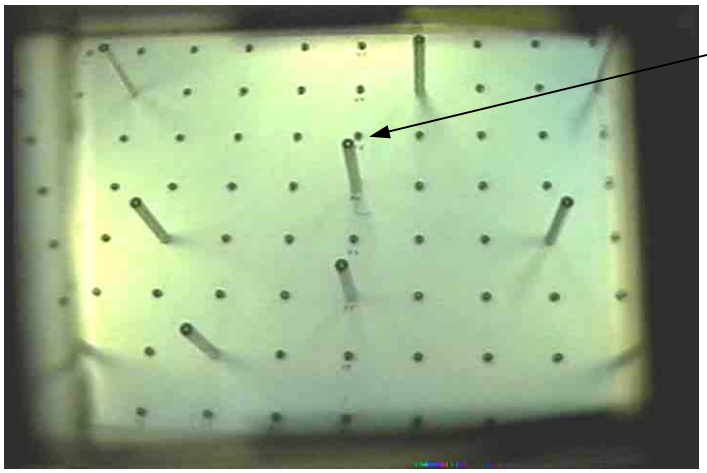


Figura 4.4: Imagem desentrelaçada gerada pelo Nu-View.

Analisando as duas imagens anteriores pode-se verificar os diferentes pontos de vista gerados na câmara de vídeo pelo conjunto de espelhos do Nu-View.

Após o desentrelaçamento das imagens, processou-se a leitura manual dos pontos imagem. As coordenadas em pixels foram lidas e digitadas em uma planilha do Microsoft Excel 2.000. O sistema de máquina foi considerado como sendo o canto superior esquerdo da imagem. Como referência para o sistema objeto arbitrou-se o canto inferior esquerdo do campo de teste tridimensional.

Para cada par de imagens foram lidas as coordenadas da imagem da esquerda e posteriormente as coordenadas da imagem da direita.

4.3.1 MÉTODO 1 (PROCESSAMENTO SIMULTÂNEO DOS MODELOS)

No método 1, inicialmente realizou-se o processamento da calibração do sistema câmara de vídeo + Nu-View, sendo posteriormente realizado o processamento da fototriangulação. A figura 4.5 ilustra as etapas realizadas neste método.

O objetivo é verificar o comportamento do sistema quando se recorre à fototriangulação com pré-calibração.

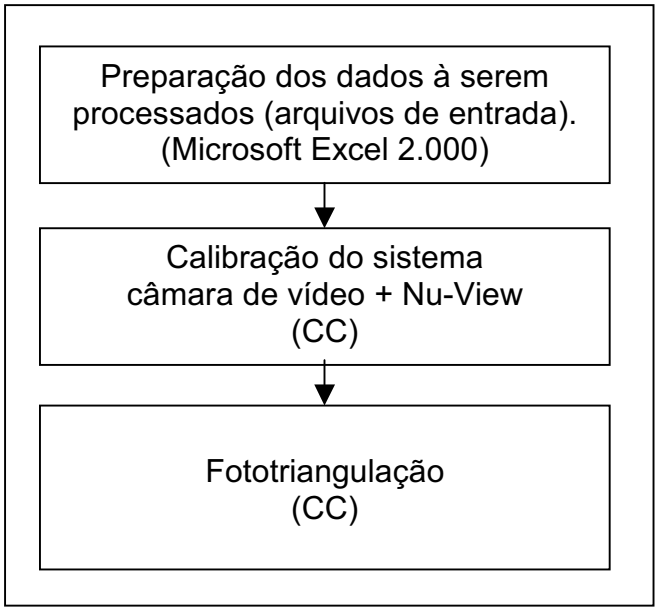


Figura 4.5: Etapas do Método 1.

Na preparação dos dados para os programas de calibração realizada no Microsoft Excel 2.000, os pontos de apoio e as coordenadas imagem foram numerados e lidos em uma seqüência que teve como origem o sistema de coordenadas objeto, isto é, o centro da primeira célula do canto inferior esquerdo do campo de teste

tridimensional. As linhas dos pontos de apoio foram numeradas com os números de 0 à 7, enquanto as colunas foram numeradas com os números de 0 à 10 (Figura 4.6)

Figura 4.6: Numeração das células do campo de teste tridimensional.

O programa *CC* foi utilizado no processo de calibração do sistema câmara de vídeo + Nu-View (Vídeo-Estereocâmara**)** com o intuito de se obter os parâmetros para a orientação interior (f x_0 y_0 K_1 A B) e orientação exterior (κ φ ω X_0 Y_0 Z_0), podendo com isto verificar se os parâmetros de orientação interior das imagens da esquerda e direita são os mesmos.

Para isto foram processados blocos de imagens pares e ímpares em separado e posteriormente foi processado um bloco com todas as imagens pares e ímpares.

4.3.1.1 Calibração com o Programa CC

No processamento dos dados através do programa CC, o arquivo de entrada usado para determinar as opções de processamento foi definido com os seguintes valores para os 5 grupos iniciais 2, 2, 2, 1 e 2; indicando as seguintes opções:

2 – distância focal bloco-variante;
2 – posição do ponto principal bloco variante;
2 – coeficiente K_1 da distorção radial simétrica bloco-variante;
1 – coeficientes P_1 e P_2 da distorção descentrada não considerados;
2 – parâmetros A e B de afinidade bloco variante.

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 arquivo que contém as coordenadas dos pontos no espaço objeto e seus respectivos desvios padrão teve os valores de desvios padrão definidos em 0,5 mm para todas as coordenadas, com exceção de 5 pontos que tiveram os valores de desvios padrão definidos em 0,05, para serem injuncionados quando do processamento da auto-calibração. Os desvios padrão das coordenadas no espaço imagem (X e Y ou coluna e linha) foram definidos com os valores de 1 pixel (0,007 mm).

O arquivo que contém uma série de elementos que são considerados durante o ajustamento, foi definido conforme tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Estrutura do arquivo de parâmetros

Item	**Valor informado**	**Descrição**
01	.001 20	Valor limite para teste de convergência e número Máximo de iterações
02	PARAM	Modo em que é feito o teste de convergência, PARAM faz o teste comparando as correções
03	CL	Tipo de Coordenada espaço imagem, coluna e linha.
04	0.05	Valor mínimo para admitir injunção em XYZ (pontos de apoio)
05	0.007	Variância da unidade de peso a priori (Sigma a priori)
06	6.3748	Distância focal nominal
07	-.0392 .1979	Posição do ponto principal em x_0 e y_0
08	-.3389232E-02 0.0 0.0	Parâmetros de distorção radial simétrica (K_1 K_2 K_3)
09	0.000 0.000	Parâmetros de distorção descentrada (P_1 P_2)
10	.9130384E-01 -.1066533E-02	Parâmetros de afinidade (A B)
11	0. 0. 0. 500. 0. 1400.	Para cada foto deve-se dar a orientação e posição da câmara aproximados. κ φ ω X_0 Y_0 Z_0
12	6	Número de injunções da orientação interior.
13	1. 6.3748 5.0 2. -.0392 1.0 3. .1979 1.0 4. -.3389E-02 1.0 5. .91304E-01 1.0 6. -.10665E-02 1.0	Posição do parâmetro no vetor X_a, valor do parâmetro e desvio padrão, neste caso temos: distância focal, coordenadas x_0,y_0 do ponto principal, K_1 A e B.
14	720 0.007 480 0.007	Número de colunas da imagem, largura do pixel, número de linhas da imagem e altura do pixel.

O experimento foi dividido em três etapas:

1. No início foi realizada a calibração dos pares de imagens separadamente, com o objetivo de se ter para cada par de imagem os valores aproximados dos parâmetros f, x_0, y_0, K_1, A, B, κ, φ, ω,

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 5 pontos que não foram injuncionados com o objetivo de verificar os cálculos das coordenadas desses pontos em relação aos valores conhecidos.

2. Realizadas as calibrações com as imagens separadamente, processou-se a calibração das imagens agrupadas em dois conjuntos, um com as imagens pares e outro com as imagens ímpares. Com os resultados dos dois conjuntos foi processada a calibração de todas as imagens juntas, isto é, as imagens pares e ímpares. Os mesmos cinco pontos não injuncionados na etapa 1 também não os foram nesta etapa, foram usados como pontos de *check*.
3. Finalmente passou-se para os testes com a auto-calibração, ou seja, foram determinados os parâmetros intrínsecos, extrínsecos e as coordenadas de pontos do espaço objeto, num único procedimento. Para a realização da auto-calibração, as imagens foram agrupadas em dois conjuntos, um com as imagens pares e outro com as imagens ímpares. Foram injuncionados cinco pontos do espaço objeto (os cinco pontos não injuncionados na etapa de calibração) e usados 73 pontos como checagem; os cincos pontos foram usados por estarem bem distribuídos. Após a auto-calibração das imagens pares e ímpares em separado, processou-se a auto-calibração de todas as imagens juntas.

4.3.1.2 Resultados da Calibração

No transcorrer do processamento da calibração das imagens em separado, os pontos no espaço imagem que tinham resíduos

em X ou Y acima de três pixels, foram eliminados do processamento ou lidos novamente. Inicialmente foram usados 88 pontos.

Objetivando determinar os valores iniciais para os parâmetros de orientação interior, o desvio padrão admitido para f foi de 5 mm, para x_0 e y_0 de 1 mm, K_1 de 1 mm^{-2}, A e B de 1. Os valores obtidos da orientação interior (f, x_0, y_0, K_1, A, B) no processamento da primeira imagem, foram utilizados no processamento das outras imagens.

Após a realização do processamento da calibração em separado para todas as imagens, e com os valores da orientação interior e exterior aproximados conhecidos, passou-se ao processamento da calibração dos conjuntos das imagens. Em primeiro lugar foram processados simultaneamente as imagens pares e ímpares em blocos separados, cinco imagens em cada bloco, e 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 pontos não tiveram suas coordenadas injuncionadas, os outros setenta e três pontos tiveram suas coordenadas injuncionadas, através do limite imposto no item 04 da tabela 4.1 (Valor mínimo para admitir injunção em XYZ = 0.05 mm). Este valor é considerado no programa como o valor mínimo dos desvios padrão das coordenadas dos pontos objetos à serem injuncionados, isto é, coordenadas com desvios padrão maiores do que o valor do item 04 da tabela 4.1 não são injuncionadas. Os pontos injuncionados tiveram seus desvios padrão iguais a 0.05 mm e os cinco pontos não injuncionados iguais a 0.06 mm.

Na tabela 4.2 verifica-se que os desvios padrão dos parâmetros de orientação interior das imagens ímpares, pares e todas juntas são pequenos. O desvio padrão da distância focal, por exemplo, está na casa de 10^{-2} em relação ao respectivo parâmetro. Portanto, pode-se considerar que os valores dos parâmetros da orientação interior para

as imagens ímpares, pares e todas juntas são confiáveis. Além disso, os desvios padrão de todas as imagens juntas são os menores, certificando-se que os parâmetros da orientação interior deste grupo são os mais confiáveis.

Tabela 4.2 – Parâmetros da orientação interior da calibração.

CALIBRAÇÃO						
Parâmetro	Imagens			Desvio padrão		
	Ímpares	Pares	Todas	Ímpares	Pares	Todas
f (mm)	6.21990	6.19950	6.21190	0.03366	0.03534	0.02438
x_0 (mm)	0.00240	0.01610	0.00340	0.01262	0.01411	0.00940
y_0 (mm)	0.09180	0.06540	0.08200	0.02965	0.02866	0.02077
K_1 (mm^{-2})	-0.00409	-0.00313	-0.00365	0.00019	0.00020	0.00013
A	0.09317	0.09282	0.09301	0.00068	0.00069	0.00049
B	-0.00134	-0.00131	-0.00134	0.00065	0.00066	0.00046

Tabela 4.3 – Discrepâncias dos parâmetros da orientação interior da calibração.

CALIBRAÇÃO						
Parâmetro	Imagens			Discrepâncias		
	Ímpares	Pares	Todas	Ímpares e pares	Ímpares e todas	Pares e todas
f (mm)	6.21990	6.19950	6.21190	0.02040	0.00800	0.01240
x_0 (mm)	0.00240	0.01610	0.00340	0.01370	0.00100	0.01270
y_0 (mm)	0.09180	0.06540	0.08200	0.02640	0.00980	0.01660
K_1 (mm^{-2})	-0.00409	-0.00313	-0.00365	0.00095	0.00044	0.00052
A	0.09317	0.09282	0.09301	0.00035	0.00016	0.00019
B	-0.00134	-0.00131	-0.00134	0.00003	0.00000	0.00003

As discrepâncias dos parâmetros na tabela 4.3, valores bem menores que os parâmetros, 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.

