

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

Maurício Edgar Stivanello

**ALGORITMOS PARA MEDIÇÃO DE SUPERFÍCIES EM  
MOVIMENTO USANDO VISÃO 3D**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Dr. Ing.

Co-orientador: Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Ing.

Florianópolis

2013



Maurício Edgar Stivanello

## **ALGORITMOS PARA MEDIÇÃO DE SUPERFÍCIES EM MOVIMENTO USANDO VISÃO 3D**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Automação e Sistemas e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina.  
Florianópolis, 24/05/2013.

---

Jomi Fred Hübner, Dr.  
Coordenador do Curso

### **Banca Examinadora:**

---

Marcelo Ricardo Stemmer, Dr. Ing.,  
Orientador

---

Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Ing.,  
Co-orientador

---

Meinhard Sesselmann, Dr., UFMG

---

Hans Jorg Andreas Schneebeli, Ph.D., UFES

---

Analucia Vieira Fantin Pezzotta, Dra., UFSC

---

Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr., UFSC

---

Rômulo Silva de Oliveira, Dr., UFSC



*À Minha Família, Pelo Amor, Incentivo e Compreensão.*



*Não basta conquistar a sabedoria, é preciso usá-la.*

Cícero





## **AGRADECIMENTOS**

Aos Professores Marcelo Ricardo Stemmer e Armando Albertazzi Gonçalves Jr. pela orientação, apoio, confiança e paciência na realização deste e de outros trabalhos.

Aos colegas do S2I e do Labmetro pelo companheirismo e suporte prestados durante o desenvolvimento deste projeto.

Aos colegas e professores do PGEAS da UFSC, do programa PRH34 da ANP e da TU/e (Technische Universiteit Eindhoven) pela troca de conhecimentos e experiências.

À ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) e ao Programa Erasmus Mundus, pelas bolsas de estudo e mobilidade que viabilizaram a realização deste trabalho.



## RESUMO

A demanda por aplicações de robótica móvel vem crescendo consideravelmente nos últimos anos. Independente da natureza ou fim, robôs autônomos devem interagir com o mundo para alcançar seus objetivos. Para isto, de alguma maneira precisam obter informações a respeito do ambiente. Dentre diferentes abordagens existentes, bons resultados têm sido alcançados pelo emprego de sistemas de visão estereoscópica passiva. Esta abordagem, porém, ainda mostra-se pouco robusta para cenários estruturados onde existe a presença de objetos de intensidade homogênea ou texturas repetitivas. Por sua vez, métodos de medição por meios ópticos ativos têm apresentado resultados excelentes na caracterização de forma 3D. Porém, há limitações existentes no emprego destes sistemas relacionadas à medição rápida de objetos de formas complexas. Observa-se que sua utilização em aplicações onde não há garantia de estabilidade da plataforma do robô ou mesmo dos objetos sendo observados se torna difícil. Consequentemente, a medição de objetos complexos em ambientes dinâmicos, como é o caso de aplicações de robótica, não é um problema totalmente resolvido.

Com o objetivo de contribuir neste sentido, a presente proposta prevê o desenvolvimento de um sistema de medição 3D por meios ópticos para utilização em sistemas robotizados que permita a medição rápida de superfícies complexas em ambientes dinâmicos. No presente trabalho técnicas e algoritmos de medição por meios ópticos foram estudados, avaliados e desenvolvidos, procurando atender requisitos específicos relacionados com robótica. Neste contexto, foram levantadas técnicas e soluções clássicas para diferentes problemas relacionados com o tipo de aplicação tratada, e um sistema de medição 3D completo foi desenvolvido. Além da implementação e combinação de técnicas de referência, dois novos métodos relacionados com medição tridimensional foram propostos. Inicialmente, foi elaborado um novo método de correspondência a ser empregado em medições por estereoscopia passiva. Na abordagem proposta é utilizada a informação regional periférica de componentes de alta frequência, de modo a dar suporte à etapa de correspondência de pontos em regiões de intensidade homogênea. Outra proposta corresponde a um método de medição completo baseado em estereoscopia e projeção de franjas. Nesta abordagem, uma versão modificada da técnica de Perfilometria por Transformada de Fourier é combinada à técnica de batimento, de modo a se contornar as limitações originalmente existentes na medição de superfícies com descontinuidades ou saltos abruptos.

Os resultados obtidos demonstram a efetividade da utilização do sistema proposto na caracterização 3D de objetos e superfícies em ambientes dinâmicos.

**Palavras-chave:** correspondência, estereoscopia, medição 3D, projeção de franjas, robótica, visão computacional.

## ABSTRACT

The demand for mobile robotics applications has grown considerably in recent years. Regardless its nature or purpose, autonomous robots must interact with the world to achieve their goals. In order to do that, information about the environment must be retrieved. Among different approaches, good results have been achieved by using stereoscopic vision systems. However, problems are faced when operating on structured scenarios, where objects with homogeneous intensity or repetitive textures are found. In turn, active methods using structured light bring excellent results for 3D shape characterization. However, there are limitations related to rapid measurement of objects with complex shapes when using these methods. Thus, their use in applications becomes difficult where stability of the robot platform or even of the objects being observed is not guaranteed. Hence, fast measurement of complex objects for mobile robotics is not a solved problem.

In this work, the development of a 3D optical measurement system intended for robotic systems and allowing rapid measurement of complex surfaces in dynamic environments is described. Optical measurement techniques and algorithms were studied, evaluated and developed, seeking to meet specific requirements related to robotics. In this context, solutions and conventional techniques have been selected, in order to solve the various problems addressed by the application. These solutions were combined in a complete 3D measurement system. Besides the implementation and combination of standard techniques, two new methods relating to three-dimensional measurement were proposed. First, a new matching method aimed to be used in measurements by passive stereoscopy was developed. In the proposed approach, regional information provided by peripheral high frequency components is used in order to help the step of matching points in regions with homogeneous intensity. Then, a complete measurement method based on stereoscopy and fringe projection is proposed. Here, a modified version of the FTP technique is combined with the beating technique in order to circumvent the limitations when measuring surfaces with discontinuities or abrupt jumps.

The results demonstrate the effectiveness of using the proposed system for 3D characterization of objects.

**Keywords:** 3D measurement, computer vision, fringe projection, robotics, stereo matching, stereoscopy.



## LISTA DE FIGURAS

1	Recordes de profundidade na exploração marítima de petróleo	29
2	Sistema de medição empregado na engenharia de produtos (CAPTURE3D, 2009)	34
3	Sistema de medição empregado no controle de qualidade e reparo de turbinas (CAPTURE3D, 2009)	34
4	Classificação dos métodos de medição 3D	35
5	Máquina de medição por coordenadas (Esquerda) e Apalpador manual (Direita) (LEADER, 2009)	36
6	Classificação dos métodos de medição óptica	36
7	Geometria presente no modelo de câmera <i>pinhole</i>	38
8	Similaridade de triângulos na projeção de coordenadas <i>pinhole</i>	38
9	Transformação entre sistemas de coordenadas do mundo e da câmera	41
10	Gabarito empregado na calibração de câmeras	43
11	Modelo estéreo simplificado	46
12	Parâmetros extrínsecos e intrínsecos do sistema de visão estéreo (TRUCCO; VERRI, 1998)	48
13	Processo de correspondência por correlação de janelas	53
14	Normalização LOG - a,b)Original c,d)Filtrado	54
15	Reconstrução projetiva e métrica (TRUCCO; VERRI, 1998; HARTLEY; ZISSERMAN, 2003)	55
16	Reconstrução de ponto por triangulação (TRUCCO; VERRI, 1998)	56
17	Sistema de visão estereoscópica	57
18	Sistema de triangulação ativa por plano laser	58
19	Geometria básica de um sistema de medição laser por triangulação ativa	60
20	Cenário de calibração direta	62
21	Configuração de sistema de projeção de luz estruturada	63
22	Codificação de linhas por código cinza binário	63
23	Configuração de eixos ópticos cruzados (GORTHI; LOLLA, 2005)	65
24	Espectro de frequência espacial do padrão deformado	67
25	Metodologia de medição por FTP	69
26	a) Superfície empregada na simulação - b) Padrão senoidal projetado sobre superfície	69
27	a) Espectro das franjas de referência - b) Espectro das franjas distorcidas	70
28	a) Mapa de fase com salto - b) Mapa de fase com salto removido	70

29	Metodologia de medição por Deslocamento de Fase . . . . .	72
30	a) Superfície empregada na simulação - b) Padrões senoidais projetados sobre superfície . . . . .	73
31	a) Mapa de fase com salto - b) Mapa de fase com salto removido . . . . .	73
32	Esquema básico LIDAR . . . . .	74
33	Scanner LIDAR (Esquerda) / Modelo gerado com sistema LIDAR (Direita) (LEICA, 2009) . . . . .	75
34	Configuração básica proposta . . . . .	80
35	Fluxogramas simplificados de medições . . . . .	82
36	Sistema montado . . . . .	83
37	Cenário de calibração . . . . .	85
38	Apresentação do gabarito para calibração estéreo . . . . .	86
39	Retificação do par de imagens estéreo . . . . .	88
40	Correspondência por correlação de janelas (Método Simples - Método proposto com Suporte Regional) . . . . .	89
41	Reconstrução do cenário de calibração . . . . .	91
42	Espectros de um padrão de franjas separados por portadora . . . . .	94
43	Espectro isolado através de seleção por filtro passa-banda . . . . .	95
44	Função de batimento . . . . .	96
45	Função de ordem . . . . .	97
46	Fase absoluta baseada na função de ordem . . . . .	97
47	Fluxograma do procedimento de medição (FTP + Batimento) . . . . .	99
48	Fluxograma do procedimento de medição (Deslocamento de fase) . . . . .	101
49	Avaliação das distâncias entre linhas epipolares e vértices . . . . .	103
50	Base de imagens estéreo de referência . . . . .	105
51	Comparação dos mapas de disparidade calculados . . . . .	106
52	Tempos de processamento X Tamanho de janela (Otimizado e não otimizado) . . . . .	107
53	Verificação de consistência <i>Left-Right Check</i> . . . . .	107
54	Correspondência por Intensidade / Fase . . . . .	109
55	Reconstrução de mapa de disparidades . . . . .	110
56	Objetos de teste . . . . .	112
57	Objetos sob ponto de vista do sistema . . . . .	113
58	Fluxo de processamento para o algoritmo FTPBAT2 . . . . .	114
59	Filtragem para obtenção de mapa de fase . . . . .	115
60	Filtragem do mapa de fase por modulação . . . . .	116
61	Fluxo de processamento para o algoritmo FSBAT8 . . . . .	117
62	Mapas de fase absoluta (normalizados) . . . . .	118



63	Mapas de disparidade (normalizados) .....	119
64	Reconstrução e comparação de nuvens de pontos (mm) - Ma- nequim .....	121
65	Reconstrução e comparação de nuvens de pontos (mm) - De- graus .....	122
66	Reconstrução e comparação de nuvens de pontos (mm) - Porta	123
67	Avaliação Pontos-Plano .....	124
68	Padrão de franjas com multiplexação por cor .....	126
69	Sequência de medições utilizando projeção de apenas um padrão .....	127
70	Diagrama de classes (componentes principais) .....	129
71	Tela principal do sistema de medição .....	130
72	Módulo de visualização de nuvens de pontos .....	131
73	Bancada de medição laser construída .....	146
74	Medição com bancada laser .....	146
75	Sistema de Medição Estéreo Ativa utilizada nos estudos .....	147
76	Estudo de diferentes padrões projetados .....	148



## LISTA DE TABELAS

3.1	Especificação das câmeras utilizadas	81
3.2	Especificação das lentes utilizadas	82
3.3	Especificação do projetor utilizado	83
3.4	Distância entre vértices e linhas epipolares associadas (pixels)	103
3.5	Erro obtido no cálculo das disparidades (%)	105
3.6	Tempo de processamento obtidos no cálculo das disparidades (s)	106
3.7	Resultado da avaliação da qualidade da reconstrução	110
3.8	Algoritmos implementados	111
3.9	Correspondências incorretas	120
3.10	Diferença entre nuvens de pontos (mm)	124
3.11	Distâncias Ponto-Plano (mm)	125
3.12	Tempos de processamento por etapa (s)	127



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AUV	Veículo Submarino Autônomo, do inglês <i>Autonomous Underwater Vehicle</i> .
CCD	Dispositivo de Carga Acoplada, do inglês <i>Charge-Coupled Device</i> .
CMM	Máquina de Medição por Coordenadas, do inglês <i>Coordinate Measuring Machine</i> .
FFT	Algoritmo da Transformada Rápida de Fourier, do inglês <i>fast Fourier transform</i> .
FFTW	biblioteca com implementação dos algoritmos FFT e IFFT, do inglês <i>Fastest Fourier Transform in the West</i> .
FSBAT8	Algoritmo proposto implementado com base em técnicas convencionais, baseado na projeção consecutiva de 8 quadros, análise de franjas por deslocamento de fase, obtenção de fase absoluta por batimento e reconstrução de pontos por estereoscopia.
FTP	do inglês <i>Fourier Transform Profilometry</i> .
FTPBAT1	Algoritmo proposto, baseado na projeção combinada de dois padrões em 1 quadro através de multiplexação por cor, análise de franjas por FTP modificado, obtenção de fase absoluta por batimento e reconstrução de pontos por estereoscopia.
FTPBAT2	Algoritmo proposto, baseado na projeção consecutiva de 2 quadros, análise de franjas por FTP modificado, obtenção de fase absoluta por batimento e reconstrução de pontos por estereoscopia.
GPGPU	General-purpose Computing on Graphics Processing Units.
HOV	Veículo Submarino Tripulado por Humanos, do inglês <i>Human Occupied Vehicle</i> .
IFFT	Algoritmo da Transformada Inversa Rápida de Fourier, do inglês <i>Inverse Fast Fourier transform</i> .
LCD	Projetor de Cristal Líquido, do inglês <i>Liquid Crystal Display</i> .
LIDAR	do inglês <i>light direction and ranging</i> .
LOG	do inglês <i>Laplacian of Gaussian</i> .
LUT	Tabela de consulta, do inglês <i>Lookup Table</i> .
OpenCV	biblioteca com estruturas e rotinas para processamento de imagens e visão computacional, do inglês <i>Open Source Computer Vision</i> .
RADAR	do inglês <i>radio direction and ranging</i> .
ROV	Veículo Submarino Operado Remotamente, do inglês <i>Remotely Operated Underwater Vehicle</i> .

SAD	Soma das diferenças absolutas, do inglês <i>Sum of absolute differences</i> .
SIMD	<i>Single Instruction Multiple Data</i> .
SONAR	do inglês <i>sound navigation and ranging</i> .
SSD	Soma das diferenças quadráticas, do inglês <i>Sum of squared differences</i> .
UML	Unified Modeling Language.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	27
1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	29
1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES .....	30
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	31
<b>2 SISTEMAS DE MEDIÇÃO POR MEIOS ÓPTICOS</b> .....	33
2.1 SISTEMAS DE MEDIÇÃO 3D POR MEIOS ÓPTICOS .....	33
<b>2.1.1 Modelo Básico de Câmera</b> .....	37
2.1.1.1 Parâmetros Intrínsecos .....	39
2.1.1.2 Parâmetros Extrínsecos .....	40
2.1.1.3 Projeção Mundo-Imagem .....	41
2.1.1.4 Calibração Monocular .....	43
<b>2.1.2 Estereoscopia Passiva</b> .....	45
2.1.2.1 Parâmetros de um Sistema de Visão Estéreo .....	48
2.1.2.2 Calibração .....	49
2.1.2.3 Correspondência .....	50
2.1.2.4 Reconstrução .....	55
2.1.2.5 Exemplo de aplicação .....	57
<b>2.1.3 Triangulação Ativa por Projeção de Plano de Luz</b> .....	57
2.1.3.1 Identificação da Linha Laser .....	58
2.1.3.2 Estimação das Coordenadas 3D .....	59
<b>2.1.4 Triangulação Ativa por Projeção de Luz Codificada</b> .....	62
<b>2.1.5 Métodos Baseados em Projeção de Franjas</b> .....	64
2.1.5.1 Fourier Transform Profilometry .....	66
2.1.5.2 Deslocamento de Fase .....	71
<b>2.1.6 Tempo de Voo</b> .....	74
2.2 SUMÁRIO .....	76
<b>3 DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO 3D</b> .....	77
3.1 ESPECIFICAÇÃO E ANÁLISE DOS REQUISITOS .....	77
3.2 CONFIGURAÇÃO BÁSICA DO SISTEMA PROPOSTO .....	79
3.3 FUNCIONALIDADES E CARACTERÍSTICAS GERAIS .....	83
<b>3.3.1 Calibração do Sistema</b> .....	84
<b>3.3.2 Retificação do Par de Imagens Estéreo</b> .....	87
<b>3.3.3 Correspondência Estéreo</b> .....	87
<b>3.3.4 Reconstrução</b> .....	91
3.4 MÉTODOS DE MEDIÇÃO IMPLEMENTADOS .....	91

<b>3.4.1 Medição 3D Através de Estereoscopia Ativa por Projeção de Franjas Empregando FTP Modificado e Batimento . . . .</b>	<b>92</b>
3.4.1.1 Cálculo de Fase Absoluta Através de FTP Modificado e Técnica de Batimento . . . . .	92
3.4.1.2 Descrição Geral do Método de Medição Proposto . . . . .	98
<b>3.4.2 Medição Estereoscópica Ativa por Projeção de Franjas Baseado em Deslocamento de Fase . . . . .</b>	<b>100</b>
<b>3.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS . . . . .</b>	<b>102</b>
<b>3.5.1 Calibração do Sistema . . . . .</b>	<b>102</b>
<b>3.5.2 Correspondência Estéreo . . . . .</b>	<b>104</b>
<b>3.5.3 Reconstrução . . . . .</b>	<b>108</b>
<b>3.5.4 Avaliação dos Métodos de Medição . . . . .</b>	<b>110</b>
<b>3.5.5 Avaliação Geral do Sistema . . . . .</b>	<b>124</b>
<b>3.5.6 Utilização do Sistema em Medições Instantâneas . . . . .</b>	<b>125</b>
<b>3.5.7 Avaliação do Tempo de Processamento . . . . .</b>	<b>126</b>
<b>3.6 ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA E AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO UTILIZADO . . . . .</b>	<b>128</b>
<b>4 CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>133</b>
4.1 CONCLUSÕES . . . . .	133
4.2 PERSPECTIVAS FUTURAS . . . . .	134
<b>Referências bibliográficas . . . . .</b>	<b>143</b>
<b>Apêndice A – Experimentos e Testes Conceituais Realizados . . . .</b>	<b>145</b>
A.1 DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DE MEDIÇÃO POR TRIANGULAÇÃO LASER . . . . .	145
A.2 ESTUDO DE MEDIÇÃO COM DIFERENTES PADRÕES PROJETADOS . . . . .	147
<b>Apêndice B – Artigos Publicados . . . . .</b>	<b>149</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Já se passou o tempo em que a palavra robô lembrava manipuladores mecânicos inseridos em linhas de produção, realizando tarefas muito específicas e repetitivas. A robótica móvel quebrou este paradigma e hoje existem as aplicações mais diversas, com robôs das mais variadas formas e com diferentes finalidades. Esta realidade foi possível graças aos resultados obtidos por um grande número de pesquisas na área (IWASHITA Y. MURASE, 2005; BIEGELBAUER; VINCZE, 2006), pelo surgimento de ferramentas de desenvolvimento específicas (BRADSKI; KAEHLER, 2008; GERKEY; HOWARD, 2003) e pela popularização das técnicas e barateamento dos dispositivos que a viabilizam.

Automóveis autônomos começam a circular tanto em desertos como em cidades (CHEN *et al.*, 2004; WILLE; FORM, 2008; YOON, 2008). A indústria bélica investe pesado em projetos de pesquisa para criar exércitos de robôs (DASTUR, 2009; KAMNIK *et al.*, 2012; KEMKEMIAN, 2010a; KEMKEMIAN, 2010b). Vários robôs humanóides têm sido desenvolvidos, com funções que vão de serviços domésticos ao entretenimento (DROESCHEL, 2011; NG-THOW-HING, 2007; LIU, 2009; MICHEL, 2005; GAGALOWICZ, 1993). Os primeiros produtos comercializáveis também começam a aparecer, impulsionando o interesse pela área e financiando novos projetos.

Na indústria, estes dispositivos representam uma ferramenta essencial que permite a exploração ou realização de atividades em áreas antes inalcançáveis. Exemplo disso são as atividades realizadas em ambientes aquáticos. Cerca de 70% da superfície da Terra é coberta por oceanos. A exploração dos recursos marinhos apresenta-se como um caminho natural em uma época em que se observa o crescimento da população, e, conseqüentemente, do crescimento da demanda por recursos naturais. Seja no emprego como via de transporte, no desenvolvimento de atividades associadas à indústria de alimentos ou na exploração de minério, é inegável que a utilização consciente deste ambiente ainda pouco explorado traz benefícios diretos para a sociedade.

A exploração e desenvolvimento de atividades em rios, mares e oceanos têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologia e instrumentação apropriada para ambiente submerso. Exemplos de novas tecnologias incluem veículos tripulados por humanos capazes de atingir grandes profundidades (HOV), veículos operados remotamente (ROV), veículos submarinos autônomos (AUV) e uma diversidade de instrumentos capazes de realizar medições em ambiente submerso para a obtenção de dados sísmicos, acústicos, hidrotermais, dentre outros (BUDIYONO, 2009).

Especificamente na indústria de petróleo e gás, atividades como instalação, inspeção e manutenção de estruturas submarinas são de fundamental importância. No caso de linhas de transmissão de fluidos, por exemplo, procura-se identificar e eliminar defeitos como trincas, amassamentos, perda de espessura causada por corrosão, dentre outros (NEGAHDARIPOUR; FIROOZFAM, 2006).

A realização destes procedimentos no próprio local de operação representa uma economia significativa, visto que evita longas paradas na produção. Entretanto, uma série de complicações como operação em área classificada, ambiente molhado, grandes profundidades e presença de hidrocarbonetos devem ser contornadas. As dificuldades encontradas na intervenção local manual têm impulsionado o desenvolvimento de sistemas robotizados que sejam capazes de realizar os procedimentos nestas condições.

Estes sistemas robotizados submergíveis podem assumir diferentes configurações e serem equipados com diferentes sensores e atuadores. Geralmente permanecem conectados a uma estrutura na superfície, de onde são controlados remotamente por um operador. A orientação destes sistemas é normalmente realizada pela utilização de imagens bidimensionais fornecidas por um sistema de visão composto por câmeras de vídeo.

Para algumas aplicações específicas, entretanto, grande benefício pode ser obtido pela existência de informação tridimensional da estrutura que está sendo reparada ou inspecionada. Este é o caso de solda robotizada, onde se faz necessário calcular a trajetória espacial a ser seguida pelo braço robótico durante a sua operação. A estimação da forma tridimensional de estruturas pode ser realizada através do uso de sistemas de medição 3D por meios ópticos. O princípio geral de funcionamento destes sistemas é fazer uma amostragem do mensurando, criando um modelo digital que caracterize a superfície observada.

Desenvolver um sistema de medição 3D para ambientes como este representa um desafio considerável. Além das dificuldades provenientes da operação em ambiente submerso, outro obstáculo técnico compartilhado com diversas aplicações é a falta de garantia de estabilidade da plataforma do robô ou mesmo dos objetos sendo observados, ao longo do tempo (FITZGERALD, 1999; WHITCOMB, 2000). Muitos dos sistemas de medição empregados adquirem informação tridimensional baseando-se na aquisição de uma sequência de imagens ou na projeção de luz e captura de imagens ao longo do tempo. Desta forma, sua utilização em ambientes dinâmicos é impossibilitada. Outros sistemas, que permitem a realização de medições instantâneas, apresen-

tam a limitação de que não são possíveis medições em superfícies contendo descontinuidades ou saltos abruptos de profundidade.

Com o objetivo de contribuir neste sentido, a presente proposta corresponde ao desenvolvimento de um sistema de medição 3D por meios ópticos para utilização em sistemas robotizados que permite a medição de superfícies complexas em ambientes dinâmicos.

## 1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O domínio de tecnologia que permita a exploração de mares e oceanos é de fundamental importância para o Brasil, que possui uma fronteira marítima de mais de 7.000 quilômetros. O desenvolvimento de atividades neste meio ambiente representa uma oportunidade importante para o desenvolvimento do país. Este fato é confirmado pelas recentes descobertas das grandes reservas nacionais de petróleo, como é o caso da camada pré-sal do litoral brasileiro.

Na Indústria de Petróleo e Gás em particular, a crescente demanda por estes recursos têm impulsionado a produção para profundidades antes consideradas não economicamente ou tecnologicamente viáveis. Na Figura 1 é apresentada a evolução da profundidade de exploração marítima mundial de petróleo (TRIGGIA, 2001; WHITCOMB, 2000).



**Figura 1: Recordes de profundidade na exploração marítima de petróleo**

A pesquisa e desenvolvimento de sistemas robotizadas de operação submersa é de fundamental interesse para o Brasil, em função das profundidades cada vez maiores onde são descobertos os principais campos petrolíferos.

A automação das atividades que fazem parte da exploração de petróleo nestas condições mostra-se necessária, dadas as limitações existentes na intervenção humana em grandes profundidades.

O limite prático de intervenção por mergulhadores é em torno de 300 metros. Além destas profundidades as operações devem ser obrigatoriamente executadas por sistemas robotizados. Apesar da existência de diferentes sistemas já em operação, é de comum acordo que um melhor controle dos robôs e uma maior quantidade de informação do ambiente de operação devem ser alcançados (WHITCOMB, 2000; RICCI, 1990).

O desenvolvimento de um sistema de medição tridimensional rápido não só contribuiria para este cenário, como também contribuiria para diversas outras aplicações onde informação tridimensional de superfícies se faça necessária e onde exista a presença de restrições ao tempo de aquisição.

## 1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

O objetivo geral desta tese de doutorado foi estudar, avaliar e desenvolver técnicas e algoritmos de medição por meios ópticos, procurando atender requisitos específicos relacionados com robótica móvel. Diversos métodos foram organizados e implementados na forma de um sistema de visão computacional, que pode ser utilizado em diferentes aplicações.

Neste contexto, foram levantadas técnicas e soluções clássicas para diferentes problemas relacionados com o tipo aplicação tratada. Além da implementação e combinação de técnicas de referência, dois novos métodos relacionados com medição tridimensional foram propostos. Inicialmente, foi elaborado um novo método de correspondência a ser empregado em medições por estereoscopia passiva. Na abordagem proposta é utilizada a informação regional periférica de componentes de alta frequência, de modo a dar suporte à etapa de correspondência de pontos em regiões de intensidade homogênea. Outra proposta corresponde a um método de medição completo baseado em estereoscopia e projeção de franjas. Nesta abordagem, uma versão modificada da técnica *Fourier Transform Profilometry* (FTP) é combinada à técnica de batimento, de modo a se contornar as limitações originalmente existentes na medição de superfícies com descontinuidades ou saltos abruptos. Os resultados obtidos comprovam que a abordagem proposta representa um interessante compromisso entre precisão e velocidade de aquisição, se comparados os números de quadros necessários quando utilizadas técnicas convencionais.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2 é realizada uma revisão teórica sobre tópicos pertinentes ao desenvolvimento do sistema proposto, incluindo a descrição de diferentes técnicas de medição 3D. No Capítulo 3 é descrito o desenvolvimento de um sistemas de Medição 3D, onde são apresentadas a análise dos requisitos impostos ao sistema, a metodologia proposta para a solução de cada problema tratado e também a avaliação dos resultados obtidos. Finalmente, no Capítulo 4 são apresentadas as conclusões e as perspectivas para trabalhos futuros.



