

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E COMPUTAÇÃO

ESTIMAÇÃO DO DESLOCAMENTO DE UMA CÂMERA
DESCALIBRADA A PARTIR DO PROCESSAMENTO DAS FOTOS
CAPTURADAS PELA MESMA

Autor:

Caio Alessandro Mesentier Louro

Orientador:

Prof. José Gabriel Rodriguez Carneiro Gomes, Ph. D.

Examinadora:

Prof^a. Mariane Rembold Petraglia, Ph. D.

Examinador:

Prof. Júlio Cesar Boscher Torres, D. Sc.

DEL
NOVEMBRO DE 2008

Dedicatória

*À minha avó, que infelizmente não pode vivenciar esta conquista;
às duas mulheres que dividem comigo o sobrenome e que olham por mim;
e à minha vida, que recomeça.*

Agradecimentos

Ao apoio familiar de Irene, Sonia e Louise, que forneceram o porto seguro de cada dia.

Aos amigos de sempre, próximos e distantes, com os quais eu sempre procurei manter contato, pois adquiriram uma importância ímpar para este e para todos os projetos da minha vida.

Aos eternos amigos da “EEL2002/2”, sem os quais eu não teria chance alguma de chegar até aqui. Seja participando dos estudos, da diversão ou apenas exercendo a amizade, estas pessoas fizeram com que o processo da graduação fosse benéfico e possível para mim.

Ao Rodrigo e ao Tulio, pela composição do grupo de estudos de Projeto Final mais divertido de todos os tempos.

Às pessoas importantes que se foram, cuja contribuição nunca será esquecida.

Ao inesperado orientador, Professor José Gabriel, que aceitou acompanhar tantos alunos em paralelo, abrindo a oportunidade para que eu também pudesse aproveitar do seu conhecimento e da sua paciência.

Aos tantos professores da universidade que, direta ou indiretamente, me ajudaram nesta profunda e valiosíssima formação que vai sendo finalizada.

Finalmente, ao aluno alemão Sebastian Hoefle e ao Professor Júlio Torres, que trouxeram uma derivada muito positiva ao experimento chave deste Projeto Final.

Resumo

Sistemas de navegação passiva utilizam-se de algoritmos para identificação de que tipo de movimento está sendo realizado por uma câmera fotográfica digital, através do processamento de suas imagens capturadas, em um funcionamento similar aos olhos humanos trabalhando em conjunto com o cérebro.

Este projeto descreve um estudo que se utiliza do Método dos Mínimos Quadrados para gerar uma modelagem algébrica linear capaz de estimar o quanto uma câmera se deslocou horizontalmente e verticalmente, a partir da captura de imagens de um objeto de referência, sem usar a técnica de calibração de câmeras.

Após a análise de quatro tipos de modelagens para cada conjunto de dados de treino, foi possível estimar o deslocamento de alguns centímetros da câmera, com erros relativos entre 5% e 13%. Os dados de treino utilizados foram adquiridos em ambientes de referência similares aos ambientes de teste.

Palavras-Chave

- Calibração de câmeras;
- Digitalização de imagens;
- Processamento de imagens digitalizadas;
- Estimação de deslocamento;
- Visão computacional;
- Navegação passiva.

Índice

<i>Dedicatória</i>	<i>II</i>
<i>Agradecimentos</i>	<i>III</i>
<i>Resumo</i>	<i>IV</i>
<i>Palavras-Chave</i>	<i>V</i>
<i>Índice</i>	<i>VI</i>
<i>Índice de Figuras</i>	<i>VIII</i>
<i>Índice de Tabelas</i>	<i>IX</i>
<i>Índice de Equações</i>	<i>XI</i>
Capítulo 1 - Introdução	1
Capítulo 2 - Teoria	3
2.1 - Objetivo do Estudo	3
2.1.1 - Algoritmo de Calibração.....	3
Capítulo 3 - Métodos	5
3.1 - Recursos Utilizados	5
3.1.1 - <i>Grid</i> de Alvos	5
3.1.2 - Câmera Fotográfica	5
3.1.3 - Objetos de Suporte.....	6
3.1.4 - Instrumentos de Medida.....	6
3.1.5 - Ambiente no Computador.....	6
3.2 - Sistema de Referências	7
3.3 - Dados Processados	7
3.4 - Modelagem Algébrica	9
3.4.1 - Cenários Considerados de Deslocamento da Câmera.....	10
3.4.2 - Dados de Treino.....	13
3.4.3 - Modelagem de Seis Coeficientes	13
3.4.4 - Modelagem de Cinco Coeficientes	16
3.5 - Estrutura e Realização das Tomadas de Fotos	17
3.5.1 - Deslocamento da Câmera	17
3.5.2 - Digitalização da Imagem	20
3.6 - Fluxo Posterior à Captura das Imagens	20
3.6.1 - Marcação dos Centros.....	20
3.6.2 - Captura das Coordenadas.....	20
3.6.3 - Cálculo dos Modelos	21
3.6.4 - Aplicação dos Modelos.....	21
3.6.5 - Geração de Massa de Dados de Teste.....	21
Capítulo 4 - Resultados	22
4.1 - Indicadores	22
4.1.1 - Erro Relativo Médio	22
4.1.2 - Erro Absoluto Médio	22
4.2 - Dados Desprezados	23
4.2.1 - Estimação Exata.....	23
4.2.2 - Estimação Impossível ou Imprecisa.....	23

4.3 - Aprimoramento.....	24
4.3.1 - Tomada 1 (Treino).....	24
4.3.2 - Tomada 2 (Teste).....	26
4.3.3 - Tomada 3 (Treino).....	27
4.3.4 - Tomada 4 (Treino).....	27
4.3.5 - Tomada 5 (Teste).....	28
4.3.6 - Tomada 6 (Teste).....	29
4.3.7 - Tomada 7 (Treino).....	30
4.3.8 - Tomada 8 (Treino).....	30
4.3.9 - Comentários sobre o Aprimoramento.....	31
4.4 - Direcionamento.....	31
4.4.1 - Tomada 9 (Treino).....	31
4.4.2 - Tomada 10 (Treino).....	32
4.4.3 - Tomada 11 (Treino).....	32
4.4.4 - Tomada 12 (Treino).....	33
4.4.5 - Tomada 13 (Teste).....	34
4.4.6 - Tomada 14 (Treino).....	34
4.4.7 - Tomada 15 (Treino).....	35
4.4.8 - Comentários sobre o Direcionamento.....	35
4.5 - Tomadas Finais.....	36
4.5.1 - Modelos Horizontais na Altura 1 (Treino).....	36
4.5.2 - Modelos Horizontais na Altura 2 (Treino).....	37
4.5.3 - Modelos Horizontais na Altura 3 (Treino).....	38
4.5.4 - Modelos Horizontais na Altura 4 (Treino).....	38
4.5.5 - Modelos Verticais da Altura 1 para a Altura 2 (Treino).....	38
4.5.6 - Modelos Verticais da Altura 2 para a Altura 3 (Treino).....	39
4.5.7 - Modelos Verticais da Altura 3 para a Altura 4 (Treino).....	39
4.5.8 - Trajetórias Diagonais da Altura 1 para a Altura 4 (Teste Final).....	40
Capítulo 5 - Conclusões.....	44
Referências Bibliográficas.....	46

Índice de Figuras

<i>Figura 2-1 - Grid de alvos e, em azul, o sistema de referências e um par de coordenadas (u, v) do centro do primeiro alvo</i>	4
<i>Figura 3-1 - Detalhes do grid, com destaque para um dos alvos</i>	5
<i>Figura 3-2 - Detalhes da câmera fotográfica utilizada e do ponto que a representava nas medidas</i>	6
<i>Figura 3-3 - Sistema de referência baseado no grid, exemplificando a câmera em duas posições</i>	8
<i>Figura 3-4 - Representação dos limites dos planos triangulares formados pela ligação dos centros dos alvos escolhidos para representação do comportamento do grid</i>	9
<i>Figura 3-5 - Três fotos sobrepostas do grid, para a câmera em três posições consecutivas de deslocamento horizontal</i>	10
<i>Figura 3-6 - Cenário genérico para aquisição de fotos do cenário de deslocamento horizontal da câmera</i>	11
<i>Figura 3-7 - Projeção do deslocamento horizontal d_U sobre o eixo x e definição de alguns termos</i>	12
<i>Figura 3-8 - Cenário genérico para aquisição de dados de deslocamento vertical da câmera</i>	12
<i>Figura 3-9 - Vista superior dos detalhes das práticas de aperfeiçoamento do deslocamento</i>	18
<i>Figura 3-10 - Vista lateral dos detalhes das práticas de aperfeiçoamento do deslocamento</i>	18
<i>Figura 3-11 - Vista lateral dos detalhes das práticas de aperfeiçoamento do deslocamento vertical, exemplificando o caso de três deslocamentos verticais realizados</i>	19
<i>Figura 3-12 - Vista superior do esquema aperfeiçoado para os Testes Finais</i>	19
<i>Figura 3-13 - Vista posterior do esquema aperfeiçoado para os Testes Finais. Estão ocultados os objetos de escoramento para melhor visualização</i>	19
<i>Figura 3-14 - Fluxo de processamento a partir do fim da captura das imagens</i>	20
<i>Figura 4-1 - Ilustração da Tomada 1: vista lateral da câmera (à esquerda) e vista em perspectiva do cenário (à direita)</i>	25
<i>Figura 4-2 - Ilustração da Tomada 5: vista lateral da câmera (à esquerda) e vista em perspectiva do cenário (à direita)</i>	28
<i>Figura 4-3 - Esquema para fotos da Seção 4.5.1, não considerando, a nível de ilustração, diferenças de alturas entre as posições do grid e da câmera</i>	36
<i>Figura 4-4 - Ilustração dos trajetos de modelagem e testes da câmera nos Testes Finais</i>	42

Índice de Tabelas

<i>Tabela 2-1 - Parâmetros retornados pela rotina de calibração</i>	<i>4</i>
<i>Tabela 3-1 - Conjunto de dados armazenados para uma foto F hipotética</i>	<i>8</i>
<i>Tabela 3-2 - Conjuntos de dados processados entre duas fotos e as estimações alvo para cada caso.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabela 4-1 - Indicadores Modelos 1 x Dados 1</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 4-2 - Fotos da Tomada 1 em ordem de captura</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 4-3 - Indicadores Modelos 1 x Dados 2</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 4-4 - Indicadores Modelos 3 x Dados 3</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 4-5 - Indicadores Modelos 4 x Dados 4</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 4-6 - Indicadores Modelos 3 x Dados 5</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 4-7 - Indicadores Modelos 4 x Dados 5</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 4-8 - Indicadores Modelos 3 x Dados 6</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 4-9 - Indicadores Modelos 4 x Dados 6</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 4-10 - Indicadores Modelos 7 x Dados 7</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 4-11 - Indicadores Modelos 8 x Dados 8</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 4-12 - Indicadores Modelos 9 x Dados 9</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 4-13 - Indicadores Modelos 10 x Dados 10</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 4-14 - Indicadores Modelos 11 x Dados 11</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 4-15 - Indicadores Modelos 12 x Dados 12</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 4-16 - Fotos da Tomada 12 em ordem de captura</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 4-17 - Indicadores Modelos 11 x Dados Horizontais 13.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 4-18 - Indicadores Modelos 12 x Dados Verticais 13.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 4-19 - Indicadores Modelos 14 x Dados 14</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 4-20 - Indicadores Modelos 15 x Dados 15</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 4-21 - Indicadores Modelos Horizontais Altura 1 x Dados Horizontais Altura 1 para os Testes Finais</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 4-22 - Indicadores Modelos Horizontais Altura 2 x Dados Horizontais Altura 2 para os Testes Finais</i>	<i>37</i>

<i>Tabela 4-23 - Indicadores Modelos Horizontais Altura 3 x Dados Horizontais Altura 3 para os Testes Finais</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 4-24 - Indicadores Modelos Horizontais Altura 4 x Dados Horizontais Altura 4 para os Testes Finais</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 4-25 - Indicadores Modelos Verticais Altura 1 para 2 x Dados Verticais Altura 1 para 2 para os Testes Finais.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 4-26 - Indicadores Modelos Verticais Altura 2 para 3 x Dados Verticais Altura 2 para 3 para os Testes Finais.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 4-27 - Indicadores Modelos Verticais Altura 3 para 4 x Dados Verticais Altura 3 para 4 para os Testes Finais.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 4-28 - Indicadores Modelos Horizontais x Dados Horizontais Conjuntos Central, Intermediário e Final para os Testes Finais. Os Erros Relativos Médios em negrito retratam o modelo mais eficiente encontrado para cada conjunto de treino.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 4-29 - Indicadores Modelos Verticais x Dados Verticais Conjuntos Central, Intermediário e Final para os Testes Finais. Os Erros Relativos Médios em negrito retratam o modelo mais eficiente encontrado para cada conjunto de treino.....</i>	<i>43</i>

Índice de Equações

<i>Equação 3-1 - Relação entre o deslocamento horizontal d_U e sua projeção no eixo x.....</i>	<i>11</i>
<i>Equação 3-2 - Relação entre o deslocamento vertical d_V e sua projeção no eixo z.....</i>	<i>13</i>
<i>Equação 3-3 - Equação genérica para cálculo do deslocamento horizontal da câmera.....</i>	<i>13</i>
<i>Equação 3-4 - Equação genérica para cálculo do deslocamento vertical da câmera.....</i>	<i>13</i>
<i>Equação 3-5 - Equação matricial de modelagem de deslocamento horizontal.....</i>	<i>14</i>
<i>Equação 3-6 - Representação simplificada da equação matricial de modelagem de deslocamento horizontal.....</i>	<i>14</i>
<i>Equação 3-7 - Equação matricial de modelagem de deslocamento vertical.....</i>	<i>14</i>
<i>Equação 3-8 - Representação simplificada da equação matricial de modelagem de deslocamento vertical.....</i>	<i>14</i>
<i>Equação 3-9 - Equação genérica para uso do Método dos Mínimos Quadrados.....</i>	<i>15</i>
<i>Equação 3-10 - Equação para cálculo do modelo de coeficientes para o caso de deslocamentos horizontais da câmera.....</i>	<i>15</i>
<i>Equação 3-11 - Equação para cálculo do modelo de coeficientes para o caso de deslocamentos verticais da câmera.....</i>	<i>15</i>
<i>Equação 3-12 - Cálculo do primeiro grupo de coeficientes variáveis para estimação horizontal.....</i>	<i>16</i>
<i>Equação 3-13 - Representação simplificada do cálculo do primeiro grupo de coeficientes variáveis para estimação horizontal.....</i>	<i>16</i>
<i>Equação 4-1 - Erro relativo.....</i>	<i>22</i>
<i>Equação 4-2 - Erro absoluto.....</i>	<i>22</i>
<i>Equação 4-3 - Projeção do deslocamento $d_U = 1$ cm sobre o eixo x.....</i>	<i>24</i>
<i>Equação 4-4 - Projeção do deslocamento $d_U = -1$ cm sobre o eixo x.....</i>	<i>27</i>
<i>Equação 4-5 - Reflexão do deslocamento no eixo x para $\Delta d = -4$ cm.....</i>	<i>37</i>

Capítulo 1 - Introdução

Atualmente a área de processamento de imagens digitais está presente em vários ramos para aplicação industrial e comercial. Muitas funções que eram apenas desempenhadas por humanos por estarem muito ligadas à complexidade dos sentidos e da mente, podem agora ser assumidas por programas que adquirem comportamentos de acordo com parâmetros calculados a partir do ambiente.