Tabela 4.4 – 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
Graus de liberdade	1265
Qui-Quadrado (calculado)	874.10

Outro valor que comprova a consistência dos resultados é a variância da unidade de peso a posteriori, tabela 4.4, sinalizando que os valores das coordenadas observadas tiveram desvios padrão abaixo de um pixel (pixel = 0.007 mm), valores menores que os previstos pela variância de unidade de peso a priori (0.007 mm).

Tabela 4.5 – Pontos com coordenadas não injuncionadas na calibração.

COORDENADAS NÃO INJUNCIONADAS NA CALIBRAÇÃO									
Ponto	Calibração			Objeto			Erro		
	X mm	Y mm	Z mm	X mm	Y mm	Z mm	Ex mm	Ey mm	Ez mm
20	199.25	0.39	-1.53	200	0	0	-0.75	0.39	-1.53
81	800.51	99.56	0.10	800	100	0	0.51	-0.44	0.10
93	898.54	302.06	2.39	900	300	0	-1.46	2.06	2.39
27	201.56	699.80	-0.47	200	700	0	1.56	-0.20	-0.47
87	798.77	700.33	-2.96	800	700	0	-1.23	0.33	-2.96
						Erro médio quadrático	1.18	0.97	1.85

Os pontos com coordenadas não injuncionadas na calibração estão na tabela 4.5; estes pontos foram usados como checagem. O maior erro médio quadrático entre as coordenadas calculadas é de 1.85 mm, confirmando a consistência dos valores determinados para os parâmetros de orientação interior.

As tabelas 4.6 até 4.9 relacionam os parâmetros de orientação exterior calculados.

Tabela 4.6 – Parâmetros extrínsecos ($\kappa\ \varphi\ \omega$) das imagens ímpares na calibração.

IMAGENS ÍMPARES					
κ	φ	ω	Desvio padrão		
Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais
0,692	2.006	23.379	0.047	0.126	0.215
-89,634	-29.240	1.410	0.058	0.199	0.122
179,581	-0.415	-29.499	0.039	0.092	0.204
88,747	31.562	0.859	0.061	0.199	0.122
93,188	4.956	0.450	0.037	0.205	0.143

Tabela 4.7 – Parâmetros extrínsecos (X Y Z) das imagens ímpares na calibração

IMAGENS ÍMPARES					
X	Y	Z	Desvio padrão		
mm	mm	mm	mm	mm	mm
560,132	-241.042	1274.868	2.993	3.519	5.165
-284,747	356.379	1375.666	3.622	2.542	5.442
471,716	1059.576	1298.769	2.212	3.576	5.098
1315,909	353.002	1341.242	3.696	2.422	5.284
602,740	357.808	1388.176	3.711	3.421	5.507

Tabela 4.8 – Parâmetros extrínsecos ($\kappa\ \varphi\ \omega$) das imagens pares na calibração.

IMAGENS PARES					
κ	φ	ω	Desvio padrão		
Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais
-0,119	5.699	24.026	0.052	0.132	0.220
-88,475	-29.580	5.283	0.060	0.200	0.126
178,799	-3.938	-30.267	0.043	0.095	0.206
90,271	31.969	-3.334	0.063	0.200	0.126
92,679	5.304	-3.218	0.039	0.212	0.151

Tabela 4.9 – Parâmetros extrínsecos (X Y Z) das imagens pares na calibração.

IMAGENS PARES					
X	Y	Z	Desvio padrão		
mm	mm	mm	mm	mm	mm
641,964	-267.300	1323.765	3.292	3.767	5.383
-305,062	295.601	1420.865	3.786	2.705	5.645
407,374	1088.025	1340.261	2.366	3.765	5.268
1341,369	416.392	1386.672	3.879	2.601	5.484
604,220	423.106	1439.899	4.046	3.750	5.735

Os desvios padrão dos parâmetros extrínsecos (coordenadas X Y Z) possuem uma média de 4 mm e para os ângulos $(\kappa\ \varphi\ \omega)$ é de aproximadamente 10'.

Tabela 4.10 – Diferença dos parâmetros extrínsecos na calibração.

DIFERENÇA ENTRE IMAGENS ÍMPARES E PARES						
$\Delta\kappa$	$\Delta\varphi$	$\Delta\omega$	ΔX	ΔY	ΔZ	Base
Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	mm	mm	mm	mm
0,57	3.69	0.65	81.83	26.26	48.90	98.88
1,16	0.34	3.87	20.32	60.78	45.20	78.42
0,78	3.52	0.77	64.34	28.45	41.49	81.68
1,52	0.41	2.47	25.46	63.39	45.43	82.04
0,51	0.35	2.77	1.48	65.30	51.72	83.31
					MÉDIA	84.87

Na tabela 4.10 tem-se o valor da base entre a câmara de vídeo e o sistema Nu-View, que possui o valor médio de 84.87 mm.

As diferenças (tabela 4.10) não são constantes porque os ângulos $(\kappa\ \varphi\ \omega)$ são em relação ao espaço objeto. O único elemento que deveria ser constante é a base, as diferenças são por causa dos erros na estimação do parâmetros de orientação exterior.

Com a calibração processada para todas as imagens, foram realizados experimentos com a auto-calibração.

4.3.1.3 Resultados da Auto-Calibração

Após a realização do processamento da calibração, e com os valores da orientação interior e exterior conhecidos, passou-se ao processamento da auto-calibração.

Usaram-se os mesmos procedimentos usados na calibração, isto é, em primeiro lugar foram processados 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.

Cinco pontos do espaço objeto tiveram suas coordenadas injuncionadas, com desvios padrão iguais a 0.05 mm, e as coordenadas dos pontos restantes, pontos de checagem, com desvios padrão iguais a 0.06 mm. Os pontos injuncionados na auto-calibração foram os utilizados como checagem na calibração.

Os valores da tabela 4.11 confirmam os resultados obtidos na calibração, isto é, os desvios padrão estão todos na casa de 10^{-2} em relação ao respectivo parâmetro e, os desvios padrão de todas as imagens juntas são os menores, certificando-se que os parâmetros da orientação interior deste grupo são os mais confiáveis.

Tabela 4.11 – Parâmetros da orientação interior da auto-calibração (processamento simultâneo).

AUTO-CALIBRAÇÃO						
Parâmetro	Imagens			Desvio padrão		
	Ímpares	Pares	Todas	Ímpares	Pares	Todas
f (mm)	6.36940	6.39240	6.41210	0.07519	0.07461	0.05516
x_0 (mm)	-0.03780	-0.03610	-0.03380	0.01440	0.01685	0.01064
y_0 (mm)	0.18890	0.21120	0.21650	0.05549	0.05430	0.04199
K_1 (mm^{-2})	-0.00358	-0.00311	-0.00345	0.00056	0.00050	0.00034
A	0.09128	0.09120	0.09117	0.00106	0.00102	0.00082
B	-0.00112	-0.00100	-0.00117	0.00069	0.00073	0.00050

Comparando os resultados da orientação interior na calibração e na auto-calibração com todas as imagens processadas simultaneamente, através da tabela 4.12, verifica-se uma discrepância pequena em alguns parâmetros. As coordenadas do ponto principal tiveram diferenças consideráveis, podendo-se considerar aceitáveis os dois métodos de obtenção dos parâmetros da orientação interior, mas quando se deseja um maior rigor deve-se considerar os parâmetros da calibração, visto que quase a totalidade dos pontos de apoio foram injuncionados.

Tabela 4.12 – Parâmetros da orientação interior para a calibração e auto-calibração (processamento simultâneo).

CALIBRAÇÃO E AUTO-CALIBRAÇÃO			
Parâmetro	Calibração	Auto-calibração	Discrepância
f (mm)	6.2119	6.4121	0.2002
x_0 (mm)	0.2002	-0.0338	0.1664
y_0 (mm)	0.1664	0.2165	0.0501
K_1 (mm^{-2})	0.0501	-0.00345	0.04665
A	0.04665	0.09117	0.04452
B	0.04452	-0.00117	0.04335

Tabela 4.13 – Estatística da auto-calibração com todas as imagens.

PARÂMETRO	VALOR
Variância da unidade de peso a priori (mm)	0.00700
Variância da unidade de peso a posteriori (mm)	0.00404
Razão entre variância posteriori e priori	0.5777
Graus de liberdade	1061
Qui-Quadrado (calculado)	612.90

Com o propósito de checar a consistência dos valores calculados para a variância da unidade de peso a posteriori, determina-se o limite de confiança do valor do Qui-quadrado calculado.

Usando um teste unilateral para um α = 5% o χ^2 é de 886.60 e portanto o ajustamento é aceito, isto é:

$$\chi^2_{calculado} \langle \chi^2_{tabelado} \quad (4.4)$$

Os erros verdadeiros das coordenadas calculadas em relação aos pontos objetos com coordenadas conhecidas na auto-calibração, e o erro médio quadrático estão no anexo A.

Os erros médios quadráticos (EMQ) das coordenadas do espaço objeto, estão relacionados na tabela 4.14 e foram calculados de acordo com a expressão (4.5).

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum e^2}{n-1}}$$

(4.5)

onde:

e – erro verdadeiro, diferença entre valor calculado e o valor conhecido das coordenadas do ponto de apoio.

n – número de pontos calculados.

Tabela 4.14 – Erros Médios Quadráticos (EMQ) na auto-calibração com o processamento de todas as imagens.

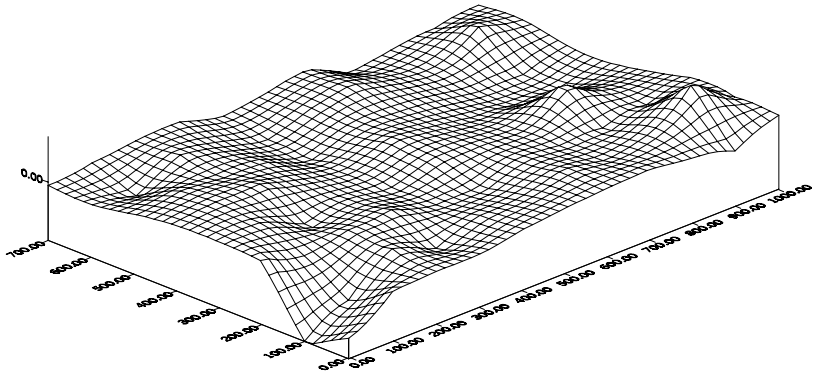
Coordenada	EMQ (mm)
X	1.214
Y	1.139
Z	2.110

Comparando os resultados da tabela 4.14 com os resultados da calibração da tabela 4.5, verifica-se um aumento no erro médio quadrático de todas as coordenadas na auto-calibração, resultados esperados, pois enquanto que na calibração somente 5 pontos não foram injuncionados, na auto-calibração teve-se somente 5 pontos injuncionados. Comprovando que para processamento que exija um maior rigor geométrico, deve-se utilizar os valores da orientação interior

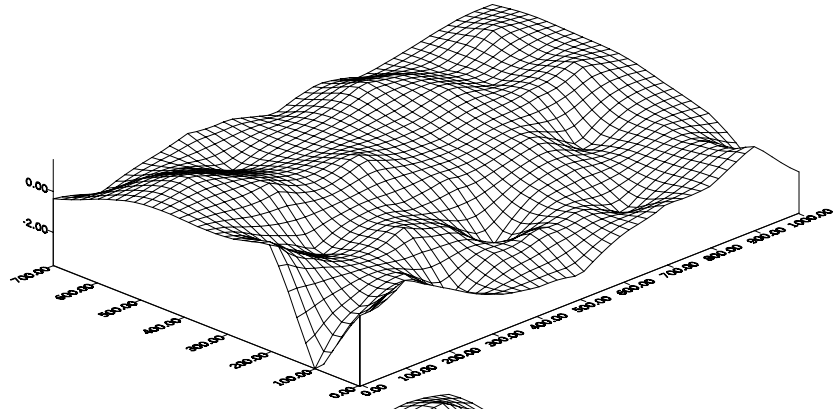
definidos na calibração do sistema, ou realizar a auto-calibração com mais pontos de apoio (calibração “on-job”).

O anexo B representa o gráfico de dispersão dos erros verdadeiros das coordenadas dos pontos não injuncionados na auto-calibração, onde se verifica que a coordenada Z tem os maiores erros.