## 2 SISTEMAS DE MEDIÇÃO POR MEIOS ÓPTICOS

Sistemas de medição *3D* por meios ópticos são utilizados para diferentes fins, e podem ser construídos empregando técnicas de medição baseadas em diferentes abordagens. Independente da técnica de medição empregada, a aplicação desses sistemas em ambientes dinâmicos introduz desafios adicionais relacionados à falta de garantia de estabilidade do sistema ou do mensurando.

No presente Capítulo é realizada uma revisão teórica de assuntos importantes para o entendimento do problema e para a fundamentação da proposta de tese, descrita no Capítulo 3. Diferentes técnicas de medição por meios ópticos existentes, algumas das quais corresponderam a abordagens candidatas a serem utilizadas no desenvolvimento do sistema proposto neste trabalho, são apresentadas.

### 2.1 SISTEMAS DE MEDIÇÃO 3D POR MEIOS ÓPTICOS

Os sistemas de medição *3D* são dispositivos que obtêm informação a respeito da forma tridimensional de ambientes e objetos reais. Os dados obtidos são organizados de modo a formar um modelo tridimensional digital, que pode ser utilizado para diferentes fins. Dentre as aplicações mais comuns que fazem uso desta tecnologia estão a modelagem para filmes e jogos digitais, engenharia reversa, prototipagem, inspeção e controle de qualidade e documentação de objetos.

O princípio de funcionamento geral dos sistemas de medição *3D* é fazer uma amostragem do objeto de interesse, criando uma nuvem de pontos de amostras geométricas da superfície observada. Por um processo denominado reconstrução, estes pontos podem ser usados para extrapolar a forma do objeto. Em alguns sistemas ainda é possível obter informação a respeito da cor de cada ponto amostrado, o que permite a geração de modelos mais realistas.

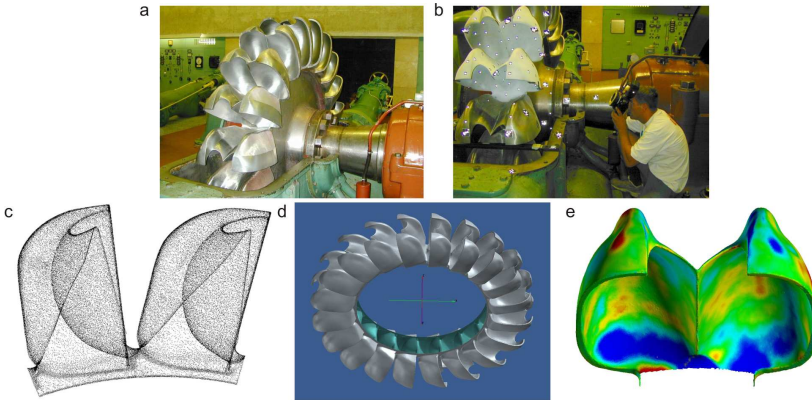
Na Figura 2 é ilustrado o emprego de um sistema de medição na engenharia de produtos. A sequência de imagens mostra diferentes etapas do processo de criação de um capacete personalizado para um piloto de Fórmula 1. Pela obtenção de um modelo tridimensional da cabeça do piloto, é possível criar um capacete mais ergonômico.

Na Figura 3 é mostrado o emprego de um sistema de medição na atividade de reparo de turbinas hidráulicas utilizadas em hidrelétricas. A partir de medições parciais (b) da turbina (a), nuvens de pontos são recuperadas (c). A



**Figura 2: Sistema de medição empregado na engenharia de produtos (CAPTURE3D, 2009)**

partir da união das nuvens de pontos é estimado um modelo tridimensional da peça (d), que finalmente pode ser utilizado na comparação com um modelo ideal, para avaliação do desgaste e do reparo das pás.

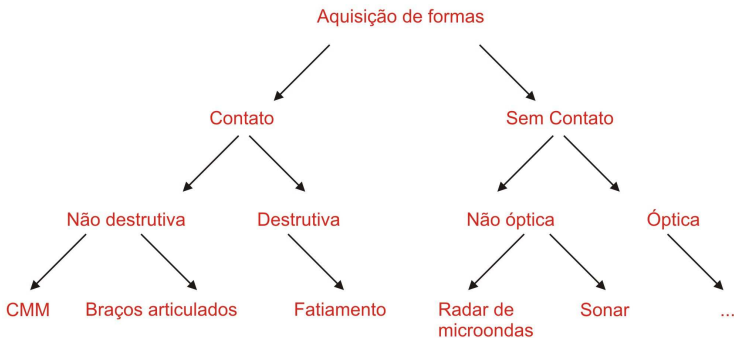


**Figura 3: Sistema de medição empregado no controle de qualidade e reparo de turbinas (CAPTURE3D, 2009)**

Como apresentado na Figura 4, os sistemas de medição 3D podem ser classificados de modo geral em duas classes principais: por contato e sem contato (LIMA, 2006; FANTIN, 1999). Os sistemas por contato avaliam o objeto de interesse através de contato físico. A desvantagem destes equipamentos é que requerem contato com o objeto sendo medido e, desta forma, o



objeto pode ser modificado ou danificado. Outra desvantagem é que são relativamente lentos quando comparados a outros métodos de medição. Mover o braço de medição empregado por muitos destes equipamentos é um procedimento lento, e mesmo os mais rápidos dispositivos podem operar apenas algumas dezenas de vezes por segundo.



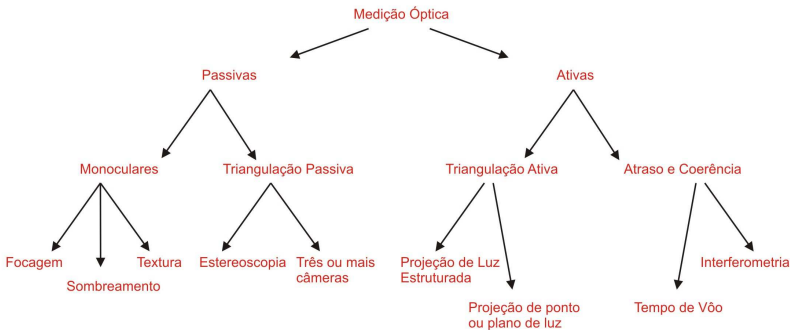
**Figura 4: Classificação dos métodos de medição 3D**

As Máquinas de Medição de Coordenadas (CMM) são um exemplo de sistemas por contato bastante utilizado na indústria. As CMMs são dispositivos de medição que utilizam um apalpador móvel rastreado por uma série de sensores ao longo dos seus eixos. Estes sensores podem rastrear o movimento e posição da sonda com incertezas muito pequenas, geralmente com erro máximo de poucos micrometros. Outro exemplo, menos caro, são os sistemas apalpadores manuais, utilizados na digitalização de modelos, principalmente na indústria de animação. Na Figura 5 é exibida uma máquina de medição de coordenadas (esquerda) e um apalpador manual (direita).

Os métodos sem contato podem, por sua vez, ser classificados em ativos e passivos, como pode ser observado na Figura 6. Os sistemas sem contato ativos emitem algum tipo de radiação e detectam sua reflexão de modo a avaliar um objeto ou cena. Os tipos de emissão mais comuns incluem luz, ultra-som ou raios X. Os sistemas sem contato passivos não emitem qualquer tipo de radiação, e ao invés disso são baseados na detecção da radiação naturalmente refletida pelo ambiente. A maioria das abordagens utiliza a luz visível, visto que é uma radiação comumente disponível. Entretanto, outros tipos de radiação, como infravermelho, podem ser utilizados.



**Figura 5: Máquina de medição por coordenadas (Esquerda) e Apalpador manual (Direita) (LEADER, 2009)**



**Figura 6: Classificação dos métodos de medição óptica**

A grande utilização de medição por meios ópticos é justificada por uma série de vantagens existentes. Este método é pouco invasivo, pode apresentar níveis de incerteza excelentes, gera um grande volume de dados e apresenta uma alta velocidade de medição.

Na sequência serão descritos diferentes tópicos relacionados à medição por meios ópticos. Inicialmente será apresentado o modelo de câmera, que corresponde ao principal componente presente em muitos dos sistemas

de medição. Em seguida, serão apresentados métodos de medição por meios ópticos, ativos e passivos.

### 2.1.1 Modelo Básico de Câmera

Um dos modelos utilizados para descrever o modo pelo qual um ponto no espaço é projetado no sensor de uma câmera é o modelo *pinhole* (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003; TRUCCO; VERRI, 1998). Conforme ilustrado na Figura 7, o modelo de câmera *pinhole* é composto por um plano de imagem  $\pi$  e por um ponto no espaço  $C$  que corresponde ao centro de projeção da câmera. A distância entre  $\pi$  e  $C$  é denominada distância focal, ou simplesmente  $f$ . A reta que passa por  $C$  e é perpendicular ao plano  $\pi$  é denominada como eixo óptico, e a intersecção  $c$  entre  $\pi$  e o eixo óptico é denominada como ponto principal. O sistema de coordenadas 3D cuja origem é  $C$  e onde o plano  $\pi$  é ortogonal ao eixo  $Z$  é conhecido como sistema de coordenadas da câmera.

Conforme ilustrado, um ponto no espaço  $M = [X, Y, Z]^T$  é mapeado ao ponto  $m$  no plano  $\pi$  onde a reta através de  $M$  e  $C$  intersecta o plano  $\pi$ .

Pela similaridade de triângulos exibida na Figura 8, é possível definir o mapeamento  $[fX/Z, fY/Z, f]^T$ , que descreve a projeção central de coordenadas do mundo para coordenadas no plano de imagem.

Ignorando a última coordenada, é possível descrever o mapeamento do espaço euclidiano 3D para o espaço euclidiano 2D como:

$$m = \left[ \begin{array}{cc} f\frac{X}{Z} & f\frac{Y}{Z} \end{array} \right]^T \quad (2.1)$$

Em muitos dos sistemas de medição por meios ópticos, os algoritmos utilizados na recuperação de informação do objeto observado precisam relacionar as coordenadas dos pontos 3D no ambiente com as coordenadas de sua projeção no plano da imagem. As equações acima apresentadas descrevem estas relações com base no sistema de coordenadas da câmera.

Muitas vezes, entretanto, o sistema de coordenadas de interesse é diferente do da câmera. O sistema de coordenadas de interesse pode ter a origem definida por um marco do ambiente e apresentar qualquer orientação, sendo assim denominado como sistema de coordenadas do mundo.

Além disso, nas equações da projeção de perspectiva apresentadas os pontos da imagem são expressos em unidades métricas. É essencial que as coordenadas dos pontos da imagem no sistema de coordenadas da câmera

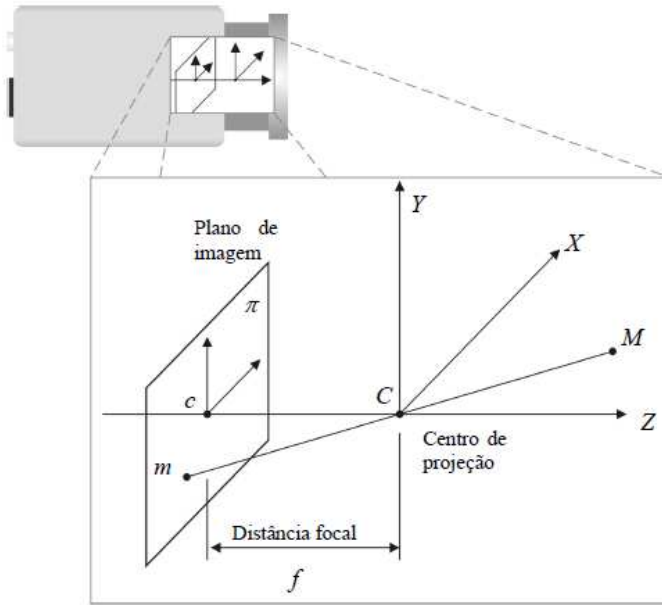


Figura 7: Geometria presente no modelo de câmera *pinhole*

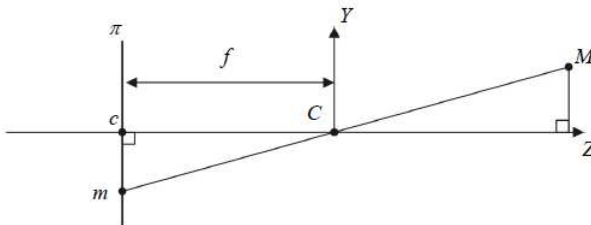


Figura 8: Similaridade de triângulos na projeção de coordenadas *pinhole*

possam ser recuperadas a partir das coordenadas inteiras em pixel, já que são as únicas diretamente disponíveis a partir da imagem.

Considerando as coordenadas em pixel disponíveis na imagem é possível definir um novo sistema de coordenadas denominado sistema de coordenadas da imagem. Por todas estas considerações, faz-se necessário conhecer algumas das características e relacionamentos das câmeras utilizadas, denominadas como parâmetros intrínsecos e parâmetros extrínsecos.

Nas seções seguintes são apresentadas as equações básicas que descrevem os parâmetros intrínsecos e extrínsecos e a transformação de coordenadas entre os diferentes sistemas de coordenadas. O problema de estimar os valores destes parâmetros, denominado calibração de câmera, também será tratado.

### 2.1.1.1 Parâmetros Intrínsecos

Os parâmetros intrínsecos relacionam as coordenadas em pixel de um ponto no sistema de coordenadas da imagem com as correspondentes coordenadas no sistema de coordenadas da câmera. Estes parâmetros descrevem as características ópticas, geométricas e digitais da câmera utilizada. Para o modelo de câmera *pinhole*, é possível considerar três conjuntos de parâmetros intrínsecos principais.

O primeiro conjunto é formado apenas pelo parâmetro  $f$ , ou distância focal, introduzida na descrição da projeção de perspectiva.

O segundo conjunto de parâmetros é diretamente empregado na transformação entre coordenadas do sistema de coordenadas da câmera e coordenadas em pixel do sistema de coordenadas da imagem. Esta transformação é descrita pelas equações 2.2 e 2.3, onde são ignoradas possíveis distorções geométricas introduzidas pelo sistema óptico. Nestas equações,  $(c_x, c_y)$  representam as coordenadas do ponto principal no sistema de coordenadas da imagem,  $(s_x, s_y)$  representam o tamanho efetivo do pixel em milímetros na horizontal e na vertical e  $(x_{img}, y_{img})$  são as coordenadas de um ponto no sistema de coordenadas da imagem correspondendo às coordenadas  $(x_{cam}, y_{cam})$  de um ponto no sistema de coordenadas da câmera.

$$x_{cam} = -(x_{img} - c_x) s_x \quad (2.2)$$

$$y_{cam} = -(y_{img} - c_y) s_y \quad (2.3)$$

A mudança de sinal presente nas equações acima se deve ao fato de que os eixos horizontal e vertical do sistema de coordenadas da câmera e do sistema de coordenadas da imagem possuem orientação oposta.

O terceiro conjunto de parâmetros intrínsecos está relacionado com as distorções geométricas introduzidas pelo conjunto óptico utilizado. Em função da qualidade das lentes utilizadas, o conjunto óptico pode introduzir distorções que geralmente são evidenciadas na região periférica da ima-

gem. Estas distorções podem ser modeladas com certa precisão como simples distorções radiais, de acordo com as relações descritas pelas equações 2.4 e 2.5, onde  $(x_d, y_d)$  são as coordenadas dos pontos distorcidos, onde  $r^2 = x_d^2 + y_d^2$  e onde  $k_1$  e  $k_2$  correspondem aos coeficientes de distorção.

$$x_{cam} = x_d (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (2.4)$$

$$y_{cam} = y_d (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (2.5)$$

Nestas equações, a distorção consiste em um deslocamento radial nos pontos da imagem. Este deslocamento é nulo no centro da imagem, e aumenta com o distanciamento do centro da imagem. Observa-se que como os valores de  $k_1$  e  $k_2$  são normalmente muito pequenos, a distorção radial pode ser ignorada quando alta precisão não é necessária em todas as regiões da imagem.

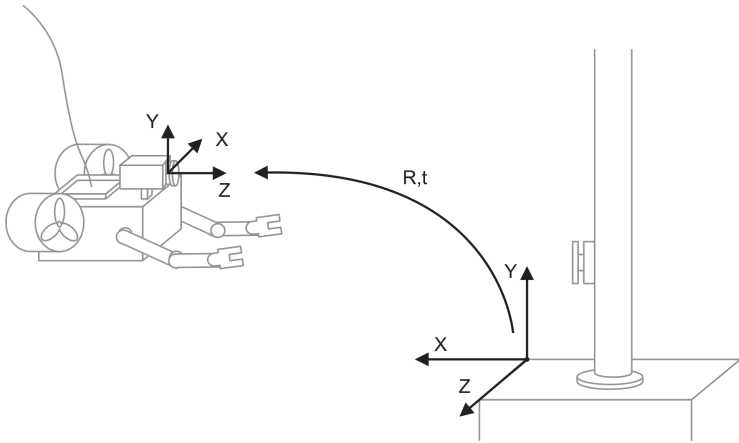
Finalmente, o conjunto de parâmetros intrínsecos é formado por  $f$ ,  $c_x$ ,  $c_y$ ,  $s_x$ ,  $s_y$ ,  $k_1$  e  $k_2$ .

### 2.1.1.2 Parâmetros Extrínsecos

Considerando apenas o sistema de coordenadas da câmera é possível escrever as equações fundamentais da projeção perspectiva de maneira simplificada, conforme apresentado na equação 2.1. Porém, o sistema de coordenadas da câmera é muitas vezes desconhecido, e um problema comum é determinar a sua localização e orientação em relação a outro sistema de coordenadas utilizando somente informações da imagem. Os parâmetros extrínsecos são definidos como o conjunto de parâmetros geométricos que descrevem a transformação entre o sistema de coordenadas da câmera e o sistema de coordenadas do mundo conhecido.

Esta transformação é especificada através de um vetor de translação  $t$  e uma matriz de rotação  $R$ . O vetor de translação  $t$  descreve a posição relativa entre as origens dos dois sistemas de coordenadas. A matriz  $3 \times 3$  de rotação  $R$  descreve a orientação relativa entre os eixos dos dois sistemas de coordenadas. Esta transformação é ilustrada na Figura 9.

Assim sendo, a relação entre as coordenadas de um ponto no sistema



**Figura 9: Transformação entre sistemas de coordenadas do mundo e da câmera**  
de coordenadas do mundo e no sistema de coordenadas da câmera,  $W$  e  $M$  respectivamente, é dada por:

$$M = R(W - t) \quad (2.6)$$

### 2.1.1.3 Projeção Mundo-Imagem

A partir dos parâmetros e relacionamentos do modelo de câmera *pinhole* apresentados é possível descrever as relações que permitem o mapeamento direto das coordenadas de um ponto 3D no ambiente com as coordenadas em pixel da projeção deste ponto na imagem, sem explicitamente referenciar o sistema de coordenadas da câmera.

Já foram definidos os dois passos necessários para a projeção mundo-imagem. Com os parâmetros extrínsecos é possível realizar a transformação entre o sistema de coordenadas do mundo e o sistema de coordenadas da câmera. Com os parâmetros intrínsecos, é possível realizar a transformação entre o sistema de coordenadas da câmera e o sistema de coordenadas da imagem. Ignorando a ocorrência de possíveis distorções radiais e substituindo as equações 2.2, 2.3 e 2.6 na equação 2.1 são obtidas as equações 2.7 e 2.8, que relacionam as coordenadas de um ponto 3D no mundo com as coordenadas do

ponto correspondente na imagem, onde  $R_n, n = 1, 2, 3$  é um vetor 3D formado pela  $n$ -ésima linha da matriz  $R$ .

$$-(x_{im} - c_x) s_x = f \frac{R_1^T (W - t)}{R_3^T (W - t)} \quad (2.7)$$

$$-(y_{im} - c_y) s_y = f \frac{R_2^T (W - t)}{R_3^T (W - t)} \quad (2.8)$$

Embora possamos usar as equações 2.7 e 2.8 diretamente, é conveniente expressá-las na forma de produto entre matrizes lineares. Para isso, é possível definir as matrizes apresentadas em 2.9 e 2.10, onde  $A$  depende somente de parâmetros intrínsecos e  $[R|t]$  depende somente de parâmetros extrínsecos.

$$A = \begin{bmatrix} -f/s_x & 0 & c_x \\ 0 & -f/s_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$[R|t] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & -R_1^T t \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & -R_2^T t \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & -R_3^T t \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

A equação matricial linear que descreve a projeção de perspectiva empregando as matrizes lineares definidas acima é dada por:

$$\tilde{m} \cong A [R|t] \tilde{W} \quad (2.11)$$

onde  $\tilde{W}$  corresponde a  $W$  empregando 1 como a quarta coordenada,  $\tilde{m}$  representa em coordenadas homogêneas a projeção de  $W$  no plano projetivo  $\pi$  e onde  $\cong$  é empregado para indicar que os dois lados da igualdade podem diferir por uma constante não-nula desconhecida, já que se trata de uma equação homogênea.

Finalmente, sendo  $\tilde{m} = [u, v, w]^T$ , as coordenadas do ponto  $W$  no sistema de coordenadas da imagem podem ser obtidas pela equação 2.12, completando desta forma a descrição do processo de formação de imagem.

$$W = \left[ \begin{array}{cc} \frac{u}{w} & \frac{v}{w} \end{array} \right]^T \quad (2.12)$$

É importante observar que frequentemente o mapeamento acima des-



critério é representado empregando a matriz de projeção (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003) dada por:

$$P \cong A [R|t] \quad (2.13)$$

Para este caso, a equação 2.11 deve ser reescrita como:

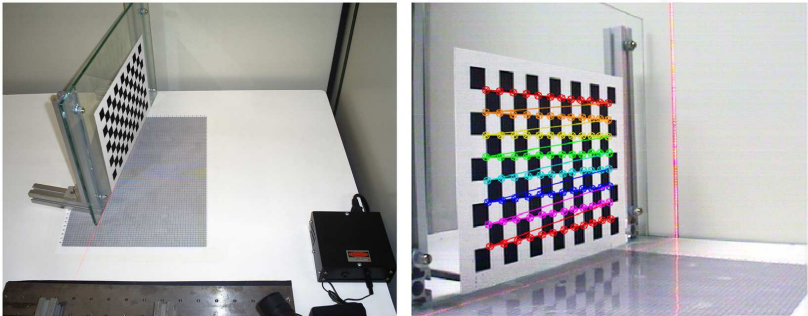
$$\tilde{m} \cong P\tilde{W} \quad (2.14)$$

#### 2.1.1.4 Calibração Monocular

A calibração de uma câmera consiste na determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos que, conforme discutido anteriormente, correspondem às características geométricas e ópticas internas da câmera e da sua orientação e posicionamento em relação ao sistema de coordenadas do mundo.

Diversos métodos de calibração encontram-se disponíveis. Enquanto alguns destes seguem a abordagem de auto-calibração, empregando elementos estruturais da cena como segmentos de reta e vértices diretamente, a maioria realiza a calibração empregando um gabarito cuja geometria é conhecida ( TSAI, 1987; ZHANG, 2000; FRANÇA; FRANÇA, 2007).

Na Figura 10 é apresentado um gabarito plano, empregado em calibrações. Neste exemplo, o gabarito está sendo utilizado para calibrar um sistema de medição a laser. O grande benefício ao empregar gabaritos de geometria conhecida é que as projeções de seus pontos característicos nas imagens capturadas pela câmera são mais facilmente detectadas.



**Figura 10:** Gabarito empregado na calibração de câmeras

Seguindo esta abordagem, são necessárias ao procedimento de calibração as coordenadas no sistema de coordenadas do mundo de pontos característicos de um gabarito e uma imagem contendo o gabarito, capturada pela câmara a ser calibrada. Inicialmente são empregadas técnicas para a extração de características da imagem, como vértices e contornos, a fim de identificar os pontos candidatos às projeções de pontos do gabarito. Tomando o conjunto de pontos característicos extraídos, faz-se uso de restrições particulares ao gabarito utilizado para corresponder cada ponto 3D do gabarito com o respectivo ponto 2D da imagem. Como resultado desta etapa obtém-se  $n$  pares formados por pontos do mundo  $(X_i, Y_i, Z_i) | i = 1, \dots, n$  e suas respectivas projeções no plano de imagem  $(x_i, y_i, z_i) | i = 1, \dots, n$ .

Conforme introduzido pela equação 2.14, a transformação das coordenadas do sistema de coordenadas do mundo em coordenadas do sistema de coordenadas da imagem pode ser escrita empregando a matriz de projeção  $P$  como:

$$\begin{bmatrix} \lambda x_i \\ \lambda y_i \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Sendo  $\lambda$  um fator de escala de um dos elementos da matriz de projeção, é possível igualar  $p_{34}$ , por exemplo, a 1 sem perda de generalidade. Desta forma, restam somente onze parâmetros a serem determinados no processo de calibração.

Expandindo a equação 2.15 é possível obter:

$$\begin{cases} p_{11}X_i + p_{12}Y_i + p_{13}Z_i + p_{14} = \lambda x_i \\ p_{21}X_i + p_{22}Y_i + p_{23}Z_i + p_{24} = \lambda y_i \\ p_{31}X_i + p_{32}Y_i + p_{33}Z_i + 1 = \lambda \end{cases} \quad (2.16)$$

onde substituindo a última equação nas duas primeiras e eliminando  $\lambda$  é possível obter:

$$\begin{cases} p_{11}X_i + p_{12}Y_i + p_{13}Z_i + p_{14} - p_{31}X_i x_i - p_{32}Y_i x_i - p_{33}Z_i x_i = x_i \\ p_{21}X_i + p_{22}Y_i + p_{23}Z_i + p_{24} - p_{31}X_i y_i - p_{32}Y_i y_i - p_{33}Z_i y_i = y_i \end{cases} \quad (2.17)$$

Torna-se viável reformular o problema como um sistema de equações lineares na forma  $A\phi = b$ , apresentado na equação 2.18, onde  $A$  é uma matriz

$2n \times 11$ ,  $\phi$  é um vetor contendo as 11 incógnitas da matriz de projeção  $P$  e onde  $b$  é um vetor  $2n$ , sendo  $A$  e  $b$  obtidos a partir dos pontos de calibração.

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_1x_1 & -Y_1x_1 & -Z_1x_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -X_1y_1 & -Y_1y_1 & -Z_1y_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_i & Y_i & Z_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_ix_i & -Y_ix_i & -Z_ix_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_i & Y_i & Z_i & 1 & -X_iy_i & -Y_iy_i & -Z_iy_i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_nx_n & -Y_nx_n & -Z_nx_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -X_ny_n & -Y_ny_n & -Z_ny_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{11} \\ p_{12} \\ \dots \\ p_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \dots \\ x_i \\ y_i \\ \dots \\ x_n \\ y_n \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Com onze incógnitas e cada ponto conhecido fornecendo duas equações ao sistema, são necessários pelo menos seis pontos para calcular  $P$ . A estimativa  $\hat{\phi}$  dos valores de  $\phi$ , e logo de  $P$ , pode ser obtida através de otimização pelo método dos mínimos quadrados:

$$\hat{\phi} =_{\phi} \min \|A\phi - b\|^2 \quad (2.19)$$

ou, na forma matricial:

$$\hat{\phi} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (2.20)$$

Caso seja necessário, os parâmetros extrínsecos e intrínsecos podem ainda ser isolados a partir da matriz  $P$  (TRUCCO; VERRI, 1998).

O método descrito ignora possível influência de distorção radial. Muitos métodos consideram esta influência empregando modelos de câmera não lineares. O método simplificado acima descrito apresenta ainda o inconveniente de que a informação de calibração somente será válida no volume em torno da posição dos pontos pertencentes ao gabarito de calibração utilizado. Por esta razão, alguns métodos incluem na calibração pontos correspondentes do padrão tomados em diferentes instantes e posições (ZHANG, 2000).