O processamento de imagens permite, por exemplo, a realização de diagnósticos médicos de forma menos invasiva, a inspeção de dutos submarinos profundos diminuindo o risco ao qual um mergulhador estaria exposto, a detecção de faces e sorrisos por máquinas fotográficas, entre outros. A teoria dessas aplicações se baseia em funções desempenhadas pelo próprio cérebro humano em conjunção com o sentido da visão.

Este Projeto Final é baseado nos conceitos utilizados em sistemas de navegação passiva, que processam imagens capturadas por uma câmera em movimento para calcular parâmetros sobre o deslocamento realizado pela mesma. Assim, é possível identificar, por exemplo, velocidade e direção do movimento a partir de modelos parametrizados aplicados sobre informações como brilho contido nas imagens, e a análise de objetos de referência presentes nas fotos. O objetivo deste trabalho é estudar modelos lineares, independentes do algoritmo de calibração, que permitam a estimação do movimento de uma câmera a partir da análise de suas imagens.

O apoio à pesquisa e a orientação para este trabalho foram fornecidos pelo Laboratório de Processamento Analógico e Digital de Imagens (PADS/UFRJ), onde diversos estudos nesse sentido estão sendo e foram desenvolvidos. Um dos principais, o qual foi origem de alguns dos conceitos aqui utilizados, resultou em uma tese de doutorado sobre a técnica de calibração de câmeras, melhor descrito no Capítulo 2 - Teoria.

Ainda no Capítulo 2, é descrito o objetivo do projeto que, apesar de se basear nos conceitos de calibração, propõe um estudo alternativo ao uso da mesma. A seguir, toda a metodologia é minuciosamente descrita no Capítulo 3, iniciado pela descrição dos recursos utilizados, seguido pela análise dos quatro tipos de modelos propostos a serem gerados pelo Método dos Mínimos Quadrados, além de conter todas as informações sobre as montagens dos cenários de tomada de fotos.

Finalizando esta seção, está uma descrição do fluxo de processamento realizado após as tomadas de fotos terem sido finalizadas.

No Capítulo 4 estão contidos os principais indicadores para análise dos resultados de estimação gerados pelo uso dos modelos parametrizados, aplicados sobre os dados das várias tomadas de fotos. Além disso, detalhes específicos de cada cenário que os diferem dos outros também estão expostos.

No Capítulo 5 são condensadas as principais conclusões, relativas a toda a análise feita, citando, quando cabível, possibilidades de melhorias e estudos futuros.

Capítulo 2 - Teoria

2.1 - Objetivo do Estudo

Este é um estudo sobre a viabilidade de estimar o quanto uma câmera descalibrada se deslocou entre duas posições, de forma que esse raciocínio pudesse ser escalado para trajetórias formadas por deslocamentos sucessivos. Os cálculos basearam-se em imagens capturadas pela câmera em cada posição de interesse, processadas com o uso de uma plataforma de programação numérica. Os dados estimados foram as alterações das coordenadas da câmera, mais especificamente nos eixos x e z , de um sistema de eixos de referência pré-determinado antes da captura.

Para isso foram tomados como base alguns conceitos da Tese de Doutorado de Lenildo Carqueija Silva[1], a qual descrevia um método robusto para calibração de câmeras no ramo de estereofotogrametria. Ainda assim, o objetivo presente residiu em desenvolver um método independente do algoritmo de calibração, utilizando-se apenas dos fundamentos da tese relativos à tomada de fotos e à criação de um sistema de referência.

2.1.1 - Algoritmo de Calibração

Seja uma câmera descalibrada e um objeto de referência chamado *grid* de alvos, o qual também determina o sistema de eixos de coordenadas. Este objeto possui uma coleção de 28 alvos e, a partir de 24 pares de coordenadas (u, v) de 24 dos 28 centros de alvos, é possível calibrar a câmera que fez a captura da foto.

Como indicado na Figura 2-1, podem-se observar os eixos de referência demarcados pelo *grid*, assim como a origem do sistema de coordenadas. Cada um dos alvos tem um centro. As coordenadas u e v do centro medidas em *pixels* indicam a posição do alvo em relação ao canto superior esquerdo da imagem.

O processamento da rotina de calibração retorna parâmetros divididos em dois grupos: extrínsecos e intrínsecos. Os extrínsecos são indicativos do posicionamento da câmera em relação ao sistema de coordenadas e os intrínsecos tratam de parâmetros relativos à sua construção. A Tabela 2-1 lista os parâmetros retornados.

Analisando os parâmetros extrínsecos, pode-se verificar que a estimação de deslocamento poderia ser feita se a rotina de calibração fosse executada em duas imagens adquiridas em duas posições distintas da câmera. Assim, a partir dos valores

de x , y e z nas duas situações seria possível calcular qual foi o deslocamento da câmera.

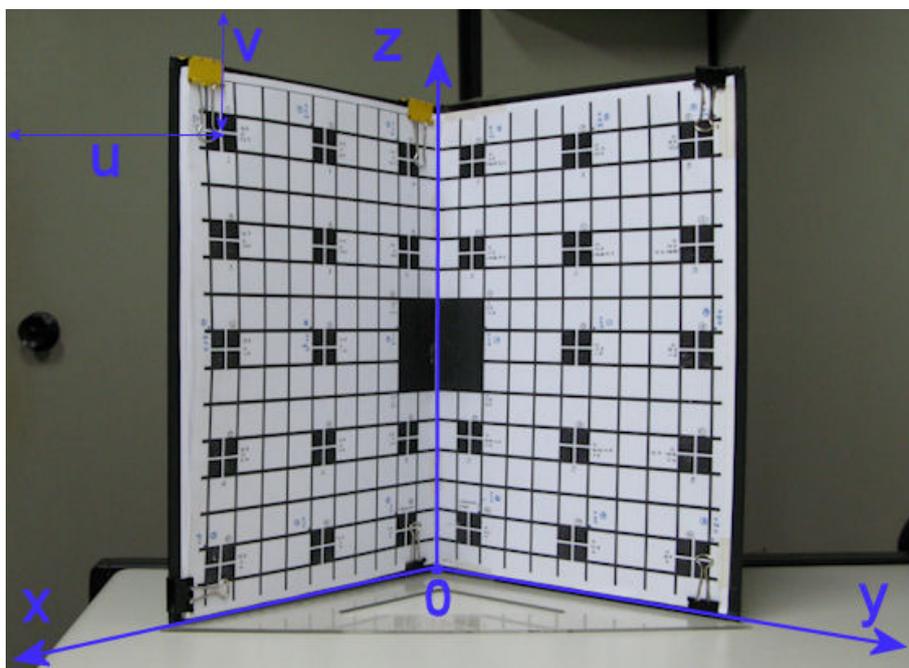


Figura 2-1 - *Grid* de alvos e, em azul, o sistema de referências e um par de coordenadas (u , v) do centro do primeiro alvo

Tabela 2-1 - Parâmetros retornados pela rotina de calibração

Tipo	Nome	Descrição
Extrínseco	x	Translação do centro óptico da câmera ao longo do eixo x do <i>grid</i> .
	y	Translação do centro óptico da câmera ao longo do eixo y do <i>grid</i> .
	z	Translação do centro óptico da câmera ao longo do eixo z do <i>grid</i> .
	ω	Rotação dos eixos da câmera em torno do eixo x do <i>grid</i> .
	ϕ	Rotação dos eixos da câmera em torno do eixo y do <i>grid</i> .
	κ	Rotação dos eixos da câmera em torno do eixo z do <i>grid</i> .
Intrínseco	u	Coordenada u da origem do <i>grid</i> projetada na câmera.
	v	Coordenada v da origem do <i>grid</i> projetada na câmera.
	f_u	Distância focal da câmera ao longo da direção u , medida em <i>pixels</i> .
	f_v	Distância focal da câmera ao longo da direção v , medida em <i>pixels</i> .

Capítulo 3 - Métodos

3.1 - Recursos Utilizados

3.1.1 - Grid de Alvos

O *grid* de alvos, ou simplesmente *grid*, é um objeto de propriedade do PADS/UFRJ que consiste em um livro aberto, onde foi fixada a impressão de um mapeamento quadriculado, contendo 28 alvos brancos na forma de cruces desenhadas sobre quadrados pretos. Com a intenção de manter a abertura do livro em 90°, sempre foi utilizado um esquadro isósceles para apoio. As características mencionadas, mais as medidas do *grid* e a denominação das Faces Esquerda e Direita estão mostradas na Figura 3-1.

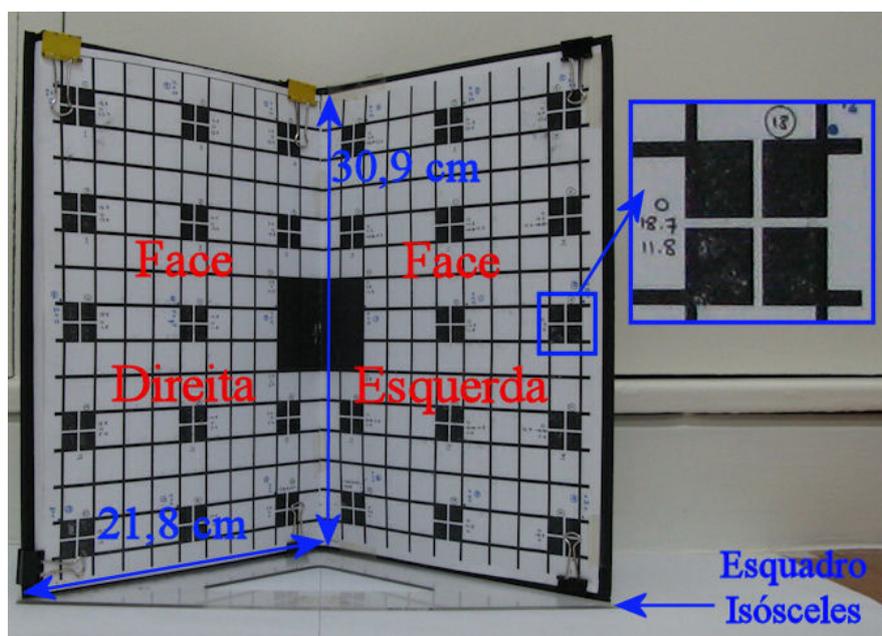


Figura 3-1 - Detalhes do *grid*, com destaque para um dos alvos

3.1.2 - Câmera Fotográfica

Uma câmera fotográfica fabricada pela Canon, modelo Powershot G7, que captura imagens com até 10 *megapixels* de resolução e também de propriedade do PADS/UFRJ, foi utilizada no projeto. Como indicado na Figura 3-2 pelo centro da cruz, para todos os efeitos de medida a posição da câmera foi considerada como o ponto localizado no centro de sua lente mais externa.



Figura 3-2 - Detalhes da câmera fotográfica utilizada e do ponto que a representava nas medidas

Além da câmera, o cabo mini-USB para comunicação com o computador e o *software* da Canon também foram utilizados.

3.1.3 - Objetos de Suporte

Como foram feitos diversos deslocamentos da câmera durante os experimentos propostos, foram utilizados variados objetos para apoio, que são descritos a seguir:

- 16 paralelepípedos de plástico, com as seguintes dimensões: 12,6 centímetros de largura, 0,95 centímetros de altura e 14,2 centímetros de profundidade;
- Três paralelepípedos de madeira, com as seguintes dimensões: 8,2 centímetros de largura, 7,5 centímetros de altura e 18,4 centímetros de profundidade;
- Um trilho horizontal de alumínio para apoio horizontal de deslocamento da câmera;
- Uma base de papelão, pouco maior que a base da câmera, para que esta ficasse sustentada;
- Uma régua no formato “T”.

3.1.4 - Instrumentos de Medida

Para a realização das medidas e preparação dos cenários, foram utilizados instrumentos básicos de medidas, detalhados a seguir:

- Uma régua de 30 centímetros;
- Um par de esquadros;
- Uma trena de cinco metros.

3.1.5 - Ambiente no Computador

Para este projeto foram utilizadas as seguintes classes de *software*:

- Plataforma de programação numérica: todo o processamento das imagens e cálculos pertinentes foram executados via implementação de algoritmos específicos;
- Editor de imagem: a manipulação de imagens para marcação dos centros foi suportada;
- Interface da câmera: um aplicativo feito com base em uma biblioteca disponibilizada pelo fabricante da câmera resultado de [3] foi utilizado na captura e transferência das fotos para o computador.

3.2 - Sistema de Referências

O sistema de referências foi um dos primeiros pontos a serem definidos, por ter impacto direto em todas as medidas e tipos de estimações que poderiam ser feitas. Foi utilizado o *grid* de alvos para delimitar inicialmente os eixos x, y e z, como exemplificado na Figura 3-3. Deve ser observado que a origem do sistema de coordenadas coincide com a origem da base do *grid*.

Também estão exemplificadas dentro do sistema da Figura 3-3 duas posições distintas da câmera. De uma posição para a outra, existe uma diferença entre as coordenadas x e y, destacadas como Δx e Δy respectivamente e, analogamente, pode-se pensar no deslocamento ao longo do eixo z. Assim, completa-se o par de dados (Δx , Δz) a ser estimado neste projeto para cada par de fotos.

3.3 - Dados Processados

A partir do momento em que se propôs que a câmera deveria capturar uma foto do *grid* em uma posição e, posteriormente, ser deslocada para outra posição e capturar outra imagem do mesmo objeto, foram definidos que tipos de dados seriam processados com o objetivo de estimar esse deslocamento espacial.

Para cada foto foram consideradas informações sobre seis centros de alvos. Com esses pontos seria possível formar dois planos, a partir de três pontos cada, um para cada face do *grid*, como indicado na Figura 3-4. Essa solução tinha como objetivo representar o *grid* de forma fiel e armazenando poucos dados, já que o mínimo para se representar dois planos são dois conjuntos de três pontos.