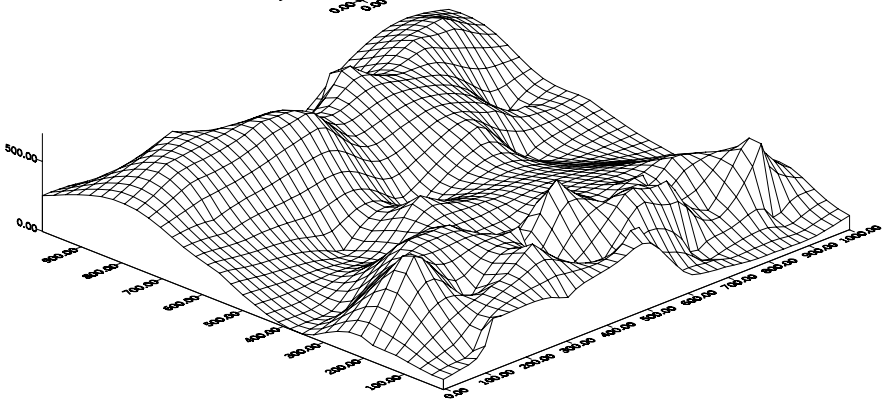
A figura 4.7 e o gráfico do anexo B mostram que os erros possuem uma tendência para os valores positivos. Devido à esta tendência sistemática, os erros relativos dos pontos serão menores.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.7: Erros verdadeiros das coordenadas na auto-calibração, reconstruídos no SURFER; (a) coordenadas XY erro em X; (b) coordenadas XY erro em Y; (c) coordenadas XY erro em Z.

Com a auto-calibração processada para todas as imagens, realizou-se a fototriangulação, considerando-se agora os parâmetros de orientação interior conhecidos.

4.3.1.4 Fototriangulação com o programa CC (Parâmetros da calibração).

Para o processamento dos dados através da fototriangulação, utilizando-se o programa CC, o arquivo de entrada usado para determinar as opções de processamento foi definido com os seguintes valores para os 5 grupos iniciais: 1, 1, 1, 1 e 1; indicando que os seguintes parâmetros não foram considerados como incógnitas: distância focal, posição do ponto principal, coeficientes K_1, K_2 e K_3 da distorção radial simétrica, coeficientes P_1 e P_2 da distorção descentrada e parâmetros A e B.

Foram usados os parâmetros de orientação interior calculados na calibração e valores aproximados para os parâmetros extrínsecos do sistema câmara de vídeo + Nu-view, também da calibração para o processamento da fototriangulação.

O arquivo que contém as coordenadas dos pontos no espaço objeto, setenta e oito pontos no total, e seus respectivos desvios padrão teve os valores de desvios padrão definidos em 0.06 mm para todas as coordenadas, com exceção de 5 pontos, bem distribuídos no modelo, que tiveram os valores de desvios padrão definidos em 0.05 mm, para serem injuncionados (pontos de apoio).

Os desvios padrão das coordenadas no espaço imagem (X e Y ou coluna e linha) foram definidos com os valores de 1 pixel (0,007

mm). Como na calibração e na auto-calibração, foram usados dez imagens para o processamento da fototriangulação.

No ajustamento por feixes perspectivos, processamento utilizado na fototriangulação, as coordenadas imagens são processadas simultaneamente, determinando-se os elementos da orientação exterior e as coordenadas no espaço objeto.

Tabela 4.15 – Parâmetros extrínsecos (ângulos de rotação) da fototriangulação com todas as imagens, usando parâmetros intrínsecos calculados na calibração.

ÂNGULOS DE ROTAÇÃO OBTIDOS NA FOTOTRIANGULAÇÃO COM CALIBRAÇÃO						
	κ	φ	ω	Desvios padrão		
Imagens	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais
Ímpares	0.245	-0.712	36.518	0.447	0.795	0.773
	-91.329	-34.664	2.066	0.458	0.798	0.859
	177.830	-0.235	-36.776	0.588	0.590	0.683
	87.204	34.398	3.895	0.444	0.767	0.771
	92.028	6.314	1.818	0.359	0.963	0.896
Pares	-0.501	2.023	-37.178	0.456	0.802	0.789
	-89.782	-35.115	5.985	0.454	0.808	0.857
	177.115	-3.101	37.620	0.596	0.591	0.703
	88.907	34.889	-0.220	0.466	0.764	0.765
	91.552	6.777	-1.278	0.376	0.986	0.919

Tabela 4.16 – Parâmetros extrínsecos (coordenadas dos centros perspectivos) obtidos na fototriangulação com todas as imagens, usando parâmetros intrínsecos calculados na calibração.

COORDENADAS DOS CPs DA FOTOTRIANGULAÇÃO COM CALI BRAÇÃO						
	X	Y	Z	Desvios padrão		
Imagens	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Ímpares	493.196	-445.947	1015.981	17.680	13.780	13.890
	-360.354	342.122	1229.036	17.100	18.230	13.860
	472.788	1144.295	1103.025	13.710	12.530	11.660
	1326.346	289.242	1226.119	16.060	16.000	14.590
	628.292	325.816	1332.585	22.020	20.650	8.222
Pares	541.570	-481.504	1056.603	18.660	14.440	14.850

	-385.809	291.070	1268.782	17.830	19.010	14.390
	432.058	1175.612	1136.878	14.340	13.090	12.370
	1352.598	339.337	1268.435	16.580	16.600	14.980
	633.197	371.268	1381.783	23.430	21.960	8.698

As tabelas 4.15 e 4.16 contém os parâmetros extrínsecos de orientação do sistema câmara+Nu-view. Na tabela 4.17 estão as diferenças dos parâmetros extrínsecos e a base entre os centros perspectivos.

Tabela 4.17 – Diferença dos parâmetros extrínsecos da fototriangulação com todas as imagens, usando parâmetros intrínsecos calculados na calibração.

DIFERENÇA ENTRE IMAGENS ÍMPARES E PARES FOTOTRIANGULAÇÃO (CALIBRAÇÃO)						
$\Delta\kappa$	$\Delta\varphi$	$\Delta\omega$	ΔX	ΔY	ΔZ	Base
Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	mm	mm	mm	mm
0.746	2.736	0.660	48.374	35.557	40.622	72.488
1.547	0.451	3.919	25.455	51.052	39.746	69.527
0.715	2.866	74.396	40.730	31.317	33.853	61.528
1.703	0.491	4.114	26.252	50.095	42.316	70.635
0.476	0.464	3.096	4.905	45.452	49.198	67.159
					MÉDIA	68.27

Tabela 4.18 – Estatística da fototriangulação (calibração).

PARÂMETRO	VALOR
Variância da unidade de peso a priori (mm)	0.007
Variância da unidade de peso a posteriori (mm)	0.1064
Razão entre variância posteriori e priori	15.20
Graus de liberdade	1057
Qui-Quadrado calculado	1607

Tabela 4.19 – Erros Médios Quadráticos (EMQ) na fototriangulação com calibração com o processamento de todas as imagens.

Coordenada	EMQ (mm)
X	11.245
Y	11.330
Z	19.329

Após a análise dos resultados da fototriangulação utilizando como opção de processamento os valores 1, 1, 1, 1 e 1 para os 5 grupos iniciais, verificou-se que haviam grandes diferenças nos resultados comparados com a calibração e a auto-calibração. Pode-se verificar estas diferenças através da análise das tabelas 4.4 e 4.5 da calibração e as tabelas 4.13 e 4.14 da auto-calibração, em relação as tabelas 4.18 e 4.19 da fototriangulação. A variância da unidade de peso a posteriori e os erros médios quadráticos da calibração e auto-calibração são bem menores do que os da fototriangulação.

Após alguns testes verificou-se que o programa não processa o pré-refinamento das coordenadas imagens, quando são usados como opção de processamento os valores 1, 1, 1, 1 e 1 para os 5 grupos iniciais, isto é, quando não são considerados como incógnitas os parâmetros de orientação interior. Para o processamento da fototriangulação utilizou-se então a mesma opção da calibração e auto-calibração para os parâmetros de orientação interior (2, 2, 2, 1 e 2), mas aplicando-se pesos altos. Os valores dos parâmetros de orientação interior calculados na calibração foram utilizados para o processamento da fototriangulação, e para que estes parâmetros não fossem calculados, foram utilizados como injunção desvios padrão muito pequenos para a orientação interior. Todos desvios padrão dos parâmetros de orientação interior foram estabelecidos com 10^{-7}.

Os resultados da fototriangulação considerando os parâmetros de orientação interior como injunção estão nas tabelas 4.20 até 4.24.

Através das tabelas 4.20 até 4.24 verifica-se a melhoria dos resultados com o novo processamento. Para os processamentos seguintes foram considerados os parâmetros de orientação interior, mas com injunções nos desvios padrão de 10^{-7} mm.

Pode-se interpretar os resultados apresentados nas tabelas 4.15 a 4.19 como aqueles que seriam obtidos quando não são considerados os erros sistemáticos.

Tabela 4.20 – Parâmetros extrínsecos (ângulos de rotação) da fototriangulação com todas as imagens, considerando parâmetros intrínsecos calculados na calibração com desvios padrão de 10^{-7} mm.

ÂNGULOS DE ROTAÇÃO OBTIDOS NA FOTOTRIANGULAÇÃO COM CALIBRAÇÃO						
	κ	φ	ω	Desvios padrão		
Imagens	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais
Ímpares	0.69141	2.01788	23.69632	0.05380	0.13220	0.13490
	-89.64628	-29.22968	1.59187	0.04936	0.11450	0.12910
	179.60947	-0.33608	-29.36806	0.05240	0.10620	0.11580
	88.78725	31.67801	0.98450	0.05005	0.11260	0.12510
	93.20604	5.05803	0.56354	0.03902	0.16410	0.15280
Pares	-0.11789	5.69878	24.35173	0.05615	0.13600	0.13850
	-88.48950	-29.56770	5.46470	0.05180	0.11610	0.13180
	178.82773	-3.85492	-30.12650	0.05395	0.10730	0.11800
	90.31772	32.08158	-3.21184	0.05095	0.11440	0.12730
	92.70216	5.40152	-3.10644	0.04026	0.17100	0.15900

Tabela 4.21 – Parâmetros extrínsecos (coordenadas dos centros perspectivos) obtidos na fototriangulação com todas as imagens, considerando parâmetros intrínsecos calculados na calibração com desvios padrão de 10^{-7} mm.

COORDENADAS DOS CPs DA FOTOTRIANGULAÇÃO COM CALIBRAÇÃO						
	X	Y	Z	Desvios padrão		
Imagens	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Imagens pares	560.563	-248.748	1273.123	3.309	2.942	2.052

	-284.971	351.759	1377.683	2.718	3.175	2.146
	473.866	1057.163	1302.671	2.834	2.598	1.895
	1319.311	349.921	1341.397	2.501	2.974	2.210
	605.495	354.829	1390.063	4.046	3.799	1.043
Pares	642.127	-275.503	1321.808	3.529	3.129	2.220
	-305.252	290.777	1422.818	2.844	3.328	2.268
	409.647	1085.409	1344.534	2.965	2.715	2.028
	1344.811	413.188	1386.929	2.621	3.127	2.325
	606.963	420.104	1441.854	4.371	4.086	1.127

Tabela 4.22 – Diferenças dos parâmetros extrínsecos da fototriangulação com todas as imagens, considerando parâmetros intrínsecos calculados na calibração com desvios padrão de 10^{-7} mm.

DIFERENÇA ENTRE IMAGENS ÍMPARES E PARES FOTOTRIANGULAÇÃO (CALIBRAÇÃO)						
$\Delta\kappa$	$\Delta\varphi$	$\Delta\omega$	ΔX	ΔY	ΔZ	Base
Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	mm	mm	mm	mm
0,809	3.681	0.655	81.564	26.755	48.685	98.685
1,157	0.338	3.873	20.281	60.982	45.135	78.532
0,782	3.519	0.758	64.219	28.246	41.863	81.697
1,530	0.404	4.196	25.500	63.267	45.532	82.013
0,504	0.343	3.670	1.468	65.275	51.791	83.338
					MÉDIA	84.853

Tabela 4.23 – Estatística da fototriangulação com todas as imagens, considerando parâmetros intrínsecos calculados na calibração com desvios padrão de 10^{-7} mm.

PARÂMETRO	VALOR
Variância da unidade de peso a priori (mm)	0.007
Variância da unidade de peso a posteriori (mm)	0.00413
Razão entre variância posteriori e priori	0.59
Graus de liberdade	1057
Qui-Quadrado calculado	626.40

Tabela 4.24 – Erros Médios Quadráticos (EMQ) da fototriangulação com todas as imagens, considerando parâmetros intrínsecos calculados na calibração com desvios padrão de 10^{-7} mm.

Coordenada	EMQ (mm)
X	1.045
Y	1.024
Z	2.093

4.3.1.5 Fototriangulação com o programa CC (Parâmetros da auto-calibração).

Processou-se novamente a fototriangulação, com a diferença que forma utilizados os parâmetros da orientação interior calculados na auto-calibração do sistema.