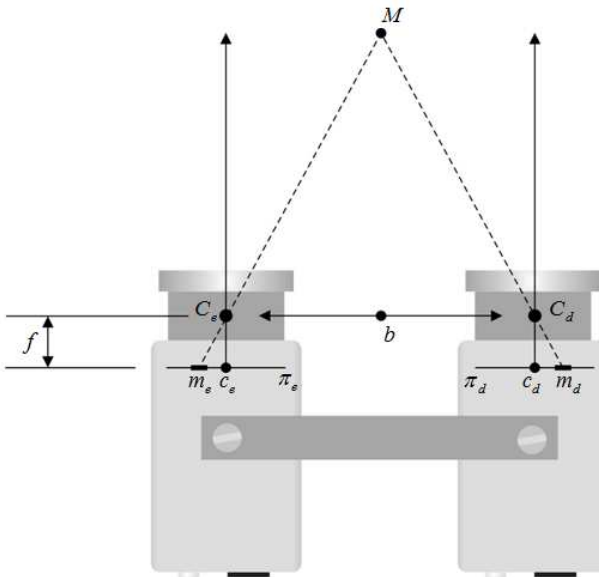
## 2.1.2 Estereoscopia Passiva

Na Seção 2.1.1 é descrito o modelo de câmera *pinhole* como o dispositivo que projeta pontos do espaço 3D em pontos em um plano de imagem. Este processo não é reversível, visto que um ponto  $m$  no plano de imagem pode corresponder à projeção de qualquer ponto sobre uma determinada reta no espaço. Por este motivo, os sistemas de visão estereoscópica fazem uso

de uma segunda câmera para introduzir a restrição adicional necessária para que seja possível realizar o processo de reconstrução, recuperando assim as coordenadas de um ponto no espaço de maneira unívoca.

Através de um sistema de visão estereoscópica é possível recuperar a informação de profundidade de um dado ponto no espaço a partir da distância relativa entre dois pontos que o representam em imagens capturadas sob diferentes pontos de vista. Esta distância é denominada disparidade, e foi originalmente utilizada para descrever a diferença na localização de pontos característicos observados pelo olho esquerdo e pelo olho direito do sistema visual humano (SCHARSTEIN; SZELISKI, 2002).

O modelo exibido na Figura 11 apresenta a geometria básica presente em um sistema de visão estereoscópica composto por duas câmeras do modelo *pinhole*.



**Figura 11: Modelo estéreo simplificado**

Neste modelo simplificado (TRUCCO; VERRI, 1998), os planos de imagem das câmeras da esquerda  $\pi_e$  e da direita  $\pi_d$  são coplanares e seus eixos ópticos são paralelos, o que significa que a intersecção dos mesmos encontra-se infinitamente distante das câmeras. Os centros de projeção  $C_e$  e  $C_d$  são

separados por uma distância denominada linha de base, ou  $b$ , perpendicular aos eixos óticos.

É possível determinar a posição de  $M$  no espaço por triangulação, ou seja, pela intersecção dos raios definidos pelos centros de projecção e as imagens de  $M$ ,  $m_e$  e  $m_d$ .

Sejam  $x_e$  e  $x_d$  as coordenadas de  $m_e$  e  $m_d$  em relação aos pontos principais  $c_e$  e  $c_d$ ,  $f$  a distância focal e tomando o ponto equidistante aos centros de projecção das duas câmeras como a origem do sistema de coordenadas a qual  $M$  pertence. Por similaridade de triângulos ( $m_e, M, m_d$ ) é possível observar que a profundidade do ponto  $M$  pode ser calculada por:

$$Z = f \frac{b}{d} \quad (2.21)$$

onde  $d$  corresponde à disparidade, que por sua vez é dada por:

$$d = x_d - x_e \quad (2.22)$$

Desta forma, a profundidade é inversamente proporcional à disparidade. É importante notar que esta característica tem efeito sobre a incerteza da profundidade recuperada, onde a posição recuperada para objetos mais próximos será mais exata do que a posição recuperada para objetos mais distantes.

É possível observar ainda que, como a dimensão  $x$  é definida como sendo ao longo da linha que liga os centros dos pontos principais das imagens, qualquer ponto projetado sobre ambas as imagens aparecerá na mesma altura, ou na mesma coordenada para a dimensão  $y$ . Desta forma torna-se possível ignorar a dimensão  $y$  na recuperação da profundidade por triangulação.

A configuração de sistema de visão estereoscópica assumida neste modelo simplificado dificilmente é alcançada na prática, uma vez que é muito difícil construir um sistema binocular onde as câmeras estejam exatamente alinhadas conforme apresentado. Por este motivo são empregados os recursos de calibração do conjunto estéreo de maneira a compensar as diferenças obtidas.

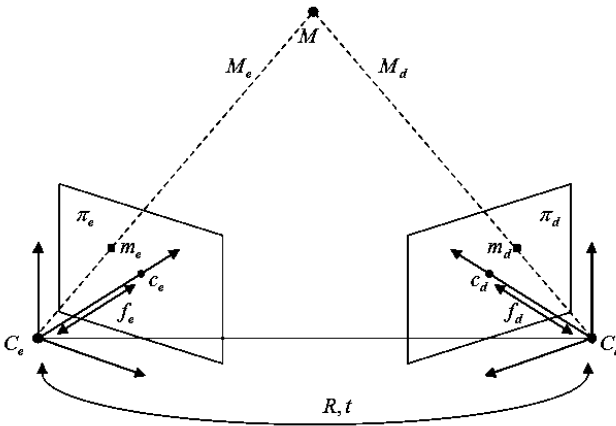
Com base neste modelo e considerações, é possível verificar que a informação de profundidade pode ser obtida a partir de um sistema de visão estereoscópica pelo tratamento de três problemas principais: calibração, correspondência e reconstrução. Na calibração procura-se determinar os parâmetros que descrevem o sistema de aquisição utilizado. O problema da correspondência consiste em determinar qual elemento na imagem capturada sob um ponto de vista corresponde a um dado elemento na imagem capturada

sob outro ponto de vista. Por sua vez, através da reconstrução procura-se recuperar a informação de profundidade com base nos parâmetros obtidos na etapa de calibração e nos pares de pontos correspondentes obtidos na etapa de correspondência.

Na sequência, cada um destes problemas e soluções são discutidos em maiores detalhes.

### 2.1.2.1 Parâmetros de um Sistema de Visão Estéreo

Assim como no modelo de câmera *pinhole*, os parâmetros de um sistema de visão estereoscópica podem ser divididos como intrínsecos e os extrínsecos (TRUCCO; VERRI, 1998). Estes parâmetros são apresentados na Figura 12. Observe que na ilustração, por simplicidade, os planos de imagens estão representados entre o ponto observado e os centros de projeção. Apesar de esta representação estar distante da realidade, as relações matemáticas são preservadas e os modelos são formalmente equivalentes.



**Figura 12: Parâmetros extrínsecos e intrínsecos do sistema de visão estéreo (TRUCCO; VERRI, 1998)**

Neste caso, os parâmetros intrínsecos correspondem aos mesmos presentes no modelo *pinhole* para cada uma das câmeras que compõe o sistema, e são utilizados para mapear as coordenadas de pontos do sistema de coordenadas da imagem para o sistema de coordenadas da câmera, e vice-versa.

Um conjunto mínimo de parâmetros intrínsecos inclui, para cada câmera, as coordenadas do ponto principal ( $c_e$  e  $c_d$ ) e a distância focal ( $f_e$  e  $f_d$ ).

Os parâmetros extrínsecos diferem ligeiramente dos parâmetros presentes no modelo de câmera *pinhole*. Para um sistema de visão estéreo, eles descrevem a transformação que relaciona os sistemas de coordenadas das duas câmeras um ao outro, definida por um vetor de translação,  $t = (C_d - C_e)$ , e uma matriz de rotação  $R$ .

A relação entre os vetores  $M_e = [X_e, Y_e, Z_e]^T$  e  $M_d = [X_d, Y_d, Z_d]^T$  que se referem ao mesmo ponto  $M$  no espaço, representado nos sistemas de coordenadas das câmeras esquerda e direita é dada por:

$$M_d = R(M_e - t) \quad (2.23)$$

Seja  $t_e$ ,  $R_e$ , e  $t_d$ ,  $R_d$  os parâmetros extrínsecos das duas câmeras que compõe o sistema, é possível obter os parâmetros extrínsecos do sistema de visão estereoscópica através das equações 2.24 e 2.25.

$$R = R_d R_e^T \quad (2.24)$$

$$t = t_e - R^T t_d \quad (2.25)$$

Além destes parâmetros, um importante relacionamento geométrico existente entre duas imagens de uma mesma cena tridimensional é descrito pela geometria epipolar (TRUCCO; VERRI, 1998). Segundo a geometria epipolar, os pontos correspondentes nas imagens estéreo devem aparecer em linhas particulares das imagens. Dado um ponto em uma imagem de um par estéreo, é possível encontrar seu ponto correspondente na outra imagem sobre uma linha específica, e não sobre toda imagem. Isto reduz significativamente a complexidade do problema de correspondência, a ser descrito na Seção 2.1.2.3.

### 2.1.2.2 Calibração

A calibração de um sistema de visão estereoscópica consiste na determinação dos parâmetros intrínsecos, orientação e posicionamento das câmeras que o compõe. Quando o sistema de visão estereoscópica é rígido, cujos parâmetros não são alterados durante a operação do sistema, normalmente a calibração é realizada como uma etapa preliminar à operação do sistema. Já para os casos onde durante a operação do sistema podem ocorrer mudança de parâmetros intrínsecos ou extrínsecos como resultado de

operações como foco e zoom, é comum empregar uma técnica denominada auto-calibração (FRANÇA, 2005), onde não existe uma etapa inicial para determinação dos parâmetros do conjunto. Ao invés disso, a estimação dos parâmetros necessários é realizada durante a operação do sistema. Este tipo de calibração é bastante flexível, porém nem sempre são obtidos resultados confiáveis.

De modo geral, é possível classificar os métodos de calibração como fortes (calibração clássica) ou fracos (calibração projetiva). A calibração forte refere-se à determinação tanto dos parâmetros intrínsecos como dos parâmetros extrínsecos, possibilitando assim uma reconstrução métrica dos pontos do mundo. Já na calibração fraca, apenas a geometria epipolar do sistema é determinada, sendo que desta forma apenas uma reconstrução projetiva é possível (TRUCCO; VERRI, 1998).

Na calibração clássica, os parâmetros intrínsecos do sistema de visão estereoscópica são formados pelos parâmetros intrínsecos de cada câmera que compõe o sistema, e cujo conjunto mínimo inclui as coordenadas dos pontos principais e as distâncias focais. Os parâmetros extrínsecos, por sua vez, são calculados diretamente pelas equações 2.24 e 2.25 empregando os parâmetros extrínsecos obtidos para cada câmera do sistema.

### 2.1.2.3 Correspondência

Como descrito anteriormente, é possível recuperar informação de profundidade a partir da disparidade. Para determinar a disparidade é necessário corresponder elementos contidos nas imagens capturadas, identificando pontos da imagem da esquerda e da imagem da direita que correspondem à projeções do mesmo ponto na cena tridimensional observada.

Este processo, denominado correspondência, é um dos tópicos mais pesquisados em visão computacional, e é uma das principais questões a serem tratadas na estereoscopia (SCHARSTEIN; SZELISKI, 2002). Oclusões, diferenças na iluminação, distorções projetivas e texturas pobres são apenas alguns dos fatores que tornam o problema de correspondência uma tarefa complexa.

Para realizar a correspondência de pontos, duas questões principais precisam ser consideradas: qual elemento será correspondido e qual será o critério de similaridade empregado. Com base em quais elementos serão correspondidos, é possível classificar os vários métodos de correspondência em duas classes principais: os métodos de correspondência densa e os métodos de correspondência esparsa. Os métodos de correspondência densa procuram



corresponder todos os pontos das imagens. Por sua vez, os métodos de correspondência esparsa realiza a correspondência a um reduzido conjunto de pontos relevantes.

Os métodos de correspondência densa são particularmente interessantes, visto que proveem uma grande quantidade de informação a respeito da cena observada. Para os algoritmos que implementam esta abordagem, a entrada é um par de imagens capturado com o sistema binocular, normalmente retificado (SCHARSTEIN; SZELISKI, 2002). A retificação de um par de imagens estéreo se refere à aplicação de transformações geométricas nas imagens de modo a alinhar as linhas epipolares (TRUCCO; VERRI, 1998). Estas transformações, baseadas nos parâmetros de calibração, reduzem o processo de correspondência de um problema de busca 2D para um problema de busca 1D.

Selecionando como referência uma das imagens retificadas do par estéreo, para cada ponto nesta imagem é realizada uma busca pelo ponto correspondente na outra imagem, de acordo com um dado critério de similaridade. A disparidade é calculada para cada par de pontos correspondidos como sendo o valor da distância relativa entre suas coordenadas. O valor da disparidade é então armazenado como o valor de intensidade em uma terceira imagem, chamada de mapa de disparidade. Os valores de intensidade para cada ponto no mapa de disparidade armazena informação de profundidade na cena, visto que a disparidade é inversamente proporcional à profundidade.

Em geral, os algoritmos de correspondência densa podem ser classificados como locais ou globais, com base na estratégia que empregam para corresponder os pontos (HIRSCHMULLER; SCHARSTEIN, 2007). Adicionalmente, alguns algoritmos podem ser classificados como híbridos, visto que fazem uso de abordagens locais e globais combinadas (MARK; GAVRILA, 2006).

Os algoritmos de correspondência local assumem que os pontos da imagem são envoltos por uma janela de pontos vizinhos onde a disparidade é a mesma. Desta forma, a correspondência para cada um dos pontos da imagem é realizada com base na correspondência destas janelas empregando funções de custo baseadas em similaridade.

O método básico utilizado para correspondência segundo esta abordagem é a correlação (TRUCCO; VERRI, 1998). Vários algoritmos foram propostos utilizando variações desta abordagem. Estes algoritmos apresentam, de maneira geral, um comportamento comum. Dadas duas imagens capturadas pelo sistema binocular, escolha uma das imagens como referência e defina o tamanho  $2n + 1$  para uma janela quadrada a ser utilizada na correspondência. Para cada ponto da imagem de referência, faça:

1. Centralize a janela no ponto de interesse na imagem de referência;
2. Correlacione a janela posicionada na imagem de referência com uma segunda janela, movendo-a sobre todas as posições pertencentes a um espaço de busca na segunda imagem;
3. Determine o ponto na segunda imagem que corresponde ao ponto de interesse na primeira imagem, selecionando a posição onde a correlação minimiza a função de custo empregada;
4. Calcule a disparidade pela diferença relativa da posição central das janelas. Armazene este valor numa terceira imagem, na posição do ponto central da janela na imagem de referência.

A saída é um mapa de disparidades denso, contendo a disparidade para cada ponto da imagem de referência

Os métodos de correspondência por correlação utilizam funções de custo que levam em conta a similaridade dos valores de intensidade de cada ponto da imagem, como a soma das diferenças quadráticas (SSD) ou soma das diferenças absolutas (SAD). Uma função de custo empregando a similaridade *SAD* comumente empregada é dada por:

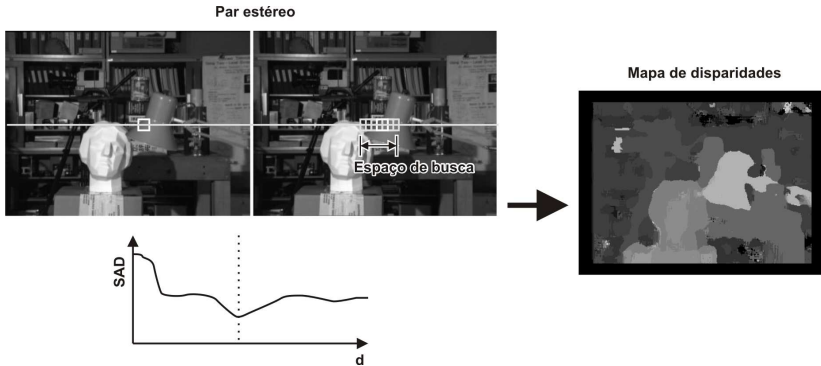
$$C_{sad}(x, y, d) = \sum_{i, j=-n}^n |D_{Ie}(x + j, y + i) - D_{Id}(x + d + j, y + i)| \quad (2.26)$$

onde  $d$  é uma dada disparidade,  $D_{Ie}(x, y)$  e  $D_{Id}(x, y)$  correspondem a uma função de descrição baseada em intensidade referente às imagens esquerda e direita, respectivamente. Uma janela de tamanho  $2n + 1$  é utilizada.

Na Figura 13 é ilustrado o processo de correspondência por correlação de janelas descrito anteriormente, em que para um dado ponto na primeira imagem é definido um espaço de busca na segunda imagem onde é selecionada a janela de correlação que minimiza a função de custo utilizada.

No processo de correspondência pelos métodos por correlação descritos, a intensidade assume um papel de descritor para cada ponto das imagens. Esta descrição mostra-se pouco robusta visto que o valor de intensidade de cada pixel é sensível a mudanças na intensidade absoluta, introduzidos por influências como diferenças no ganho dos sensores, variações radiométricas, entre outros.

Uma solução largamente empregada é a utilização da normalização das imagens pelo filtro LOG (MARK; GAVRILA, 2006). O filtro LOG é com-



**Figura 13: Processo de correspondência por correlação de janelas**

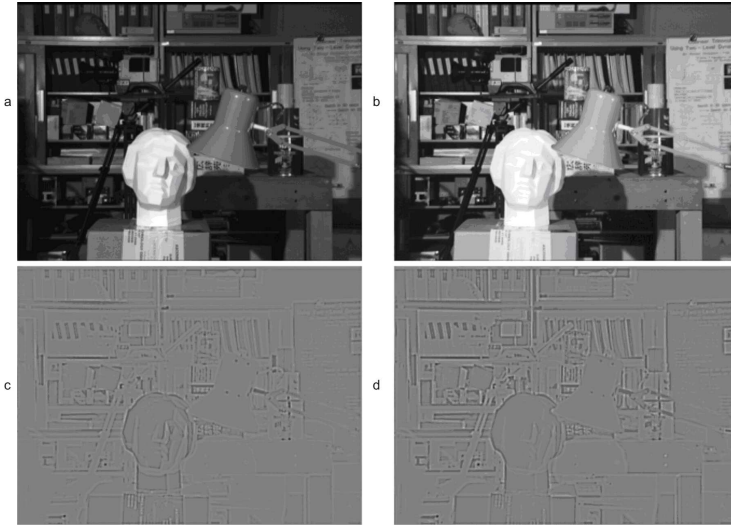
posto por uma filtragem gaussiana e uma filtragem laplaciana. O filtro laplaciano reduz a influência da iluminação, já que a resposta ao mesmo é zero nas áreas com intensidade constante e é negativa ou positiva próximo às bordas com gradiente de intensidade alta. O filtro gaussiano é aplicado antes do filtro laplaciano para reduzir a influência de ruído, visto que o segundo é altamente sensível a este.

Na Figura 14 é ilustrada a normalização de um par de imagens estereó empregando o filtro LOG. A imagem original direita apresenta uma diferença significativa na intensidade luminosa em relação à imagem da esquerda (a e b). Porém, ao empregarmos o filtro LOG nas imagens originais é obtida uma resposta muito semelhante (c e d).

Os métodos que seguem a abordagem de correspondência densa global, em oposição à abordagem local, procuram propagar a informação de disparidade de um ponto da imagem para seus vizinhos. Para isso, comumente empregam a minimização de alguma função de energia sobre o mapa de disparidade inteiro.

O algoritmo de programação dinâmica é um dos algoritmos que calcula a disparidade segundo esta abordagem (BIRCHFIELD; TOMASI, 1999). Inicialmente é definida uma função de custo que leva em conta o número de oclusões, correspondências e uma medida de dissimilaridade. Para cada linha da imagem é realizada uma busca exaustiva pela melhor solução de disparidade dentre as soluções possíveis, segundo esta função de custo.

A partir de duas imagens de entrada, o algoritmo realiza um processo de emparelhamento denso para cada linha. É realizada uma medição seguindo



**Figura 14: Normalização LOG - a,b)Original c,d)Filtrado**

um critério de dissimilaridade entre os pontos, atribuindo a cada sequência de correspondências  $M$  um custo, dado por:

$$\gamma(M) = N_{occ}k_{occ} - N_mk_r + \sum_{i=1}^{N_m} d(m_{ei}, m_{di}) \quad (2.27)$$

O custo  $\gamma(M)$  mede a probabilidade de que essa sequência seja uma correspondência correta. Os parâmetros  $N_{occ}$  e  $N_m$  representam o número de oclusões e de emparelhamentos, sendo  $k_{occ}$  e  $k_r$  as respectivas constantes de penalidade e recompensa, e  $d(m_{ei}, m_{di})$  uma função de dissimilaridade baseada em intensidade entre os pontos da imagem esquerda e da imagem direita. A sequência de emparelhamento ótima é realizada empregando uma busca exaustiva através de um algoritmo de programação dinâmica.

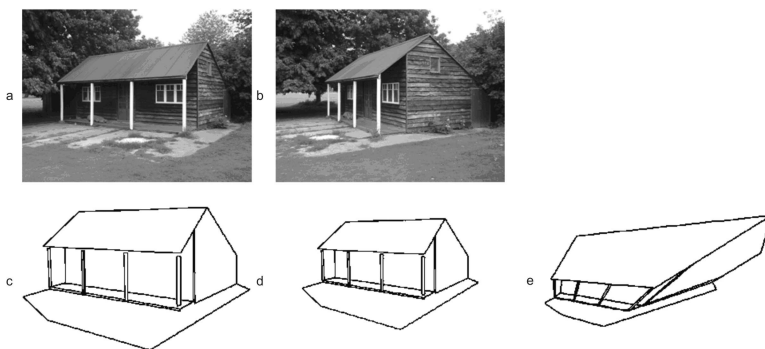
Como as intensidades entre linhas de uma imagem não são independentes, é realizada uma análise coluna a coluna no mapa de disparidades. Primeiro, a disparidade de um pixel, cujos vizinhos verticais tenham disparidade igual, mas diferente dele próprio, torna-se igual à dos seus vizinhos. A seguir, para ambas as direções horizontal e vertical, utiliza-se o gradiente na direção considerada na imagem original para propagar regiões de confiança no mapa de disparidade. A confiança, para cada pixel, define-se como o número de pontos contíguos na direção a considerar com disparidade igual

à sua. Depois, o mapa de disparidade é filtrado com um filtro de média nas duas direções sequencialmente, de forma a preservar os vértices dos objetos.

As principais vantagens apresentadas pelo algoritmo são o tratamento de regiões homogêneas, a utilização de uma medida de similaridade insensível à amostragem e um algoritmo de programação dinâmica mais eficiente.

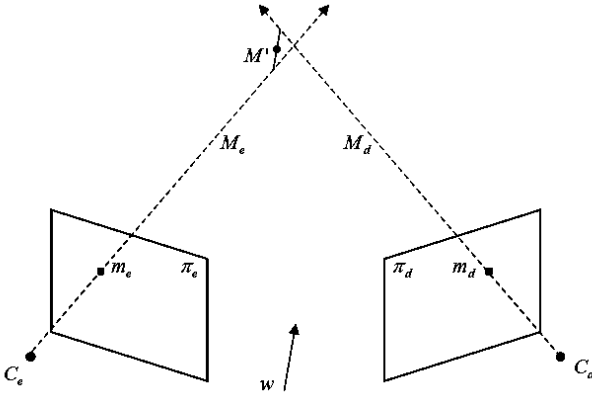
#### 2.1.2.4 Reconstrução

A reconstrução está relacionada à recuperação de informação de profundidade a partir de pontos correspondentes identificados nas duas imagens estéreo e dos parâmetros que descrevem o sistema de visão estéreo. O que pode ser reconstruído depende diretamente do que é conhecido a respeito da cena e do sistema de visão estereoscópica (TRUCCO; VERRI, 1998). Na Figura 15 é ilustrada a reconstrução da estrutura tridimensional de uma cena observada sob diferentes pontos de vista (*a* e *b*) para os diferentes cenários possíveis. Se tanto parâmetros intrínsecos como extrínsecos são conhecidos, é possível realizar a reconstrução métrica (*c*). Se somente parâmetros intrínsecos são conhecidos, é possível realizar a reconstrução sujeita a um fator de escala (*d*). No caso onde nem parâmetros intrínsecos e nem parâmetros extrínsecos são conhecidos e somente é conhecida a informação de pontos correspondentes, é possível realizar apenas a reconstrução sujeita a uma transformação projetiva global desconhecida (*e*).



**Figura 15:** Reconstrução projetiva e métrica (TRUCCO; VERRI, 1998; HARTLEY; ZISSERMAN, 2003)

TRUCCO et al. (TRUCCO; VERRI, 1998) descrevem o processo de reconstrução por triangulação para o caso onde tanto parâmetros intrínsecos como extrínsecos são conhecidos. Conforme exibido na Figura 16, o ponto  $M$ , projetado no par de pontos correspondentes  $m_e$  e  $m_d$  encontra-se na intersecção dos raios  $M_e$  e  $M_d$ , representando os raios que intersectam a imagem nos pontos  $m_e$  e  $m_d$  e intersectam os centros de projeção  $C_e$  e  $C_d$ , respectivamente. Estes raios são conhecidos e sua intersecção pode ser calculada. Entretanto, sendo que os parâmetros e posição das imagens são conhecidos apenas aproximadamente, os dois raios não intersectam realmente. Desta forma, a intersecção deve ser estimada como o ponto médio da menor reta que une os dois raios.



**Figura 16: Reconstrução de ponto por triangulação (TRUCCO; VERRI, 1998)**

Seja  $am_e$  ( $a \in \mathfrak{R}$ ) o raio  $M_e$ , e seja  $t + bR^T m_d$  ( $b \in \mathfrak{R}$ ) o raio  $M_d$ , expressos no sistema de coordenadas esquerdo. Seja  $w = m_e \times R^T m_d$  um vetor ortogonal tanto a  $M_e$  quanto a  $M_d$ . O problema encontra-se em determinar o ponto médio,  $M'$  do segmento  $s$  paralelo a  $w$  que liga  $M_e$  e  $M_d$ , conforme ilustrado pela Figura 16.

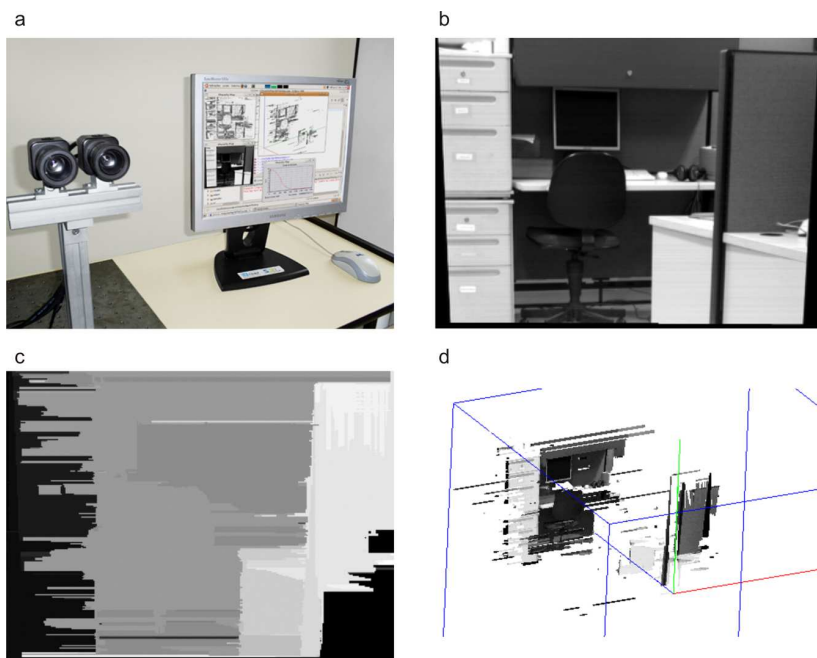
Para tal, é possível determinar os pontos finais do segmento  $s$ ,  $a_0 m_e$  e  $t + b_0 R^T m_d$ , resolvendo o sistema de equações lineares dado por:

$$am_e - bR^T m_d + c(m_e \times R^T m_d) = t \quad (2.28)$$

para  $a_0$ ,  $b_0$  e  $c_0$ . O ponto triangulado  $M'$  pode então ser calculado diretamente como o ponto médio do segmento  $s$ .