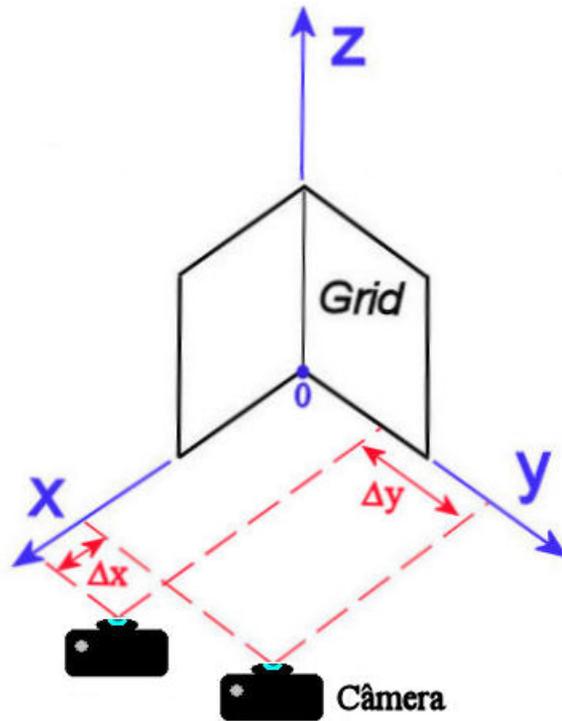


Figura 3-3 - Sistema de referência baseado no *grid*, exemplificando a câmera em duas posições

De cada foto foi retirado um conjunto de seis pares de coordenadas horizontais e verticais, sendo cada par relativo a cada um dos seis centros. As coordenadas foram medidas em *pixels* e representavam a distância do centro em relação ao canto superior esquerdo da imagem. Sendo $u_{C,F}$ a distância em *pixels* do centro de número C em relação ao canto esquerdo da foto F e $v_{C,F}$ a distância em *pixels* do centro de número C em relação ao limite superior da foto F, a Tabela 3-1 representa os dados armazenados para cada imagem analisada.

Tabela 3-1 - Conjunto de dados armazenados para uma foto F hipotética

$u_{1,F}$	$v_{1,F}$
$u_{6,F}$	$v_{6,F}$
$u_{10,F}$	$v_{10,F}$
$u_{15,F}$	$v_{15,F}$
$u_{19,F}$	$v_{19,F}$
$u_{24,F}$	$v_{24,F}$

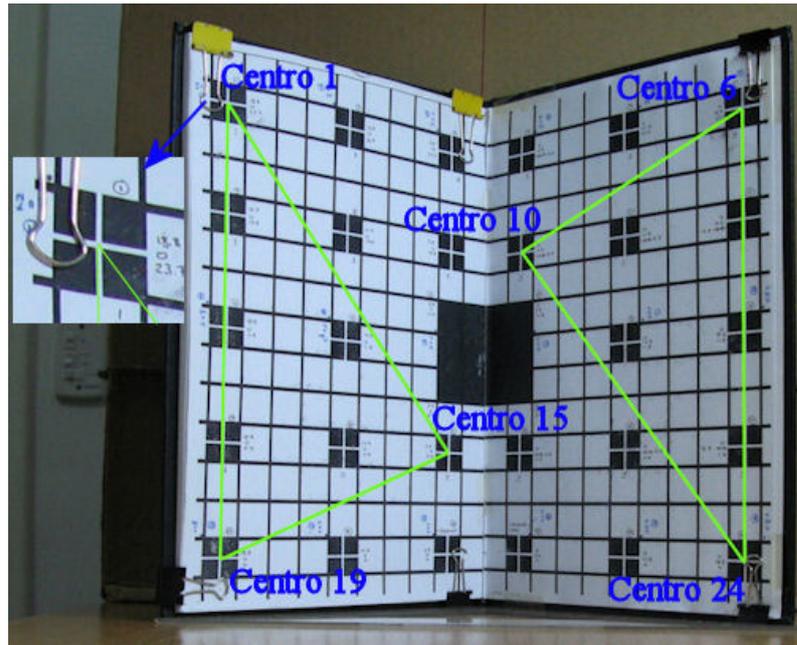


Figura 3-4 - Representação dos limites dos planos triangulares formados pela ligação dos centros dos alvos escolhidos para representação do comportamento do *grid*

Como o objetivo consistia em estimar a diferença entre as posições da câmera entre duas fotos, foram processadas as diferenças entre as coordenadas dos centros, de uma foto para outra, sendo a primeira foto chamada de I (inicial) e a segunda chamada de F (final). A Tabela 3-2 ilustra os dados processados para o cálculo da estimação entre essas duas imagens. Para exemplificar visualmente esta questão, a Figura 3-5 mostra três fotos consecutivas capturadas a partir de dois deslocamentos horizontais da câmera. Estão indicados os dados do tipo $\Delta u_{6,I:F}$ e $\Delta u_{24,I:F}$.

3.4 - Modelagem Algébrica

Após a definição de que tipos de dados seriam processados para cada par de fotos, foi definido que ocorreria uma modelagem algébrica linear a partir de um conjunto de imagens, com o objetivo de encontrar coeficientes que ponderariam as diferenças do tipo $\Delta u_{C,I:F}$ para o cálculo do deslocamento horizontal da câmera definido por Δx , ou do tipo $\Delta v_{C,I:F}$ para o cálculo do deslocamento vertical da câmera definido por Δz .

Tabela 3-2 - Conjuntos de dados processados entre duas fotos e as estimações alvo para cada caso

Dados Processados	Estimação Alvo
$\Delta u_{1,I:F} = u_{1,F} - u_{1,I}$	Deslocamento da câmera no eixo x entre a foto I e a foto F, ou seja, $\Delta x = x_F - x_I$.
$\Delta u_{6,I:F} = u_{6,F} - u_{6,I}$	
$\Delta u_{10,I:F} = u_{10,F} - u_{10,I}$	
$\Delta u_{15,I:F} = u_{15,F} - u_{15,I}$	
$\Delta u_{19,I:F} = u_{19,F} - u_{19,I}$	
$\Delta u_{24,I:F} = u_{24,F} - u_{24,I}$	
$\Delta v_{1,I:F} = v_{1,F} - v_{1,I}$	Deslocamento da câmera no eixo z entre a foto I e a foto F, ou seja, $\Delta z = z_F - z_I$.
$\Delta v_{6,I:F} = v_{6,F} - v_{6,I}$	
$\Delta v_{10,I:F} = v_{10,F} - v_{10,I}$	
$\Delta v_{15,I:F} = v_{15,F} - v_{15,I}$	
$\Delta v_{19,I:F} = v_{19,F} - v_{19,I}$	
$\Delta v_{24,I:F} = v_{24,F} - v_{24,I}$	

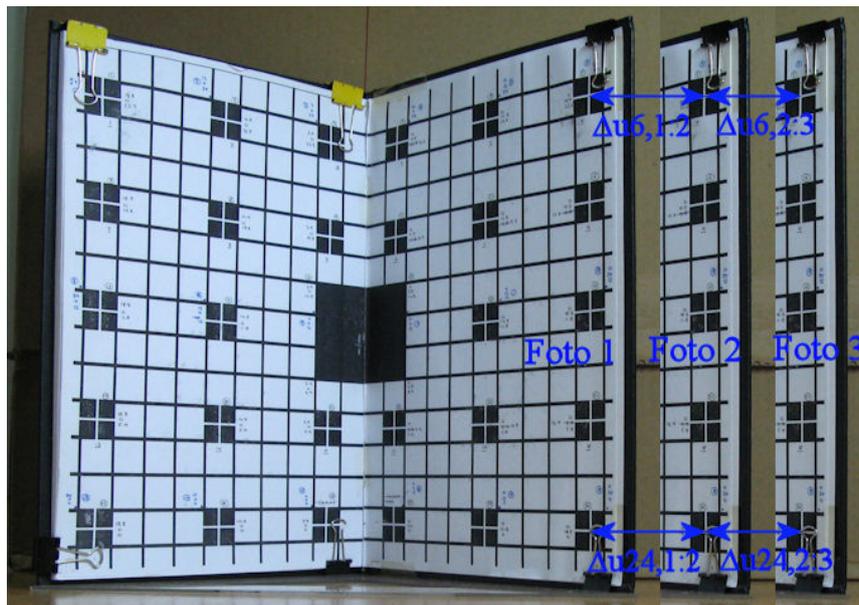


Figura 3-5 - Três fotos sobrepostas do *grid*, para a câmera em três posições consecutivas de deslocamento horizontal

3.4.1 - Cenários Considerados de Deslocamento da Câmera

3.4.1.1 Cenário Horizontal

Foi definido um cenário padrão de deslocamento horizontal da câmera, formalizado por uma reta de referência para a trajetória da câmera, paralela a uma reta de referência da base do *grid*. A câmera deveria sofrer N-1 deslocamentos constantes

de d_U centímetros apenas sobre a sua reta de referência. A Figura 3-6 exibe uma vista em perspectiva de um exemplo de cenário com $N = 7$, onde os números de 1 a 7 demonstram possíveis posições da câmera em ordem de captura de fotos, e a Posição 4 é a chamada *Posição Central*.

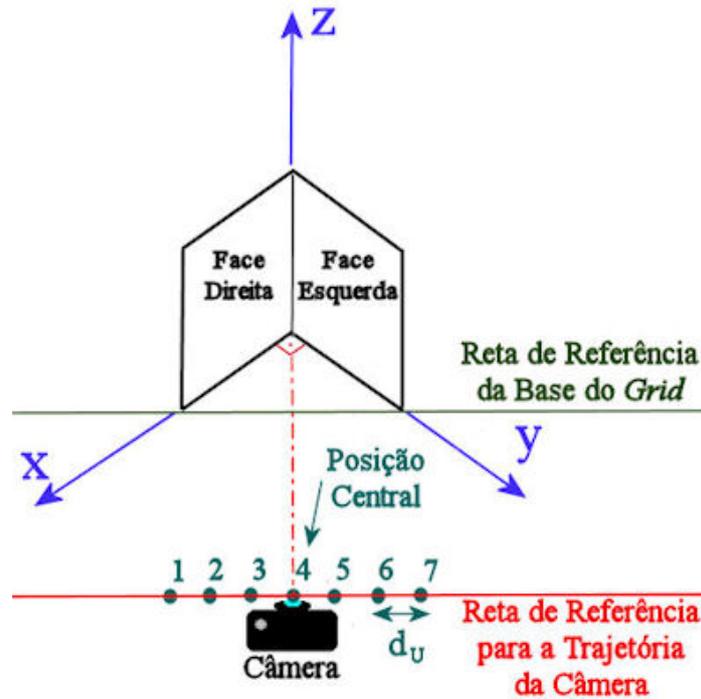


Figura 3-6 - Cenário genérico para aquisição de fotos do cenário de deslocamento horizontal da câmera

Apesar do controle e da medição terem sido realizados sobre d_U , o objetivo dos modelos de estimativa era calcular o deslocamento ao longo do eixo x. A Equação 3-1 demonstra a relação entre esses dois valores, a partir da análise da Figura 3-7.

Equação 3-1 - Relação entre o deslocamento horizontal d_U e sua projeção no eixo x

$$\text{sen}(45^\circ) = \frac{\Delta x}{d_U} = \frac{\sqrt{2}}{2} \therefore \Delta x = \frac{\sqrt{2}}{2} * d_U$$

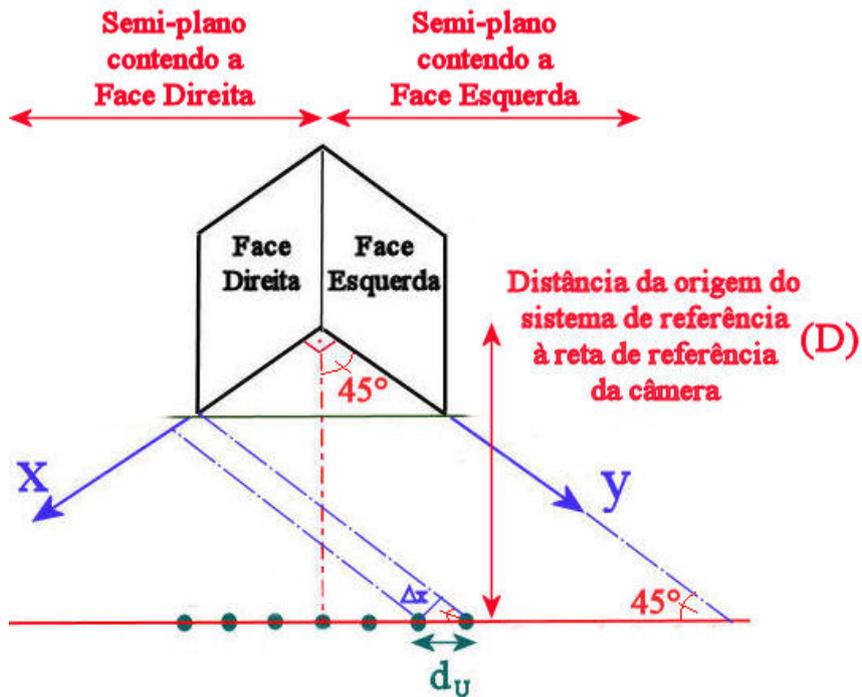


Figura 3-7 - Projeção do deslocamento horizontal d_U sobre o eixo x e definição de alguns termos

Mais uma informação importante, a ser retirada da Figura 3-7 e a ser referenciada na descrição dos resultados, é a distância entre a origem do sistema de coordenadas e a reta de referência da câmera, definida como D .

3.4.1.2 Cenário Vertical

Foi também definido um cenário padrão de deslocamento vertical da câmera, formalizado por uma reta de referência para a trajetória da câmera, paralela ao eixo z . A câmera deveria sofrer $N-1$ deslocamentos constantes de d_V centímetros apenas sobre a sua reta de referência. A Figura 3-8 exibe um exemplo de cenário com N igual a quatro, com uma vista lateral do *grid* e da câmera, onde os números de 1 a 4 demonstram possíveis posições da câmera.



Figura 3-8 - Cenário genérico para aquisição de dados de deslocamento vertical da câmera

Como neste caso o eixo z é paralelo à trajetória, tem-se que:

Equação 3-2 - Relação entre o deslocamento vertical d_v e sua projeção no eixo z

$$\Delta z = d_v$$

3.4.1.3 Cenário Diagonal

O cenário que abriga o deslocamento diagonal da câmera é descrito por uma combinação entre deslocamentos horizontais e verticais. Cada deslocamento diagonal pode ser decomposto em um deslocamento horizontal e um vertical.

3.4.2 - Dados de Treino

As imagens de treino forneceram pares de coordenadas horizontais e verticais, dos seis centros, para que modelos pudessem ser calculados e assim aplicados sobre Dados de Teste, que poderiam ser até os próprios Dados de Treino. Os modelos são compostos por coeficientes para ponderar os dados do tipo $\Delta u_{C,I,F}$ ou do tipo $\Delta v_{C,I,F}$.