Os resultados são mostrados nas tabelas 4.25 a 4.29. Pode-se verificar que existem poucas diferenças quando se usa os parâmetros da calibração ou da auto-calibração para o processamento da fototriangulação. Isto pode ser comprovado através dos erros médios quadráticos da fototriangulação para os dois casos. Utilizando-se os parâmetros intrínsecos da calibração (tabela 4.24) os erros médios quadráticos da fototriangulação são de mesma ordem de grandeza daqueles obtidos utilizando os parâmetros intrínsecos da auto-calibração (tabela 4.29).

Tabela 4.25 – Parâmetros extrínsecos (ângulos de rotação) da fototriangulação com todas as imagens, considerando parâmetros intrínsecos calculados na auto-calibração com desvios padrão de 10^{-7} mm.

ÂNGULOS DE ROTAÇÃO OBTIDOS NA FOTOTRIANGULAÇÃO						
	κ	φ	ω	Desvios padrão		
Imagens	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais
Ímpares	0.6578	2.2812	25.1049	0.0551	0.1307	0.1340
	-89.4750	-30.6039	1.8852	0.0497	0.1134	0.1286
	179.5962	-0.6133	-30.7724	0.0534	0.1045	0.1147
	88.9475	33.0164	0.7041	0.0503	0.1115	0.1247

	93.2423	5.9964	0.2767	0.0386	0.1647	0.1536
Pares	-0.2309	5.9417	25.7657	0.0575	0.1342	0.1375
	-88.2947	-30.9268	5.7717	0.0522	0.1150	0.1312
	178.7451	-4.1066	-31.5305	0.0550	0.1055	0.1168
	90.5067	33.4069	-3.5160	0.0513	0.1133	0.1269
	92.7401	6.3416	-3.4058	0.0400	0.1716	0.1598

Tabela 4.26 – Parâmetros extrínsecos (coordenadas dos centros perspectivos) obtidos na fototriangulação com todas as imagens, considerando parâmetros intrínsecos calculados na auto-calibração com desvios padrão de 10^{-7} mm.

COORDENADAS DOS CPs DA FOTOTRIANGULAÇÃO						
	X	Y	Z	Desvios padrão		
Imagens	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Ímpares	560.7560	-270.8840	1310.9060	3.3810	2.9990	2.1080
	-313.2980	352.2690	1418.6330	2.7610	3.2340	2.2030
	473.9330	1084.4680	1340.7560	2.8880	2.6380	1.9480
	1348.0220	348.1280	1381.4520	2.5420	3.0330	2.2640
	603.4270	352.3460	1435.5640	4.1880	3.9330	1.0570
Pares	645.1150	-299.0200	1361.1850	3.6040	3.1870	2.2800
	-334.7030	288.9300	1465.2560	2.8880	3.3890	2.3280
	407.0910	1114.1550	1383.8950	3.0210	2.7560	2.0830
	1374.8730	413.8650	1428.5590	2.6650	3.1880	2.3820
	605.0800	421.0440	1489.3850	4.5250	4.2320	1.1420

Tabela 4.27 – Diferença dos parâmetros extrínsecos na fototriangulação com todas as imagens, considerando parâmetros intrínsecos calculados na auto-calibração com desvios padrão de 10^{-7} mm.

DIFERENÇA ENTRE IMAGENS ÍMPARES E PARES FOTOTRIANGULAÇÃO (AUTO-CALIBRAÇÃO)						
$\Delta\kappa$	$\Delta\varphi$	$\Delta\omega$	ΔX	ΔY	ΔZ	Base
Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	mm	mm	mm	mm
0,889	3.661	0.661	84.359	28.136	50.279	102.157
1,180	0.323	3.887	21.405	63.339	46.623	81.509
0,851	3.493	0.758	66.842	29.687	43.139	84.913
1,559	0.390	4.220	26.851	65.737	47.107	85.214
0,502	0.345	3.683	1.653	68.698	53.821	87.286

MÉDIA	88.216

Tabela 4.28 – Estatística na fototriangulação com todas as imagens, considerando parâmetros intrínsecos calculados na auto-calibração com desvios padrão de 10^{-7} mm.

PARÂMETRO	VALOR
Variância da unidade de peso a priori (mm)	0.007
Variância da unidade de peso a posteriori (mm)	0.00404
Razão entre variância posteriori e priori	0.577
Graus de liberdade	1057
Qui-Quadrado amostral	612.90

Tabela 4.29 – Erros Médios Quadráticos (EMQ) obtidos na fototriangulação com todas as imagens, considerando parâmetros intrínsecos calculados na auto-calibração com desvios padrão de 10^{-7} mm.

Coordenada	EMQ (mm)
X	1.214
Y	1.140
Z	2.110

Tabela 4.30 – Distância entre os vizinhos na fototriangulação com auto-calibração.

DISTÂNCIAS ENTRE VIZINHOS NA FOTOTRIANGULAÇÃO COM AUTO-CALIBRAÇÃO

	Coordenadas calculadas			Coordenadas conhecidas			Distância		
Ponto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Calculada (mm)	Real (mm)	Diferença (mm)
63	**600.424**	**299.59**	**2.949**	**600**	**300**	**0**			
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
								Média	0.31
25	**200.31**	**500.80**	**0.74**	**200**	**500**	**0**			

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
								Média	0.31

Para verificar a precisão local das coordenadas geradas, foram calculadas as distâncias entre pontos vizinhos. A tabela 4.30 contém as diferenças entre as distâncias calculadas e as distâncias reais para dois pontos (63 e 25) e seus vizinhos.

As precisões dos pontos considerados estão acima da acurácia de 1.1 a 2.11 mm (tabela 4.29), indicando que os erros calculados são devidos a erros sistemáticos.

Com o processamento da fototriangulação foram determinadas as coordenadas precisas dos pontos no espaço objeto, os erros verdadeiros das coordenadas em relação aos pontos objetos com coordenadas conhecidas e o erro médio quadrático.

Na análise dos resultados da fototriangulação verificou-se que os erros verdadeiros foram maiores nos pontos que estavam na periferia das imagens. Estes pontos foram eliminados e posteriormente foram calculados os EMQ. A tabela 4.31 faz uma comparação dos EMQ.

Analisando os valores da tabela 4.31, houve uma redução considerável nos valores dos EMQ. Os aumentos dos erros e distorções nas imagens, verificados nas extremidades das imagens são devidos ao conjunto de espelhos que compõem o adaptador estereoscópico da Nu-View. Estas distorções podem ser causadas pela não uniformidade das superfícies dos espelhos.

Tabela 4.31 – Comparação dos Erros Médios Quadráticos.

Coordenada	EMQ (todos os pontos) (mm)	EMQ (sem ptos extremos) (mm)	Discrepância	
			(mm)	(%)
X	1.214	0.909	0.305	25
Y	1.140	0.999	0.141	12

Z	2.110	1.925	0.185	9

Objetivando verificar a influência dos pontos com coordenadas Z diferentes de zero nos valores dos EMQ, foram eliminados os pontos e calculados novamente os EMQ. A tabela 4.32 evidencia que estes pontos com valores nas coordenadas Z contribuem significativamente para o aumento do valor do EMQ das coordenadas X e Y, pois com a eliminação desses pontos há uma redução significativa no erro médio quadrático nas coordenadas X e Y. Em um processamento real não é possível eliminar os pontos com coordenadas Z diferentes de zero.

Tabela 4.32 – Comparação dos EMQ com e sem pontos com valores na coordenada Z.

Coordenada	EMQ (sem ptos extremos) (mm)	EMQ (sem ptos extremos e sem ptos com valores em Z) (mm)	Discrepância	
			(mm)	(%)
X	0.909	0.563	0.346	38
Y	0.999	0.836	0.163	16
Z	1.925	1.951	0.026	1

4.3.2 MÉTODO 2 (PROCESSAMENTO DE UM MODELO)

Neste método 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 objeto através das coordenadas calculadas de seus pontos na fototriangulação.

Inicialmente houve o procedimento da calibração, gerando para os parâmetros intrínsecos os valores contidos na tabela 4.33.

Tabela 4.33 – Parâmetros da orientação interior do modelo.

Parâmetro	Valor (mm)	Desvio padrão (mm)
f (mm)	6.39230	0.08637

x_0 (mm)	0.03720	0.01777
y_0 (mm)	0.17740	0.05619
K_1 (mm^{-2})	-0.00308	0.00027
A	0.09501	0.00142
B	-0.00677	0.00128

As tabelas 4.34 e 4.35 contém os parâmetros extrínsecos da calibração do sistema câmara+Nu-view, considerando 1 modelo.

Os parâmetros de orientação interior e parâmetros extrínsecos aproximados determinados na calibração do modelo foram utilizados para o processamento da fototriangulação do modelo.

Tabela 4.34 – Parâmetros extrínsecos (κ φ ω) das imagens na calibração do modelo.

CALIBRAÇÃO						
	κ	φ	ω	Desvio padrão		
Imagem	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais
Ímpar	-89.590	-31.160	2.506	0.092	0.569	0.145
Par	-88.240	-31.638	6.588	0.093	0.568	0.151

Tabela 4.35 – Parâmetros extrínsecos (X Y Z) das imagens na calibração do modelo.

CALIBRAÇÃO						
	X	Y	Z	Desvio padrão		
Imagem	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Ímpar	-101.946	258.408	1143.971	10.600	3.556	12.970
Par	-128.172	191.133	1185.916	11.140	4.297	13.370

As diferenças entre os parâmetros extrínsecos das imagens ímpar e par, bem como a base, estão na tabela 4.36.

Tabela 4.36 – Diferença dos parâmetros extrínsecos da calibração do modelo.

DIFERENÇA ENTRE IMAGEM ÍMPAR E PAR

Δκ	Δφ	Δω	ΔX	ΔY	ΔZ	Base
Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	mm	mm	mm	mm
1.35	0.48	4.08	26.23	67.28	41.94	83.51

As tabelas 4.37 e 4.38 contém os parâmetros extrínsecos calculados na fototriangulação do modelo, usando os parâmetros intrínsecos da tabela 4.33.

Tabela 4.37 – Parâmetros extrínsecos (κ φ ω) das imagens na fototriangulação do modelo.

FOTOTRIANGULAÇÃO						
	κ	φ	ω	Desvio padrão		
Imagem	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais	Graus decimais
Ímpar	-89.597	-31.060	2.571	0.073	0.094	0.183
Par	-88.111	-31.645	6.879	0.075	0.095	0.183

Tabela 4.38 – Parâmetros extrínsecos (X Y Z) das imagens na fototriangulação do modelo.

FOTOTRIANGULAÇÃO						
	X	Y	Z	Desvio padrão		
Imagem	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Ímpar	-101.815	256.753	1148.594	1.782	3.849	1.796
Par	-128.771	184.376	1186.316	1.853	3.912	2.004

Foram realizados dois processamentos para a fototriangulação do modelo. Um processamento foi idêntico ao realizado no item 4.3.1.3, isto é, injuncionou-se somente 5 pontos no espaço objeto. No segundo processamento todos os pontos do espaço objeto conhecidos (pontos da placa) foram injuncionados, sendo determinados somente os pontos lidos no objeto.

A tabela 4.39 relaciona os EMQ da fototriangulação com somente 5 pontos de apoio.

Tabela 4.39 – Erros Médios Quadráticos – EMQ da fototriangulação com 5 pontos de apoio e com os parâmetros de orientação interior da tabela 4.33.

Coordenada	EMQ (mm)
X	13.370
Y	5.993
Z	19.997

Em seguida foi processada a mesma fototriangulação (1 modelo), mas usando os parâmetros precisos, isto é, os parâmetros intrínsecos determinados na calibração de todas as imagens juntas, tabela 4.2.

A tabela 4.40 relaciona os EMQ da fototriangulação com somente 5 pontos de apoio utilizando parâmetros intrínsecos da calibração com todas as imagens juntas.

Tabela 4.40 – Erros Médios Quadráticos – EMQ da fototriangulação com 5 pontos de apoio e com os parâmetros de orientação interior da tabela 4.2.

Coordenada	EMQ (mm)
X	14.605
Y	6.675
Z	22.137

Houve um aumento dos erros médios quadráticos (tabelas 4.39 e 4.40) quando da utilização dos parâmetros de calibração com todas as imagens juntas, sendo os erros de magnitude maior que na auto-calibração.

Objetivando comparar os erros médios quadráticos da fototriangulação com calibração e fototriangulação com auto-calibração para um modelo, foi processada a fototriangulação com auto-calibração para um modelo. Os erros médios quadráticos estão na tabela 4.41.