### 2.1.2.5 Exemplo de aplicação

Na Figura 17 (a) é exibido um sistema de visão estereoscópica que emprega a técnica descrita. Este sistema foi projetado para ser utilizado na navegação e reconhecimento em sistemas de visão para robôs móveis (STIVANELLO, 2008).



**Figura 17: Sistema de visão estereoscópica**

Nesta mesma Figura é exibida uma das imagens do par estéreo para uma dada cena (b), o mapa de disparidade obtido na correspondência densa de pontos (c), e a reconstrução da cena a partir de triangulação (d).

### 2.1.3 Triangulação Ativa por Projeção de Plano de Luz

O princípio básico de um sistema de triangulação ativa por projeção de plano de luz é ilustrado na Figura 18. O sistema é composto por uma câmera e um emissor de plano laser (a). O emissor laser projeta uma folha de luz sobre

a cena observada (b). Uma câmera de vídeo, em ângulo, é utilizada para capturar a linha distinguível formada pela intersecção da folha de luz com a superfície dos objetos da cena (c). As distorções observadas na extensão desta linha podem ser interpretadas como variações de distância. A união de vários perfis obtidos na extensão da cena fornece uma descrição completa dos objetos (TRUCCO; VERRI, 1998).



**Figura 18: Sistema de triangulação ativa por plano laser**

De modo geral, o procedimento para a obtenção de um modelo  $3D$  pode ser descrito como uma repetição dos seguintes passos:

1. Capturar imagem;
2. Processar a imagem de modo a encontrar a linha laser;
3. Transformar as coordenadas  $2D$  da linha laser na imagem em coordenadas  $3D$ ;
4. Alterar a posição da folha de luz sobre o objeto;

Nesta sequência, os principais problemas a serem resolvidos são a identificação da linha laser nas imagens e a transformação das coordenadas  $2D$  em coordenadas  $3D$ . A seguir são descritos métodos utilizados para solucionar estes problemas.

#### 2.1.3.1 Identificação da Linha Laser

Existem diferentes maneiras de encontrar a posição da linha laser. A escolha do método mais adequado está relacionada com a definição com que a imagem da linha laser aparece na imagem obtida pela câmera. O baixo contraste da linha laser, assim como a presença de ruído, pode tornar esta tarefa difícil. Concavidades ou superfícies brilhantes podem criar reflexões que



confundem a detecção da linha laser. A localização pode ainda ser dificultada por sombras e oclusões. Além disso, não é possível obter informação métrica onde a linha é invisível à câmara por oclusões.

Para aplicações onde durante a aquisição não haverá mudança significativa de luminosidade e onde a cena permanece estática, uma alternativa é identificar a linha laser pela subtração entre uma imagem de referência e cada imagem capturada durante o procedimento de medição.

Encontrada a linha, outro requisito é localizar a posição exata do centro da linha. Um método bastante empregado para este fim é empregar a equação de centro de gravidade:

$$pos = \frac{\sum uI(u)}{\sum I(u)} \quad (2.29)$$

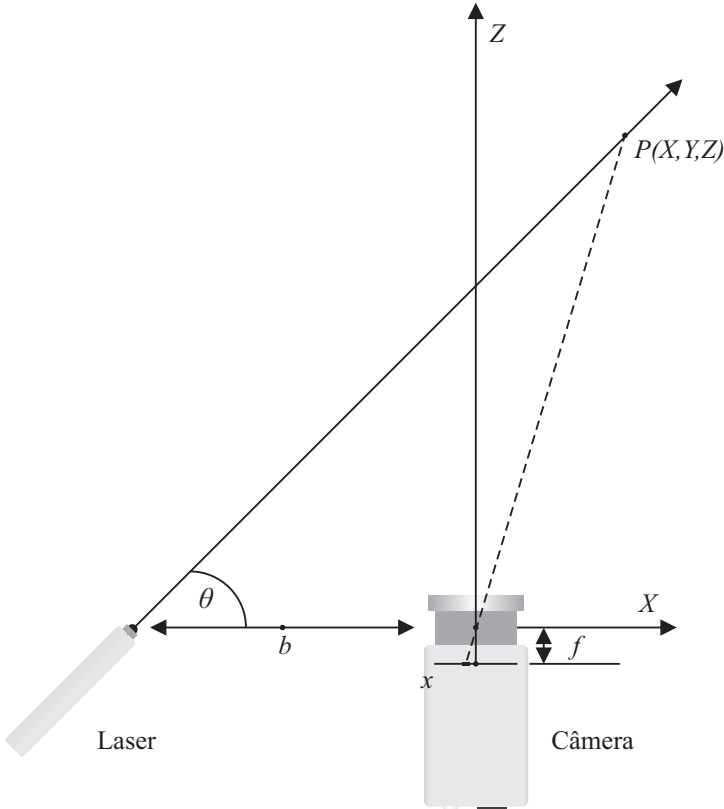
onde  $pos$  é a posição calculada em pixel da linha para o centro da linha laser, o índice  $u$  é o índice da coluna e  $I(u)$  é a intensidade do pixel de coluna número  $u$ . A somatória é feita sobre as colunas onde a intensidade é maior que um valor de limiar definido. Este método assume que o nível de ruído é menor que o valor de limiar.

### 2.1.3.2 Estimação das Coordenadas 3D

A estimação das coordenadas tridimensionais da cena pode ser realizada de diferentes formas. Uma primeira abordagem seria utilizar as propriedades geométricas existentes entre os elementos que compõe o sistema. Uma outra abordagem utilizada é abstrair os parâmetros mencionados e calibrar diretamente o sistema, calculando curvas que diretamente relacionem deslocamentos da linha laser na imagem com deslocamentos na unidade do mensurando. Estas duas abordagens são descritas na sequência.

A geometria básica de um sistema de triangulação ativa é apresentada na Figura 19 (TRUCCO; VERRI, 1998). Um projetor de luz é posicionado a uma distância  $b$ , ou linha de base, do centro de projeção de uma câmara *pinhole*. O centro de projeção é a origem do sistema de coordenadas  $XYZ$ , em que todas as medições do sistema são expressas. O eixo  $Z$  e o eixo óptico coincidem. Os eixos  $y$  e  $Y$ ,  $x$  e  $X$ , são respectivamente paralelos, mas apontam para direções opostas. Seja  $f$  o comprimento focal. O projetor emite um plano de luz perpendicular ao plano  $XZ$  e formando um ângulo controlado,  $\theta$ , com o plano  $XY$ . O eixo  $Y$  é paralelo ao plano de luz e perpendicular à página, de modo que somente o perfil do plano de luz é exibido. A intersecção do plano de luz

com as superfícies da cena é uma curva planar denominada plano laser, que é observada pela câmera.



**Figura 19: Geometria básica de um sistema de medição laser por triangulação ativa**

Nesta configuração simplificada, as coordenadas de um ponto do feixe  $P = [X, Y, Z]^T$  são dadas por:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{b}{f \cot \theta - x} \begin{bmatrix} x \\ y \\ f \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Ao aplicar a Equação 2.30 para todos os pontos visíveis do plano laser, obtém-se um perfil do objeto. Avançando o objeto sobre o plano ou var-

rendo o plano sobre o objeto, e repetindo o cálculo das coordenadas para cada posição relativa do plano, é possível obter a forma tridimensional do objeto.

De modo a utilizar o presente modelo na transformação de coordenadas, precisamos estimar  $f$ ,  $b$  e  $\theta$ . Entretanto, parâmetros como o ângulo ou distância entre a câmera e o laser são difíceis de medir. Pequenos erros angulares podem gerar grandes erros de distância. Em alguns trabalhos é empregada uma calibração com o objetivo de estimar estes parâmetros. Entretanto, devido a dificuldades práticas no procedimento de calibração, os parâmetros estimados podem se tornar a maior fonte de incertezas.

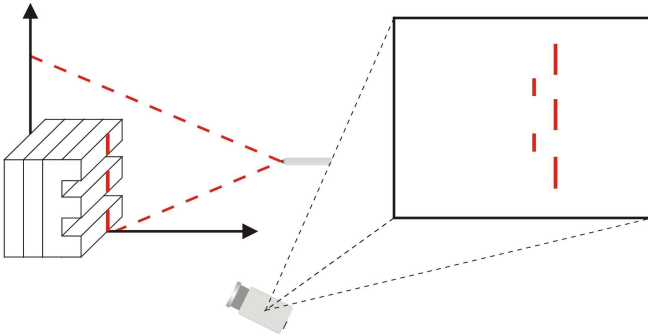
Uma alternativa bastante empregada é utilizar um método de calibração direta, que permite estimar coordenadas 3D sem a estimação dos parâmetros do sistema (TRUCCO; VERRI, 1998). A calibração direta tem como objetivo encontrar curvas que relacionem diretamente deslocamentos da linha laser na imagem com deslocamentos na unidade do mensurando. É importante notar que a correspondência um para um entre coordenadas da imagem e do mundo somente é possível devido ao fato de que os pontos da linha laser estão restringidos a estar sobre o plano da luz estruturada.

Na calibração direta, uma tabela de consulta (LUT) é construída de modo a relacionar coordenadas do mundo e da imagem. A tabela é construída pela medição de coordenadas da imagem de uma grade de pontos 3D conhecidos, e gravando tanto coordenadas de imagem como de mundo para cada ponto. Os valores de profundidade de todos os outros pontos visíveis são então estimados por interpolação.

Na Figura 20 é apresentada a configuração utilizada em uma calibração, empregando como padrão de calibração um conjunto de blocos de geometria conhecida. Um dos padrões deve ter um número de concavidades paralelas (Bloco G).

A calibração, empregando o método ilustrado, pode ser realizada pelos seguintes passos:

1. Posicione o bloco G sobre a folha de luz laser, com as concavidades perpendiculares ao seu plano;
2. Adquira uma imagem da folha de luz laser sobre o bloco G. Encontre as coordenadas  $[x_z, y_i]$ ,  $i = 1, \dots, n$ , dos centros dos segmentos de linhas na superfície mais externa (não côncava) do bloco G. Insira cada ponto da imagem  $[x_z, y_i]$  e seu ponto 3D  $[Y, Z]$  correspondente à tabela T;
3. Coloque outro bloco atrás do bloco G, tomando cuidado para que seja mantido o sistema de coordenadas assumido;



**Figura 20: Cenário de calibração direta**

4. Repita os passos 3 e 4 até que a toda a área de interesse seja percorrida pela superfície mais externa do bloco G.

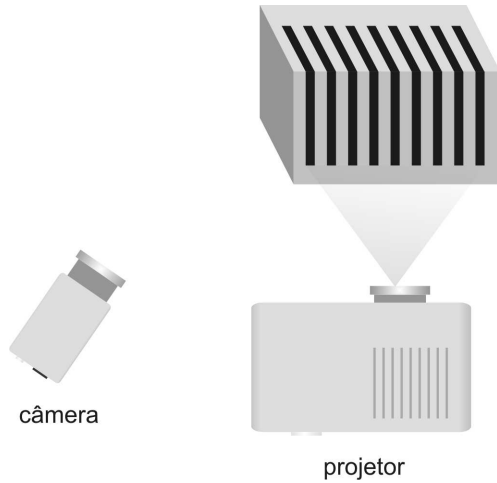
A saída do algoritmo é uma tabela de consulta que associa coordenadas de pontos na imagem à coordenadas de pontos da cena. Para pontos da imagem não medidos diretamente, deve-se utilizar interpolação linear empregando os quatro vizinhos mais próximos.

### 2.1.4 Triangulação Ativa por Projeção de Luz Codificada

Um método mais rápido e versátil do que a projeção de plano de luz descrito na Seção 2.1.3 é projetar padrões consistindo em vários planos de uma vez. Neste caso, assim como na projeção de plano laser, o padrão projetado, visto de diferentes pontos de vista, aparece geometricamente distorcido devido à forma dos objetos. Diferentes tipos de luz estruturada podem ser utilizados.

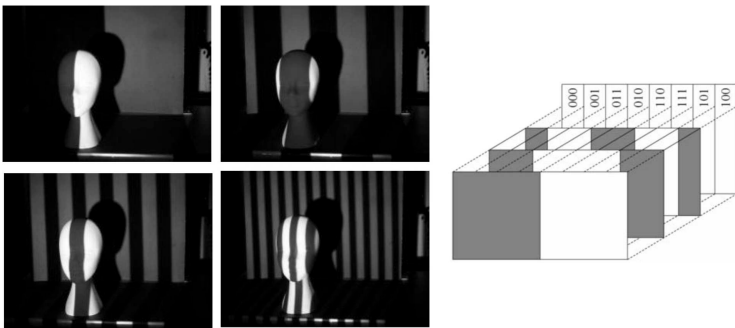
Na Figura 21 é ilustrada a configuração do sistema, assim como a deformação geométrica de um padrão como este sobre a superfície de um objeto. O sistema é tipicamente composto por um projetor de cristal líquido (LCD) e por pelo menos uma câmera. Pela avaliação da distorção e pelo conhecimento das características geométricas dos padrões que são projetados se faz a determinação das coordenadas de pontos que compõem a superfície do objeto. Para isto, as relações geométricas existentes entre a câmera e os feixes de raios luminosos do padrão projetado devem ser determinadas em uma etapa de calibração.

A disposição de qualquer linha pode ser convertida em coordenadas



**Figura 21: Configuração de sistema de projeção de luz estruturada**

3D. Entretanto, as linhas individuais devem ser identificadas. Estratégias simples, como contar as linhas, são muitas vezes empregadas. Um método mais robusto é utilizar a codificação binária por intensidade de cinza (YANG, 2008). Na Figura 22 é ilustrada a codificação de linhas por este método.



**Figura 22: Codificação de linhas por código cinza binário**

Pela projeção de uma sequência de imagens, as linhas são codificadas binariamente. Um bit para todas as linhas é projetado de cada vez. Uma linha iluminada representa zero e uma linha escura representa um. A informação binária é obtida através de um processamento de imagens, incluindo uma binarização. No final do processo, todos os pontos de uma mesma linha terão

sido identificados pela mesma palavra binária. A codificação de 610 linhas, por exemplo, pode ser conseguida pela projeção de uma sequência de 10 imagens.

### 2.1.5 Métodos Baseados em Projeção de Franjas

Dentre os métodos de medição baseados em triangulação ativa por projeção de luz estruturada, encontra-se um grupo que emprega a projeção de franjas (QUAN; TAY, 2010; GORTHI; RASTOGI, 2010; ZHONG-WEI, 2009; YAMAGUCHI; ZHANG, 1997; HUANG; ZHANG, 2006; TAKEDA; MUTOH, 1983; TAKEDA; KOBAYASHI, 1982). Seguindo esta abordagem, um projetor é utilizado para projetar um padrão de franjas senoidais sobre o objeto de interesse. Uma câmera é utilizada para capturar uma imagem do padrão de franjas sobre o objeto de um ponto de vista diferente do projetado. A mudança de altura da superfície do objeto é transformada em distribuição de fase no padrão de franjas deformadas gerado no objeto. Assim, a estimação da forma 3D é realizada pela avaliação da deformação do padrão projetado no objeto, observada na imagem.

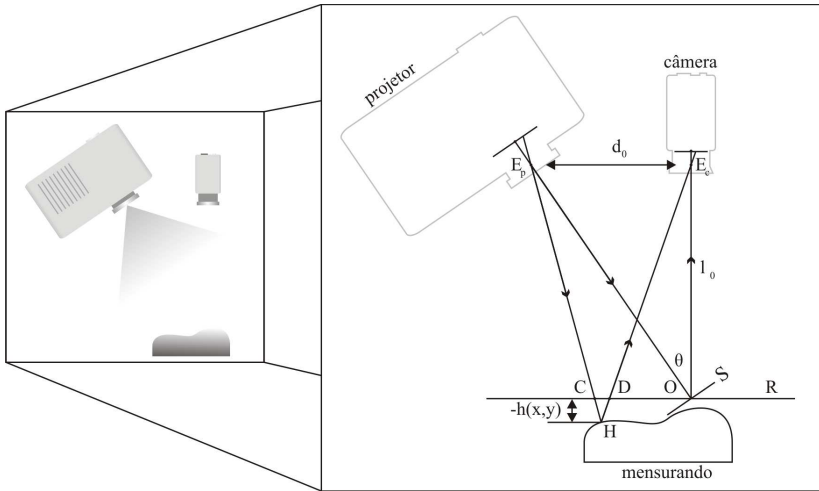
Duas configurações óptico-geométricas principais tem sido empregadas. Na primeira delas, conhecida como geometria de eixos ópticos cruzados, os eixos ópticos do projetor e da câmera permanecem em um mesmo plano e intersectam em um ponto próximo do centro do objeto. Na segunda configuração possível, conhecida como geometria de eixos ópticos paralelos, os eixos ópticos do projetor e da câmera permanecem em um mesmo plano e devem ser paralelos. A primeira configuração tem sido mais empregada devido à facilidade de construção e utilização (TAKEDA; MUTOH, 1983).

Na Figura 23 é apresentada a configuração de eixos ópticos cruzados. O eixo óptico do projetor parte do ponto  $E_p$  e intersecta o eixo óptico da câmera que parte do ponto  $E_c$  no ponto  $O$  do plano de referência  $R$ . O plano de referência  $R$  corresponde a um plano fictício normal ao eixo óptico da câmera, e serve como a referência pela qual a altura  $h(x,y)$  de um ponto do objeto é medida (GORTHI; LOLLA, 2005; TAKEDA; MUTOH, 1983; ORTEGA, 2007).

Uma imagem capturada pela câmera, do objeto com o padrão de franjas projetadas, pode ser descrita por:

$$g(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos[2\pi f_0x + \phi(x,y)] \quad (2.31)$$

onde  $g(x,y)$  representa a intensidade da imagem na posição  $(x,y)$ ,  $\phi(x,y)$



**Figura 23: Configuração de eixos ópticos cruzados (GORTHI; LOLLA, 2005)**

representa a fase correspondente ao padrão de franjas distorcido,  $f_0$  corresponde à frequência espacial das franjas projetadas e  $a(x,y)$  e  $b(x,y)$  representam variações de iluminação e contraste resultantes da distribuição não uniforme da reflexão sobre o mensurando (TAKEDA; KOBAYASHI, 1982).

É importante observar que  $\phi(x,y)$  contém a informação desejada, e que na maioria dos casos  $a(x,y)$ ,  $b(x,y)$  e  $\phi(x,y)$  variam lentamente quando comparados com a variação introduzida pela frequência espacial das franjas  $f_0$ . O ângulo de interesse  $\phi(x,y)$  pode ser descrito por:

$$\phi(x,y) = \phi_0(x,y) + \phi_z(x,y) \quad (2.32)$$

onde  $\phi_0$  corresponde ao deslocamento de fase resultante do ângulo de projeção em relação ao plano de referência e  $\phi_z(x,y)$  corresponde ao deslocamento de fase resultante da distribuição de altura do objeto.

Observando a configuração apresentada na Figura 23, é possível verificar que uma franja projetada pelo projetor atinge o objeto no ponto  $H$  e cruza o plano de referência no ponto  $C$ . Esta franja pode ser observada pela câmera no ponto  $D$ . É verificado que os triângulos  $E_pHE_c$  e  $CHD$  são similares, e que:

$$\frac{CD}{-h} = \frac{d_0}{l_0} \quad (2.33)$$

Esta relação nos leva à equação:

$$\phi_z(x, y) = \frac{h(x, y)2\pi f_0 d_0}{h(x, y) - l_0} \quad (2.34)$$

onde o valor de  $h(x, y)$  é medido e considerado positivo para o lado esquerdo do plano de referência. A Equação 2.34 pode finalmente ser re-arranjada para expressar a distribuição de altura como função da distribuição da fase:

$$h(x, y) = \frac{l_0 \phi_z(x, y)}{\phi_z(x, y) - 2\pi f_0 d_0} \quad (2.35)$$

Conforme descrito, para obter a informação da forma 3D do mensurando são necessários os parâmetros que descrevem o sistema empregado e a fase  $\phi(x, y)$ . A estimação dos parâmetros que descrevem o sistema de medição podem ser obtidos através de um procedimento de calibração, similar ao descrito na Seção 2.1.2.2. Assim sendo, o problema se resume em como obter  $\phi(x, y)$  separadamente das variações de amplitude,  $a(x, y)$  e  $b(x, y)$ , que representam variações de iluminação e contraste não desejados derivados da distribuição não uniforme de reflectância da superfície do objeto. Diferentes métodos têm sido propostos para este fim, e os principais deles são descritos na sequência.

### 2.1.5.1 Fourier Transform Profilometry

O padrão de franjas deformado, do objeto, dado pela Equação 2.31, pode ser interpretado como múltiplos sinais com frequências espaciais portadoras  $nf_0$ , moduladas tanto em fase  $\phi(x, y)$  e amplitude  $r(x, y)$  (ORTEGA, 2007; TAKEDA; MUTOH, 1983). Assim sendo, torna-se viável reescrever esta equação como:

$$g(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n r(x, y) \cdot \exp[in\phi(x, y)] \cdot \exp(i2\pi n f_0 x) \quad (2.36)$$

Por sua vez, o padrão de franjas deformado da referência, onde  $h(x, y) = 0$ , é dado por:

$$g_0(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n r_0(x, y) \cdot \exp[in\phi_0(x, y)] \cdot \exp(i2\pi n f_0 x) \quad (2.37)$$

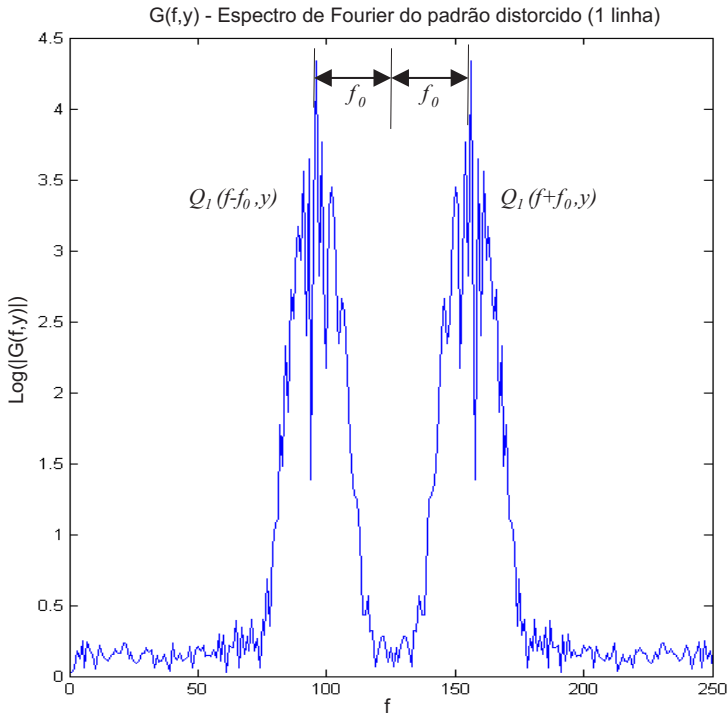


Empregando o algoritmo FFT, é possível calcular a transformada de Fourier 1D da Equação 2.36 para obter:

$$G(f,y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} Q_n(f - nf_0, y), \quad (2.38)$$

onde  $G(f,y)$  corresponde ao espectro de Fourier 1D de  $g(x,y)$ , calculados somente com respeito à variável  $x$ , e com  $y$  sendo tratada como um parâmetro fixo. O mesmo procedimento pode ser empregado sobre a Equação 2.37, para obtermos  $\hat{G}_0(f,y)$ .

Sendo que na maioria dos casos  $r(x,y)$  e  $\phi(x,y)$  variam lentamente em relação quando comparados à frequência  $f_0$  do padrão de franjas, os espectros  $Q_n(f - nf_0, y)$  são separados uns dos outros pela frequência portadora  $f_0$ , como mostrado na Figura 24.



**Figura 24:** Espectro de frequência espacial do padrão deformado

A partir de  $G(f, y)$ , é possível selecionar apenas o espectro  $Q_1(f - f_0, y)$  e calcular sua transformada de Fourier inversa através do algoritmo IFFT para obter o sinal complexo:

$$\hat{g}(x, y) = A_1 r(x, y) \exp\{i[2\pi f_0 x + \phi(x, y)]\}. \quad (2.39)$$

Nós realizamos a mesma operação de filtragem a  $\hat{G}_0(f, y)$  para obter:

$$\hat{g}_0(x, y) = A_1 r_0(x, y) \exp\{i[2\pi f_0 x + \phi_0(x, y)]\} \quad (2.40)$$

Multiplicando  $\hat{g}(x, h)$  com o conjugado de  $\hat{g}_0(x, y)$  é obtido:

$$\hat{g}(x, y) \cdot \hat{g}_0^*(x, y) = |A_1|^2 r(x, y) \cdot \exp[i\phi_z(x, y)], \quad (2.41)$$

onde

$$\phi_z(x, y) = \phi(x, y) - \phi_0(x) \quad (2.42)$$

Visto que a modulação inicial da fase  $\phi_0(x)$  para  $h(x, y) = 0$  foi subtraída,  $\phi_z(x, y)$  fornece a modulação de fase associada à distribuição objeto-altura. O problema resume-se então a obter a distribuição de fase  $\phi_z(x, y)$  na Equação 2.41, separando-a da variação de amplitude indesejada  $r(x, y)$ . Observando que tanto  $|A_1|^2 r(x, y)$  e  $\phi_z(x, y)$  são funções reais, calculamos o logaritmo complexo como:

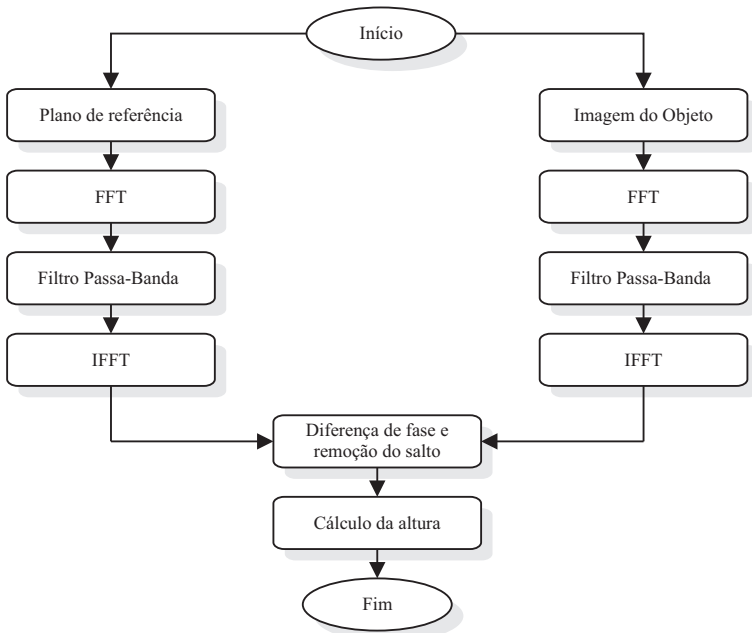
$$\log[\hat{g}(x, y) \cdot \hat{g}_0^*(x, y)] = \log[|A_1|^2 r(x, y)] + i\phi_z(x, y). \quad (2.43)$$

Assim, é obtida a distribuição de fase  $\phi_z(x, y)$  na parte imaginária, totalmente separada da indesejada variação de reflectividade  $r(x, y)$  na parte real.