3.4.3 - Modelagem de Seis Coeficientes

3.4.3.1 Coeficientes Fixos

O primeiro modelo a ser estudado foi um conjunto de seis coeficientes calculado usando Dados de Treino obtidos a partir de N imagens. Cada um desses coeficientes ponderava uma das seis diferenças calculadas em *pixels* do posicionamento do respectivo centro de alvo, seja para deslocamentos horizontais ou verticais. Foram consideradas duas situações:

- Para um deslocamento em x da câmera de Δx centímetros, da foto I para a foto F:

Equação 3-3 - Equação genérica para cálculo do deslocamento horizontal da câmera

$$\Delta x = f(\Delta u_{1,I,F}, \Delta u_{6,I,F}, \Delta u_{10,I,F}, \Delta u_{15,I,F}, \Delta u_{19,I,F}, \Delta u_{24,I,F})$$

- Para um deslocamento vertical da câmera de Δz centímetros, da foto I para a foto F:

Equação 3-4 - Equação genérica para cálculo do deslocamento vertical da câmera

$$\Delta z = f(\Delta v_{1,I,F}, \Delta v_{6,I,F}, \Delta v_{10,I,F}, \Delta v_{15,I,F}, \Delta v_{19,I,F}, \Delta v_{24,I,F})$$

Uma forma de utilizar os Dados de Treino na criação de um modelo para cálculo de deslocamento seria, a partir desse conjunto de N fotos que representam N-1 deslocamentos de Δx ou Δz centímetros, escrever as seguintes equações matriciais:

Equação 3-5 - Equação matricial de modelagem de deslocamento horizontal

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{1,1:2} & \Delta u_{6,1:2} & \Delta u_{10,1:2} & \Delta u_{15,1:2} & \Delta u_{19,1:2} & \Delta u_{24,1:2} \\ \Delta u_{1,2:3} & \Delta u_{6,2:3} & \Delta u_{10,2:3} & \Delta u_{15,2:3} & \Delta u_{19,2:3} & \Delta u_{24,2:3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta u_{1,N-2:N-1} & \Delta u_{6,N-2:N-1} & \Delta u_{10,N-2:N-1} & \Delta u_{15,N-2:N-1} & \Delta u_{19,N-2:N-1} & \Delta u_{24,N-2:N-1} \\ \Delta u_{1,N-1:N} & \Delta u_{6,N-1:N} & \Delta u_{10,N-1:N} & \Delta u_{15,N-1:N} & \Delta u_{19,N-1:N} & \Delta u_{24,N-1:N} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} c_{1,U} \\ c_{6,U} \\ c_{10,U} \\ c_{15,U} \\ c_{19,U} \\ c_{24,U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta x \\ \vdots \\ \Delta x \\ \Delta x \end{bmatrix}$$

ou, simplesmente:

Equação 3-6 - Representação simplificada da equação matricial de modelagem de deslocamento horizontal

$$\Delta u * \underline{c_U} = \underline{\Delta x}$$

Equação 3-7 - Equação matricial de modelagem de deslocamento vertical

$$\begin{bmatrix} \Delta v_{1,1:2} & \Delta v_{6,1:2} & \Delta v_{10,1:2} & \Delta v_{15,1:2} & \Delta v_{19,1:2} & \Delta v_{24,1:2} \\ \Delta v_{1,2:3} & \Delta v_{6,2:3} & \Delta v_{10,2:3} & \Delta v_{15,2:3} & \Delta v_{19,2:3} & \Delta v_{24,2:3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta v_{1,N-2:N-1} & \Delta v_{6,N-2:N-1} & \Delta v_{10,N-2:N-1} & \Delta v_{15,N-2:N-1} & \Delta v_{19,N-2:N-1} & \Delta v_{24,N-2:N-1} \\ \Delta v_{1,N-1:N} & \Delta v_{6,N-1:N} & \Delta v_{10,N-1:N} & \Delta v_{15,N-1:N} & \Delta v_{19,N-1:N} & \Delta v_{24,N-1:N} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} c_{1,V} \\ c_{6,V} \\ c_{10,V} \\ c_{15,V} \\ c_{19,V} \\ c_{24,V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta z \\ \Delta z \\ \vdots \\ \Delta z \\ \Delta z \end{bmatrix}$$

ou, simplesmente:

Equação 3-8 - Representação simplificada da equação matricial de modelagem de deslocamento vertical

$$\Delta v * \underline{c_V} = \underline{\Delta z}$$

Isso significa que os modelos eram constituídos de seis coeficientes de $c_{1,U}$ a $c_{24,U}$ para o deslocamento horizontal e $c_{1,V}$ a $c_{24,V}$ para o deslocamento vertical. Inserindo-se na matriz os deslocamentos em *pixels* registrados nos Dados de Treino e medindo-se o deslocamento feito pela câmera em centímetros para o preenchimento

do lado direito da equação, deveria ser possível calcular conjuntos de coeficientes a partir de algum método de otimização.

Como se pode observar, a equação apresentada é da forma $Ax = b$ e o objetivo é encontrar coeficientes que melhor se ajustem entre os Dados de Treino e os deslocamentos medidos. Foi utilizado o Método dos Mínimos Quadrados que ajusta os coeficientes para minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre Ax e b , para cada componente do vetor b .

A solução segundo o Método dos Mínimos Quadrados é mostrada na Equação 3-9.

Equação 3-9 - Equação genérica para uso do Método dos Mínimos Quadrados

$$A * x = b \Rightarrow A^T * A * x = A^T * b \therefore x = (A^T * A)^{-1} * A^T * b$$

Aplicando-se a Equação 3-9 ao projeto em questão, têm-se duas equações matriciais:

Equação 3-10 - Equação para cálculo do modelo de coeficientes para o caso de deslocamentos horizontais da câmera

$$c_U = ((\Delta u)^T * \Delta u)^{-1} * (\Delta u)^T * \Delta x$$

Equação 3-11 - Equação para cálculo do modelo de coeficientes para o caso de deslocamentos verticais da câmera

$$c_V = ((\Delta v)^T * \Delta v)^{-1} * (\Delta v)^T * \Delta z$$

3.4.3.2 Coeficientes Variáveis

Os modelos relativos aos coeficientes variáveis nada mais foram do que modelos calculados com subconjuntos dos dados de treino. Se existiam N fotos para deslocamentos horizontais ou verticais e, portanto, $N - 1$ deslocamentos de d_U ou d_V centímetros sendo considerados, puderam ser calculados modelos consecutivos de J em J fotos, onde $J < N$.

A equação para cálculo dos coeficientes era resolvida primeiramente para J fotos, da foto 1 à foto J , resultando em seis coeficientes; posteriormente, estavam sendo consideradas as fotos 2 à $J + 1$ e assim sucessivamente enquanto existiam fotos suficientes para formar um subconjunto de J fotos. Isso resultava em $N - J + 1$ conjuntos de coeficientes distintos, que podiam ser utilizados de forma mais específica. Como exemplo, a Equação 3-12 mostra as matrizes para cálculo do

primeiro grupo de seis coeficientes de estimação horizontal para um conjunto de Dados de Treino de N fotos organizados de J em J fotos, sendo $c_{C,U,1:J}$ o coeficiente que pondera o Centro C, para uma estimação horizontal e calculado a partir do subconjunto da Foto 1 à Foto J.

Equação 3-12 - Cálculo do primeiro grupo de coeficientes variáveis para estimação horizontal

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{1,1:2} & \Delta u_{6,1:2} & \Delta u_{10,1:2} & \Delta u_{15,1:2} & \Delta u_{19,1:2} & \Delta u_{24,1:2} \\ \Delta u_{1,2:3} & \Delta u_{6,2:3} & \Delta u_{10,2:3} & \Delta u_{15,2:3} & \Delta u_{19,2:3} & \Delta u_{24,2:3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta u_{1,J-2:J-1} & \Delta u_{6,J-2:J-1} & \Delta u_{10,J-2:J-1} & \Delta u_{15,J-2:J-1} & \Delta u_{19,J-2:J-1} & \Delta u_{24,J-2:J-1} \\ \Delta u_{1,J-1:J} & \Delta u_{6,J-1:J} & \Delta u_{10,J-1:J} & \Delta u_{15,J-1:J} & \Delta u_{19,J-1:J} & \Delta u_{24,J-1:J} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} c_{1,U,1:J} \\ c_{6,U,1:J} \\ c_{10,U,1:J} \\ c_{15,U,1:J} \\ c_{19,U,1:J} \\ c_{24,U,1:J} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta x \\ \vdots \\ \Delta x \\ \Delta x \end{bmatrix}$$

ou, simplesmente:

Equação 3-13 - Representação simplificada do cálculo do primeiro grupo de coeficientes variáveis para estimação horizontal

$$\Delta u_{1:J-1} * c_{U,1:J} = \Delta x$$

3.4.4 - Modelagem de Cinco Coeficientes

3.4.4.1 Coeficientes Fixos

A idéia da modelagem com cinco coeficientes residiu em eliminar um dos coeficientes, a partir do artifício de utilizar as diferenças de *pixels* entre as coordenadas dos Centros 1 como referência para as diferenças dos outros centros.

Isso significou que para cada par de fotos no qual estava sendo calculada a diferença de *pixels*, o valor relativo ao Centro 1 das fotos foi subtraído das seis diferenças relativas a todos os centros. Logicamente, isso resultou em um valor nulo para o Centro 1, que foi eliminado e não necessitava mais de coeficiente para ponderação. A matriz ajustada Δu advinda da Equação 3-5 está a seguir:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{6,1:2} - \Delta u_{1,1:2} & \Delta u_{10,1:2} - \Delta u_{1,1:2} & \Delta u_{15,1:2} - \Delta u_{1,1:2} & \Delta u_{19,1:2} - \Delta u_{1,1:2} & \Delta u_{24,1:2} - \Delta u_{1,1:2} \\ \Delta u_{6,2:3} - \Delta u_{1,2:3} & \Delta u_{10,2:3} - \Delta u_{1,2:3} & \Delta u_{15,2:3} - \Delta u_{1,2:3} & \Delta u_{19,2:3} - \Delta u_{1,2:3} & \Delta u_{24,2:3} - \Delta u_{1,2:3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta u_{6,N-1:N} - \Delta u_{1,N-1:N} & \Delta u_{10,N-1:N} - \Delta u_{1,N-1:N} & \Delta u_{15,N-1:N} - \Delta u_{1,N-1:N} & \Delta u_{19,N-1:N} - \Delta u_{1,N-1:N} & \Delta u_{24,N-1:N} - \Delta u_{1,N-1:N} \end{bmatrix}$$

Para este caso, só são calculados e utilizados os coeficientes $c_{6,U}$ até $c_{24,U}$, já que o coeficiente $c_{1,U}$ foi descartado. Para o caso do cálculo dos coeficientes de estimação vertical pode-se pensar de forma análoga à descrita anteriormente, resultando apenas no uso dos coeficientes $c_{6,V}$ até $c_{24,V}$.

3.4.4.2 Coeficientes Variáveis

Para esta modelagem, foi feita a união dos raciocínios descritos nas Seções 3.4.3.2 e 3.4.4.1, ou seja, para cada conjunto de J fotos, a matriz Δu ou Δv correspondente devia ser ajustada de acordo com a referência na diferença de *pixels* relativa ao Centro 1, para então serem calculados os coeficientes. Isso gerou $N - J + 1$ conjuntos distintos de cinco coeficientes, considerando-se N fotos compondo os Dados de Treino e janelas de J em J fotos.

3.5 - Estrutura e Realização das Tomadas de Fotos

O procedimento de tomadas de fotos foi realizado de forma tal que ocorreu um aperfeiçoamento durante a sua execução. Nesta seção serão descritas as práticas usadas para a aquisição de dados mais precisos em relação à realidade.

Apesar dos cenários genéricos já estarem descritos na Seção 3.4.1, serão apresentados mais detalhes além de alguns pontos serem reforçados, apontando as principais fragilidades a serem combatidas.

3.5.1 - Deslocamento da Câmera

Neste projeto são propostos dois tipos de deslocamento para a câmera, o vertical e o horizontal. Um dos principais problemas que ocorreram nas primeiras tomadas foi a rotação involuntária da câmera enquanto a mesma era deslocada, ou seja, ocorria um pequeno giro em torno do seu próprio eixo que mudava a perspectiva da foto e equivalia a um maior deslocamento horizontal do que o medido. Para

combater este problema foi utilizada uma base retangular fixada à câmera, que deveria ser escorada na parte posterior para que se mantivesse paralela ao eixo de referência por todo o trajeto, além de não se deslocar a favor ou na direção contrária ao *grid*. O objeto responsável pelo escoramento deveria ser fixado no início da tomada, de forma a compor uma base imóvel.

Outro detalhe estava na precisão do passo com que a câmera deveria ser deslocada. A dificuldade residia em definir quanto o centro da lente da câmera era deslocado sobre a reta de referência e esse problema foi minimizado com a marcação de um ponto de referência na base supracitada. Como a base estava presa à câmera, isto fazia com que este ponto se deslocasse tanto quanto a câmera. Alinhando este ponto a uma marcação em centímetros fixa na superfície, o deslocamento se dava de forma mais precisa. As técnicas descritas nesta seção estão ilustradas nas Figuras 3-9 e 3-10.

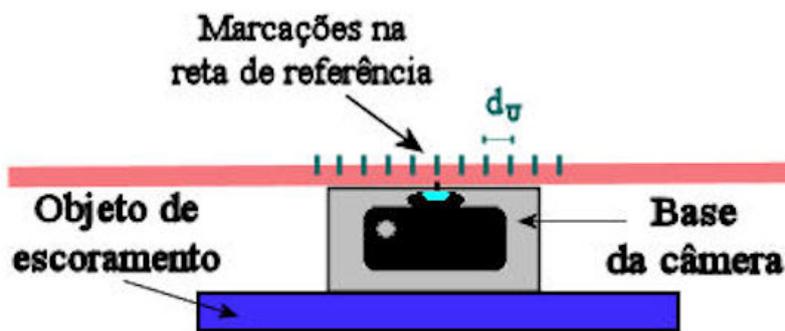


Figura 3-9 - Vista superior dos detalhes das práticas de aperfeiçoamento do deslocamento

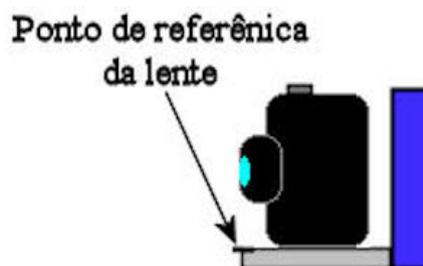


Figura 3-10 - Vista lateral dos detalhes das práticas de aperfeiçoamento do deslocamento

Mais especificamente quanto ao deslocamento vertical, foram utilizados os mesmo tipos de suportes, porém o passo da câmera se dava na direção do eixo z. Para isto eram empilhados objetos de altura constante, como exemplificado com três passos na Figura 3-11.

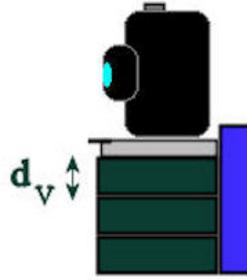


Figura 3-11 - Vista lateral dos detalhes das práticas de aperfeiçoamento do deslocamento vertical, exemplificando o caso de três deslocamentos verticais realizados

Para os Testes Finais, descritos na Seção 4.5, foi montado um sistema mais eficiente em que a reta de referência estava demarcada sobre um trilho onde a câmera, fixada à sua própria base, podia deslizar de forma segura. Para o deslocamento vertical, o trilho era calçado dos dois lados, criando novos andares onde a câmera podia novamente deslizar. As figuras a seguir esquematizam o tipo de cenário descrito.