Tabela 4.41 – Erros Médios Quadráticos – EMQ da fototriangulação com 5 pontos de apoio e com os parâmetros de orientação interior da auto-calibração de 1 modelo.

Coordenada	EMQ (mm)
X	16.849
Y	7.213
Z	24.314

Houve um aumento nos erros quando processou-se a fototriangulação com auto-calibração para 1 modelo. Este aumento provavelmente é devido a quantidade de pontos de apoio injuncionados na auto-calibração (5 pontos de apoio), enquanto na calibração somente 5 pontos de apoio não foram injuncionados.

4.3.2.1 Verificação da precisão esperada para um modelo – caso normal.

Para verificar a precisão do sistema câmara de vídeo + Nu-View, pode-se comparar os erros médios quadráticos gerados em um experimento real com os erros médios quadráticos definidos na *teoria do erro do caso normal*, supondo um modelo no qual κ, φ e ω são iguais a zero. (KRAUS, 1993)

Nesta teoria os erros médios quadráticos das coordenadas no espaço objeto são função da escala da imagem e da relação entre base (B) e a coordenada (Z) (relação base-altura). Assume-se que a distância principal (f) e o comprimento da base (B) são livres de erros. A equação para calcular o erro médio quadrático para a coordenada Z é dada por:

$$\sigma_Z = \frac{Z^2}{fB}\sigma_x \qquad (4.6)$$

onde:

Z - coordenada Z;

B – comprimento da base;

f – distância focal;

$\sigma_x = \sigma_y$ - valor inicial do desvio padrão das coordenadas imagens.

A quantidade $\frac{B}{Z}$ é chamada de *razão base-altura*. A relação $\frac{Z}{f}$ é a escala da imagem (m_b).

Os erros médios quadráticos σ_X e σ_Y das coordenadas X e Y no espaço objeto, respectivamente, podem ser calculados através da aplicação das leis de propagação de erro, levando a: (KRAUS, 1993)

$$\sigma_Y = \sqrt{(\frac{y}{f} m_b \frac{Z}{B} \sigma_x)^2 + (m_b \sigma_x)^2}$$

$$\sigma_X = \sqrt{(\frac{x}{f} m_b \frac{Z}{B} \sigma_x)^2 + (m_b \sigma_x)^2} \qquad (4.7)$$

onde:

x , *y* - coordenadas imagem;

σ_x - desvio padrão das coordenadas imagens x e y.

Utilizaram-se as equações (4.6) e (4.7) para o cálculo dos erros médios quadráticos obtidos, com base nesta propagação de erros. Para os cálculos foram usados dados do par de imagens utilizado para o processamento da fototriangulação de um só modelo. As coordenadas imagens consideradas foram as do ponto imagem 42, imagem ímpar, que possui os valores 452 e 334 (em pixels) para a coluna e linha respectivamente. Os valores considerados estão na tabela 4.42.

Tabela 4.42 – Valores utilizados para a previsão de precisão das coordenadas dos pontos no espaço objeto.

Variável	Valor (mm)
x	3.164
y	2.338
f	6.392
Z	1177
B	83.51
σ_x	0.007

A tabela 4.43 compara os valores esperados e os calculados dos erros médios quadráticos para o ponto em questão.

Tabela 4.43 – Valores esperados e os calculados dos erros médios quadráticos.

EMQ	Valor esperado (mm)	Valor calculado Ponto 42 (mm)	Diferença (mm)
σ_X	9.08	13.37	4.29
σ_Y	6.76	5.99	-0.77
σ_Z	18.17	19.99	1.82

Da tabela 4.43 deduz-se que o sistema possui uma boa acurácia para a coordenada Y e regular para a coordenada Z, levando em consideração que os erros médios quadráticos calculados estão próximos dos valores esperados, com exceção do erro médio quadrático da coordenada X que ficou muito acima do valor esperado. Isto se deve a vários fatores:

- Erros nos parâmetros de orientação interior;
- Os parâmetros reais não são normais (κ, φ e $\omega \neq 0$);

- O fator de escala em X (parâmetro A) pode estar com erro.

As coordenadas dos pontos do espaço objeto calculadas foram processadas no software SURFER com o propósito de checar a qualidade dessas coordenadas na reconstrução de imagens.

4.3.2.2 Reconstrução do objeto no SURFER

A figura 4.8 ilustra a imagem do objeto que foi reconstruído. Na montagem do arquivo de entrada para o programa SURFER, alguns pontos conhecidos da placa que não aparecem nas imagens processadas foram incluídos, procurando gerar uma superfície mais homogênea em volta do objeto.

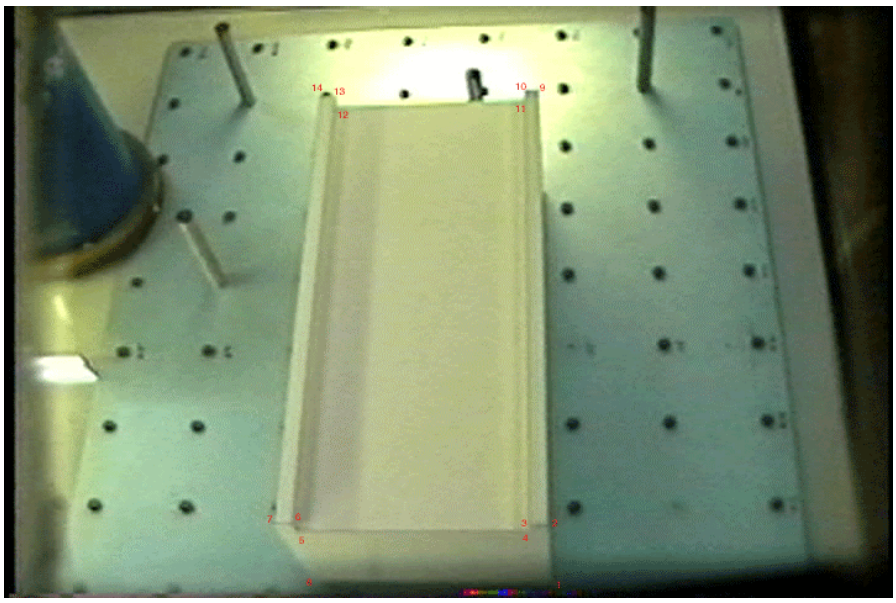


Figura 4.8: Objeto a ser reconstruído no SURFER com pontos numerados.

A primeira reconstrução do objeto foi feita com os pontos processados na fototriangulação, que considerou somente cinco pontos de apoio (figura 4.9).

A figura geométrica em forma de paralelepípedo foi traçada para representar o objeto reconstruído, pois foram poucos pontos que puderam ser lidos sobre o objeto.

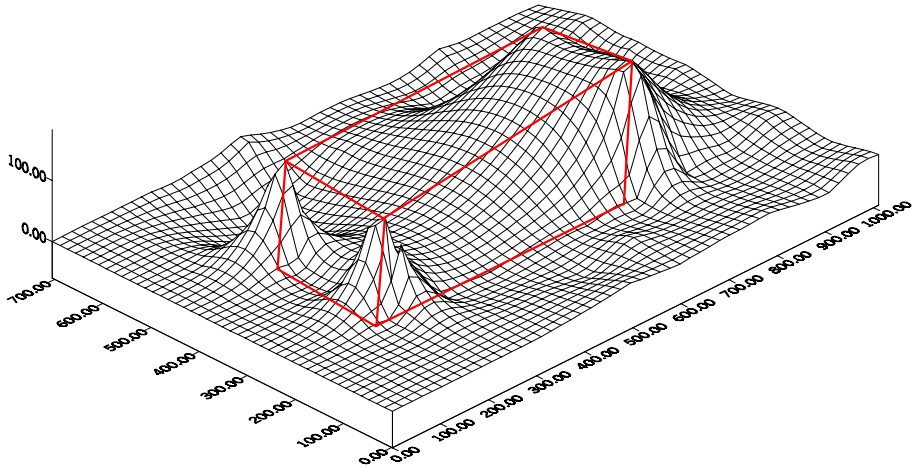


Figura 4.9: Objeto reconstruído no SURFER considerando 5 pontos de apoio.

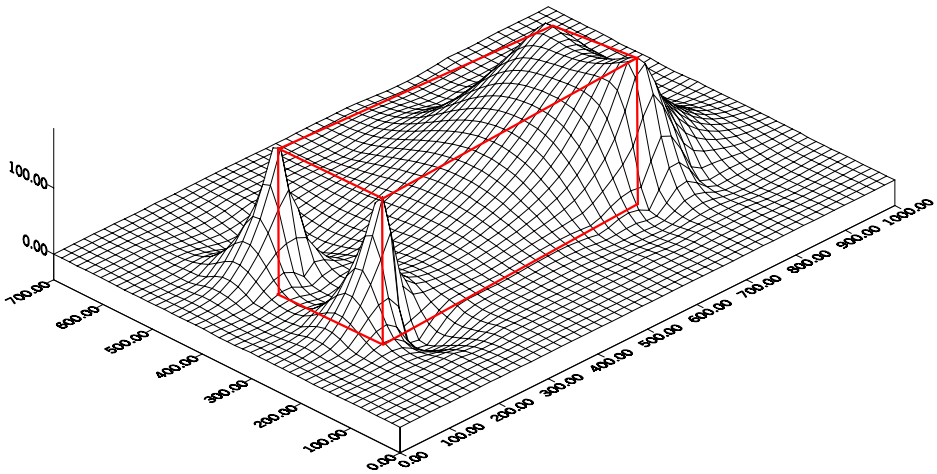


Figura 4.10: Objeto reconstruído no SURFER considerando todos os pontos da placa como pontos de apoio.

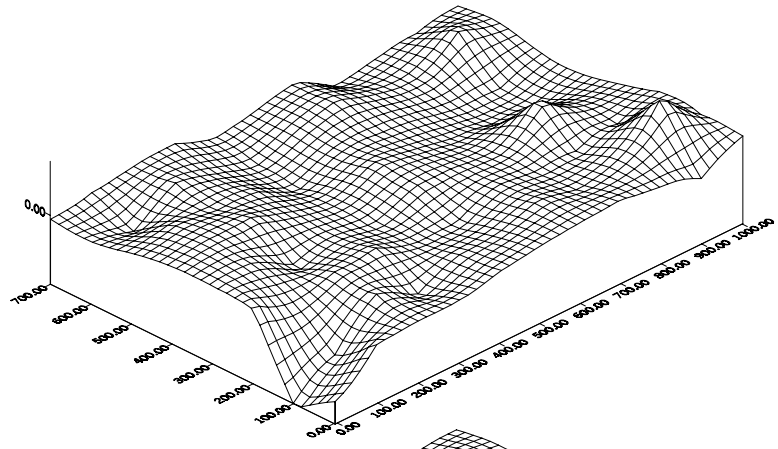
A reconstrução do objeto com os pontos gerados pelo segundo processamento da fototriangulação, onde todos os pontos da

placa foram considerados como pontos de apoio, é mostrada na figura 4.10.

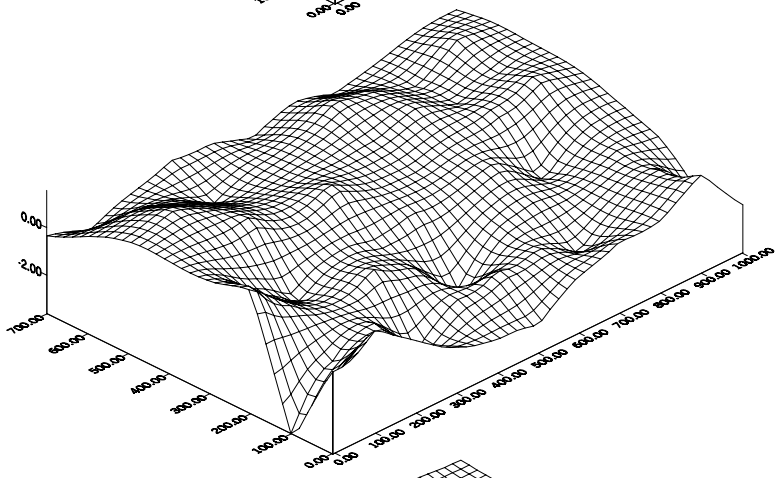
Conclui-se que é possível a reconstrução de objetos adquiridos através do conjunto câmara de vídeo+Nu-View, tendo-se o cuidado de colocar alvos pré-sinalizados nos objetos, quando estes não possuírem muitos pontos que possam ser usados na reconstrução.

No anexo D verifica-se através do gráfico de dispersão dos erros na fototriangulação, uma maior variação nos erros da coordenada Z, com tendência positiva. Constata-se ainda que as coordenadas nas periferias das imagens são as que possuem os erros de maior magnitude. A figura 4.11 mostra os erros verdadeiros na fototriangulação de todas as imagens juntas.