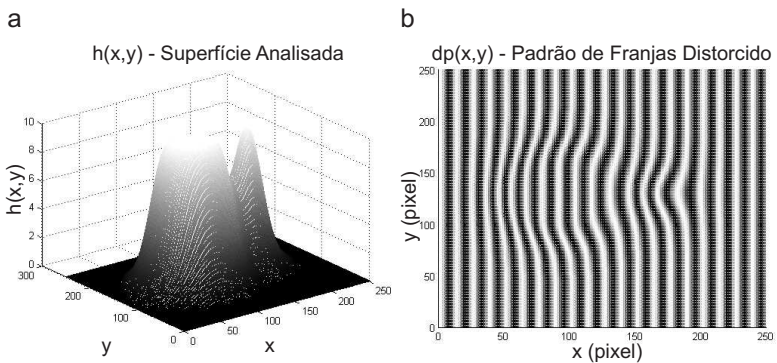
Visto que o cálculo da fase nos dá valores variando de  $-\pi$  a  $\pi$ , a distribuição de fase encontra-se comprimida nesta faixa e conseqüentemente apresenta descontinuidades com saltos de fase de  $2\pi$  para variações maiores que  $2\pi$ . Estas descontinuidades podem ser removidas pela adição ou subtração de  $2\pi$  empregando um algoritmo de remoção de salto de fase (ORTEGA, 2007).

Uma simulação foi realizada com o objetivo de ilustrar o emprego desta técnica na estimação de forma 3D. A metodologia de medição utilizada é descrita simplificada pelo fluxograma apresentado na Figura 25.

Para realizar a simulação, foi gerada a superfície contendo dois picos, apresentada na Figura 26 (a). Sobre esta superfície foi simulada a projeção de um padrão senoidal, como apresentado na Figura 26 (b).



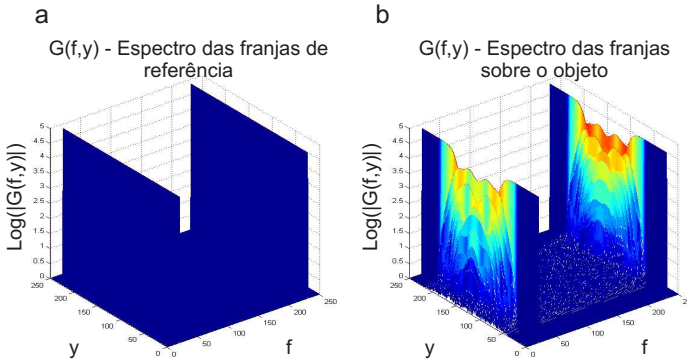
**Figura 25: Metodologia de medição por FTP**



**Figura 26: a) Superfície empregada na simulação - b) Padrão senoidal projetado sobre superfície**

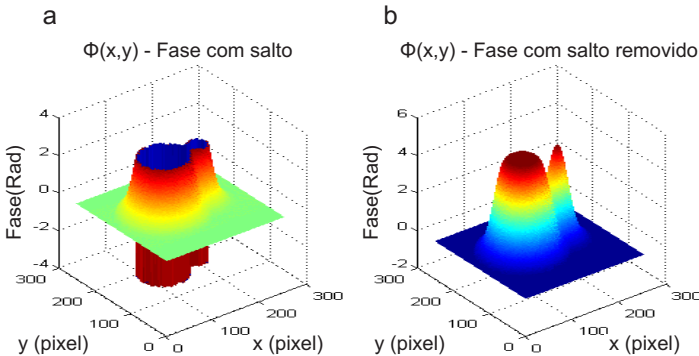
As imagens das franja de referência e das franjas distorcidas do objeto

são analisadas e filtradas no domínio da frequência, como ilustrado na Figura 27.



**Figura 27:** a) Espectro das franjas de referência - b) Espectro das franjas distorcidas

Através do cálculo da diferença de fase entre as franjas de referência e das franjas distorcidas, obtém-se o mapa de fase com salto, apresentado na Figura 28 (a). O mapa de fase, apresentado na Figura 28 (b) é obtido pelo emprego de um algoritmo de remoção de salto de fase. A forma 3D da superfície pode finalmente ser estimada empregando o mapa de fase calculado.



**Figura 28:** a) Mapa de fase com salto - b) Mapa de fase com salto removido

É importante observar que o algoritmo FTP, na sua forma original, não apresenta bons resultados se o objeto avaliado apresenta descontinuidade.

des abruptas de altura ou partes isoladas. Isso se deve ao fato de que o mapa de fase obtido apresentará saltos que não são facilmente removidos na medição de objetos com estas características. Para contornar esta limitação, uma abordagem que emprega a utilização de um padrão com duas componentes de frequência combinadas pode ser utilizada (TAKEDA, 1997).

### 2.1.5.2 Deslocamento de Fase

A descrição da imagem do padrão deformado de franjas projetadas, descritas na Equação 2.31, pode também ser descrita como:

$$I(x,y) = R(x,y)[G(x,y) + H(x,y)\cos\phi(x,y)] \quad (2.44)$$

onde  $R(x,y)$  corresponde à intensidade média no ponto  $(x,y)$ ,  $H(x,y)/G(x,y)$  ao contraste das franjas e  $\phi(x,y)$  representa a função de fase, que caracteriza a deformação da franja e que está relacionada à forma do objeto  $h(x,y)$  (YAMAGUCHI; ZHANG, 1997).

É possível obter  $\phi(x,y)$  facilmente, empregando diferentes tipos de deslocamento. Seguindo a abordagem de 4 deslocamentos, 4 padrões de franjas senoidais com deslocamento de fase são projetados sobre o objeto. Para cada padrão projetado são empregados deslocamentos de fase de  $90^\circ$ , ou seja, os deslocamentos são de  $0, \pi/2, \pi$  e  $3\pi/2$  sobre um período da franja.

Com base na equação 2.44, as Equações que fornecem o ângulo da fase correspondente a cada franja são:

$$I_1 = R(x,y)[G(x,y) + H(x,y)\cos(\phi)] \quad (2.45)$$

$$I_2 = R(x,y)[G(x,y) + H(x,y)\cos(\phi + \pi/2)] \quad (2.46)$$

$$I_3 = R(x,y)[G(x,y) + H(x,y)\cos(\phi + \pi)] \quad (2.47)$$

$$I_4 = R(x,y)[G(x,y) + H(x,y)\cos(\phi + 3\pi/2)] \quad (2.48)$$

Combinando as Equações 2.45, 2.46, 2.47 e 2.48, é obtida a função de fase:

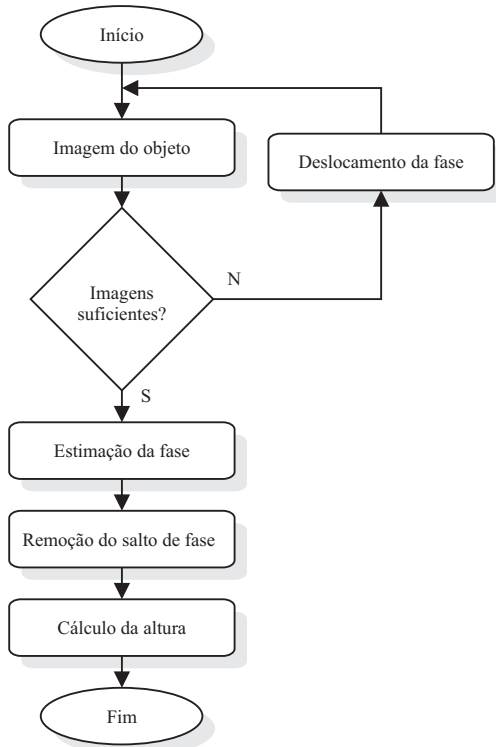
$$\tan(\phi) = \frac{I_2 - I_4}{I_3 - I_1} \quad (2.49)$$

ou

$$\phi = \arctan \left( \frac{I_2 - I_4}{I_3 - I_1} \right) \quad (2.50)$$

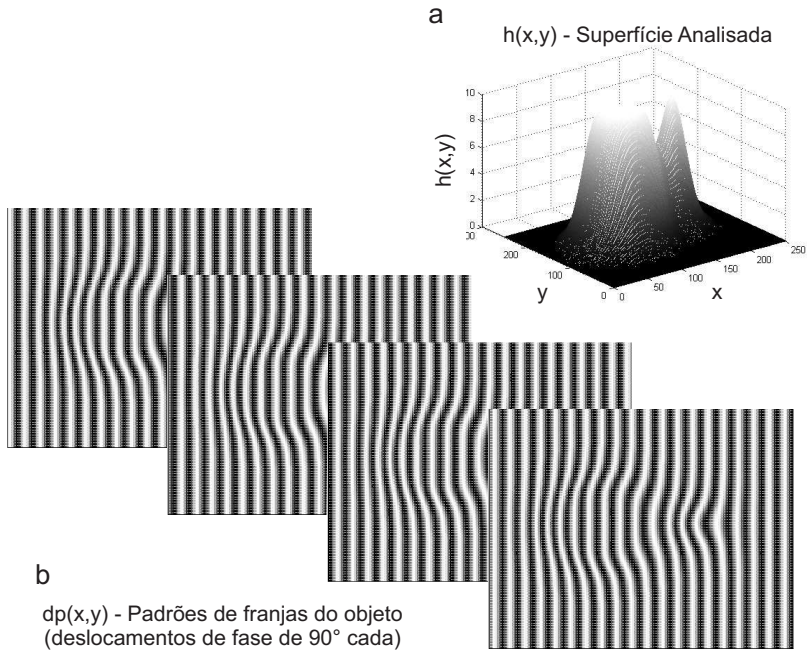
Assim como obtido através do método FTP, o valor do ângulo de fase calculado encontra-se no intervalo  $[-\pi, \pi]$ . Assim sendo, faz-se necessário empregar um algoritmo de remoção do salto de fase.

Assim como no caso do método FTP, uma simulação foi realizada com o objetivo de ilustrar o emprego desta técnica na estimação de forma 3D. A metodologia de medição utilizada é descrita simplificada pelo fluxograma apresentado na Figura 29.



**Figura 29: Metodologia de medição por Deslocamento de Fase**

Para realizar a simulação, foi gerada uma superfície contendo dois picos, apresentada na Figura 30 (a). Sobre esta superfície foi simulada a projeção de cada um dos padrões senoidais deslocados, como apresentado na Figura 30 (b).



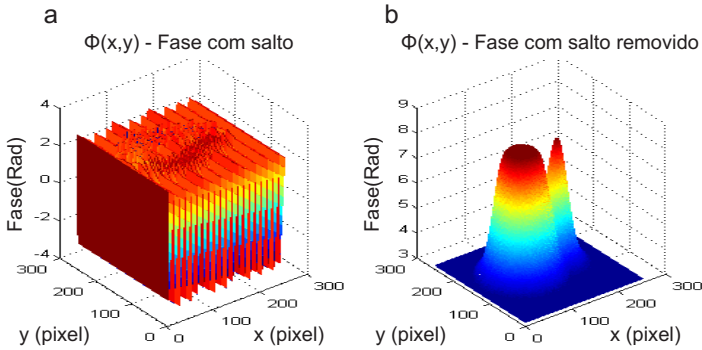
**Figura 30: a) Superfície empregada na simulação - b) Padrões senoidais projetados sobre superfície**

O mapa de fase com salto obtido pelo método é apresentado na Figura 31 (a). O mapa de fase, apresentado na Figura 31 (b) é calculado pelo emprego de um algoritmo de remoção de salto de fase.

A forma 3D da superfície pode então ser estimada empregando o mapa de fase calculado.

### 2.1.6 Tempo de Voo

Vários sistemas de medição baseiam-se na técnica de medição denominada tempo de voo (YUAN, 2009; ARTTU; ANSSI, 2009). Nesta técnica, a



**Figura 31: a) Mapa de fase com salto - b) Mapa de fase com salto removido**

distância de um objeto ou superfície é determinada pela medição do tempo decorrido entre a transmissão de um pulso e a detecção do sinal refletido. Este princípio é empregado nos sistemas RADAR (*radio direction and ranging*), SONAR (*sound navigation and ranging*) e LIDAR (*light direction and ranging*).

A utilização de pulsos Laser é predominante nos sistemas LIDAR. O princípio de funcionamento básico de um sistema como este é exibido na Figura 32. Um transdutor emissor (Laser) emite um pulso laser, que atravessa um semi-espelho e se propaga pelo meio até atingir um obstáculo (a). Ao atingir a superfície do obstáculo, o pulso é refletido. O pulso refletido retorna na direção do transdutor emissor e é então desviado por um semi-espelho a um transdutor detector (b). O tempo decorrido entre o disparo do pulso laser pelo transdutor emissor e a detecção do pulso refletido pelo transdutor detector pode ser medido (tempo de voo), e é empregado no cálculo da distância entre o sistema e o obstáculo.

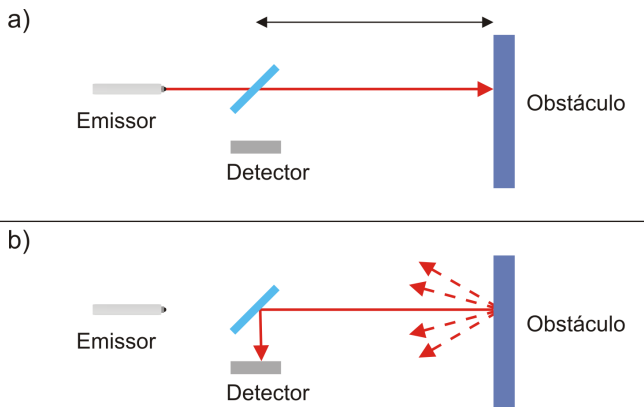
A distância  $d$  entre o referencial do sistema e o obstáculo pode ser calculada por:

$$d = \frac{vt}{2} \quad (2.51)$$

onde  $t$  corresponde ao tempo transcorrido entre o disparo do pulso laser pelo transdutor emissor e a detecção do pulso refletido pelo transdutor detector e onde  $v$  representa a constante conhecida que corresponde a velocidade da propagação da luz no meio.

O esquema ilustrado na Figura 32 somente permite a medição da distância de um ponto em uma dada direção. Para contornar esta limitação





**Figura 32: Esquema básico LIDAR**

são empregadas diferentes abordagens com o objetivo de mudar a direção do pulso, ampliando desta forma o campo de medição do sistema. A direção de medição pode ser alterada, por exemplo, girando o próprio sistema. Uma abordagem mais comum é a utilização de um sistema de espelhos móveis, que permite uma melhor precisão e maior velocidade. Sistemas como estes podem medir a distância de 10.000 a 100.000 pontos por segundo.

Na Figura 33 (esquerda) é exibido um exemplo de produto comercial que emprega a técnica descrita. Este *scanner* é utilizado para medir construções, terrenos, dentre outras estruturas. O sistema é capaz de apontar seu sistema laser em um amplo campo de medição através da rotação horizontal da cabeça e rotação vertical de um espelho.

Na Figura 33 (direita) é exibido o modelo de uma estrutura de refinamento de petróleo obtido com um *scanner* LIDAR. A nuvem de pontos densa apresentada foi obtida empregando os pontos medidos em 7 pontos de vista diferentes, e contém cerca de 16.000.000 pontos.

Outra aplicação onde os sistemas LIDAR são empregados é a robótica móvel. Neste caso, um sistema LIDAR é utilizado para extração da informação tridimensional da cena para orientar as ações do robô (LINGEMANN, 2004).



**Figura 33: Scanner LIDAR (Esquerda) / Modelo gerado com sistema LIDAR (Direita) (LEICA, 2009)**

## 2.2 SUMÁRIO

No presente Capítulo foi realizada uma revisão teórica de assuntos pertinentes ao desenvolvimento de um sistema de visão para medições tridimensionais. Este trabalho de revisão serviu como fundamento para a proposta descrita no Capítulo 3.

### 3 DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO 3D

Neste Capítulo é descrita a proposta e o desenvolvimento de um sistema de visão 3D para robótica móvel. O sistema combina um conjunto de modelos e métodos, selecionados dentre os que foram apresentados no Capítulo 2, com o objetivo de permitir a realização de medições tridimensionais de diferentes objetos observados. Além da implementação de abordagens de medição convencionais, um novo método de medição que permite a caracterização de formas em ambientes dinâmicos é proposto.

Inicialmente são descritos os requisitos levantados segundo a ótica de robótica móvel, que guiaram o desenvolvimento do sistema. A configuração do aparato utilizado para o desenvolvimento dos métodos de medição e para a realização das avaliações é posteriormente detalhada. Em seguida, são descritas as principais funcionalidades e métodos de medição disponibilizados, a fim de atender os requisitos levantados. Finalmente, os resultados experimentais obtidos com o sistema desenvolvido são apresentados.

#### 3.1 ESPECIFICAÇÃO E ANÁLISE DOS REQUISITOS

No presente trabalho propõe-se uma configuração básica para utilização no desenvolvimento de sistemas de visão 3D para robótica móvel. Um sistema de visão ou medição 3D pode ser empregado para diferentes fins. Embora o foco em robótica móvel reduza o número de aplicações a serem atendidas pelo sistema de visão, a gama de requisitos continua variada e alguns requisitos específicos devem ser observados.

Empregou-se uma configuração independente da aplicação de robótica móvel, tornando a sua utilização o mais ampla possível dentro deste contexto. Para delinear os limites dos requisitos a serem atendidos considerou-se que o software, em conjunto com o hardware necessário, deve agir como um dispositivo de captura cuja saída forneça informação tridimensional suficiente para operações gerais de robótica móvel. Desta forma, as aplicações a utilizarem o sistema ficam responsáveis por tratar a informação fornecida pelo dispositivo a fim de atender seus objetivos específicos.

Convencionou-se durante o levantamento dos requisitos e da seleção das técnicas a serem utilizadas que a informação gerada pelo dispositivo desenvolvido deveria ser suficiente para a realização do ciclo proposto por KRAGIC et al. (KRAGIC *et al.*, 2005), que sumariza a operação geral de

robôs móveis como uma combinação das etapas de detecção, aproximação e manipulação.

Com base nestas considerações, foram selecionados os seguintes requisitos funcionais e não funcionais a serem atendidos pelo sistema:

- O sistema deve permitir a calibração métrica dos parâmetros envolvidos nas medições;
- O sistema deve realizar a medição tridimensional métrica de objetos com forma complexa;
- O sistema deve gerar mapas de disparidade e nuvens tridimensionais densas;
- O sistema deve realizar a medição de objetos em movimento;
- O sistema deve ser adaptável para operar em plataformas móveis.

Sabe-se que algumas aplicações de robótica móvel, como as que assumem uma abordagem qualitativa (GASPAR, 1994), não necessitam calibração ou reconstrução métrica. Entretanto, um grande número de aplicações é baseado em abordagens métricas. Desta forma, os requisitos de calibração e medição tridimensional métrica basearam-se na consideração de que ao se introduzir a informação métrica são atendidos os dois grupos de aplicações.

O requisito que impõe a medição tanto de objetos suaves como de objetos complexos é incluído visto que algumas das técnicas de medição existentes apresentam limitações para tratar superfícies contendo descontinuidades abruptas.

O requisito da geração de mapas de disparidade e nuvens tridimensionais densas foi baseado no fato de que, ao contrário de informação esparsa, mapas ou nuvens densas fornecem informação suficiente para a realização de operações gerais de robótica móvel, descritas pelo ciclo detectar, aproximar e manipular. Além disso, considerou-se que a informação esparsa pode ser vista como subconjunto da informação densa, e que, desta forma, a abordagem densa deve atender inclusive as aplicações que eventualmente empregariam amostras de pontos característicos. Ainda, considerou-se que robôs autônomos móveis precisam de um mínimo de detalhes da cena para realizar um ciclo de operação completo. Informação sobre volume, tamanho e forma são necessários para tarefas de reconhecimento, para orientar a navegação através do ambiente e para manipular objetos. Apesar de apresentarem um

custo computacional mais elevado em relação à abordagem esparsa, a abordagem densa mostra-se uma opção cada vez mais viável devido ao avanço das arquiteturas de hardware e propostas de algoritmos mais eficientes.

Os requisitos que citam a operação em plataformas móveis ou ainda a medição de objetos em movimento foram explicitados visto que vários sistemas de medição adquirem informação tridimensional baseando-se na aquisição de uma sequência de imagens ou na projeção de luz e captura de imagens ao longo do tempo. Desta forma, deve-se considerar no momento da seleção das técnicas de medição, que para vários cenários de operação não existe a garantia de que os objetos medidos ou ainda o próprio robô permanecerá estático.

### 3.2 CONFIGURAÇÃO BÁSICA DO SISTEMA PROPOSTO

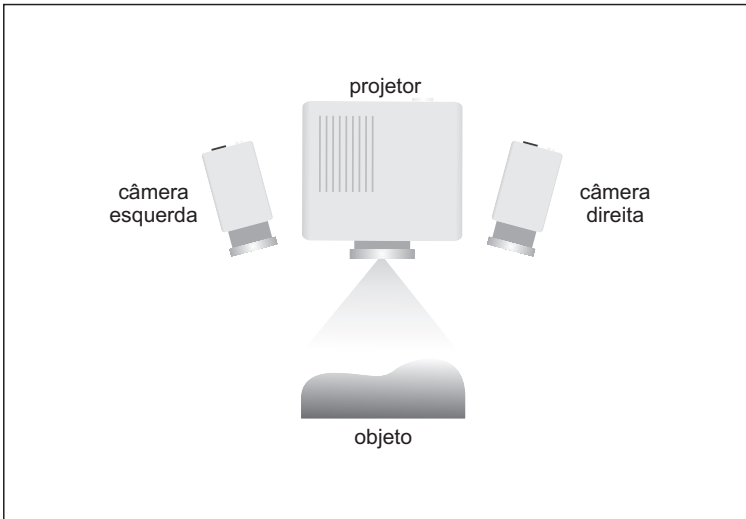
Sistemas de visão baseados em diferentes técnicas de medição podem ser considerados para utilização em um robô móvel. Ao longo do período inicial de desenvolvimento do presente trabalho, diferentes possibilidades foram estudadas e testadas, incluindo técnicas passivas monoculares, triangulação laser, estereoscopia passiva e ativa. Uma breve descrição de trabalhos de implementação e de ensaios realizados nesta etapa, que incluem o desenvolvimento completo de um sistema baseado em laser e também da avaliação de um sistema de medição por projeção de luz estruturada, pode ser verificados no Apêndice A. Adicionalmente, foram realizadas simulações em Matlab para alguns dos métodos candidatos, conforme descrito nas Seções 2.1.5.1 e 2.1.5.2. Observando os resultados obtidos nestes estudos e experimentos iniciais, e também observando os requisitos levantados citados na Seção 3.1, foi possível verificar que algumas abordagens se mostraram mais adequadas que outras.

A técnica de estereoscopia passiva, como descrito na Seção 2.1.2, é muito empregada em sistemas de visão para robótica móvel. Portanto, inicialmente apresenta-se como uma boa candidata. Porém, ao mesmo tempo que esta técnica pode atender a todos os requisitos em determinadas situações, sabe-se que são enfrentados muitos problemas na medição de superfícies com textura homogênea (SCHARSTEIN; SZELISKI, 2002; STIVANELLO, 2008). Nestes sistemas, os valores de intensidade assumem papel central na descrição de cada ponto do objeto. Para muitos cenários este tipo de descrição não se mostrará robusto, visto que o valor de intensidade de cada ponto é sensível a influências como diferenças no ganho das câmeras, variações radiométricas,

dentre outras. Consequentemente, falhas poderão ocorrer na etapa de correspondência de pontos sobre o par de imagens estéreo capturado pelo sistema binocular. Desta forma, o resultado de medição será comprometido.

As dificuldades encontradas na estereoscopia passiva para o tipo de aplicação considerada devem ser contornadas. Técnicas de medição ativa por projeção de luz estruturada, como é o caso das que se baseiam na projeção de franjas, se apresentam como uma alternativa interessante. Como descrito na Seção 2.1.5, a estimação de coordenadas 3D é baseada no cálculo da fase do sinal projetado, ao invés da avaliação das intensidades originais observadas no objeto. Desta forma, o problema associado à superfícies com textura homogênea pode ser solucionado. Em contrapartida, observa-se que a calibração entre a câmera e o projetor em sistemas como este mostra-se menos precisa e mais complexa do que a calibração do par de câmeras em sistemas de estereoscopia passiva (FALCAO; MASSICH, 2008).

De modo a contornar as limitações e fazer uso das vantagens de cada um dos métodos, optou-se por desenvolver um sistema que combina as duas técnicas (FANTIN, 1999). Na Figura 34 é apresentada a configuração simplificada de hardware proposta. É possível observar que nesta configuração, o modelo estereoscópico e o modelo de eixos ópticos cruzados, apresentados nas seções 2.1.2 e 2.1.5, são combinados.



**Figura 34: Configuração básica proposta**

Como pode ser observado, o sistema é composto por um par de câmeras e por um projetor. O conjunto é do tipo rígido, no sentido de que a posição relativa e orientação das câmeras, lentes ou projetor não são alterados durante a operação.

Esta configuração mostra-se interessante para um sistema de visão para robótica móvel. Dependendo do tipo de ação a ser realizada, diferentes níveis de qualidade ou do número de pontos medidos pelo sistema de visão são requeridos. Desta forma, diferentes métodos de medição, baseados tanto nas técnicas ativas como em técnicas passivas, podem ser disponibilizados. Isso permite um chaveamento entre as técnicas de medição durante a operação, de modo a utilizar a mais adequada para cada ação.

No sistema desenvolvido no contexto deste trabalho, foram disponibilizados métodos de medição por estereoscopia passiva e também métodos combinando estereoscopia e projeção de franjas, contemplando tanto técnicas ativas como passivas. Na Figura 35 são apresentados os fluxogramas simplificados descrevendo as principais etapas presentes em cada abordagem.

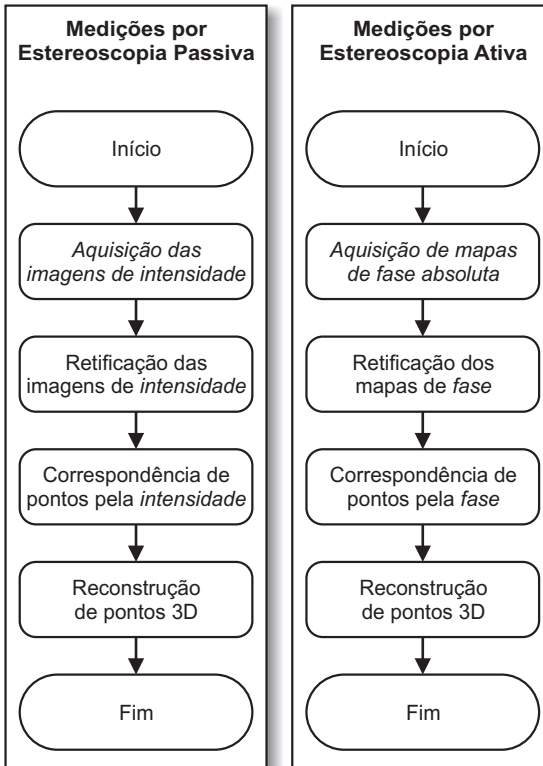
Para validar a abordagem proposta foi montado o sistema apresentado na Figura 36. Os componentes de hardware foram instalados sobre perfis e suportes de alumínio. As distâncias e ângulos entre as câmeras e o projetor podem ser facilmente alterados, em um momento de configuração, em função da distância, resolução e campo de visão desejados.