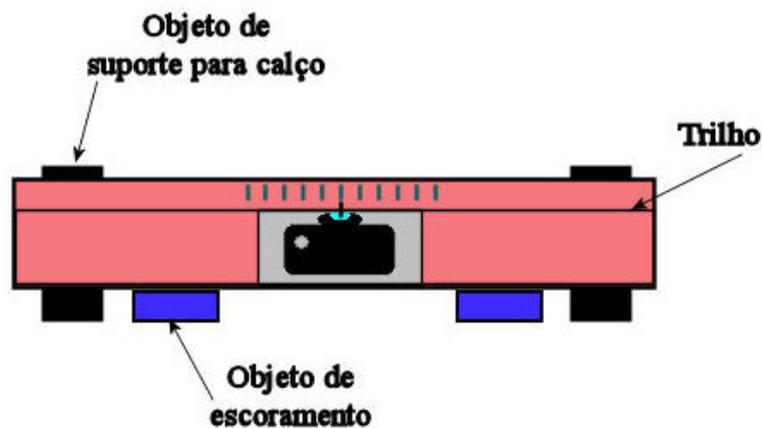


Figura 3-12 - Vista superior do esquema aperfeiçoado para os Testes Finais

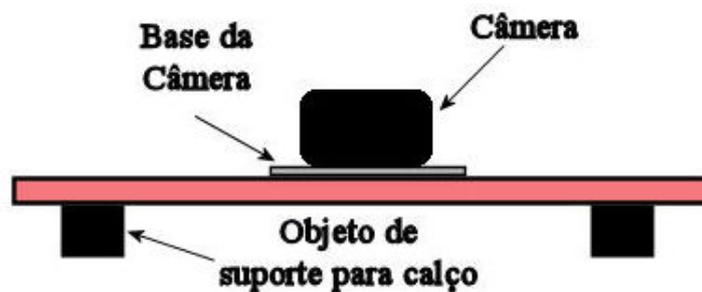


Figura 3-13 - Vista posterior do esquema aperfeiçoado para os Testes Finais. Estão ocultados os objetos de escoramento para melhor visualização

3.5.2 - Digitalização da Imagem

Outra possível fonte de problemas consistia em como a foto seria capturada. O próprio ato de pressionar o botão de acionamento da captura na câmera poderia provocar um movimento indesejado, deslocando a lente da posição anterior ao evento. Nesse ponto, a solução foi utilizar o *software* descrito na Seção 3.1.5 como Interface da câmera, que possibilitava o acionamento da captura através do computador.

3.6 - Fluxo Posterior à Captura das Imagens

Até este ponto foram descritos os métodos relativos à captura das imagens do *grid* de forma conveniente e que possibilitasse um pós-processamento que resultasse em estimações dos deslocamentos da câmera. Essas ações, que deviam ser tomadas para cada conjunto de fotos, estão esquematizadas a seguir.

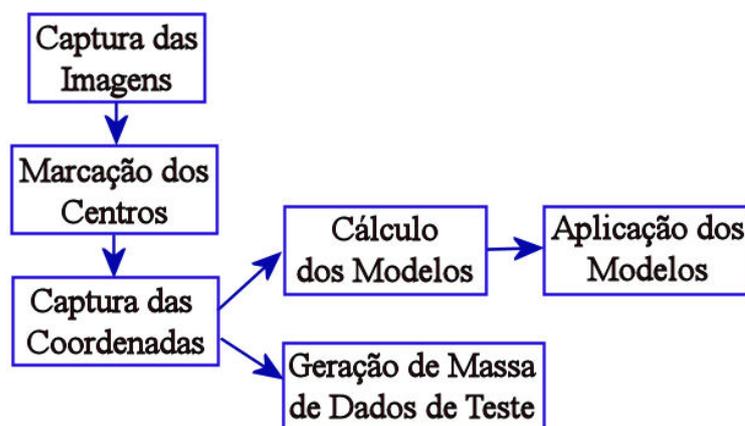


Figura 3-14 - Fluxo de processamento a partir do fim da captura das imagens

3.6.1 - Marcação dos Centros

A marcação dos centros foi a etapa que consumiu mais tempo. Primeiramente, cada imagem precisou ser convertida do formato JPG para o formato BMP. Em seguida, para cada foto, foram marcados manualmente com um *pixel* verde puro, RGB = (0, 255, 0), os seis centros de alvos de interesse.

3.6.2 - Captura das Coordenadas

A partir da plataforma de programação numérica utilizada, foi desenvolvido um *script* que era capaz de ler as coordenadas horizontais e verticais dos *pixels* verdes e armazená-los de forma apropriada para processamento posterior.

3.6.3 - Cálculo dos Modelos

Armazenado o conjunto de dados representando as coordenadas dos centros de alvos, era possível resolver as equações descritas na Seção 3.4 de acordo com o objetivo requerido. Para isso, também foram desenvolvidos *scripts* que automatizaram os processos de cálculo de seis e cinco coeficientes, fixos ou variáveis.

3.6.4 - Aplicação dos Modelos

Após a resolução das equações algébricas que resultavam em conjuntos diversos de coeficientes, os modelos poderiam ser aplicados sobre os próprios Dados de Treino ou sobre outros Dados de Teste, também a partir de *scripts* desenvolvidos para esses fins.

3.6.5 - Geração de Massa de Dados de Teste

Para este fim eram executados *scripts* que apenas faziam a leitura das fotos com o objetivo de armazenar os dados relativos às coordenadas dos centros de alvos para que fossem posteriormente usados como Dados de Teste para outro modelo, na etapa de Aplicação dos Modelos, da Seção 3.6.4.

Capítulo 4 - Resultados

O capítulo se inicia com a Seção 4.1, onde são expostos os indicadores utilizados para apresentação dos dados. Na Seção 4.2 estão descritos os casos experimentais que foram desprezados para cálculo desses indicadores.

Os dados experimentais foram divididos em três seções. Primeiramente, na Seção 4.3, está exposto o tabelamento que ajudou a criar estratégias para que as tomadas de fotos posteriores produzissem resultados mais precisos. Em seguida, na Seção 4.4, são apresentados os dados que auxiliaram na decisão de que tipos de rastreamentos seriam feitos. Finalmente, são listadas as informações extraídas dos testes finais na Seção 4.5. Um maior detalhamento dos dados de origem pode ser encontrado em [5].

4.1 - Indicadores

Toda a exibição é baseada nos indicadores descritos a seguir.

4.1.1 - Erro Relativo Médio

O Erro Relativo Médio é a média aritmética dos valores em módulo dos erros relativos, calculados para cada estimativa de deslocamento a partir da Equação 4-1. O sinal não será considerado, pois o objetivo é analisar o quanto o valor estimado divergiu do esperado, independente se para mais ou para menos.

Equação 4-1 - Erro relativo

$$Erro\ Relativo = \frac{(Deslocamento\ Estimado) - (Deslocamento\ Real)}{Valor\ Absoluto(Deslocamento\ Real)}$$

4.1.2 - Erro Absoluto Médio

O Erro Absoluto Médio é a média aritmética dos valores em módulo dos erros absolutos, calculados para cada estimativa de uma situação a partir da Equação 4-2.

Equação 4-2 - Erro absoluto

$$Erro\ Absoluto = (Deslocamento\ Estimado) - (Deslocamento\ Real)$$

4.2 - Dados Desprezados

Com o objetivo de alcançar indicadores mais úteis à análise da eficiência da estimação, duas situações não foram consideradas, ou seja, não contribuíram nos cálculos que resultaram nos indicadores. Esses casos estão especificados a seguir.

4.2.1 - Estimação Exata

Esta situação trata dos casos nos quais foi encontrado Erro Relativo Médio igual a zero, ou seja, quando o valor estimado foi exatamente igual ao valor real, fato ocorrido em situações em que estavam sendo utilizados coeficientes variáveis para conjuntos de oito fotos (J igual a 8), testados sobre os próprios Dados de Treino.

O ajuste de um modelo que gera erro zero deve remeter à ausência de Dados de Treino suficientes. Fazendo uma analogia com um sistema de duas dimensões, traçar uma reta a partir de dois pontos traz apenas uma resposta determinada e exata. Nesse caso não ocorreu ajuste, pois seriam necessários pelo menos três pontos não colineares em duas dimensões para que uma reta fosse ajustada de maneira a minimizar o erro. E essa modelagem poderia ser ainda mais abrangente se mais dados fossem adicionados, aumentando o número de pontos pelos quais a reta deveria ser ajustada.

A conclusão que se chega no caso específico do projeto é que se ocorreu uma modelagem exata, resultando em uma estimação com Erro Relativo igual a zero, um dos sete deslocamentos poderia ser desprezado, pois sua informação já está contida nos outros seis, o que resulta em um sistema para encontrar seis coeficientes, que são as incógnitas, a partir de seis deslocamentos, resultando num sistema com solução determinada e exata. Esses dados não serão considerados, pois a solução encontrada foi muito pouco abrangente, graças à escolha de poucos Dados de Treino. Na prática, os indicadores referentes a esses dados desprezados estão sendo substituídos pela média dos indicadores obtidos com dados não desprezados.

4.2.2 - Estimação Impossível ou Imprecisa

Em alguns casos em que estavam sendo utilizados coeficientes variáveis para conjuntos de oito fotos (J igual a 8), a matriz de deslocamentos Δu ou Δv representava um número de equações menor que o necessário para os cálculos dos coeficientes. Isso podia ser observado pelo posto da matriz Δu ou Δv , que era menor do que o

número de incógnitas a serem encontradas. Como exemplo, seguem os dados da Tomada 9, para o conjunto utilizando-se das fotos 9 a 16 com seis coeficientes variáveis:

$$\underline{\Delta u} = \begin{bmatrix} -50 & -51 & -44 & -43 & -45 & -46 \\ -54 & -56 & -48 & -46 & -49 & -51 \\ -53 & -54 & -47 & -45 & -49 & -50 \\ -46 & -48 & -41 & -38 & -41 & -43 \\ -44 & -46 & -38 & -37 & -39 & -41 \\ -40 & -44 & -36 & -33 & -36 & -40 \\ -44 & -46 & -38 & -37 & -39 & -41 \end{bmatrix}, \text{Posto}(\underline{\Delta u}) = 5$$

Como o cálculo tinha como objetivo encontrar seis coeficientes e a matriz de deslocamentos só representava cinco equações, não era possível resolver esse sistema. Neste caso específico os deslocamentos representados nas linhas cinco e sete foram iguais.

4.3 - Aprimoramento

4.3.1 - Tomada 1 (Treino)

Neste cenário, a câmera foi centralizada em nove posições consecutivas, distanciadas de um centímetro, sobre uma reta de referência disposta a 82,7 centímetros da origem de coordenadas do *grid* ($D = 82,7$ cm) e suspensa de 13,5 centímetros. A primeira posição estava no semi-plano que continha a Face Esquerda do *grid*, a quatro centímetros da Posição Central, e a última posição no semi-plano que continha a Face Direita do *grid*, também a quatro centímetros da Posição Central. Logo, o deslocamento se dava no sentido que diminuía a projeção no eixo y e aumentava no eixo x. Este cenário está ilustrado na Figura 4-1.

A partir das nove imagens capturadas, foram calculados modelos para estimar a projeção no eixo x do *grid* dos oito deslocamentos sofridos pela câmera. O valor a ser considerado como real pode ser obtido através da aplicação da Equação 3-1.

Equação 4-3 - Projeção do deslocamento $d_U = 1$ cm sobre o eixo x

$$\Delta x = \frac{\sqrt{2}}{2} * d_U, d_U = 1 \text{ cm} \therefore \Delta x = 0,71 \text{ cm}$$

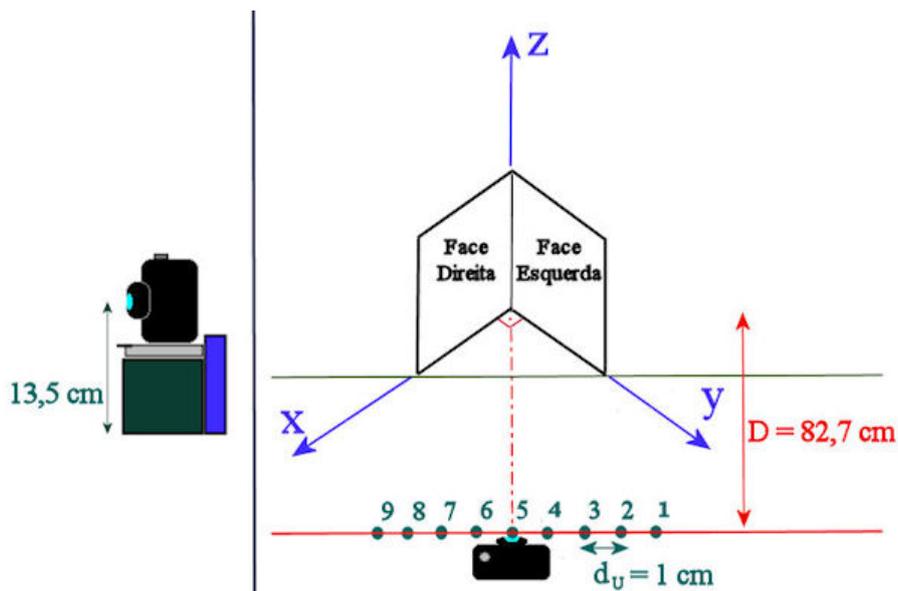


Figura 4-1 - Ilustração da Tomada 1: vista lateral da câmera (à esquerda) e vista em perspectiva do cenário (à direita)

Aplicando-se esses modelos de seis e cinco coeficientes fixos e variáveis sobre os dados relativos às fotos da Tomada 1, foram encontrados os dados na Tabela 4-1. Os modelos de coeficientes variáveis foram calculados para conjuntos de oito fotos e, portanto, sete deslocamentos.

Tabela 4-1 - Indicadores Modelos 1 x Dados 1

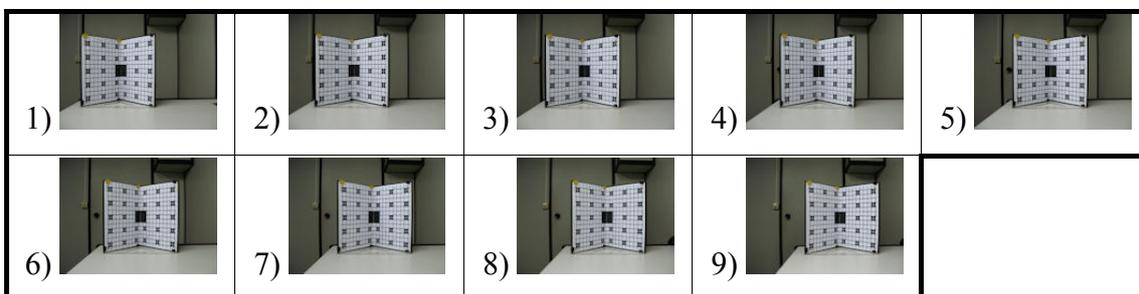
<i>Dados</i> \ <i>Modelo</i>		Tomada 1: - 6 coefs. - Fixos	Tomada 1: - 5 coefs. - Fixos	Tomada 1: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Tomada 1: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
		Tomada 1	Erro Rel. Médio	2,02%	2,76%
Erro Abs. Médio (cm)	0,01		0,02	0,01	0,02

Com o intuito de simplificar a representação das legendas das tabelas de indicadores de estimação, foi utilizado o seguinte padrão base: “Indicadores Modelos N x Dados M” significando “Indicadores dos resultados obtidos aplicando-se os modelos derivados das imagens da Tomada N sobre os dados da Tomada M”. Deve ser ressaltado que “Indicadores Modelos N x Dados N” estará indicando que os modelos da Tomada N foram aplicados sobre os próprios dados de treino.