(a)


0.00
-700.00
600.00
500.00
400.00
300.00
200.00
100.00
0.00
0.00
100.00
200.00
300.00
400.00
500.00
600.00
700.00
800.00
900.00
1000.00

(b)


0.00
-2.00
-700.00
600.00
500.00
400.00
300.00
200.00
100.00
0.00
0.00
100.00
200.00
300.00
400.00
500.00
600.00
700.00
800.00
900.00
1000.00

(c)

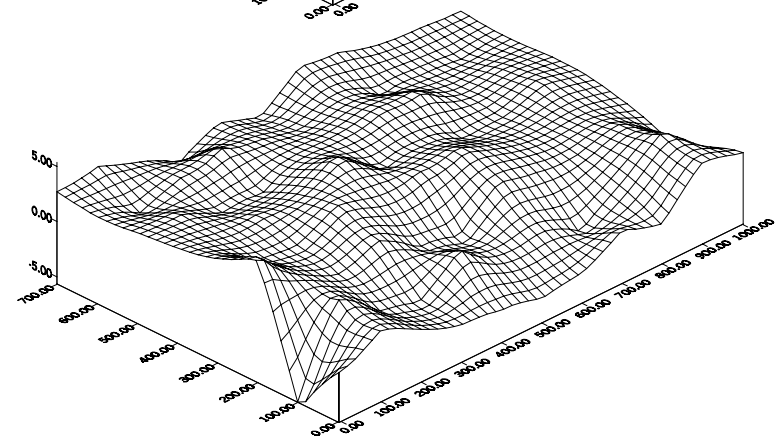

5.00
0.00
-5.00
-700.00
600.00
500.00
400.00
300.00
200.00
100.00
0.00
0.00
100.00
200.00
300.00
400.00
500.00
600.00
700.00
800.00
900.00
1000.00

Figura 4.11: Erros verdadeiros das coordenadas na fototriangulação, reconstruídos no SURFER; (a) coordenadas XY erro em X; (b) coordenadas XY erro em Y; (c) coordenadas XY erro em Z.

4.3.2.3 Reconstrução do objeto no GEOMETRA.

Na reconstrução do objeto no GEOMETRA, foi utilizado um par de imagens. Os pontos homólogos foram identificados conforme a figura 4.12. Após a identificação dos pontos homólogos processou-se o cálculo para a geração do modelo tridimensional, e finalmente gerou-se a visualização do modelo através do visualizador tridimensional (Figura 4.13). Foram criadas malhas sobre as imagens para serem mostradas as texturas no visualizador. Estas malhas são as figuras geométricas em forma de tela que estão na figura 4.12.

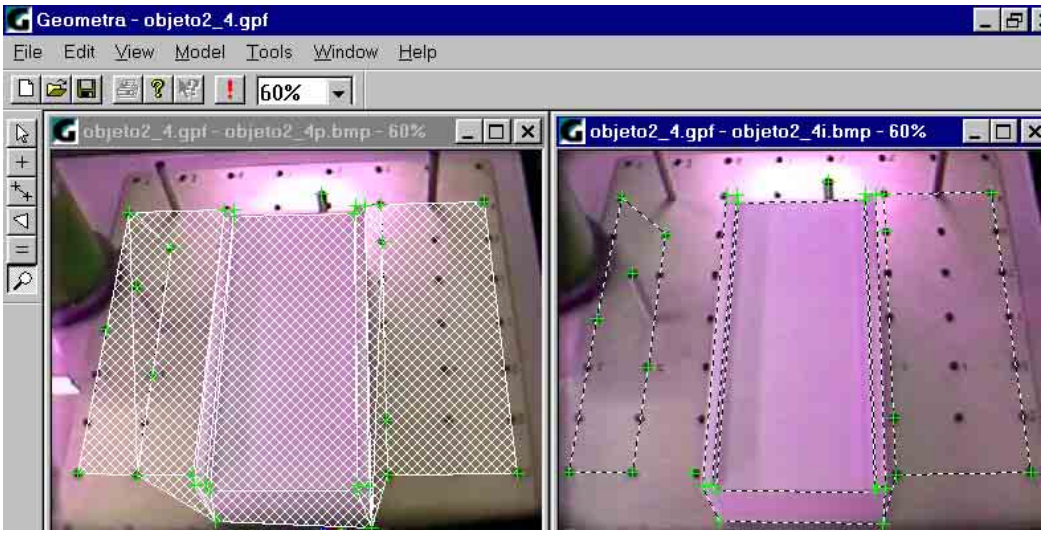


Figura 4.12: Pontos homólogos do par de imagens.

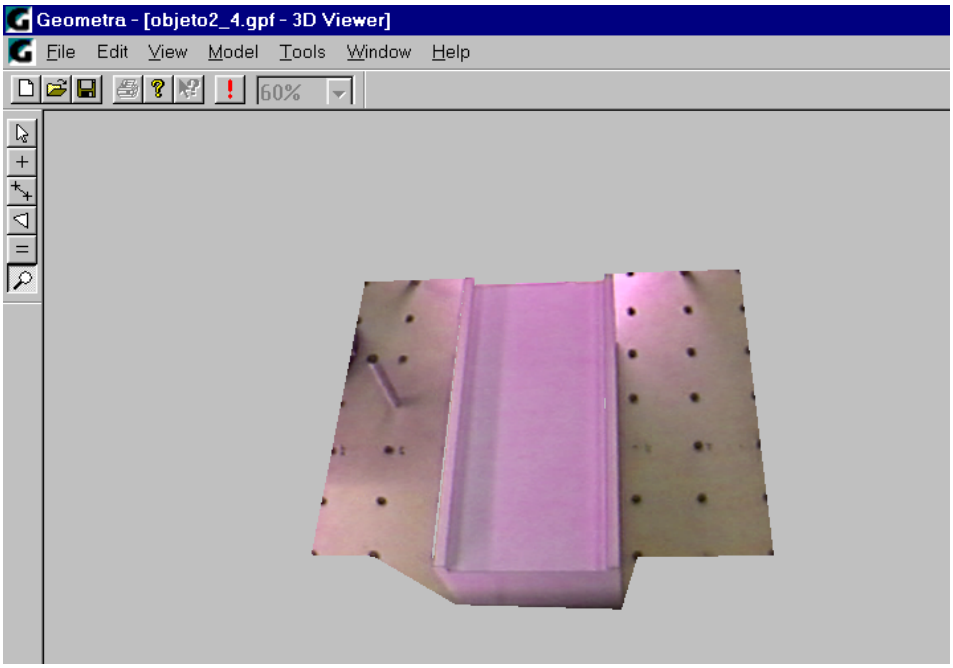


Figura 4.13: Objeto reconstruído no GEOMETRA..

Para uma completa visualização de todas as faces do objeto seriam necessárias várias tomadas com diferentes pontos de vista.

4.4 DISCUSSÃO GLOBAL DOS RESULTADOS.

É possível fazer reconstrução com o sistema, e obter erros menores que 1 cm com fototriangulação; para uma distância câmara-objeto de 1 metro aproximadamente. Os erros verificados no processamento são:

Tabela 4.44 – Erros Médios Quadráticos (EMQ) calculados nos processamentos realizados.

Tipo de processamento	Erros Médios Quadráticos (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 *	11.245	11.330	19.329
Fototriangulação com auto-calibração*	11.248	11.502	19.072
Fototriangulação com calibração	1.045	1.024	2.093
Fototriangulação com auto-calibração	1.214	1.140	2.110

* Fototriangulação sem refinamento nas coordenadas imagens

Algumas conclusões importantes obtidas após a análise dos experimentos:

- ➔ Os parâmetros da orientação interior podem ser considerados os mesmos para as imagens esquerda e direita;
- ➔ Os parâmetros da orientação interior não são estáveis, significando que os melhores resultados serão aqueles da calibração e da fototriangulação com calibração;
- ➔ O sistema é flexível, fácil de usar e permite a gravação de milhares de quadros estereoscópicos em fita de vídeo;
- ➔ A resolução das imagens, entretanto, é baixa;
- ➔ Pode-se ter inúmeras aplicações, como gravações de pequenos objetos;

- ➔ A geometria da intersecção permitida pelo sistema é ruim, devido à base ser muito pequena;
- ➔ Deve-se processar a fototriangulação com refinamento nas coordenadas imagens, caso contrário os erros médios quadráticos terão aproximadamente magnitude 10 vezes maior;
- ➔ Na auto-calibração e na fototriangulação com auto-calibração os resultados são praticamente iguais, podendo-se utilizar a fototriangulação com auto-calibração na reconstrução de superfícies.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES.

Na avaliação geométrica dos equipamentos de aquisição de imagens com o propósito de reconstrução de objetos para aplicações fotogramétricas, necessita-se 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 erros dos equipamentos de aquisição que podem afetar uma imagem são: o sincronismo do sinal de vídeo, o “line jitter”, o efeito do aumento da temperatura, o fator de escala provocado pela diferença de freqüência dos equipamentos envolvidos na digitalização das imagens, a quantização e as distorções das lentes.

Verificou-se que alguns erros podem ser parametrizados através dos procedimentos fotogramétricos, incluindo neste grupo o fator de escala devido às diferentes freqüências e as distorções das lentes.

A quantização depende dos fabricantes, visto que a mesma é resolvida através do aumento da resolução, que envolve aumento da quantidade de elementos sensores e diminuição do tamanho dos elementos sensores. Este problema é de difícil solução no sistema de vídeo, porque a resolução do vídeo é padronizada.

O “line jitter” e o sincronismo de sinal de vídeo são resolvidos também pelos fabricantes dos equipamentos, através de filtros e circuitos eletrônicos, enquanto o aumento da temperatura pode ser contornado pelo próprio usuário, utilizando a câmara somente após ser atingida a estabilidade térmica.

Os resultados obtidos no processo de reconstrução das imagens com o sistema câmara de vídeo+Nu-View indicam erros nas coordenadas x e y de 1 mm aproximadamente, enquanto na coordenada Z este erro está em torno de 2 mm; para uma distância de 1400 mm aproximadamente. Estes valores indicam que o sistema câmara de vídeo+Nu-View não deve ser utilizado para aplicação rigorosas, isto é, áreas do conhecimento onde a magnitude desses erros afetariam os resultados pretendidos, como o controle de qualidade na produção de peças industriais. Mas nas áreas onde o rigor geométrico não é primordial 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 possível é a reconstrução de objetos para o desenvolvimento de ambientes virtuais, como também a reconstrução de pequenos objetos.

5.2 RECOMENDAÇÕES.

Após a conclusão dos experimentos recomenda-se:

1. Com o objetivo de confirmar a precisão e acurácia determinadas do sistema, pode-se adquirir imagens com um maior controle em relação à iluminação, distâncias e rotações do sistema;
2. Para procedimentos idênticos aos experimentos realizados, deve-se utilizar a fototriangulação com auto-calibração;
3. Pesquisar aplicações voltadas para o desenvolvimento de ambientes virtuais, onde imagens adquiridas pelo sistema possam ser exportadas para o desenvolvimento de quiosques de informações, por exemplo. A exportação pode ser feita através do programa GEOMETRA.