As especificações das câmeras, lentes, e projetor utilizados na construção do sistema de aquisição são apresentadas respectivamente pela Tabela 3.1, Tabela 3.2 e Tabela 3.3. Este sistema foi conectado a um computador de arquitetura x86 contendo um processador Pentium D de 2.8GHz e 2.0GB de memória RAM.

**Tabela 3.1: Especificação das câmeras utilizadas**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Fabricante	Point Grey
Modelo	Chameleon CMLN-13S2M/C
Sensor	CCD 1/3 Color
Resolução Máxima	1296 x 964
Interface:	USB 2.0

Com base neste sistema de hardware, diferentes métodos clássicos de



**Figura 35:** Fluxogramas simplificados de medições

**Tabela 3.2:** Especificação das lentes utilizadas

Parâmetro	Valor
Fabricante	Fujinon
Modelo	TF8DA-8B
Distância Focal	8mm
Campo de visão	1/3- 33°24' x 25°22'

medição foram implementados, na sua forma original ou de alguma forma adaptados. Adicionalmente, um novo método de medição rápida é proposto.



**Figura 36: Sistema montado****Tabela 3.3: Especificação do projetor utilizado**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Fabricante	Sony
Modelo	VPL-EX7
Projector system	TFT LCD Color
Resolução máxima	1024 x 768
Interface	Composite Video / S Video
Fluxo luminoso	2000 Lumens

Os detalhes de cada um dos métodos disponibilizados são descritos nas seções seguintes.

### 3.3 FUNCIONALIDADES E CARACTERÍSTICAS GERAIS

Nesta Seção são descritas as funcionalidades e características gerais do sistema, necessárias e associadas ao funcionamento dos métodos de medição implementados, descritos na Seção 3.4.

#### 3.3.1 Calibração do Sistema

Antes da utilização do sistema para realização de medições, é necessário que um procedimento de calibração seja realizado. Nesta etapa são determinados os parâmetros que descrevem o sistema binocular utilizado. É importante observar que para os métodos de medição implementados, descritos posteriormente, o projetor é usado para tornar visível sobre a superfície da peça a ser medida um padrão de luz estruturada com o qual é possível calcular mapas de fase. O projetor não é diretamente utilizado na estimação da profundidade, como tradicionalmente é empregado nos métodos de análise de franjas. Na abordagem utilizada, a estimação de profundidade é baseada na avaliação estereoscópica. Desta forma, a estimação da geometria entre câmeras e projetor não é requerida, e apenas uma calibração rígida descrevendo o relacionamento entre as câmeras se faz suficiente.

A rotina de calibração estéreo foi implementada neste sistema como um passo inicial, que antecede a operação do sistema de visão. Sabe-se, entretanto, de que mesmo sendo o sistema binocular fixo, em aplicações de robótica móvel eventualmente será necessária uma nova calibração devido a possível ocorrência de alterações na configuração do sistema resultante de colisões ou vibrações.

Conforme descrito na Seção 2.1.2.2, através da calibração estereoscópica são determinados os parâmetros do conjunto binocular necessários para a operação de um sistema de visão estéreo. Dentre os métodos de calibração estereoscópica disponíveis, foram considerados tanto os enquadrados na abordagem clássica como na projetiva. Considerando que o conjunto binocular utilizado não altera seus parâmetros durante a operação, e observando o requisito de reconstrução métrica, optou-se por empregar a abordagem clássica para o presente trabalho.

A calibração estereoscópica clássica, por sua vez, exige que cada câmera seja calibrada independentemente. Dentre os diferentes métodos de calibração de câmeras avaliados foi selecionado o método proposto por ZHANG descrito na Seção 2.1.1.4. O gabarito de calibração empregado

é simples e de fácil construção, consistindo em uma impressão em alta resolução em um papel de alta qualidade fixado sobre uma superfície plana e rígida. O padrão presente no gabarito é formado por um conjunto de quadrados pretos, organizados de maneira que os vértices formados pela junção dos mesmos são facilmente detectáveis. Além da simplicidade do gabarito, outra vantagem apresentada pelo método é que os resultados obtidos são superiores a outros métodos (TSAI, 1987), visto que durante a calibração são apresentadas várias amostras do gabarito obtidas em diferentes instantes e posições do ambiente. A calibração individual das câmeras por este método foi implementada empregando funções existentes na biblioteca OpenCV 2.4 específicas para calibração monocular de câmeras, e que seguem a descrição de calibração clássica apresentada na Seção 2.1.1.4.

Na Figura 37 é apresentado um cenário de calibração do sistema.



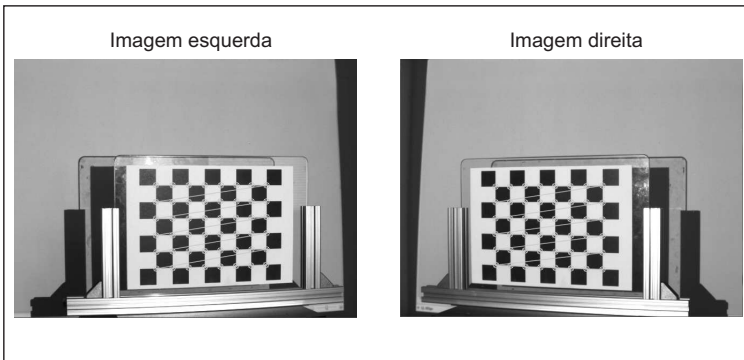
**Figura 37: Cenário de calibração**

O primeiro passo da rotina de calibração estéreo consiste na calibração de cada câmera do conjunto binocular de forma independente. Nesta etapa, são capturadas várias amostras do gabarito de calibração, cuja geometria é conhecida. Cada amostra é capturada em diferentes instantes, e para cada uma delas o gabarito é posicionado em diferentes localizações do ambiente. Nesta etapa deve-se apresentar o gabarito em diferentes profundidades, de maneira a representar toda a faixa nas quais as câmeras irão operar. Este procedimento

evita que os parâmetros de calibração sejam somente válidos em torno de uma dada posição. Observa-se ainda que na utilização de padrões coplanares, podem ser obtidos resultados discrepantes quando o gabarito está posicionado aproximadamente paralelo ao plano de imagem. Por este motivo esta configuração deve ser evitada, sendo sempre empregada uma angulação relativa entre o gabarito e o plano de imagem superior a 30 graus (BENEVENUTI, 2001).

Em cada amostra capturada são identificados os vértices internos do padrão presente no gabarito, correspondendo aos pontos característicos de interesse. Para cada ponto são associadas coordenadas do ambiente. A origem do ambiente é definida como sendo o primeiro vértice interno partindo do canto superior esquerdo do gabarito. As coordenadas  $X$  e  $Y$  dos outros vértices internos refletem a distância em milímetros em relação à origem. A coordenada  $Z$  é definida como 0.

Na Figura 38 são exibidas imagens que ilustram uma dada apresentação do gabarito no momento da calibração estereoscópica, onde as imagens correspondem às amostras capturadas pelas câmeras da direita e da esquerda, respectivamente.



**Figura 38: Apresentação do gabarito para calibração estéreo**

Para cada amostra, o conjunto de pares formados pelos pontos na imagem e suas respectivas coordenadas do ambiente são apresentados para a função que implementa a estimação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera, que segue a descrição realizada na Seção 2.1.1.4.

Dentre os parâmetros intrínsecos obtidos encontram-se a distância focal em unidade de pixel, as coordenadas da posição central da imagem em coordenadas de pixel e os coeficientes de distorção das lentes. Já dentre os

parâmetros extrínsecos obtidos, encontram-se a matriz de rotação e a matriz de translação.

Após a calibração individual de cada câmera, são calculados os parâmetros de calibração do sistema de visão estéreo. Conforme descrito na Seção 2.1.2.1, o conjunto de parâmetros intrínsecos do conjunto estéreo corresponde aos parâmetros intrínsecos das duas câmeras que o compõe. Os parâmetros extrínsecos, por sua vez, são calculados diretamente a partir dos parâmetros extrínsecos das duas câmeras, empregando as equações 2.24 e 2.25 no cálculo da matriz de rotação e da matriz de translação.

Finalmente, os parâmetros extrínsecos de cada câmera são alterados em função dos parâmetros extrínsecos do sistema estéreo, de modo que a origem do sistema de coordenadas do mundo esteja fixada na primeira câmera, ou seja,  $R_e = [I]$ ,  $t_e = [0]$ ,  $R_d = R$  e  $t_d = t$ .

A avaliação dos resultados obtidos na calibração é realizada na Seção 3.5.1.

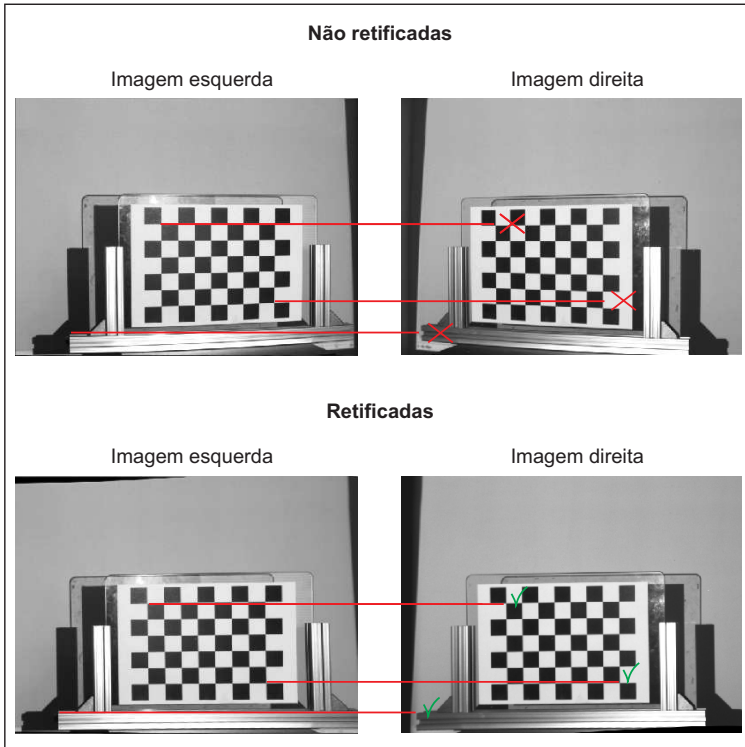
### 3.3.2 Retificação do Par de Imagens Estéreo

Conforme descrito na Seção 2.1.2.3, a retificação simplifica consideravelmente a complexidade do problema de correspondência ao alinhar os pontos correspondentes nas duas imagens de um par estéreo. Na verdade, a retificação é considerada como um passo preliminar para muitos algoritmos de correspondência. Por este motivo, esta funcionalidade foi disponibilizada para fornecer o suporte necessário à etapa de correspondência densa.

O algoritmo de retificação emprega os parâmetros obtidos na calibração e segue os passos descritos na Seção 2.1.2.3, alinhando os pontos correspondentes do par estéreo de imagens de forma a limitar a busca por pontos correspondentes entre as duas imagens ao longo da linha horizontal.

Na Figura 39 é apresentado um par de imagens não retificadas do gabarito de calibração (acima), e seu respectivo par de imagens retificadas (abaixo). As linhas que ligam os pares de imagens ilustram, para diferentes pontos do par retificado, como as correspondências podem ser feitas ao longo de um único eixo. O mesmo não ocorre nas imagens não retificadas.

A partir das correspondências feitas sobre as imagens retificadas, pode-se aplicar a transformação inversa à empregada para realizar a retificação de modo a restaurar as coordenadas originais dos pontos. En-



**Figura 39: Retificação do par de imagens estéreo**

retanto, é possível realizar a reconstrução diretamente a partir de pontos correspondentes retificados (TRUCCO; VERRI, 1998).

### 3.3.3 Correspondência Estéreo

O processo de correspondência entre pontos das imagens que compõe um par estéreo corresponde a uma etapa importante para a geração de mapas de disparidade densos. Esta etapa é considerado por muitos como o problema principal da estereoscopia, e por este motivo tem sido vastamente estudada. Diversos algoritmos têm sido desenvolvidos, seguindo tanto abordagens locais, globais ou mesmo híbridas (SCHARSTEIN; SZELISKI, 2002).

Voltados normalmente para correspondência baseada em valores de

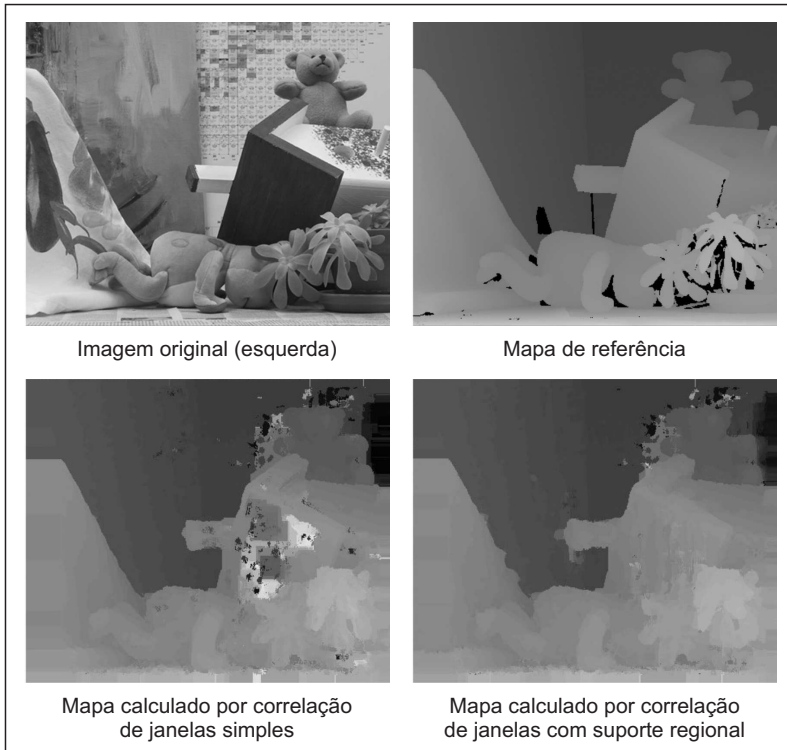
intensidade, muitos destes algoritmos são baseados em técnicas elaboradas envolvendo segmentação, minimização de funções de custo e ajuste de planos. Desta forma, procuram contornar principalmente o problema associado a regiões homogêneas existente nas técnicas clássicas baseadas em correlação de janelas. Exemplo disso é o algoritmo de correspondência baseado em suporte regional, proposto dentro do contexto de pesquisas realizadas com estereoscopia passiva (STIVANELLO *et al.*, 2010). Como ilustrado na Figura 40, este algoritmo consegue melhores resultados na correspondência em regiões com valores de intensidade similares quando comparado aos resultados obtidos por algoritmos por correlação de janelas simples. Para isso, a abordagem utilizada no processo de correlação emprega uma nova função de custo que inclui informação de componentes de alta frequência presentes na periferia do ponto avaliado.

Apesar de que algoritmos cada vez mais elaborados têm surgido, ainda encontra-se falta de robustez quando são considerados diferentes cenários ou ambientes. Além disso, a utilização destes algoritmos mais complexos para aplicações com requisito de tempo real torna-se difícil ou impraticável. Por este motivo, em aplicações de robótica, a correspondência por correlação de janelas simples ainda é amplamente utilizada.

Para o sistema desenvolvido no presente trabalho, a correlação de janelas simples foi selecionada visto que, como descrito na Seção 3.4, para os métodos de medição propostos o valor utilizado na comparação entre as janelas é o valor de fase de cada ponto, ao invés do valor de intensidade original. Com isso, além de se conseguir robustez no tratamento de superfícies com textura homogênea ao se considerar a fase, pode-se fazer uso da simplicidade da correlação de janelas simples para possíveis implementações em hardware, por exemplo.

O algoritmo implementado segue a descrição realizada na Seção 2.1.2.3. A correlação de janelas utiliza uma função de custo que levam em conta a similaridade dos valores de cada ponto da imagem, baseada na soma das diferenças absolutas (*SAD*). Duas versões do algoritmo foram disponibilizadas, utilizando tanto valores de intensidade como valores de fase.

Adicionalmente, com o objetivo de remover pontos semi-occlusos ou correspondências incorretas dos mapa de disparidade gerados, foi incluída uma verificação de consistência conhecida como *Left-Right Consistency Check* (SCHARSTEIN; SZELISKI, 2002). Esta verificação consiste em pegar o valor de disparidade computado em uma imagem, e retroprojetar o mesmo na



**Figura 40: Correspondência por correlação de janelas (Método Simples - Método proposto com Suporte Regional)**

outra imagem. Se a diferença entre os valores for maior ou igual a um dado limiar, então o ponto é marcado como uma correspondência inconsistente.

A implementação direta do procedimento de correlação descrito resultou em um algoritmo com custo computacional elevado, incluindo vários laços associados ao fluxo de processamento. Esta característica é ainda mais evidente quando janelas grandes foram utilizadas. Para resolver o problema realizou-se uma pesquisa em busca de possíveis otimizações dos algoritmos. Com base nas técnicas de otimização levantadas novas versões dos algoritmos foram implementadas. A inclusão do cálculo otimizado da função de custo que leva em consideração a sobreposição de janelas vizinhas (STEFANO; MATTOCCIA, 2000) foi suficiente para fazer com que as novas versões consumissem muito menos tempo de processamento, sem prejudicar



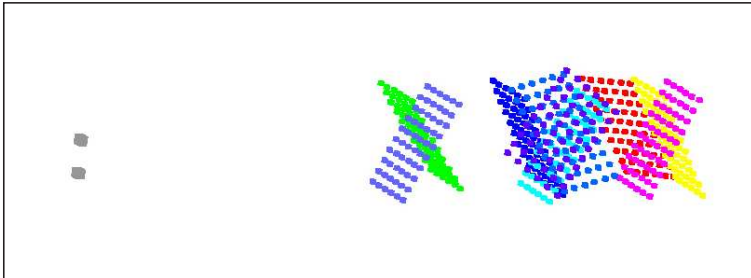
os resultados qualitativos obtidos nas versões originais dos algoritmos. Outras otimizações muito empregadas, como as que se baseiam na utilização de hardware específico, não foram utilizadas. Porém, sabe-se que é possível diminuir em muito o tempo de processamento empregando estas técnicas (JIN *et al.*, 2010; STEFANO; MATTOCCIA, 2000; STEFANO *et al.*, 2004).

A avaliação dos resultados obtidos na correspondência de pontos é realizada na Seção 3.5.2.

### 3.3.4 Reconstrução

Empregando os parâmetros estimados no momento da calibração, e utilizando os pares de pontos correspondentes obtidos na etapa de correspondência, é possível realizar a reconstrução. Dado o tipo de sistema binocular utilizado e os parâmetros de calibração conhecidos, torna-se viável realizar a reconstrução métrica através de triangulação. O algoritmo implementado segue a descrição feita na Seção 2.1.2.4.

A Figura 41 exibe a plotagem referente à reconstrução dos pontos do gabarito em uma seqüência de amostras utilizadas na calibração do conjunto binocular. Os centros de projeção das câmeras também são reconstruídos.



**Figura 41: Reconstrução do cenário de calibração**

A avaliação dos resultados obtidos na reconstrução é realizada na Seção 3.5.3.

## 3.4 MÉTODOS DE MEDIÇÃO IMPLEMENTADOS

No sistema desenvolvido no contexto deste trabalho, além do método de medição estereoscópica passiva clássica, foram disponibilizados dois ou-

tros métodos de medição combinando estereoscopia com projeção de luz estruturada. Na Seção 3.4.1 é descrita a proposta de um novo método de medição baseado em projeção de franjas, que permite a medição de objetos em ambientes dinâmicos. Na Seção 3.4.2 é descrita a implementação de um método de medição baseado na técnica clássica de deslocamento de fase, a ser utilizado, dentre outros fins, como referência para comparação e avaliação dos resultados obtidos com o método proposto.

### **3.4.1 Medição 3D Através de Estereoscopia Ativa por Projeção de Franjas Empregando FTP Modificado e Batimento**

Nesta Seção é descrita a proposta de um novo método de medição por projeção de luz estruturada. Este método combina estereoscopia e projeção de franjas. A análise das franjas é realizada por uma versão modificada da técnica FTP, combinada à técnica de batimento para obtenção de mapas de fase absoluta. Em seguida, um mapa de disparidades é gerado a partir da correspondência dos mapas de fase absoluta calculados sobre as imagens de cada câmera. A reconstrução de nuvens de pontos é realizada, por sua vez, através da triangulação estereoscópica convencional.

Inicialmente, na Seção 3.4.1.1, é descrito o método de análise de franjas. Em seguida, na Seção 3.4.1.2, é realizada a descrição geral do método de medição proposto.

#### **3.4.1.1 Cálculo de Fase Absoluta Através de FTP Modificado e Técnica de Batimento**

Nesta Seção é proposto um método para obtenção de mapas de fase absoluta que essencialmente corresponde a uma adaptação do método FTP original, descrito na Seção 2.1.5.1, de modo que possa ser combinado com a técnica de batimento. Através do método proposto, é possível contornar a limitação existente no uso do método FTP original associado à remoção dos saltos de fase, que dificulta a medição de profundidade de objetos com descontinuidades abruptas, sombras ou oclusões.

Como no método original, um projetor é utilizado para emitir um padrão de franjas senoidais verticais sobre o mensurando. Uma câmera é utilizada para capturar imagens do padrão de franjas sobre o objeto. Em função do ponto de vista da câmera utilizada, mudanças de altura na superfície medida

serão transformados em distribuição de fase no padrão de franjas distorcido observado.

Desta forma, uma etapa de análise das franjas distorcidas deve ser realizada para extrair a informação de fase, de modo a se obter para cada imagem capturada um mapa de distribuição de fase. O padrão de franjas distorcidas observado em uma imagem capturada pela câmera, descrito pela Equação 2.31, pode ser convenientemente descrito na seguinte forma:

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y) + c^*(x, y) \quad (3.1)$$

onde:

$$c(x, y) = \frac{1}{2}b(x, y) \exp[i2\pi u_0 x + i\phi(x, y)] \quad (3.2)$$

com:

$$\phi(x, y) = \phi_0(x, y) + \phi_z(x, y) \quad (3.3)$$

onde  $g(x, y)$  representa o valor de intensidade na posição  $(x, y)$ ,  $\phi_0(x, y)$  corresponde ao valor da modulação de fase original,  $\phi_z(x, y)$  corresponde ao deslocamento de fase resultante da distribuição de altura do objeto,  $u_0$  corresponde à frequência portadora do padrão de franjas,  $a(x, y)$  e  $b(x, y)$  representam, respectivamente, variações de iluminação e contraste não desejados derivados da distribuição não uniforme de reflectância da superfície do objeto e onde  $*$  denota o conjugado do número complexo (TAKEDA; MUTOH, 1983).

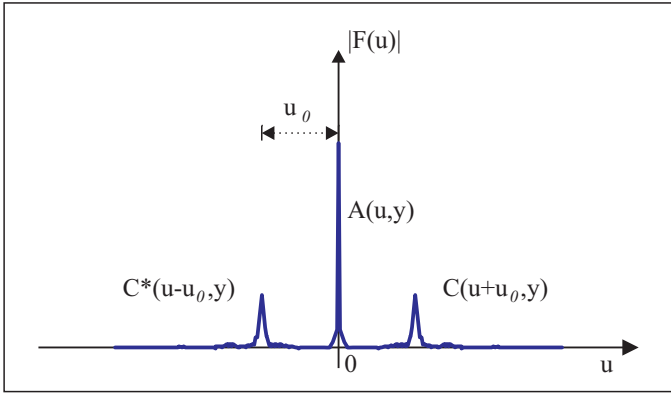
Empregando o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT) na Equação 3.1 com respeito a  $x$  é possível obter:

$$G(u, y) = A(x, y) + C(u - u_0, y) + C^*(u + u_0, y) \quad (3.4)$$

onde as letras maiúsculas denotam o espectro de Fourier e onde  $u$  denota a frequência portadora na direção  $x$ .

É importante observar que na maioria dos casos  $a(x, y)$ ,  $b(x, y)$  e  $\phi(x, y)$  variam lentamente quando comparados com a variação introduzida pela frequência portadora  $u_0$ . Assim, como ilustrado na Figura 42, os espectros  $C(u - u_0, y)$  e  $C^*(u + u_0, y)$  são separados pela frequência portadora  $u_0$ .

Empregando um filtro passa banda sobre  $G(u, y)$  é possível selecionar um dos espectros separados pela portadora, como o espectro  $C(u - u_0, y)$  por exemplo. Como exibido na Figura 43, isso pode ser feito empregando um filtro passa-banda com uma função de transferência  $H(u)$  apropriada. Como



**Figura 42: Espectros de um padrão de franjas separados por portadora**

pode ser observado, diferente do método FTP original, aqui o espectro selecionado não é transladado para a origem. Desta forma, a rampa associada à modulação de fase original não é eliminada. A informação de fase associada à modulação original é útil e ajuda evitar ambiguidades na correspondência estéreo, como discutido posteriormente.

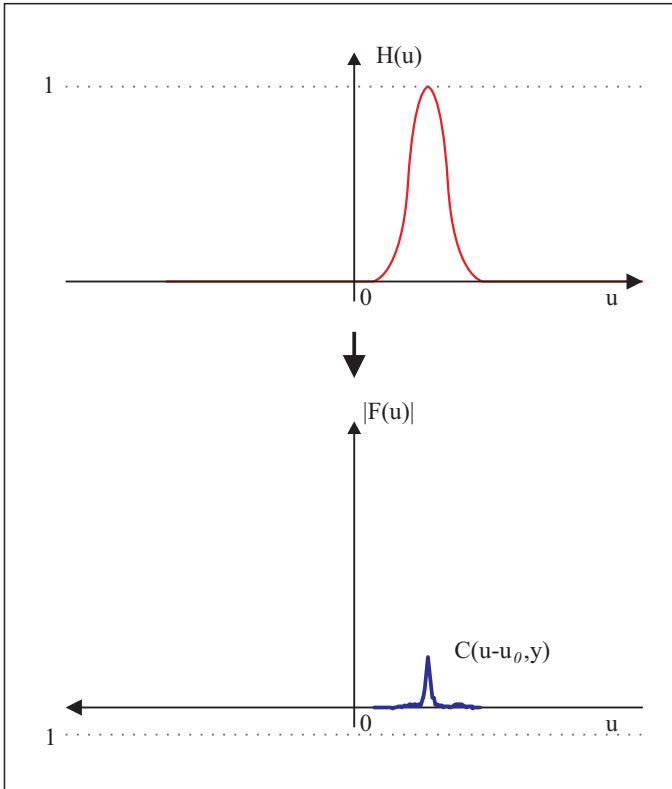
É importante observar que a variação de fundo indesejada,  $a(x,y)$ , foi eliminada neste momento. Agora, empregando o algoritmo da Transformada Inversa de Foutier (IFFT) sobre  $C(u - u_0, y)$ , é obtido  $c(x,y)$ . Calculando o logaritmo complexo sobre a Equação 3.2:

$$\log[c(x,y)] = \log\left[\frac{1}{2}b(x,y)\right] + i2\pi u_0 x + i\phi(x,y) \quad (3.5)$$

é obtida a fase relativa  $\phi(x,y) = 2\pi u_0 x + \phi_h(x,y)$  na parte imaginária, completamente separada da variação de amplitude indesejada  $b(x,y)$  na parte real. Aqui, a fase relativa  $\phi(x,y)$  contém a informação de fase correspondente às descontinuidades de altura do objeto, combinada com a informação proveniente da modulação de fase original.