Algumas pequenas alterações poderão se fazer no decorrer da listagem das tabelas, mas as descrições feitas aqui serão suficientes para o entendimento do leitor, por analogia.

Como conjunto de amostragem das imagens capturadas, a Tabela 4-2 agrupa as fotos da Tomada 1.

Tabela 4-2 - Fotos da Tomada 1 em ordem de captura



4.3.2 - Tomada 2 (Teste)

Este segundo cenário foi elaborado na tentativa de reproduzir as Posições 5 e 6 da Figura 4-1. Assim, pode-se considerar um deslocamento de 0,71 centímetros no eixo x. Desta forma, utilizando-se dos modelos calculados na Seção 4.3.1, a Tabela 4-3 exhibe a estimacão calculada sobre as fotos da Tomada 2.

Tabela 4-3 - Indicadores Modelos 1 x Dados 2

<i>Modelo</i>		Tomada 1:	Tomada 1:	Tomada 1:	Tomada 1:
		- 6 coefs. - Fixos	- 5 coefs. - Fixos	- 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	- 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
Tomada 2	Erro Rel. Médio	22,52%	18,18%	23,11%	19,22%
	Erro Abs. Médio (cm)	0,16	0,13	0,17	0,14

Neste caso da Tomada 2, apesar de s ter ocorrido um deslocamento, os indicadores continuaram sendo calculados como uma média, pois todos os modelos variáveis foram aplicados sobre esse único deslocamento. Assim, a tabela mostra uma média dos Erros Relativos calculados para cada modelo sobre o par de fotos de teste. Logicamente, para os modelos fixos, a média representa o valor em módulo do único do Erro Relativo calculado.

O raciocínio descrito anteriormente será empregado nas outras tomadas, a não ser quando especificado de outra forma.

4.3.3 - Tomada 3 (Treino)

O terceiro cenário foi produzido a partir de alterações em relação aos primeiros. Foram capturadas fotos em 17 posições consecutivas, distanciadas de um centímetro, onde $D = 79,1$ cm e a câmera estava suspensa de 19,8 centímetros. Já o deslocamento se dava no sentido contrário ao dos dois primeiros cenários, diminuindo a projeção no eixo x e aumentando no eixo y, sendo a primeira posição a Posição Central e a última a 17 centímetros da primeira. Isso significou que os 16 deslocamentos foram feitos sobre o semi-plano que continha a Face Esquerda do *grid*.

O valor de deslocamento em x a ser considerado como real pode ser obtido através da aplicação da Equação 3-1:

Equação 4-4 - Projeção do deslocamento $d_U = -1$ cm sobre o eixo x

$$\Delta x = \frac{\sqrt{2}}{2} * d_U, d_U = -1 \text{ cm} \therefore \Delta x = -0,71 \text{ cm}$$

A partir das 17 imagens capturadas, foram calculados modelos para estimar a projeção sobre o eixo x dos 16 deslocamentos sofridos pela câmera. Aplicando-se esses quatro modelos sobre os dados relativos às fotos da Tomada 3, foram encontrados os dados na Tabela 4-4. Os modelos de coeficientes variáveis foram calculados para conjuntos de oito fotos e, portanto, sete deslocamentos.

Tabela 4-4 - Indicadores Modelos 3 x Dados 3

<i>Dados</i>		<i>Modelo</i>			
		Tomada 3: - 6 coefs. - Fixos	Tomada 3: - 5 coefs. - Fixos	Tomada 3: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Tomada 3: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
Tomada 3	Erro Rel. Médio	5,47%	5,64%	2,41%	4,03%
	Erro Abs. Médio (cm)	0,04	0,04	0,02	0,03

4.3.4 - Tomada 4 (Treino)

Este quarto cenário de fotos era idêntico ao anterior, sendo alterado apenas o valor de D para 95,2 centímetros. A Tabela 4-5 exhibe os resultados.

Tabela 4-5 - Indicadores Modelos 4 x Dados 4

<i>Dados</i>		<i>Modelo</i>		Tomada 4:	Tomada 4:	Tomada 4:	Tomada 4:
		- 6 coefs. - Fixos	- 5 coefs. - Fixos	- 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	- 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)		
Tomada 3	Erro Rel. Médio	6,57%	6,71%	2,23%	4,59%		
	Erro Abs. Médio (cm)	0,05	0,05	0,02	0,03		

4.3.5 - Tomada 5 (Teste)

Este cenário foi elaborado com o objetivo de reproduzir as condições da Seção 4.3.3, com uma só diferença: foram feitas só duas capturas, representando um deslocamento. As capturas foram distanciadas de um centímetro, sendo que a primeira posição estava a 15,1 centímetros da Posição Central, e localizada no semi-plano que continha a Face Direita do *grid*. Já o deslocamento foi feito no sentido de diminuir a coordenada da câmera no eixo x do *grid* e aumentar no eixo y. Esta situação está ilustrada na Figura 4-2

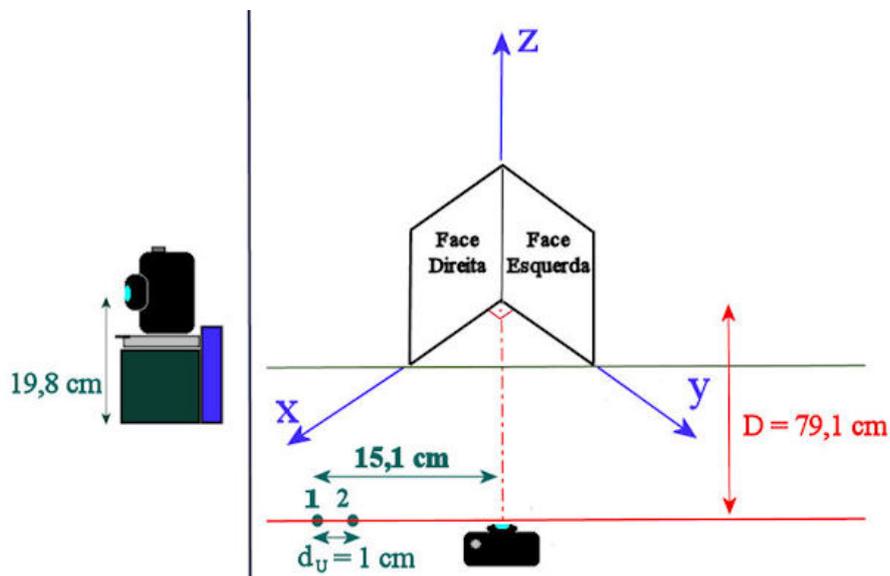


Figura 4-2 - Ilustração da Tomada 5: vista lateral da câmera (à esquerda) e vista em perspectiva do cenário (à direita)

Em seguida foram aplicados os modelos calculados a partir das fotos da Seção 4.3.3 nestes dados da Tomada 5, e os resultados estão na Tabela 4-6.

Tabela 4-6 - Indicadores Modelos 3 x Dados 5

<i>Dados</i> \ <i>Modelo</i>		Tomada 3: - 6 coefs. - Fixos	Tomada 3: - 5 coefs. - Fixos	Tomada 3: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Tomada 3: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
		Tomada 5	Erro Rel. Médio	15,10%	26,74%
Erro Abs. Médio (cm)	0,11		0,19	0,33	0,34

Também foram aplicados os modelos calculados a partir das fotos da Seção 4.3.4 sobre os dados da Tomada 5, como exibido a seguir.

Tabela 4-7 - Indicadores Modelos 4 x Dados 5

<i>Dados</i> \ <i>Modelo</i>		Tomada 4: - 6 coefs. - Fixos	Tomada 4: - 5 coefs. - Fixos	Tomada 4: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Tomada 4: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
		Tomada 5	Erro Rel. Médio	56,45%	31,38%
Erro Abs. Médio (cm)	0,40		0,22	0,78	0,33

4.3.6 - Tomada 6 (Teste)

Este cenário é idêntico ao anterior, porém com D sendo 95,2 centímetros, como na Seção 4.3.4.

Em seguida foram aplicados os modelos calculados a partir das fotos da Seção 4.3.3 nestes dados da Tomada 6, e os resultados estão na Tabela 4-8.

Tabela 4-8 - Indicadores Modelos 3 x Dados 6

<i>Dados</i> \ <i>Modelo</i>		Tomada 3: - 6 coefs. - Fixos	Tomada 3: - 5 coefs. - Fixos	Tomada 3: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Tomada 3: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
		Tomada 6	Erro Rel. Médio	40,32%	47,60%
Erro Abs. Médio (cm)	0,29		0,34	0,30	0,43

Também foram aplicados os modelos calculados a partir das fotos da Seção 4.3.4 sobre os dados da Tomada 6, como exibido na Tabela 4-9.

Tabela 4-9 - Indicadores Modelos 4 x Dados 6

<i>Modelo</i>		<i>Dados</i>			
		Tomada 4: - 6 coefs. - Fixos	Tomada 4: - 5 coefs. - Fixos	Tomada 4: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Tomada 4: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
Tomada 6	Erro Rel. Médio	8,47%	4,68%	54,62%	29,38%
	Erro Abs. Médio (cm)	0,06	0,03	0,39	0,21

4.3.7 - Tomada 7 (Treino)

Este cenário é idêntico ao da Seção 4.3.3, porém com D valendo 82,3 centímetros.

Na Tabela 4-10 estão expostos os resultados relativos ao cálculo dos modelos fixos de seis e cinco coeficientes, além dos modelos variáveis também de seis e cinco coeficientes para conjuntos de oito fotos.

Tabela 4-10 - Indicadores Modelos 7 x Dados 7

<i>Modelo</i>		<i>Dados</i>			
		Tomada 7: - 6 coefs. - Fixos	Tomada 7: - 5 coefs. - Fixos	Tomada 7: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Tomada 7: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
Tomada 7	Erro Rel. Médio	2,73%	2,94%	1,63%	2,21%
	Erro Abs. Médio (cm)	0,02	0,02	0,01	0,02

4.3.8 - Tomada 8 (Treino)

Este cenário foi desenvolvido com o objetivo de “espelhar” a situação da Seção 4.3.7, em relação ao eixo central ligando a origem do *grid* à reta de referência da trajetória da câmera. A primeira posição da câmera era a Posição Central, entretanto a última estava no semi-plano contendo a Face Direita do *grid*, a 17 centímetros da primeira. Logo, o deslocamento se dava no sentido de aumentar em 0,71 centímetros a projeção no eixo x e diminuir no eixo y. Os resultados estão na Tabela 4-11.

Tabela 4-11 - Indicadores Modelos 8 x Dados 8

<i>Dados</i> \ <i>Modelo</i>		Tomada 8: - 6 coefs. - Fixos	Tomada 8: - 5 coefs. - Fixos	Tomada 8: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Tomada 8: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
		Tomada 8	Erro Rel. Médio	4,77%	7,52%
Erro Abs. Médio (cm)	0,03		0,05	0,01	0,02

4.3.9 - Comentários sobre o Aprimoramento

Foram estudados modelos iniciais com apenas nove fotos nas Seções 4.3.1 e 4.3.2 e, após isso, foram testadas situações com dezessete fotos, abrindo a possibilidade do uso de mais dados para ajuste dos modelos.

As Seções 4.3.3 e 4.3.4 descreveram modelos obtidos de fotos capturadas no semi-plano que continha a Face Direita do *grid*, enquanto que os dados de teste estavam localizados no outro semi-plano, nas Seções 4.3.5 e 4.3.6. Para refinar os métodos de captura de fotos nos dois lados relativos às faces do *grid* e observar as relações entre os modelos “espelhados”, os cenários das Seções 4.3.7 e 4.3.8 foram executados.

4.4 - Direcionamento

4.4.1 - Tomada 9 (Treino)

Neste cenário era desejado alterar a perspectiva da captura de fotos e observar os impactos nos cálculos de estimativas. Para isso, D valia 95,5 centímetros e o ponto do *grid* que representa a origem do sistema de coordenadas foi então *levantado de cinco centímetros*. O ângulo formado entre a base do *grid* e a superfície de apoio foi de 12,9 graus. É importante notar que o eixo x a ser considerado nos cálculos continuou sendo delineado pelo *grid* quando este não estava suspenso, como nos outros cenários descritos até agora.

Quanto à aquisição, as posições da câmera foram as mesmas consideradas na Seção 4.3.3. Os resultados estão na Tabela 4-12.

Tabela 4-12 - Indicadores Modelos 9 x Dados 9

<i>Modelo</i>		<i>Dados</i>			
		Tomada 9: - 6 coefs. - Fixos	Tomada 9: - 5 coefs. - Fixos	Tomada 9: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Tomada 9: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
Tomada 9	Erro Rel. Médio	2,92%	2,77%	2,10%	3,29%
	Erro Abs. Médio (cm)	0,02	0,02	0,01	0,02

4.4.2 - Tomada 10 (Treino)

Neste cenário a perspectiva da captura de fotos foi alterada de outra forma. Para isso, D valia 101 centímetros e o *grid* determinou os eixos. Em seguida, o *grid* foi rotacionado de forma que sua Face Direita ficasse perpendicular à reta de referência para a trajetória da câmera. É importante notar que o eixo x a ser considerado nos cálculos continuou sendo delineado pelo *grid* quando este não estava rotacionado.

A aquisição foi idêntica à da Seção 4.3.3. Os resultados estão na Tabela 4-13.

Tabela 4-13 - Indicadores Modelos 10 x Dados 10

<i>Modelo</i>		<i>Dados</i>			
		Tomada 10: - 6 coefs. - Fixos	Tomada 10: - 5 coefs. - Fixos	Tomada 10: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Tomada 10: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
Tomada 10	Erro Rel. Médio	5,12%	5,24%	0,82%	2,79%
	Erro Abs. Médio (cm)	0,04	0,04	0,01	0,02

4.4.3 - Tomada 11 (Treino)

Neste cenário, o *grid* foi posicionado novamente como nas Seções 4.3.1 a 4.3.8, sendo D igual a 89,5 centímetros e a câmera estando suspensa de 0,95 centímetros. Já as posições da câmera para aquisição foram as mesmas das Seções 4.4.1 e 4.4.2, estando os resultados expostos na Tabela 4-14.