ANEXOS

ANEXO A – COORDENADAS NÃO INJUNCIONADAS NA AUTO-CALIBRAÇÃO

ANEXO B – GRÁFICO DE DISPERSÃO DOS ERROS NA AUTO-CALIBRAÇÃO

ANEXO C – COORDENADAS NÃO INJUNCIONADAS NA FOTOTRIANGULAÇÃO

ANEXO D – GRÁFICO DE DISPERSÃO DOS ERROS NA FOTOTRIANGULAÇÃO

ANEXO A

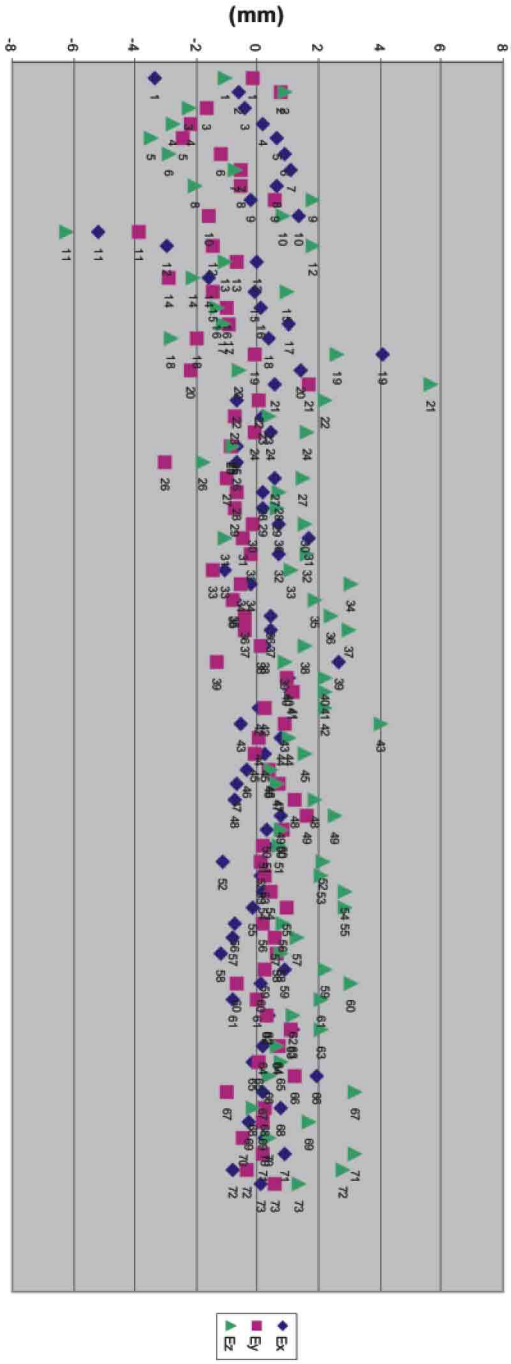
COORDENADAS NÃO INJUNCIONADAS NA AUTO-CALIBRAÇÃO

RESULTADO DA AUTO-CALIBRAÇÃO									
Ptos	*Auto-calibração **			*Objeto **			*Erro **		
	X	Y	Z	X	Y	Z	Ex	Ey	Ez
0	-3.339	-0.151	-1.094	0	0	0	-3.339	-0.151	-1.094
10	99.361	0.732	0.884	100	0	0	-0.639	0.732	0.884
30	299.558	-1.679	-2.238	300	0	0	-0.442	-1.679	-2.238
40	400.194	-2.208	-2.744	400	0	0	0.194	-2.208	-2.744
50	500.593	-2.452	-3.478	500	0	0	0.593	-2.452	-3.478
60	600.892	-1.197	-2.888	600	0	0	0.892	-1.197	-2.888
70	701.087	-0.587	-0.782	700	0	0	1.087	-0.587	-0.782
80	800.616	-0.566	-2.047	800	0	0	0.616	-0.566	-2.047
90	899.751	0.561	1.789	900	0	0	-0.249	0.561	1.789
100	1001.358	-1.597	0.812	1000	0	0	1.358	-1.597	0.812
1	-5.169	96.133	-6.234	0	100	0	-5.169	-3.867	-6.234
11	97.024	98.535	147.816	100	100	146	-2.976	-1.465	1.816
21	199.996	99.304	-1.074	200	100	0	-0.004	-0.696	-1.074
31	298.423	97.101	143.901	300	100	146	-1.577	-2.899	-2.099
41	399.879	98.561	0.935	400	100	0	-0.121	-1.439	0.935
51	500.091	99.009	-1.363	500	100	0	0.091	-0.991	-1.363
61	601.031	99.047	-1.118	600	100	0	1.031	-0.953	-1.118
71	700.38	98.039	-2.833	700	100	0	0.38	-1.961	-2.833
91	904.105	99.871	148.575	900	100	146	4.105	-0.129	2.575
101	1001.4	97.783	-0.627	1000	100	0	1.4	-2.217	-0.627
2	0.557	201.691	5.677	0	200	0	0.557	1.691	5.677
12	99.3	200.005	2.179	100	200	0	-0.7	0.005	2.179
22	200.146	199.224	0.348	200	200	0	0.146	-0.776	0.348
32	300.416	199.871	1.608	300	200	0	0.416	-0.129	1.608
42	399.309	199.097	-0.842	400	200	0	-0.691	-0.903	-0.842
52	499.307	196.932	144.234	500	200	146	-0.693	-3.068	-1.766
62	600.564	198.955	1.446	600	200	0	0.564	-1.045	1.446
72	700.194	199.328	0.704	700	200	0	0.194	-0.672	0.704
82	800.151	199.251	0.591	800	200	0	0.151	-0.749	0.591
92	900.709	199.822	1.555	900	200	0	0.709	-0.178	1.555
102	1001.654	199.506	-1.095	1000	200	0	1.654	-0.494	-1.095
13	100.667	299.756	1.595	100	300	0	0.667	-0.244	1.595
23	198.938	298.558	147.055	200	300	146	-1.062	-1.442	1.055
33	299.8	299.476	3.021	300	300	0	-0.2	-0.524	3.021
43	399.221	299.201	1.848	400	300	0	-0.779	-0.799	1.848
53	500.398	299.582	2.383	500	300	0	0.398	-0.418	2.383
63	600.424	299.59	2.949	600	300	0	0.424	-0.41	2.949
73	700.203	300.071	1.513	700	300	0	0.203	0.071	1.513

83	802.661	298.653	146.877	800	300	146	2.661	-1.347	0.877
14	101.003	400.959	2.189	100	400	0	1.003	0.959	2.189
24	201.101	401.128	2.195	200	400	0	1.101	1.128	2.195
34	300.022	400.224	2.194	300	400	0	0.022	0.224	2.194
44	399.471	400.874	4.031	400	400	0	-0.529	0.874	4.031
54	500.738	400.022	147.035	500	400	146	0.738	0.022	1.035
64	600.209	399.934	1.516	600	400	0	0.209	-0.066	1.516
74	699.621	400.338	0.393	700	400	0	-0.379	0.338	0.393
84	799.288	400.656	0.607	800	400	0	-0.712	0.656	0.607
94	899.236	401.24	1.877	900	400	0	-0.764	1.24	1.877
15	100.719	501.592	2.49	100	500	0	0.719	1.592	2.49
25	200.305	500.799	0.738	200	500	0	0.305	0.799	0.738
35	300.308	500.166	0.712	300	500	0	0.308	0.166	0.712
45	398.867	500.106	2.108	400	500	0	-1.133	0.106	2.108
55	500.13	500.228	2.085	500	500	0	0.13	0.228	2.085
65	600.181	500.407	2.816	600	500	0	0.181	0.407	2.816
75	699.844	500.916	2.869	700	500	0	-0.156	0.916	2.869
85	799.228	500.132	0.82	800	500	0	-0.772	0.132	0.82
95	899.181	500.579	1.296	900	500	0	-0.819	0.579	1.296
16	98.786	600.627	146.738	100	600	146	-1.214	0.627	0.738
26	200.896	600.245	2.159	200	600	0	0.896	0.245	2.159
36	300.091	599.283	3.037	300	600	0	0.091	-0.717	3.037
46	399.195	599.958	2.04	400	600	0	-0.805	-0.042	2.04
56	500.36	600.28	1.164	500	600	0	0.36	0.28	1.164
66	601.136	601.072	148.058	600	600	146	1.136	1.072	2.058
76	700.136	600.66	0.606	700	600	0	0.136	0.66	0.606
86	799.867	600.029	0.753	800	600	0	-0.133	0.029	0.753
96	901.895	601.203	146.358	900	600	146	1.895	1.203	0.358
17	100.188	698.974	3.173	100	700	0	0.188	-1.026	3.173
37	300.758	700.257	-0.154	300	700	0	0.758	0.257	-0.154
47	399.722	700.132	1.68	400	700	0	-0.278	0.132	1.68
57	500.242	699.514	0.391	500	700	0	0.242	-0.486	0.391
67	600.887	700.151	3.197	600	700	0	0.887	0.151	3.197
77	699.202	699.673	2.779	700	700	0	-0.798	-0.327	2.779
97	900.123	700.543	1.37	900	700	0	0.123	0.543	1.37
Erro médio quadrático							1.214	1.139	2.110
* VALORES EM MILÍMETROS									

ANEXO B

GRÁFICO DA DISPERSÃO DOS ERROS NA AUTO-CALIBRAÇÃO



ANEXO C

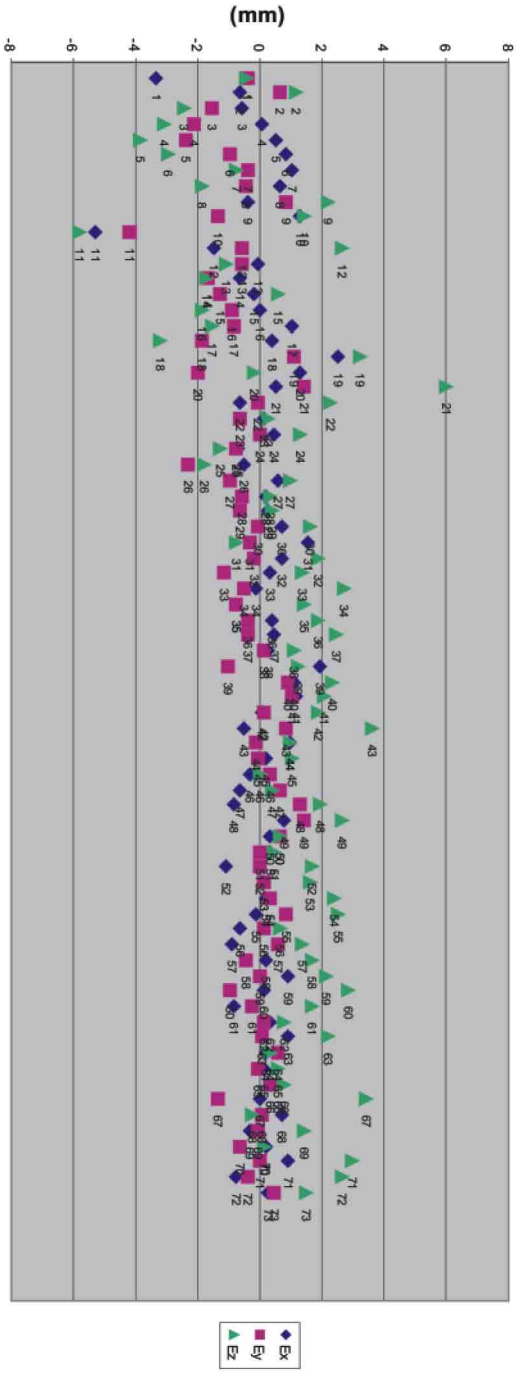
COORDENADAS NÃO INJUNCIONADAS NA FOTOTRIANGULAÇÃO

RESULTADO DA FOTOTRIANGULAÇÃO									
Ptos	*Fototriangulação **			*Objeto **			*Erro **		
	X	Y	Z	X	Y	Z	Ex	Ey	Ez
0	-3,338	-0,15	-1,093	0	0	0	-3,338	-0,15	-1,093
10	99,361	0,732	0,884	100	0	0	-0,639	0,732	0,884
30	299,558	-1,679	-2,238	300	0	0	-0,442	-1,679	-2,238
40	400,194	-2,208	-2,744	400	0	0	0,194	-2,208	-2,744
50	500,593	-2,452	-3,478	500	0	0	0,593	-2,452	-3,478
60	600,892	-1,196	-2,888	600	0	0	0,892	-1,196	-2,888
70	701,087	-0,587	-0,782	700	0	0	1,087	-0,587	-0,782
80	800,616	-0,566	-2,047	800	0	0	0,616	-0,566	-2,047
90	899,751	0,561	1,788	900	0	0	-0,249	0,561	1,788
100	1001,357	-1,596	0,813	1000	0	0	1,357	-1,596	0,813
1	-5,168	96,133	-6,233	0	100	0	-5,168	-3,867	-6,233
11	97,024	98,535	147,815	100	100	146	-2,976	-1,465	1,815
21	199,996	99,304	-1,073	200	100	0	-0,004	-0,696	-1,073
31	298,423	97,101	143,901	300	100	146	-1,577	-2,899	-2,099
41	399,879	98,561	0,935	400	100	0	-0,121	-1,439	0,935
51	500,091	99,009	-1,363	500	100	0	0,091	-0,991	-1,363
61	601,031	99,047	-1,118	600	100	0	1,031	-0,953	-1,118
71	700,38	98,039	-2,833	700	100	0	0,38	-1,961	-2,833
91	904,105	99,87	148,574	900	100	146	4,105	-0,13	2,574
101	1001,399	97,783	-0,626	1000	100	0	1,399	-2,217	-0,626
2	0,558	201,691	5,678	0	200	0	0,558	1,691	5,678
12	99,301	200,005	2,179	100	200	0	-0,699	0,005	2,179
22	200,146	199,224	0,348	200	200	0	0,146	-0,776	0,348
32	300,416	199,871	1,609	300	200	0	0,416	-0,129	1,609
42	399,309	199,097	-0,842	400	200	0	-0,691	-0,903	-0,842
52	499,307	196,932	144,234	500	200	146	-0,693	-3,068	-1,766
62	600,564	198,956	1,446	600	200	0	0,564	-1,044	1,446
72	700,194	199,328	0,704	700	200	0	0,194	-0,672	0,704
82	800,151	199,251	0,592	800	200	0	0,151	-0,749	0,592
92	900,709	199,822	1,554	900	200	0	0,709	-0,178	1,554
102	1001,653	199,507	-1,094	1000	200	0	1,653	-0,493	-1,094
13	100,667	299,756	1,595	100	300	0	0,667	-0,244	1,595
23	198,938	298,558	147,055	200	300	146	-1,062	-1,442	1,055
33	299,8	299,476	3,022	300	300	0	-0,2	-0,524	3,022
43	399,221	299,201	1,849	400	300	0	-0,779	-0,799	1,849
53	500,398	299,582	2,383	500	300	0	0,398	-0,418	2,383
63	600,424	299,59	2,949	600	300	0	0,424	-0,41	2,949
73	700,203	300,071	1,513	700	300	0	0,203	0,071	1,513
83	802,661	298,653	146,877	800	300	146	2,661	-1,347	0,877
14	101,003	400,959	2,189	100	400	0	1,003	0,959	2,189
24	201,102	401,128	2,196	200	400	0	1,102	1,128	2,196
34	300,022	400,224	2,194	300	400	0	0,022	0,224	2,194