O cálculo da fase descrito nos dá valores variando de  $-\pi$  a  $\pi$ . Nesta etapa, a distribuição de fase apresenta saltos de  $2\pi$ , como discutido na Seção 2.1.5. A remoção de salto de fase através de um procedimento de comparação dos valores na vizinhança dos pixels para adicionar ou subtrair  $2\pi$  não se mostra robusto para objetos com sombras, oclusões ou descontinuidades.

Como alternativa, propõe-se utilizar o princípio de batimento para calcular o valor de fase absoluta, sem a presença de saltos (REICH *et al.*, 1997; ZUMBRUNN, 1987). Como exibido na Figura 44, duas funções de fase  $\phi_1(x,y)$

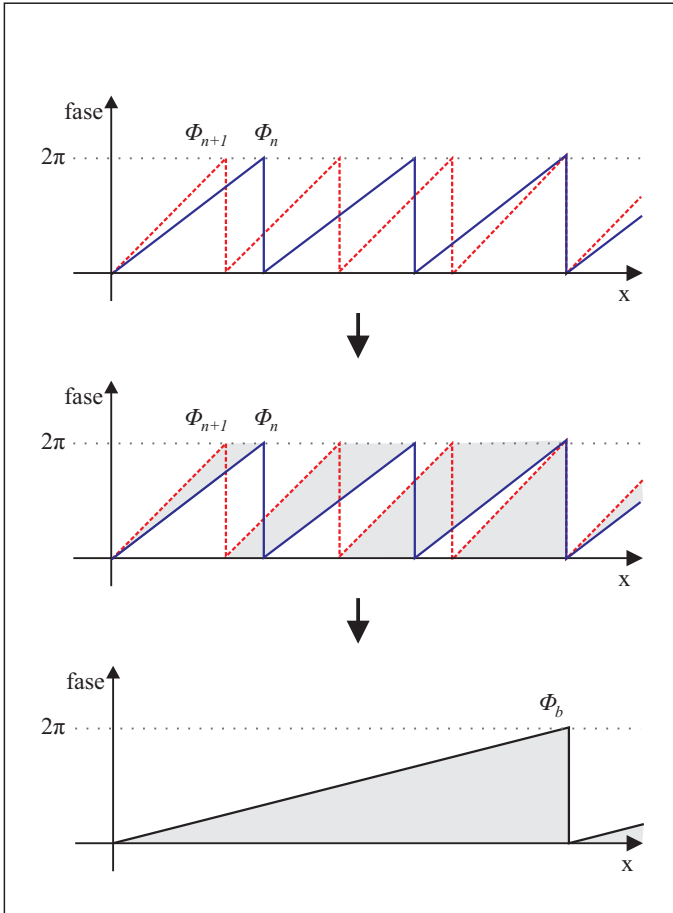


**Figura 43: Espectro isolado através de seleção por filtro passa-banda**

e  $\phi_2(x, y)$  podem ser obtidas analisando-se dois padrões de franjas de diferentes frequências capturados por uma câmera. Estas funções são então subtraídas de forma a se obter uma função de batimento  $\Phi(x, y)$  de frequência  $\lambda_b$ :

$$\lambda_b = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (3.6)$$

As frequências  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  das funções de fase  $\phi_1(x, y)$  e  $\phi_2(x, y)$  devem ser escolhidas de modo que a função de batimento resultante  $\Phi(x, y)$  não assuma valores iguais ao longo do campo de visão.



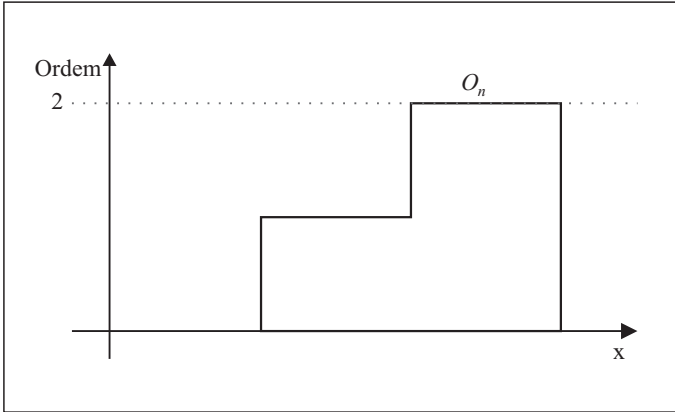
**Figura 44: Função de batimento**

Escolhendo uma das funções de fase, como  $\phi_1(x, y)$ , a função de ordem é obtida por:

$$O_1(x, y) = \frac{\Phi(x, y)\lambda_1 - \phi_1(x, y)}{2\pi} \quad (3.7)$$

como ilustrado na Figura 45.

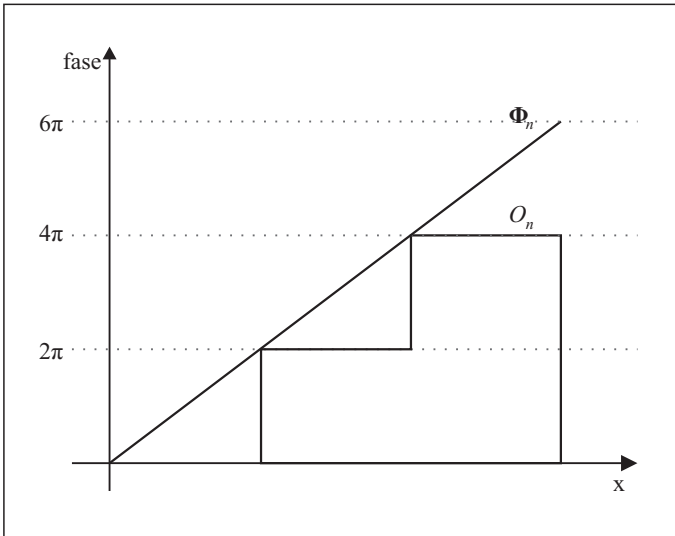
Finalmente, como ilustrado na Figura 46, a fase absoluta  $\Phi_1(x, y)$  pode



**Figura 45: Função de ordem**

ser obtida adicionando  $\phi_1(x, y)$  à função de ordem  $O_1(x, y)$  multiplicada por  $2\pi$ :

$$\Phi_1(x, y) = \phi_1(x, y) + O_1(x, y)2\pi \quad (3.8)$$



**Figura 46: Fase absoluta baseada na função de ordem**

A fase absoluta  $\Phi(x,y)$  pode ser calculada da mesma maneira, caso desejado.

Como descrito, dois mapas de fase relativa com saltos obtidos pela análise das imagens de dois padrões deformados com diferentes frequências portadoras são necessários para calcular um mapa de fase absoluta sem salto. Como consequência, são necessárias a projeção de dois padrões com aquisição de uma imagem para cada um deles.

São propostas duas diferentes abordagens para utilizar o método proposto para aplicações com requisitos de tempo real, ou onde medições rápidas se façam necessárias.

Uma primeira possibilidade envolve a projeção e aquisição de apenas uma imagem, utilizando multiplexação por cor. Multiplexação por cor já tem sido utilizada com sucesso em combinação com a técnica de deslocamento de fase, onde padrões com deslocamentos de franjas são combinados por cor para a aquisição instantânea de objetos que não contenham descontinuidade (ZHANG; ZHANG, 2009). Se o método de análise de franjas proposto for observado, verifica-se que é possível utilizar um projetor e uma câmera coloridos para emitir cada um dos dois padrões requeridos em canais de cor diferentes. Adicionalmente, o terceiro canal de cor disponível poderia ser utilizado para projetar uma imagem homogênea de modo a reduzir a influência de variações de fundo. É importante observar que, para utilizar esta abordagem, uma calibração adicional é necessária de modo a desacoplar os canais de cores do projetor e da câmera.

Uma segunda possibilidade seria projetar os dois padrões requeridos consecutivamente, muito rapidamente, capturando as imagens de cada padrão de modo sincronizado com o projetor. Esta abordagem já tem sido utilizada com sucesso também com o método de deslocamento de fase de três passos (WEISE *et al.*, 2007). Entretanto, a utilização desta técnica envolve a utilização de equipamento especial, como câmeras e projetores rápidos onde a sincronização é possível. Adicionalmente, quando utilizada esta abordagem, correções para redução da influência de pequenos deslocamentos de objetos móveis pode ser necessária.

Finalmente, é importante observar que o método de recuperação de fase descrito também é aplicável para a Transformada de Fourier Bidimensional (LIN; SU, 1995).



### 3.4.1.2 Descrição Geral do Método de Medição Proposto

O método de medição proposto combina estereoscopia e projeção de franjas para estimar a forma tridimensional de objetos. A abordagem pode ser utilizada em aplicações que envolvam ambientes dinâmicos e permite a medição de objetos incluindo oclusões, sombras e descontinuidades.

Um projetor é utilizado para emitir um padrão de franjas sobre o objeto de interesse. As câmeras são utilizadas para capturar imagens do padrão de franjas deformadas sobre o objeto, de pontos de vista diferentes do utilizado para projeção. Como comentado previamente, dado o ponto de vista de cada câmera, mudanças na altura da superfície são transformadas em distribuição de fase na imagem capturada do padrão distorcido. Desta forma, o valor de fase pode ser utilizado para orientar o estágio de correspondência de pontos existente no procedimento de medição por estereoscopia.

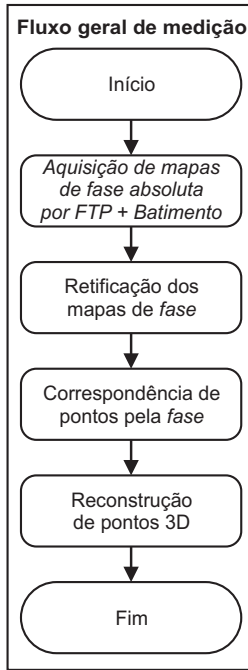
Como um passo de preparação, um procedimento de calibração deve ser realizado de modo a estimar os parâmetros que descrevem o sistema, conforme descrito na Seção 3.3.1. Na etapa de aquisição de imagens, o projetor é utilizado para emitir dois padrões contendo franjas verticais, seja por projeção sequencial ou seja por multiplexação de cor. As câmeras, de modo sincronizado com a projeção, são utilizadas para capturar imagens dos padrões sobre a superfície do objeto de interesse.

Na Figura 47 é exibido o fluxograma que descreve as principais etapas do procedimento de medição.

Um par estéreo de mapas de fase absolutas, sendo um para a câmera da esquerda e um para a câmera da direita, são calculados utilizando o procedimento proposto na Seção 3.4.1.1.

Em seguida, uma filtragem baseada em modulação é realizada nestes mapas para isolar as áreas de interesse ou áreas confiáveis. Sabe-se que baixa modulação pode indicar descontinuidades geométricas, sombras, furos ou áreas com baixa reflectividade ou iluminação saturada (ZHANG; ZHANG, 2009). Desta forma, a filtragem é realizada para eliminar regiões propensas a erros de medição.

Em seguida, o par estéreo de mapas de fase absoluta é retificado de modo a alinhar as linhas epipolares, conforme descrito na Seção 3.3.2. Um mapa de disparidades é calculado, em seguida, utilizando o procedimento de correspondência densa baseado em correlação de janelas, conforme descrito na Seção 3.3.3. Aqui, porém, é utilizada uma função de custo *SAD* modifi-



**Figura 47: Fluxograma do procedimento de medição (FTP + Batimento)**

cada, descrita na Equação 3.9, que utiliza valores de fase ao invés de valores de intensidade:

$$C_{sad}(x, y, d) = \sum_{i, j=-n}^n |\phi_l(x + j, y + i) - \phi_r(x + d + j, y + i)| \quad (3.9)$$

onde  $d$  é uma dada disparidade,  $\phi_l(x, y)$  e  $\phi_r(x, y)$  correspondem ao valor de fase absoluta nos mapas da esquerda e da direita, respectivamente. Uma janela de tamanho  $2n + 1$  é utilizada. É importante observar que, para o caso onde mapas de fase livres de ruído forem obtidos, é possível realizar a correspondência através da comparação direta entre os pixels, sem empregar a correlação baseada em janelas. Também é interessante considerar que uma interpolação *subpixel* poderia ser considerada neste procedimento, de modo a refinar ainda mais os resultados.

A verificação de consistência *Left-Right Consistency Check* é realizada

para remover pontos semi-occlusos ou correspondências incorretas no mapa de disparidade final (STEFANO; MATTOCCIA, 2000; STEFANO *et al.*, 2004).

Por fim, uma nuvem de pontos 3D é calculada através de triangulação estéreo, como descrito na Seção 3.3.1, empregando o mapa de disparidade e as informações de calibração do sistema.

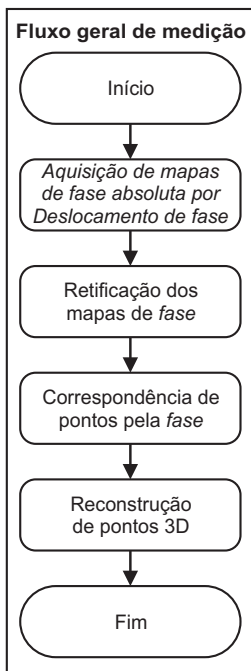
### **3.4.2 Medição Estereoscópica Ativa por Projeção de Franjas Baseado em Deslocamento de Fase**

Além do método de medição proposto, descrito na Seção 3.4.1, um segundo método de medição por projeção de franjas foi implementado. Este método é baseado na técnica de deslocamento de fase de 4 passos, apresentado na Seção 2.1.5.2. O método de deslocamento de fase é bem conhecido, muito utilizado e bastante exato. Desta forma, serve convenientemente como referência para avaliação dos resultados obtidos com o método proposto.

Este método é baseado na projeção de diversas franjas com valor de fase deslocado. Por este motivo, sua utilização para ambientes dinâmicos ou plataformas móveis se torna difícil, visto que a posição relativa dos objetos observados nas imagens poderá mudar ao longo das projeções e aquisições. De qualquer modo, estando disponível em um sistema de visão como o descrito, poderá ser utilizado em situações onde a estabilidade da cena ou do sistema seja garantida.

Na Figura 48 é exibido o fluxograma que descreve as principais etapas do procedimento de medição. Como pode ser observado, o fluxo de processamento é praticamente o mesmo que o empregado no método descrito na Seção 3.4.1. A única diferença existente refere-se à etapa da geração dos mapas de fase absoluta, que neste caso requer mais passos de projeção e aquisição.

Para cada câmera, dois mapas de fase com salto com diferentes frequências são adquiridos, através da técnica de deslocamento de fases descrito na Seção 2.1.5.2. Esta etapa exige que sejam projetadas e adquiridas 8 imagens no total. Por sua vez, a remoção dos saltos de fase para obtenção de mapas de fase absoluta é realizada pela técnica de batimento, de maneira similar ao procedimento descrito na Seção 3.4.1.1. Uma filtragem por modulação também é realizada, de forma a eliminar pontos em regiões propensas a erros. Mapas de disparidade são gerados, e posteriormente utilizados na reconstrução de pontos, de forma similar ao que foi descrito na Seção 3.4.1.2.



**Figura 48: Fluxograma do procedimento de medição (Deslocamento de fase)**

### 3.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta Seção são descritos os resultados obtidos através da utilização das funcionalidades implementadas no sistema proposto. Inicialmente algumas das funcionalidades principais são avaliadas isoladamente, como é o caso da calibração do sistema, da correspondência e da reconstrução de pontos. Em seguida, os métodos de medição são avaliados como um todo sob diferentes aspectos.

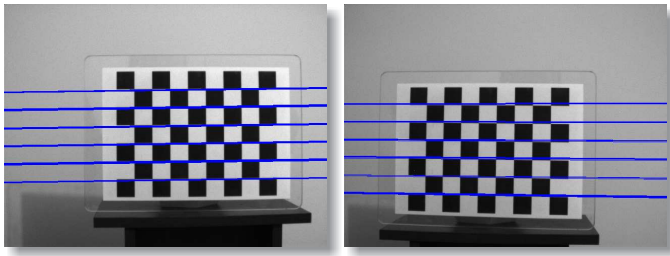
#### 3.5.1 Calibração do Sistema

Conforme descrito na Seção 2.1.2.1, para um dado ponto na imagem da esquerda existe uma reta epipolar associada na imagem da direita que deve conter o ponto correspondente, e vice-versa. Esta relação é estabelecida

pela geometria epipolar, que para um dado sistema de visão estereoscópica encontra-se descrita pelos parâmetros obtidos na calibração. Sendo assim, é possível utilizar a distância existente entre os pontos e as retas epipolares onde estes deveriam aparecer como medida da qualidade obtida para uma dada calibração (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003; STIVANELLO, 2008).

Este critério foi empregado para avaliação da qualidade obtida pelo método implementado. O sistema de visão estereoscópica foi calibrado três vezes, com distâncias de medição variando de 900 mm a 1400 mm. O gabarito utilizado na calibração, do tipo descrito na Seção 3.3.1, apresenta passos de  $28,20 \pm 0,05$  mm.

Para cada cenário utilizado, após a calibração ter sido realizada, foram capturados vários pares de imagens contendo o padrão empregado. Tomando a imagem da esquerda de cada par estéreo, para cada um dos 48 pontos presente no padrão foi calculada a linha epipolar sobre a imagem da direita onde o ponto correspondente deveria estar localizado. De maneira similar, foram calculadas as linhas epipolares para os pontos da imagem da direita, conforme apresentado pela Figura 49.



**Figura 49: Avaliação das distâncias entre linhas epipolares e vértices**

A distância entre cada ponto correspondente e a linha epipolar calculada foi então computada através da Equação 3.10. Este procedimento foi repetido para todos os pares capturados.

$$d = \frac{|ax + by + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (3.10)$$

Na Tabela 3.4 são apresentados os resultados obtidos seguindo o critério de qualidade estabelecido, para todos os cenários de calibração. Os valores estão apresentados em unidade de pixel.

Os resultados obtidos na avaliação de qualidade da calibração fo-

**Tabela 3.4: Distância entre vértices e linhas epipolares associadas (pixels)**

Parâmetro	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
$\bar{x}$	0,83	0,83	0,72
$\sigma$	0,46	0,46	0,40
Mínimo	0,03	0,01	0,01
Máximo	2,74	2,65	3,22

ram condizentes aos resultados obtidos em trabalhos anteriores (STIVANELLO, 2008), e foram considerados satisfatórios.

### 3.5.2 Correspondência Estéreo

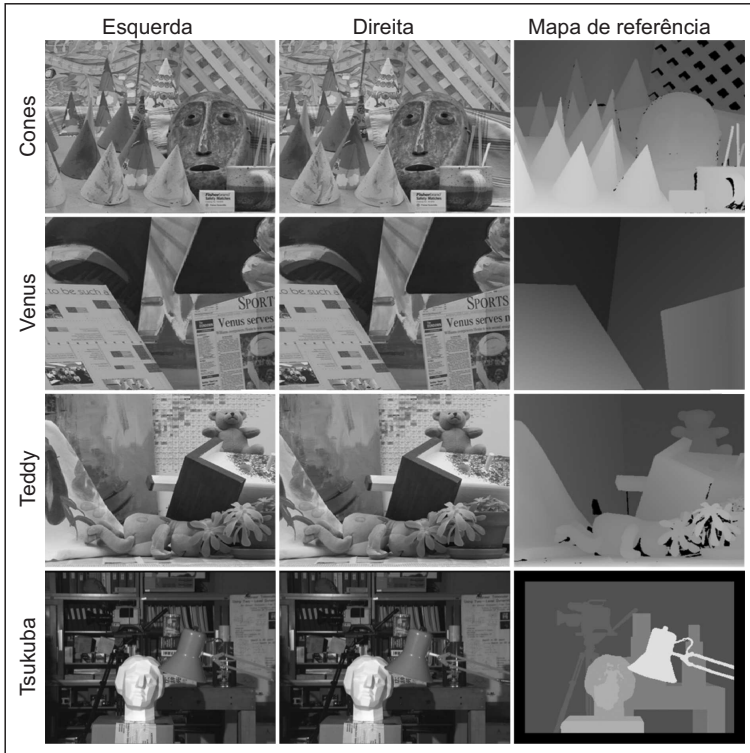
Nesta Seção é apresentada uma avaliação isolada da etapa de correspondência. Uma avaliação de maneira associada aos métodos de medição propostos, empregando fase, é apresentada na Seção 3.5.4.

Durante o desenvolvimento e avaliação dos algoritmos, principalmente no que diz respeito aos relacionados à etapa de correspondência, é preciso utilizar pares de imagens devidamente retificadas. A criação de uma base própria de imagens estéreo pode se mostrar interessante, a princípio. Entretanto, a falta dos mapas de disparidade reais confiáveis, para referência, torna a avaliação dos resultados muito subjetiva.

Por este motivo, foi utilizada a base de imagens estéreo Middlebury, vastamente utilizada na literatura (SCHARSTEIN; SZELISKI, 2002). Esta base é composta por diversos pares de imagens estéreo de referência. Estas imagens são livres de ruído, estão devidamente normalizados e retificados, além de possuírem um mapa de disparidade real associado. Os pares estéreo utilizados são exibidos com seu respectivo mapa de disparidade real na Figura 50.

As imagens dos pares estéreo de referência apresentam diferentes características como presença de objetos complexos, objetos em diferentes profundidades gerando variadas oclusões, regiões sem textura ou com textura homogênea, entre outras. Desta forma, a base torna-se ideal para a avaliação de algoritmos de correspondência sob diferentes aspectos.

Na avaliação realizada, mapas de disparidade densos foram computados para cada um dos pares estéreo da base de referência empregando o algoritmo de correspondência implementado. Os mapas calculados, os ma-



**Figura 50: Base de imagens estéreo de referência**

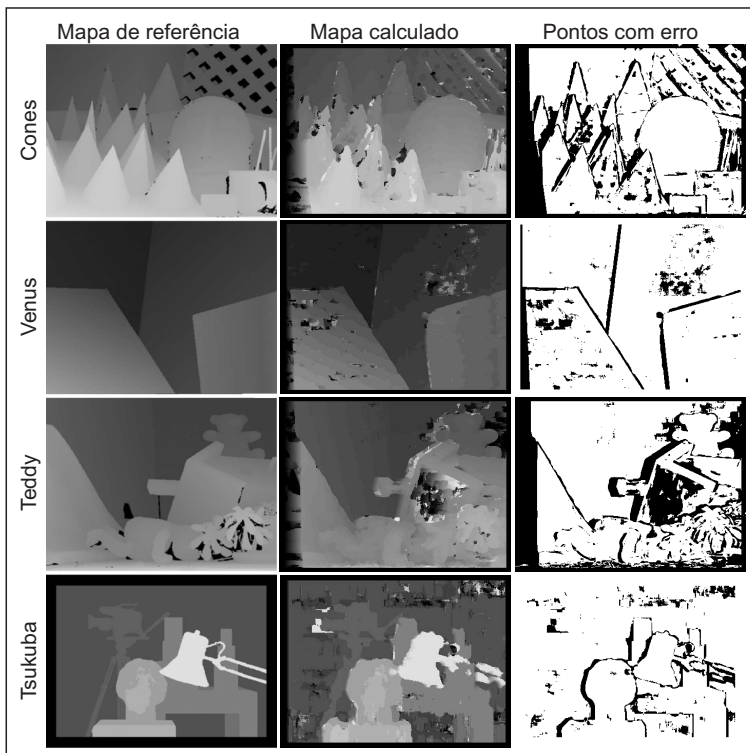
pas de referência e também as áreas com erro são apresentados na Figura 51. Nestas imagens, fica evidente que o erro de disparidade é predominante nas áreas de região homogênea ou nas regiões de sombra ou oclusão.

Uma avaliação objetiva dos resultados obtidos foi realizada, pela comparação entre os mapas calculados e os mapas reais. Para isso, como medida de qualidade, a porcentagem de correspondências incorretas foi empregada (SCHARSTEIN; SZELISKI, 2002):

$$E = \frac{1}{N} \sum_{x,y} (d_c(x,y) - d_1(x,y) > \delta_d). \quad (3.11)$$

onde  $\delta_d$  corresponde a uma dada tolerância para o erro de disparidade.

Na Tabela 3.5 são apresentadas as *porcentagens de correspondências*



**Figura 51: Comparação dos mapas de disparidade calculados**

*incorretas* obtidas com o algoritmo implementado para cada um dos pares estéreo. Para calcular o erro foi utilizado um valor de  $\delta_d$  igual a 1.

**Tabela 3.5: Erro obtido no cálculo das disparidades (%)**

Algoritmo	Tsukuba	Venus	Teddy	Cones
WTA SAD SW	8,74	8,55	27,29	22,32

Os tempos de processamento consumidos para a etapa de correspondência também foram avaliados. Para realizar uma verificação da influência das otimizações implementadas, tanto os tempos consumidos pela versão do algoritmo não otimizado quanto os tempos obtidos pela versão final do algoritmo foram levantados. Na Tabela 3.6 são exibidos os tempos,



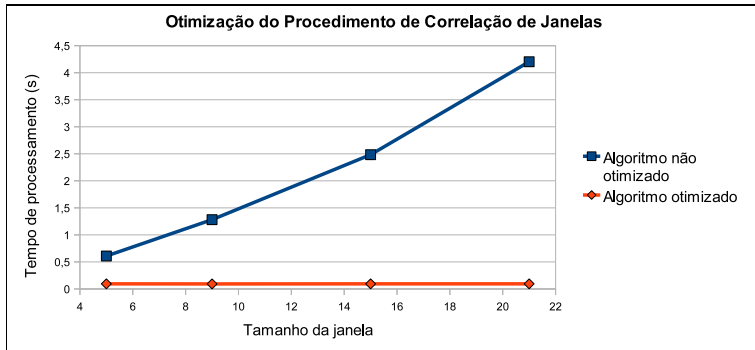
em segundos, obtidos no processamento dos mapas de disparidade para cada par estéreo.

**Tabela 3.6: Tempo de processamento obtidos no cálculo das disparidades (s)**

Algoritmo	Tsukuba	Venus	Teddy	Cones
WTA SAD SW Otimizado	0,0940	0,1880	0,6410	0,6400
WTA SAD SW Não Otimizado	1,2810	2,4840	7,4060	7,4210

A melhoria obtida pela otimização mostra-se significativa quando comparados os tempos de processamento apresentados pela versão não otimizados dos algoritmos e suas respectivas versões otimizadas. Além disso, é importante observar que a otimização empregada, que considera a existência de sobreposição das janelas, apresenta ainda a vantagem de tornar o tempo de computação consumido praticamente independente do tamanho da janela utilizada. Isto se deve ao fato de que, independente do tamanho das janelas, um número fixo de pixels será utilizado no cálculo da função de custo.

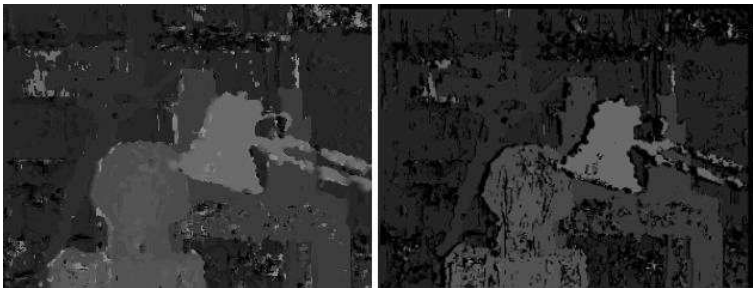
Na Figura 52 é exibido um gráfico que permite a comparação dos tempos dos algoritmos otimizado e não otimizado em função do tamanho da janela. É possível observar como a otimização implementada reduz a complexidade do algoritmo de correspondência para  $O(n)$ , com tempo de execução constante, ao invés de  $O(n^2)$ , com tempo de execução quadrático.