Tabela 4-14 - Indicadores Modelos 11 x Dados 11

<i>Dados</i> \ <i>Modelo</i>		Tomada 11: - 6 coefs. - Fixos	Tomada 11: - 5 coefs. - Fixos	Tomada 11: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Tomada 11: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
		Tomada 11	Erro Rel. Médio	5,74%	5,84%
Erro Abs. Médio (cm)	0,04		0,04	0,02	0,03

4.4.4 - Tomada 12 (Treino)

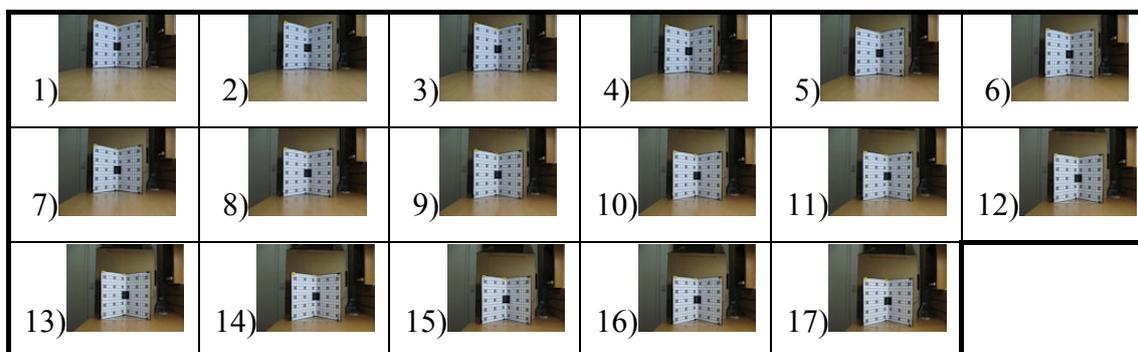
Neste cenário foi alterado o tipo de deslocamento da câmera, de forma que só ocorresse variação positiva no eixo z de referência, permanecendo constantes os valores de x e y. O *grid* foi posicionado para demarcar os eixos, e a primeira posição da câmera era localizada no ponto frontal em relação à origem de coordenadas e estava suspensa de 0,95 centímetros. Foram feitos 16 deslocamentos verticais de 0,95 centímetros cada, resultando em 17 posições de captura de foto, que distavam de 89,5 centímetros da origem do *grid* ($D = 89,5$ cm). Os resultados estão na Tabela 4-15.

Tabela 4-15 - Indicadores Modelos 12 x Dados 12

<i>Dados</i> \ <i>Modelo</i>		Tomada 12: - 6 coefs. - Fixos	Tomada 12: - 5 coefs. - Fixos	Tomada 12: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Tomada 12: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
		Tomada 12	Erro Rel. Médio	13,92%	13,94%
Erro Abs. Médio (cm)	0,13		0,13	0,07	0,10

A Tabela 4-16 agrupa as fotos da Tomada 12.

Tabela 4-16 - Fotos da Tomada 12 em ordem de captura



4.4.5 - Tomada 13 (Teste)

Este cenário foi idealizado com o objetivo de servir de teste para os modelos desenvolvidos nas Seções 4.4.3 e 4.4.4. O *grid* foi posicionado para demarcar os eixos e a câmera foi colocada inicialmente na Posição Central, onde D valia 89,5 e câmera estava suspensa de 0,95 centímetros. A partir daí foram feitos deslocamentos no sentido de diminuir a coordenada no eixo x e aumentar nos eixos y e z.

Mantendo a coerência com os cenários anteriores, a câmera sofreu 16 deslocamentos com passo horizontal de um centímetro e com passo vertical de 0,95 centímetros. Como já exemplificado, isso correspondeu a deslocamentos de -0,71 centímetros no eixo x e 0,95 centímetros no eixo z.

Nas tabelas 4-17 e 4-18 estão expostos os tabelamentos relativos aos modelos da Seção 4.4.3 para cálculo dos deslocamentos horizontais e aos modelos da Seção 4.4.4 para cálculo dos deslocamentos verticais, todos aplicados sobre as fotos da Tomada 13.

Tabela 4-17 - Indicadores Modelos 11 x Dados Horizontais 13

<i>Modelo</i>		Tomada 11: - 6 coefs. - Fixos	Tomada 11: - 5 coefs. - Fixos	Tomada 11: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Tomada 11: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
<i>Dados (Horiz.)</i>					
Tomada 13	Erro Rel. Médio	23,85%	24,09%	29,94%	26,35%
	Erro Abs. Médio (cm)	0,17	0,17	0,21	0,19

Tabela 4-18 - Indicadores Modelos 12 x Dados Verticais 13

<i>Modelo</i>		Tomada 12: - 6 coefs. - Fixos	Tomada 12: - 5 coefs. - Fixos	Tomada 12: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Tomada 12: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
<i>Dados (Vert.)</i>					
Tomada 13	Erro Rel. Médio	27,65%	25,93%	29,16%	22,94%
	Erro Abs. Médio (cm)	0,26	0,25	0,28	0,22

4.4.6 - Tomada 14 (Treino)

Este cenário era idêntico ao da Seção 4.4.4, porém D foi alterado para 76,5 centímetros. Os resultados estão na Tabela 4-19.

Tabela 4-19 - Indicadores Modelos 14 x Dados 14

<i>Modelo</i>		<i>Dados</i>			
		Tomada 14: - 6 coefs. - Fixos	Tomada 14: - 5 coefs. - Fixos	Tomada 14: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Tomada 14: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
Tomada 14	Erro Rel. Médio	5,20%	5,17%	1,15%	3,05%
	Erro Abs. Médio (cm)	0,05	0,05	0,01	0,03

4.4.7 - Tomada 15 (Treino)

Este cenário foi exatamente igual ao anterior, exceto pelo fato de D ter sido alterado para 80,5 centímetros. Os resultados estão na Tabela 4-20.

Tabela 4-20 - Indicadores Modelos 15 x Dados 15

<i>Modelo</i>		<i>Dados</i>			
		Tomada 15: - 6 coefs. - Fixos	Tomada 15: - 5 coefs. - Fixos	Tomada 15: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Tomada 15: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
Tomada 15	Erro Rel. Médio	21,30%	21,67%	10,81%	12,73%
	Erro Abs. Médio (cm)	0,20	0,21	0,10	0,12

4.4.8 - Comentários sobre o Direcionamento

Na Seção 4.4 continuaram a ser estudadas modelagens originadas de 17 fotos e, portanto, 16 deslocamentos. Apesar disto, também foram feitas modificações em relação à Seção 4.3: o *grid*, após demarcar o sistema de referências, teve primeiramente sua base suspensa e, a seguir, sofreu uma rotação, nas Seções 4.4.1 e 4.4.2. Estas mudanças tinham como objetivo reproduzir mudanças de perspectiva que ocorrem nos pontos extremos dos modelos de 17 fotos. A Seção 4.4.1 simula uma situação na qual a câmera está numa posição muito inferior ao *grid* e a Seção 4.4.2 simula uma situação na qual a câmera está sobre a reta de referência, porém muito afastada da Posição Central.

As Seções 4.4.3 e 4.4.4 introduziram a possibilidade da criação de modelos para deslocamento diagonal do *grid*, em trajetórias compostas por deslocamentos horizontais e verticais conjugados. A Seção 4.4.5 serviu como fonte de Dados de Teste para esses modelos.

Finalmente, as Seções 4.4.6 e 4.4.7 refinaram a criação de modelos de estimação vertical.

4.5 - Tomadas Finais

A partir do refinamento e direcionamento do estudo, foram considerados mais quatro cenários de tomadas de fotos com o objetivo de obter os resultados mais precisos de cálculos de estimativas de deslocamentos horizontais até então. Adicionalmente, utilizando-se as fotos desses cenários foram calculados três modelos para estimativa de deslocamento vertical e foi reunido um conjunto de dados para testes de estimação de deslocamentos diagonais.

4.5.1 - Modelos Horizontais na Altura 1 (Treino)

Este cenário foi composto com o objetivo gerar um modelo para cálculo da projeção sobre o eixo x de um deslocamento horizontal sofrido pela câmera, movida com D igual a 175. Além disso, o *grid* estava suspenso de 35,7 centímetros em relação à câmera.

A primeira posição estava localizada a um centímetro da Posição Central, no semi-plano contendo a Face Esquerda do *grid*, e cada um dos 16 deslocamentos considerados foi de quatro centímetros. Esta situação está ilustrada na Figura 4-3.

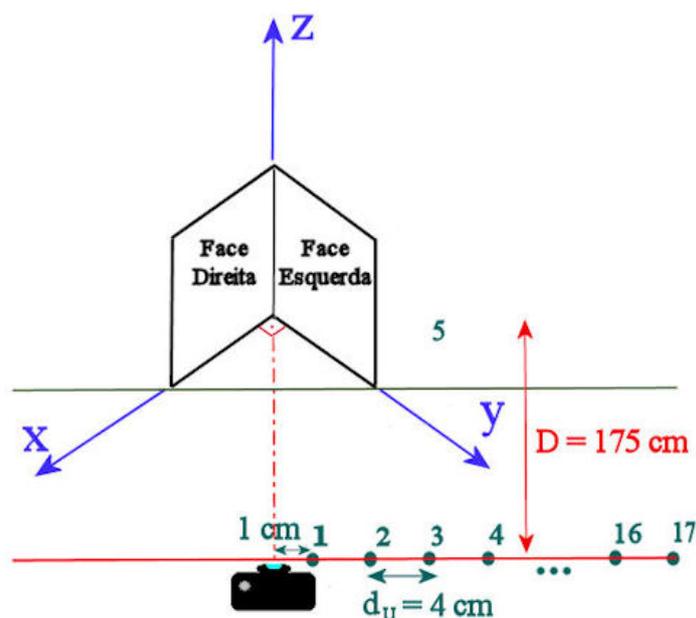


Figura 4-3 - Esquema para fotos da Seção 4.5.1, não considerando, a nível de ilustração, diferenças de alturas entre as posições do *grid* e da câmera

O valor de deslocamento em x a ser considerado como real pode ser obtido através da aplicação da Equação 3-1:

Equação 4-5 - Reflexão do deslocamento no eixo x para $\Delta d = -4$ cm

$$\text{sen}(45^\circ) = \frac{\Delta x}{\Delta d} = \frac{\sqrt{2}}{2}, \Delta d = -4 \text{ cm} \therefore \Delta x = -2,83 \text{ cm}$$

Na Tabela 4-21 estão expostos os resultados relativos ao cálculo dos modelos fixos de seis e cinco coeficientes, além dos modelos variáveis também de seis e cinco coeficientes para conjuntos de oito fotos.

Tabela 4-21 - Indicadores Modelos Horizontais Altura 1 x Dados Horizontais Altura 1 para os Testes Finais

<i>Dados</i> \ <i>Modelo</i>		Horiz. 1: - 6 coefs. - Fixos	Horiz. 1: - 5 coefs. - Fixos	Horiz. 1: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Horiz. 1: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
		Horizontal 1	Erro Rel. Médio	2,10%	2,97%
Erro Abs. Médio (cm)	0,06		0,08	0,05	0,10

4.5.2 - Modelos Horizontais na Altura 2 (Treino)

Este cenário é idêntico ao anterior, sendo alterada apenas a altura da reta de referência, que foi aumentada de 7,5 centímetros em relação à Altura 1. Os resultados estão na Tabela 4-22.

Tabela 4-22 - Indicadores Modelos Horizontais Altura 2 x Dados Horizontais Altura 2 para os Testes Finais

<i>Dados</i> \ <i>Modelo</i>		Horiz. 2: - 6 coefs. - Fixos	Horiz. 2: - 5 coefs. - Fixos	Horiz. 2: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Horiz. 2: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
		Horizontal 2	Erro Rel. Médio	1,30%	6,10%
Erro Abs. Médio (cm)	0,04		0,17	0,01	0,08

4.5.3 - Modelos Horizontais na Altura 3 (Treino)

Este cenário é idêntico ao anterior, sendo alterada apenas a altura da reta de referência, que foi aumentada de 7,5 centímetros em relação à Altura 2. Os resultados estão na Tabela 4-23.

Tabela 4-23 - Indicadores Modelos Horizontais Altura 3 x Dados Horizontais Altura 3 para os Testes Finais

<i>Modelo</i>		<i>Dados</i>			
		Horiz. 3: - 6 coefs. - Fixos	Horiz. 3: - 5 coefs. - Fixos	Horiz. 3: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Horiz. 3: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
Horizontal 3	Erro Rel. Médio	1,63%	3,61%	0,52%	1,84%
	Erro Abs. Médio (cm)	0,05	0,10	0,01	0,05

4.5.4 - Modelos Horizontais na Altura 4 (Treino)

Este cenário é idêntico ao anterior, sendo alterada apenas a altura da reta de referência, que foi aumentada de 7,5 centímetros em relação à Altura 3. Os resultados estão na Tabela 4-24.

Tabela 4-24 - Indicadores Modelos Horizontais Altura 4 x Dados Horizontais Altura 4 para os Testes Finais

<i>Modelo</i>		<i>Dados</i>			
		Horiz. 4: - 6 coefs. - Fixos	Horiz. 4: - 5 coefs. - Fixos	Horiz. 4: - 6 coefs. - Variáveis (8 fotos)	Horiz. 4: - 5 coefs. - Variáveis (8 fotos)
Horizontal 4	Erro Rel. Médio	1,56%	5,69%	1,14%	3,14%
	Erro Abs. Médio (cm)	0,04	0,16	0,03	0,09

4.5.5 - Modelos Verticais da Altura 1 para a Altura 2 (Treino)

Para este cenário foram reunidas as fotos capturadas nos cenários das Seções 4.5.1 e 4.5.2, formando 17 deslocamentos verticais para cálculo dos modelos de estimação. Isto é, a primeira foto da Seção 4.5.1 foi comparada com a primeira foto da Seção 4.5.2, as segundas fotos foram comparadas entre si, e assim sucessivamente até a décima sétima foto. Assim, os deslocamentos alvo foram todos iguais a um aumento de 7,5 centímetros no eixo z de referência. Os resultados estão na Tabela 4-25.

Tabela 4-25 - Indicadores Modelos Verticais Altura 1 para 2 x Dados Verticais Altura 1 para 2 para os Testes Finais

<i>Modelo</i>		Vert. 1 p/ 2:	Vert. 1 p/ 2:	Vert. 1 p/ 2:	Vert. 1 p/ 2:
		- 6 coefs. - Fixos	- 5 coefs. - Fixos	- 6 coefs. - Variáveis (7 fotos)	- 5 coefs. - Variáveis (7 fotos)
Vertical 1 p/ 2	Erro Rel. Médio	1,83%	2,00%	0,49%	0,76%
	Erro Abs. Médio (cm)	0,14	0,15	0,04	0,08

4.5.6 - Modelos Verticais da Altura 2 para a Altura 3 (Treino)

Para este cenário foram reunidas as fotos das tomadas na Seção 4.5.2 e na Seção 4.5.3, para que fossem calculados 17 deslocamentos verticais. Isto é, a primeira foto da Seção 4.5.2 foi comparada com a primeira foto da Seção 4.5.3, as segundas fotos foram comparadas entre si, e assim sucessivamente até a décima sétima foto. Assim, os deslocamentos alvo foram todos iguais a um aumento de 7,5 centímetros no eixo z de referência. Os resultados estão na Tabela 4-26.