44	399,471	400,874	4,032	400	400	0	-0,529	0,874	4,032
54	500,738	400,022	147,035	500	400	146	0,738	0,022	1,035
64	600,209	399,934	1,516	600	400	0	0,209	-0,066	1,516
74	699,621	400,338	0,394	700	400	0	-0,379	0,338	0,394
84	799,288	400,656	0,608	800	400	0	-0,712	0,656	0,608
94	899,236	401,24	1,877	900	400	0	-0,764	1,24	1,877
15	100,719	501,592	2,49	100	500	0	0,719	1,592	2,49
25	200,305	500,799	0,738	200	500	0	0,305	0,799	0,738
35	300,309	500,166	0,712	300	500	0	0,309	0,166	0,712
45	398,867	500,105	2,108	400	500	0	-1,133	0,105	2,108
55	500,13	500,228	2,086	500	500	0	0,13	0,228	2,086
65	600,181	500,407	2,816	600	500	0	0,181	0,407	2,816
75	699,844	500,916	2,869	700	500	0	-0,156	0,916	2,869
85	799,228	500,132	0,821	800	500	0	-0,772	0,132	0,821
95	899,181	500,579	1,296	900	500	0	-0,819	0,579	1,296
16	98,786	600,627	146,738	100	600	146	-1,214	0,627	0,738
26	200,896	600,245	2,159	200	600	0	0,896	0,245	2,159
36	300,091	599,283	3,037	300	600	0	0,091	-0,717	3,037
46	399,196	599,957	2,04	400	600	0	-0,804	-0,043	2,04
56	500,36	600,28	1,164	500	600	0	0,36	0,28	1,164
66	601,136	601,072	148,058	600	600	146	1,136	1,072	2,058
76	700,136	600,66	0,606	700	600	0	0,136	0,66	0,606
86	799,867	600,029	0,753	800	600	0	-0,133	0,029	0,753
96	901,895	601,203	146,358	900	600	146	1,895	1,203	0,358
17	100,187	698,973	3,173	100	700	0	0,187	-1,027	3,173
37	300,758	700,257	-0,154	300	700	0	0,758	0,257	-0,154
47	399,722	700,132	1,68	400	700	0	-0,278	0,132	1,68
57	500,242	699,514	0,391	500	700	0	0,242	-0,486	0,391
67	600,887	700,151	3,198	600	700	0	0,887	0,151	3,198
77	699,202	699,673	2,779	700	700	0	-0,798	-0,327	2,779
97	900,123	700,543	1,37	900	700	0	0,123	0,543	1,37
Erro médio quadrático							1.214	1.140	2.110
* VALORES EM MILÍMETROS									

ANEXO D

GRÁFICO DA DISPERSÃO DOS ERROS NA FOTOTRIANGULAÇÃO



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, JOSÉ BITTENCOURT DE. Fotogrametria. Curitiba : SBEE, 1998.

COOPER, M. A. R., ROBSON, S.. Theory of close range photogrammetry. In : ATKINSON, K. B.. Close Range Photogrammetry and Machine Vision. [S.l.] : Whittles, 1996.

FRYER, J. G.. Camera Calibration. In : ATKINSON, K. B.. Close Range Photogrammetry and Machine Vision. [S.l.] : 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.

GHOSH, SANJIB KUMAR. Analytical Photogrammetry. 2ª edição. New York, Pergamon Press, 1988.

GONZALEZ, RAFAEL C. AND R. E. WOODS. Digital Image Processing. Addison Wesley. New york, 1992.

LUGNANI, J. B. Introdução a Fototriangulação. 1ª ed. Curitiba-Pr : Editora UFPR; 1987.

KRAUS, K. Photogrammetry. Fundamentals and Standard Process. Ferd Dummler Verlag, Bonn, 1993.

MARCHI, J. C. DE. Sensor de imagem – CCD. Revista Eléctron, 1988.

OZER, JAN. Video compression from multimedia. New York : AP Professional, 1994.

SHORTIS, M.R., BEYER, H. A.. Sensor technology for digital photogrammetry and machine vision. In : ATKINSON, K. B.. Close Range Photogrammetry and Machine Vision. [S.l.] : Whittles, 1996.

SILVA, JOÃO FERNANDO C. da. Fotogrametria analítica. Departamento de Cartografia, UNESP/FCT, Presidente Prudente, 1997. Apostila elaborada para o curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas.

TEKALP, A. MURAT. Digital Video processing. New Jersey : Prentice-Hall, 1995.

TOMMASELLI, A. M. G. E TOZZI, C. L.. Técnicas de Calibração de Câmaras em Visão Computacional. Jornada EPUSP/IEEE em Computação Visual, Dezembro, 1990.

TOMMASELLI, A. M. G.. Construção Analítica de Modelos e suas Aplicações: Uma abordagem utilizando injunções relativas. Departamento de Cartografia, UNESP/FCT, Presidente Prudente, 1985.

VALLEJO, HORACIO DANIEL. Vídeo Digital : TV, camcorders, computadores : teoria, projeto e construção de circuitos eletrônicos digitais para vídeo. Tradução Túlio Camargo da Silva. São Paulo : Quark Books, 1998.

WATKINSON, JOHN. An Introduction to Digital Video. Focal Press : Oxford, 1994.

SITES

www.3-dvideo.com

www.cybercollege.com/port/tvp008.htm

www.cybercollege.com/port/tvp009.htm

www.geometra-3d.com

BIBLIOGRAFIA

AL-HANBALI, N.N. *et al.* Assessment of a laser scanning system for deformation measurements. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B5. Amsterdam, p. 9-16, 2000.

ALI, MAHMOUD EL-NOKRASHY O., *et al.* Accuracy analysis for new close-range photogrammetric systems. Vol. XXXIII, Part B5. Amsterdam, p. 16-24, 2000.

ANAI, TETSUJI, E CHIKATSU, HIROFUMI. Dynamic analysis of human motion using hybrid video theodolite. Vol. XXXIII, Part B5. Amsterdam, p. 25-29, 2000.

ANDRADE, JOSÉ BITTENCOURT DE. Fotogrametria. Curitiba : SBEE, 1998.

BURDEA,G. & COIFFET,P. Virtual RealityTechnology, John Wiley & Sons, New York, NY, 1994.

COOPER, M. A. R., ROBSON, S.. Theory of close range photogrammetry. In : ATKINSON, K. B.. Close Range Photogrammetry and Machine Vision. [S.l.] : Whittles, 1996.

FERNANDES, SÉRGIO LEAL. Desenvolvimento de um programa protótipo para restituição fotogramétrica. Tese de Doutorado apresentada ao Departamento de Engenharia de Engenharia de Transportes II, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

FRYER, J. G.. Camera Calibration. In : ATKINSON, K. B.. Close Range Photogrammetry and Machine Vision. [S.l.] : 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.; HASEGAWA J. K.; TOMMASELLI, A. M. G.. Avaliação geométrica de câmaras de vídeo para uso em fotogrametria digital. Departamento de Cartografia, UNESP/FCT, Presidente Prudente, 1990.

GEMAEL, CAMIL. Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas, Curitiba-Pr : Editora UFPR; 1994.

GHOSH, SANJIB KUMAR. Analytical Photogrammetry. 2ª edição. New York, Pergamon Press, 1988.

GONZALEZ, RAFAEL C. AND R. E. WOODS. Digital Image Processing. Addison Wesley. New york, 1992.

HARTMAN, JED E WERNECKE JOSIE. The VRML 2.0 Handbook. Silicon Graphics, Inc, 1996.

KRAUS, K. Photogrammetry. Fundamentals and Standard Process. Ferd Dummler Verlag, Bonn, 1993.

LUGNANI, J. B. Introdução a Fototriangulação. 1ª ed. Curitiba-Pr : Editora UFPR; 1987.

LUGNANI, J. B., DALMOLIN Q. e QUINTINO, MOACIR J.. Introdução à Fotogrametria. 2ª parte, Curitiba-Pr : Editora UFPR; 1977.

MARCHETTI, DELMAR A. BANDIERA e GARCIA, GILBERTO J.. Principios de Fotogrametria e Fotointerpretação, São Paulo SP : Livraria Nobel S.A., 1978.

MARCHI, J. C. DE. Sensor de imagem – CCD. Revista Eléctron, 1988.

OZER, JAN. Video compression from multimedia. New York : AP Professional, 1994.

PAREDES, EVARISTO ATENCIO. Introdução à Aerofotogrametria para Engenheiros. Volume I [Brasília, DF] : CNPq ; Maringá, PR : CONCITEC, 1987.

POYNTON, CHARLES A.. A Technical Introduction to Digital Video. New York NY : john Wiley & Sons, Inc, 1996.

RICHARDSON, D. A Mágica dos estereogramas no PC. Waite Group Press - Axcel Books, 1995.

ROSCH, WINN L.. Desvendando o Hardware do PC . Vol. 2; tradução de Insight Serviços de Informática; 2ª ed. Rio de Janeiro : Campus, 1993.

SHORTIS, M.R., BEYER, H. A.. Sensor technology for digital photogrammetry and machine vision. In : ATKINSON, K. B.. Close Range Photogrammetry and Machine Vision. [S.l.] : Whittles, 1996.

SILVA, JOÃO FERNANDO C. da. Fotogrametria analítica. Departamento de Cartografia, UNESP/FCT, Presidente Prudente, 1997. Apostila elaborada para o curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas.

SPIEGEL, MURRAY R.. Estatística. Tradução e revisão técnica Pedro Consentino, 3ª Edição, São Paulo SP : Makron Books, 1993.

TEKALP, A. MURAT. Digital Video processing. New Jersey : Prentice-Hall, 1995.

TOMMASELLI, A. M. G. E TOZZI, C. L.. Calibração de Câmaras Digitais. XV Congresso Brasileiro de Cartografia, São Paulo SP, 28 julho – 02 agosto, 1991.

TOMMASELLI, A. M. G. E TOZZI, C. L.. Técnicas de Calibração de Câmaras em Visão Computacional. Jornada EPUSP/IEEE em Computação Visual, Dezembro, 1990.

TOMMASELLI, A. M. G.. Construção Analítica de Modelos e suas Aplicações: Uma abordagem utilizando injunções relativas. Departamento de Cartografia, UNESP/FCT, Presidente Prudente, 1985.

TORRES, GABRIEL. Hardware. Rio de Janeiro : Axcel Books do Brasil, 1999.

VALLEJO, HORACIO DANIEL. Vídeo Digital : TV, camcorders, computadores : teoria, projeto e construção de circuitos eletrônicos digitais para vídeo. Tradução Túlio Camargo da Silva. São Paulo : Quark Books, 1998.

WATKINS, CHRISTOPHER E MARENKA, STEPHEN R.. Virtual Reality Excursions with Programs in C. London : Academic Press Limited, 1994.

WATKINSON, JOHN. An Introduction to Digital Video. Focal Press : Oxford, 1994.

WRAUS, KARL. Photogrammetry. Volume 1 4ª ed. Germany, 1993.

SITES

jesubrik.eresmas.com

Onyx.inescn.pt

www.3-dvideo.com

www.cybercollege.com/port/tvp008.htm

www.cybercollege.com/port/tvp009.htm

www.geometra-3d.com

www.visgraf.impa.br/sibgrapi97/cursos/rvirtual/disp.htm