Tabela 4-26 - Indicadores Modelos Verticais Altura 2 para 3 x Dados Verticais Altura 2 para 3 para os Testes Finais

<i>Modelo</i>		Vert. 2 p/ 3:	Vert. 2 p/ 3:	Vert. 2 p/ 3:	Vert. 2 p/ 3:
		- 6 coefs. - Fixos	- 5 coefs. - Fixos	- 6 coefs. - Variáveis (7 fotos)	- 5 coefs. - Variáveis (7 fotos)
Vertical 2 p/ 3	Erro Rel. Médio	1,65%	2,16%	0,80%	1,34%
	Erro Abs. Médio (cm)	0,12	0,16	0,06	0,10

4.5.7 - Modelos Verticais da Altura 3 para a Altura 4 (Treino)

Para este cenário foram reunidas as fotos das tomadas na Seção 4.5.3 e na Seção 4.5.4, para que fossem calculados 17 deslocamentos verticais. Isto é, a primeira foto da Seção 4.5.3 foi comparada com a primeira foto da Seção 4.5.4, as segundas fotos foram comparadas entre si, e assim sucessivamente até a décima sétima foto. Assim, os deslocamentos alvo foram todos iguais a um aumento de 7,5 centímetros no eixo z de referência. Os resultados estão na Tabela 4-27.

Tabela 4-27 - Indicadores Modelos Verticais Altura 3 para 4 x Dados Verticais Altura 3 para 4 para os Testes Finais

<i>Dados</i>		<i>Modelo</i>		Vert. 3 p/ 4:	Vert. 3 p/ 4:	Vert. 3 p/ 4:	Vert. 3 p/ 4:
		- 6 coefs.	- 5 coefs.	- 6 coefs.	- 5 coefs.	- Variáveis (7 fotos)	- Variáveis (7 fotos)
Vertical 3 p/ 4	Erro Rel. Médio	1,87%	1,98%	0,96%	1,91%		
	Erro Abs. Médio (cm)	0,14	0,15	0,07	0,14		

4.5.8 - Trajetórias Diagonais da Altura 1 para a Altura 4 (Teste Final)

Com o objetivo de criar cenários de teste para os modelos calculados a partir das fotos dos Testes Finais, foram organizados três grupos de fotos, representando três trajetórias diagonais. O movimento foi decomposto em um deslocamento horizontal sobre a reta de referência e outro ao suspender a câmera.

Com os modelos já calculados anteriormente, foram estimados os três deslocamentos compostos por -2,83 centímetros no eixo x e de 7,5 centímetros no eixo z para cada um dos três conjuntos. As fotos em questão refletiram o movimento diagonal em três situações: nas posições mais próximas da Posição Central, em posições intermediárias em relação ao percurso horizontal da câmera e nas posições horizontais mais extremas de tomadas de fotos. Desta forma obtiveram-se os seguintes conjuntos:

- **Central:** foto 1 na Altura 1, foto 2 na Altura 2, foto 3 na Altura 3 e foto 4 na Altura 4. Os índices 1 a 4 das fotos dizem respeito às suas posições horizontais;
- **Intermediário:** foto 8 na Altura 1, foto 9 na Altura 2, foto 10 na Altura 3 e foto 11 na Altura 4. Os índices 8 a 11 das fotos dizem respeito às suas posições horizontais;
- **Final:** foto 14 na Altura 1, foto 15 na Altura 2, foto 16 na Altura 3 e foto 17 na Altura 4. Os índices 14 a 17 das fotos dizem respeito às suas posições horizontais.

Com o objetivo de obter resultados mais precisos, os modelos de coeficientes variáveis para janelas de oito fotos foram aplicados sobre os dados de teste da forma especificada a seguir. É importante observar que neste projeto não foi utilizada nenhuma forma automatizada de escolha do melhor modelo variável de acordo com a

situação, apenas para este último teste eles foram escolhidos de forma visual para aplicação.

- **Para os dados de teste Central:** foram utilizados os modelos horizontais calculados a partir das fotos 1 a 8 e os modelos verticais calculados a partir das fotos 1 a 7 de cada conjunto de dados de treino;
- **Para os dados do teste Intermediário:**
 - Para o primeiro deslocamento foram utilizados os modelos horizontais calculados a partir das fotos 5 a 12 e os modelos verticais calculados a partir das fotos 6 a 12 de cada conjunto de dados de treino;
 - Para o segundo deslocamento foram utilizados os modelos horizontais calculados a partir das fotos 6 a 13 e os modelos verticais calculados a partir das fotos 7 a 13 de cada conjunto de dados de treino;
 - Para o terceiro deslocamento foram utilizados os modelos horizontais calculados a partir das fotos 7 a 14 e os modelos verticais calculados a partir das fotos 8 a 14 de cada conjunto de dados de treino.
- **Para os dados do teste Final:** foram utilizados os modelos horizontais calculados a partir das fotos 10 a 17 e os modelos verticais calculados a partir das fotos 11 a 17 de cada conjunto de dados de treino.

Com o objetivo de ilustrar os trajetos da câmera nos Testes Finais e os modelos aplicados sobre cada deslocamento diagonal, a Figura 4-4 mostra uma visão posterior das posições (círculos verdes) da câmera. As setas englobam o conjunto de fotos usadas para calcular os modelos variáveis utilizados no deslocamento da cor respectiva. Por exemplo, os três deslocamentos diagonais do conjunto central foram estimados no caso horizontal de coeficientes variáveis por modelos originados das fotos 1 a 8 de cada altura.

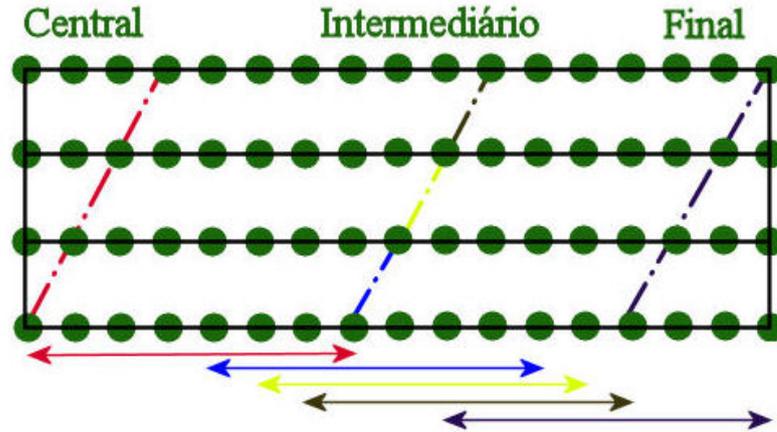


Figura 4-4 - Ilustração dos trajetos de modelagem e testes da câmera nos Testes Finais

As Tabelas 4-28 e 4-29 agrupam os resultados obtidos das aplicações dos quatro grupos de modelos horizontais e dos quatro grupos de modelos verticais sobre os três conjuntos de fotos que representam as trajetórias diagonais.

Em **negrito** está destacado para cada grupo o modelo mais eficiente (menores Erros Relativos Médios) na estimação em relação às três trajetórias diagonais. Note-se que os modelos variáveis em nenhuma situação foram destacados como melhores opções, obtendo de forma esporádica resultados satisfatórios.

Os modelos fixos de cinco coeficientes quase sempre obtiveram erros maiores do que os modelos de seis coeficientes, exceto para o Modelo Horizontal na Altura 3. Esta hegemonia foi coerente com a lógica estabelecida no projeto, que diminuiu o volume de informações base dos modelos para o caso de cinco coeficientes em relação ao de seis.

Como base de comparação, pode-se observar que os erros relativos aos Testes Finais foram inferiores ou compatíveis (de 5% a 20%) aos erros obtidos nos primeiros cenários de teste simplificados da Seção 4.3 (em torno de 20%). Então, mesmo com o aumento da complexidade das tomadas, a metodologia de aperfeiçoamento utilizada foi capaz de reduzir os erros.

Os modelos que obtiveram menores erros, o Horizontal na Altura 3 e o Vertical da Altura 2 para 3, foram os calculados a partir de fotos capturadas com a câmera em altura mais centralizada em relação ao *grid*. Adicionalmente, os dados de teste com melhores estimativas, foram os componentes do deslocamento diagonal mais próximo da Posição Central. Assim, é possível afirmar que quanto mais

centralizada a câmera em relação ao *grid*, as imagens capturadas tendem a produzir modelos e dados de teste mais precisos.

Tabela 4-28 - Indicadores Modelos Horizontais x Dados Horizontais Conjuntos Central, Intermediário e Final para os Testes Finais. Os Erros Relativos Médios em negrito retratam o modelo mais eficiente encontrado para cada conjunto de treino.

<i>Modelo</i>		<i>Dados</i>		Diagonal: - Central - Horizontal	Diagonal: - Intermediário - Horizontal	Diagonal: - Final - Horizontal
Horizontal - Altura 1	Erro Rel. Médio	6 coefs. fixos		21,20%	5,64%	10,22%
		5 coefs. fixos		25,54%	11,50%	19,88%
		6 coefs. vars.		39,99%	15,16%	53,91%
		5 coefs. vars.		52,46%	8,45%	16,07%
Horizontal - Altura 2	Erro Rel. Médio	6 coefs. fixos		13,82%	9,84%	12,87%
		5 coefs. fixos		19,99%	9,40%	14,49%
		6 coefs. vars.		18,21%	14,70%	23,05%
		5 coefs. vars.		38,98%	28,16%	28,57%
Horizontal - Altura 3	Erro Rel. Médio	6 coefs. fixos		12,21%	11,84%	5,38%
		5 coefs. fixos		8,44%	9,12%	5,66%
		6 coefs. vars.		135,56%	29,75%	23,08%
		5 coefs. vars.		11,18%	29,98%	42,10%
Horizontal - Altura 4	Erro Rel. Médio	6 coefs. fixos		12,50%	7,63%	8,87%
		5 coefs. fixos		19,19%	9,43%	15,80%
		6 coefs. vars.		34,65%	23,18%	25,56%
		5 coefs. vars.		49,67%	33,14%	28,53%

Tabela 4-29 - Indicadores Modelos Verticais x Dados Verticais Conjuntos Central, Intermediário e Final para os Testes Finais. Os Erros Relativos Médios em negrito retratam o modelo mais eficiente encontrado para cada conjunto de treino.

<i>Modelo</i>		<i>Dados</i>		Diagonal: - Central - Vertical	Diagonal: - Intermediário - Vertical	Diagonal: - Final - Vertical
Vertical - Altura 1 p/ 2	Erro Rel. Médio	6 coefs. fixos		22,72%	36,17%	35,92%
		5 coefs. fixos		23,59%	23,54%	21,56%
		6 coefs. vars.		43,94%	39,19%	300,54%
		5 coefs. vars.		48,65%	15,20%	12,33%
Vertical - Altura 2 p/ 3	Erro Rel. Médio	6 coefs. fixos		3,89%	5,25%	5,87%
		5 coefs. fixos		14,39%	19,02%	18,50%
		6 coefs. vars.		12,74%	2,12%	44,45%
		5 coefs. vars.		7,16%	12,01%	44,45%
Vertical - Altura 3 p/ 4	Erro Rel. Médio	6 coefs. fixos		10,51%	12,65%	9,95%
		5 coefs. fixos		15,14%	20,42%	17,65%
		6 coefs. vars.		5,84%	22,74%	25,00%
		5 coefs. vars.		7,34%	11,33%	25,00%

Capítulo 5 - Conclusões

Este projeto investigou uma modelagem algébrica com o objetivo de estimar o deslocamento espacial sofrido por uma câmera, a partir das fotos que a mesma processa.

No decorrer das experiências, puderam ser melhorados e documentados métodos que gradativamente aumentaram a qualidade dos modelos resultantes, a partir de um preparo mais específico e cuidadoso dos cenários. A confirmação desta evolução se mostrou através da diminuição do Erro Relativo Médio nos últimos testes nos quais se aplicaram modelos sobre Dados de Teste distintos dos Dados de Treino. Nas primeiras tomadas, os Erros Relativos para esse tipo de caso estavam em torno de 20% e nos Testes Finais, foram encontradas muitas possibilidades de estimação com erros abaixo de 10%.

Um dos pontos do método descrito cuja melhoria mais influenciaria o projeto de forma benéfica seria a marcação automática dos centros dos alvos. Este trabalho é muito penoso e toma muito tempo que poderia estar sendo utilizado para aumentar o número de Dados de Treino para criar modelos mais abrangentes. Como trabalho futuro, é sugerida a criação de algoritmos confiáveis de detecção automática das coordenadas horizontais e verticais dos centros do *grid*.

Quanto à modelagem fixa ou variável, pode-se dizer que o modelo de seis coeficientes pode ter o mesmo desempenho ou ser bem mais eficiente que o modelo de cinco coeficientes, o que já era um resultado esperado considerando-se que os cálculos para seis ponderações são mais ricos em dados sobre as fotos.

Foi mostrado também que os modelos são muito sensíveis à distância entre a origem de coordenadas e a câmera, já que os testes feitos com modelos calculados a uma distância e usados em outra geraram Erros Relativos Médios acima de 40%, como nas Tomadas 5 e 6.

Mais especificamente sobre a modelagem janelada de coeficientes variáveis, deve ser destacado que a mesma mostrou-se pouco eficiente para o caso específico de conjuntos de oito fotos, pois com frequência a pequena quantidade de dados não é suficiente para ajustar uma função abrangente o suficiente para satisfazer também os Dados de Teste. Assim, quando esses modelos são aplicados sobre Dados de Teste diferentes dos Dados de Treino, os resultados tendem a divergir do esperado pela alta

especialização do modelo. Nem mesmo a escolha de janelas mais centralizadas em relação aos deslocamentos ajudaram a reduzir os erros de forma vantajosa em relação aos modelos de coeficientes fixos.

Os Testes Finais mostram também que a estimação diagonal pode ser dividida com sucesso em uma estimação horizontal conjugada com uma estimação vertical, com Erro Relativo Médio para o deslocamento horizontal entre 5,66% e 9,12% utilizando-se do Modelo Horizontal na Altura 3 de cinco coeficientes fixos; e com Erro Relativo Médio para o deslocamento vertical entre 3,89% e 5,87% utilizando-se do Modelo Vertical da Altura 2 p/ 3 de seis coeficientes fixos.

Finalmente, um ponto a ser frisado é a possibilidade de abertura de novas frentes de estudo a partir deste projeto. Há muito trabalho a ser feito no sentido de propor modelos de coeficientes variáveis mais eficientes, possivelmente não-lineares, formas de deslocamento mais controladas da câmera e aplicações em sistemas de tempo real. Além disso, modelos que considerem rotações da câmera, poderiam ser propostos, já que neste trabalho a rotação não foi considerada.

Referências Bibliográficas

- [1] Silva, L. C. “Método Robusto para a Calibração de Câmeras em Estereofotogrametria”, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2003.
- [2] Strang, G., Linear Algebra and its Applications, 3^a Edição. Ed. Harcourt, Brace, Jovanovich, 1988.
- [3] Costa, G. G. B. “Interface para Controle de um Par de Câmeras Fotográficas Digitais para um Sistema de Visão Estéreo Computacional”, Projeto Final de Graduação, DEL/UFRJ, 2008.
- [4] Site oficial global da Canon: <http://www.canon.com>
- [5] Dados provenientes das Tomadas para Estimação de Deslocamento conduzidas em 2007/2008, Relatório Interno do PADS/COPPE/UFRJ, disponível em dois DVD's, 2008.