**Figura 52: Tempos de processamento X Tamanho de janela (Otimizado e não otimizado)**

Também é importante citar a efetividade da aplicação da verificação de consistência *Left-Right Check* sobre os mapas calculados. Na Figura 53

são apresentados dois mapas de disparidade calculados sobre o par estéreo *Tsukuba*, sendo o da esquerda sem a verificação de consistência e o da direita com a verificação de consistência.



**Figura 53: Verificação de consistência *Left-Right Check***

Esta verificação, realizada para descartar pontos com correspondências inconsistentes, evita que erros sejam propagados para as etapas seguintes nos métodos de medição empregados.

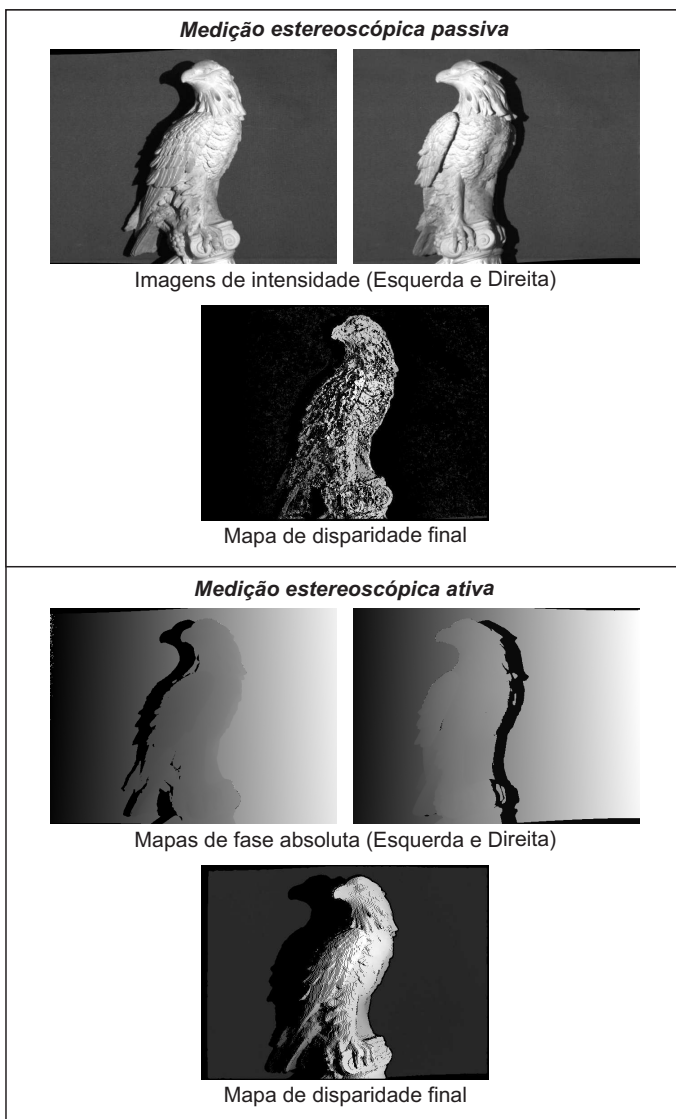
Finalmente, de modo a ilustrar o benefício da utilização da fase ao invés da intensidade no processo de correspondência, foram calculados mapas de disparidade para um dado objeto empregando os dois tipos de informação. Os mapas de disparidades calculados com cada abordagem são apresentados na Figura 54. O objeto de teste corresponde a uma estátua de gesso de uma águia, diante de uma parede.

Fica evidente que, quando utilizada correspondência baseada em intensidade, somente é possível obter resultados confiáveis nas regiões de detalhe. Baseando-se em fase é possível realizar medições mesmo em superfícies com valores de intensidade muito próximos, como é possível observar na região da parede.

### 3.5.3 Reconstrução

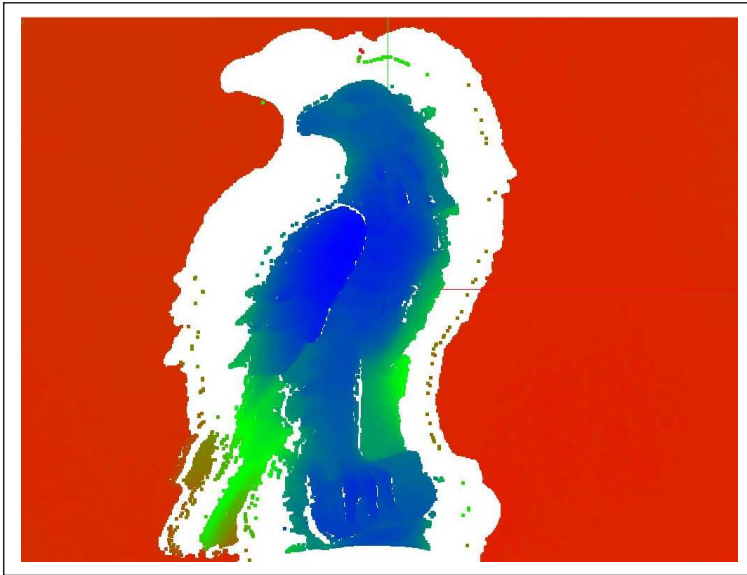
A reconstrução de uma nuvem de pontos densa pode ser visualizada na Figura 55, onde os pontos presentes no mapa de disparidade obtido por técnica ativa, apresentado na Figura 54 foram reconstruídos.

No caso de reconstrução apresentado, a nuvem de pontos calculada possui mais de 140000 pontos, para uma configuração onde as câmeras operam na resolução de 640 x 480 pixels. No resultado apresentado não foi utilizada interpolação de nenhum tipo.



**Figura 54: Correspondência por Intensidade / Fase**

Para uma avaliação da qualidade da reconstrução mais objetiva, foi adaptado o procedimento empregado por outros trabalhos (BENEVENUTI,



**Figura 55: Reconstrução de mapa de disparidades**

2001; STIVANELLO, 2008), onde as coordenadas tridimensionais conhecidas do gabarito empregado na calibração são confrontados com as coordenadas reconstruídas. Como no presente trabalho é empregado um padrão coplanar, não é possível utilizar diretamente as coordenadas 3-D do gabarito. Ao invés disso, é utilizada a distância euclidiana 3-D da linha diagonal entre o vértice superior esquerdo e o vértice inferior direito do padrão como medida, visto que a mesma é influenciada pelo erro de reconstrução para todas as dimensões.

Na Tabela 3.7 são apresentados os resultados obtidos seguindo o critério de avaliação descrito, para cada um dos cenários de calibração definidos na Seção 3.5.1.

Pela avaliação do erro obtido, levando em conta as distâncias de medição, considerou-se que a incerteza obtida nos experimentos é suficiente para um grande número de aplicações de robótica móvel.

**Tabela 3.7: Resultado da avaliação da qualidade da reconstrução**

<b>Parâmetro</b>	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>
Distância de Referência (mm)	242,59	242,59	242,59
Distância Média Calculada (mm)	242,32	242,30	242,62
Desvio Padrão (mm)	0,27	0,15	0,52
Erro Médio (%)	0,11	0,12	0,01

### 3.5.4 Avaliação dos Métodos de Medição

Dois métodos de medição principais foram implementados na forma de algoritmos de computador. O primeiro foi baseado no método proposto, descrito na Seção 3.4.1. O segundo, destinado a ser utilizado como referência na avaliação dos resultados, é baseado no método descrito na Seção 3.4.2. Como comentado anteriormente, o método de deslocamento de fase foi selecionado por ser bastante exato e robusto, e desta forma é utilizado como referência para avaliação dos resultados obtidos com o método proposto.

A descrição dos dois algoritmos implementados é realizada na Tabela 3.8, onde o identificador, o método de obtenção de fase absoluta, o número de franjas e o número de quadros requeridos são indicados.

**Tabela 3.8: Algoritmos implementados**

<b>Algoritmo</b>	<b>Cálculo da fase</b>	<b>Nr. franjas</b>	<b>Quadros</b>
FTPBAT2	FTP modificado + Bat.	50/51	2
FSBAT8	Deslocamento de fase + Bat	06/07	8

O principal requisito funcional considerado durante a avaliação dos métodos implementados foi a aquisição de nuvens de pontos densas para caracterização tridimensional de formas. Além disso, foi considerado que os objetos de interesse estariam localizados a uma distância aproximada de 1000 mm e que sua forma pode apresentar descontinuidades abruptas.

Existe um compromisso envolvendo os parâmetros de montagem do sistema utilizado, como resolução, distância entre as câmeras (linha de base), angulação entre câmeras e projetor e também da configuração das lentes. Para a avaliação do sistema, estas variáveis foram ajustadas de modo a considerar

um campo de visão amplo, considerando a distância de operação desejada. O volume de medição considerado foi de 500mm X 500mm X 300mm. A linha de base utilizada foi de 600 mm. As câmeras foram utilizadas com resolução de 640 x 480 pontos, evitando utilizar imagens com muitos pontos, que podem tornar a utilização em tempo real inviável.

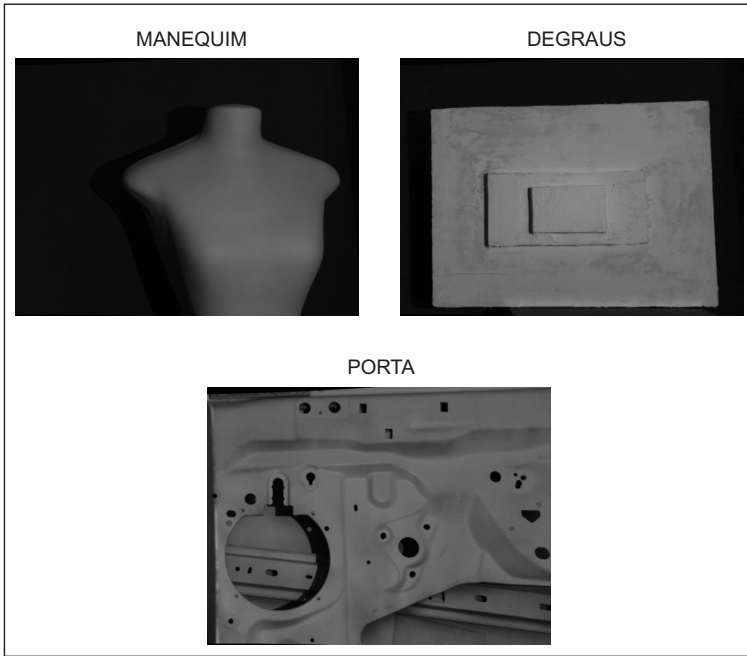
Os resultados de medição foram avaliados utilizando diferentes critérios. Os objetos de teste utilizados na avaliação são exibidos na Figura 56. Foram selecionados objetos com formas de diferentes níveis de complexidade. O primeiro objeto (MANEQUIM), cuja forma é simples e que apresenta descontinuidades suaves, corresponde a um manequim feito de material plástico. O segundo objeto (DEGRAUS), de complexidade intermediária, corresponde a uma peça com degraus, feito de isopor, onde cada degrau possui altura de 30 mm. O terceiro objeto (PORTA), mais complexo e contendo múltiplas descontinuidades irregulares e oclusões, é feito de metal e consiste na parte interna de uma porta de automóvel.



**Figura 56: Objetos de teste**

Na Figura 57 são apresentados os objetos sob o ponto de vista de uma das câmeras.

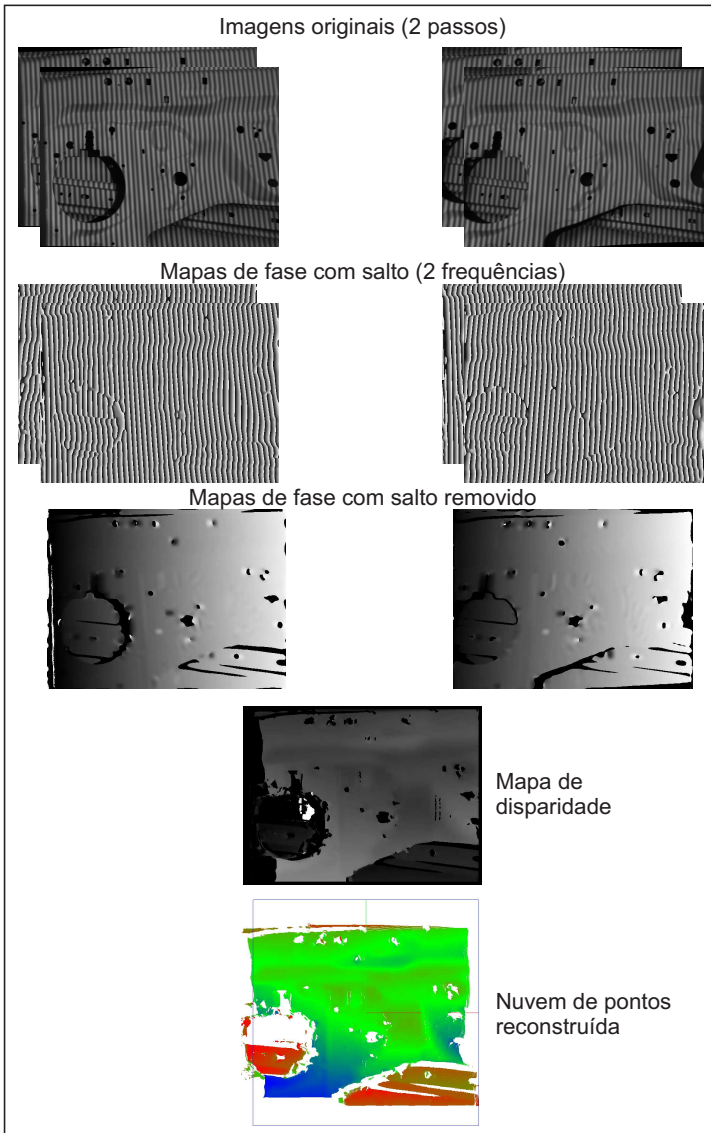
A ilustração do fluxo de processamento do algoritmo FTPBAT2, para o objeto Porta, é apresentada na Figura 58. Nela é possível visualizar as imagens originais dos padrões projetados adquiridas por cada câmera, os mapas



**Figura 57: Objetos sob ponto de vista do sistema**

de fase com salto calculadas pela técnica FTP modificada, os mapas de fase obtidos pelo método de batimento, o mapa de disparidade calculado com base nos valores de fase, e finalmente a nuvem de pontos reconstruída.

Na Figura 59 são exibidos os detalhes da etapa de cálculo dos mapas de fase com salto, dentro do fluxo de processamento. O processamento de apenas uma das imagens é ilustrado. Sobre a imagem original adquirida é aplicado o algoritmo FFT bidimensional, para obtenção do espectro de frequências. Um filtro passa-banda é utilizado para isolar um dos espectros de interesse. Diferentes tipos de filtro foram avaliados, como o Filtro Ideal, Butterworth e Hanning. O filtro de Hanning é descrito na Equação 3.12, onde  $(f_x c, f_y c)$  corresponde a frequência de corte em uma razão de atenuação de 50% (LIN; SU, 1995). Com o uso deste filtro foram alcançados os melhores resultados, evitando que artefatos como o anelamento fossem gerados. O filtro é centralizado no local de valor de pico na imagem do espectro, loca-



**Figura 58:** Fluxo de processamento para o algoritmo FTPBAT2



lizado através de uma busca simples sobre os valores próximos à região da frequência portadora.

$$H(f_x, f_y) = \frac{1}{4} \left[ 1 + \cos \left( \frac{1}{2} \pi \frac{f_x - f_0}{f_{xc}} \right) \right] \left[ 1 + \cos \left( \frac{1}{2} \pi \frac{f_y}{f_{yc}} \right) \right] \quad (3.12)$$

Após isolado o espectro de interesse, é utilizado o algoritmo IFFT para obter a imagem espacial da fase com salto.

Na Figura 60 é apresentada em detalhes a etapa de filtragem pela modulação, realizada para eliminar regiões não confiáveis. Sobre a imagem de modulação é aplicada uma limiarização, de modo a criar uma máscara binária. Esta máscara é utilizada diretamente para determinar quais pontos do mapa de fase calculado serão considerados.

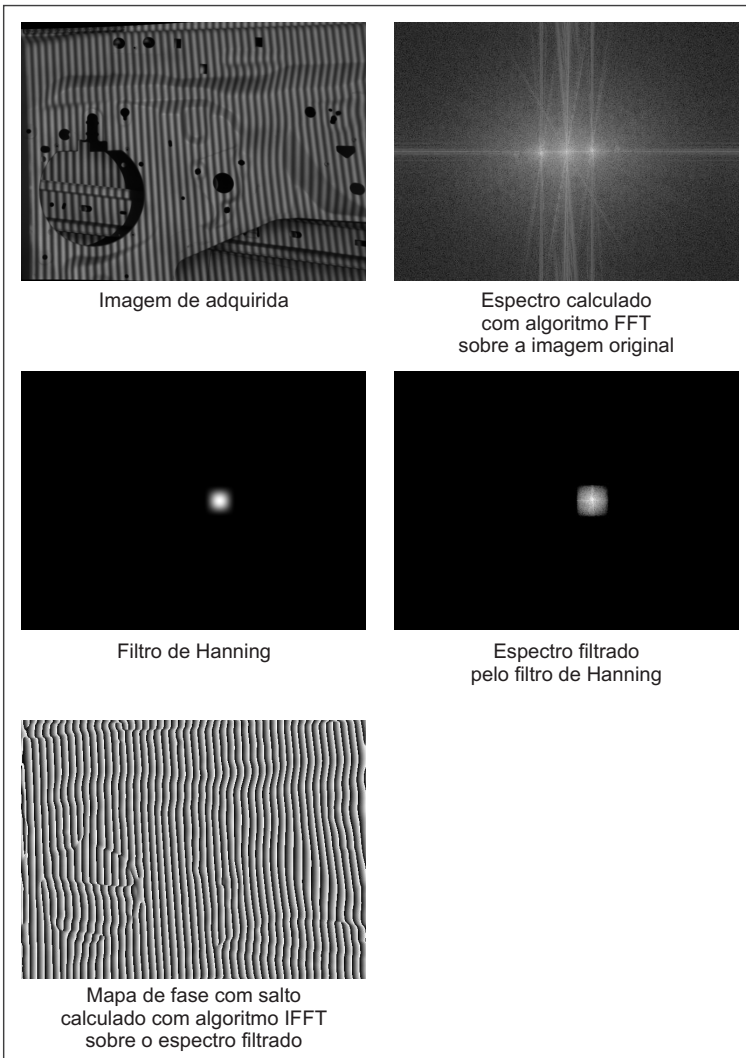
De maneira similar, na Figura 61 é ilustrado o fluxo de processamento para o algoritmo FSBAT8, para o objeto Porta, da etapa de aquisição à etapa de reconstrução de pontos.

Os mapas de fase absoluta estimados para cada objeto de teste, utilizando cada um dos algoritmos, são apresentados na Figura 62.

A avaliação objetiva dos resultados obtidos na etapa de correspondência foi baseado no cálculo dos mapas de disparidade. Mapas de disparidade para cada objeto, empregando cada algoritmo, foram gerados. Os mapas de disparidade calculados são apresentados na Figura 63.

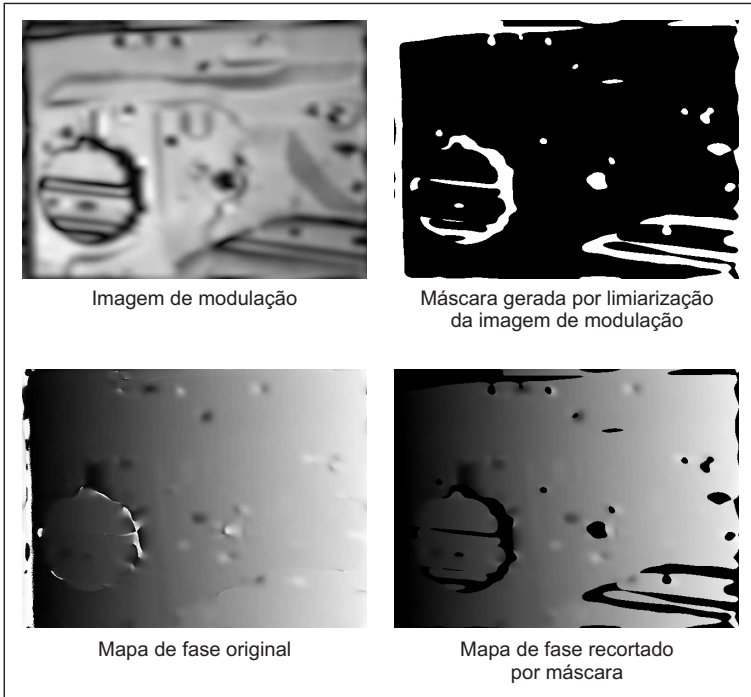
É possível observar que, independente de descontinuidades e do número reduzido de quadros necessários, a forma geral dos objetos testados foi capturado pelo método proposto (FTPBAT2). Entretanto, comparando os resultados obtidos com o método de referência, também é possível identificar diferenças localizadas nas regiões próximas a saltos de descontinuidade, sombras e oclusões. Isso se deve ao fato de que no passo de filtragem nos métodos baseados na Transformada de Fourier, é necessário encontrar um compromisso entre isolar corretamente o espectro de interesse eliminando a iluminação de fundo e preservando os detalhes finos.

Uma avaliação objetiva dos resultados obtidos entre os algoritmos testados foi realizada. Para isso, como medida de qualidade, a porcentagem de correspondências incorretas foi empregada, como descrita pela Equação 3.11. Na Tabela 3.9 a *área total*, a *área com erro* e o *erro proporcional* das correspondências inconsistentes obtida com o método proposto para cada um dos objetos são apresentados. Os resultados obtidos com o algoritmo FSBAT8 são utilizados como valores de referência. Para calcular o erro foi utilizado um valor de  $\delta_d$  igual a 1.



**Figura 59: Filtragem para obtenção de mapa de fase**

É possível observar que o método proposto apresenta resultados aproximados aos obtidos pelo método de referência. Considera-se que a diferença



**Figura 60: Filtragem do mapa de fase por modulação**

**Tabela 3.9: Correspondências incorretas**

<b>Objeto</b>	<b>Área total (pixels)</b>	<b>Erro proporcional (%)</b>
Manequim	87085	10,52
Porta	192177	8,29
Degraus	240901	10,09

obtida é pequena, se for considerado que apenas 2 quadros são utilizados no método proposto contra os 8 utilizados no método de referência.

Nuvens de pontos reconstruídos para o objeto Manequim são apresentadas na Figura 64. Um mapa de distância, calculado pela comparação entre as nuvens obtidas pelo método proposto e pelo método de referência também

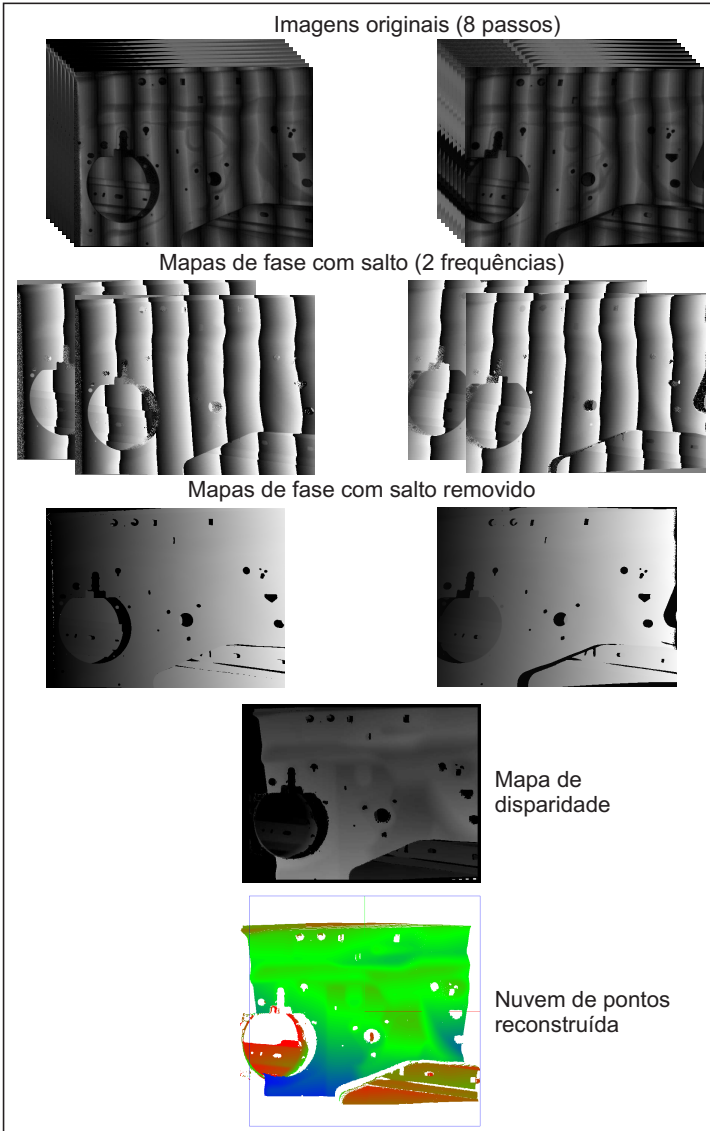
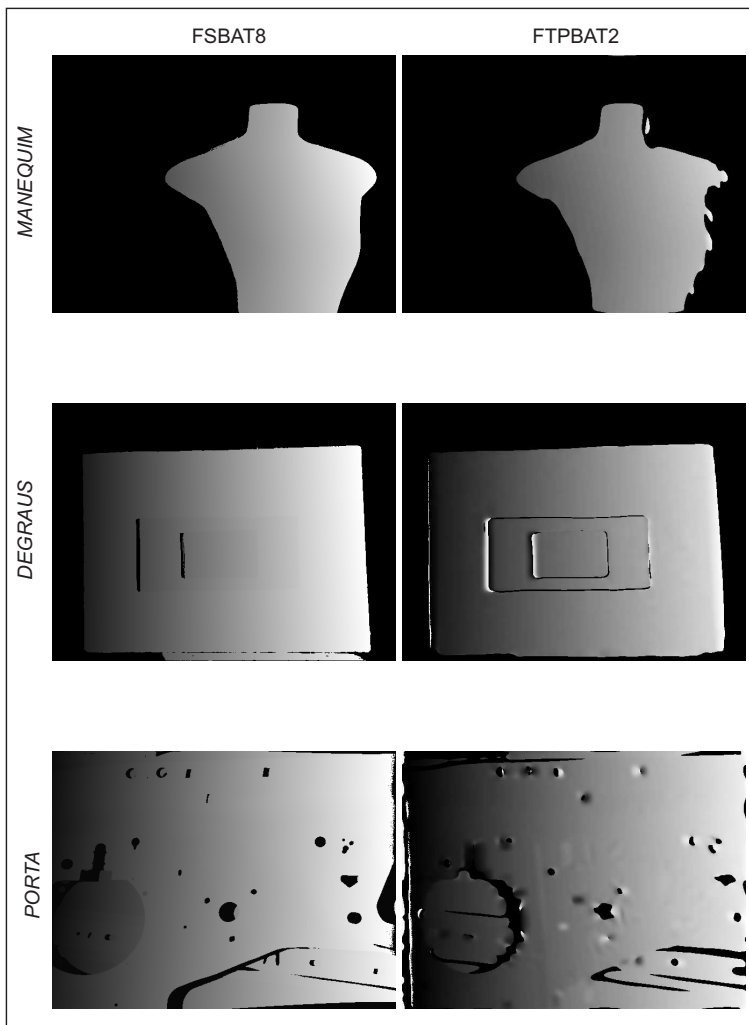
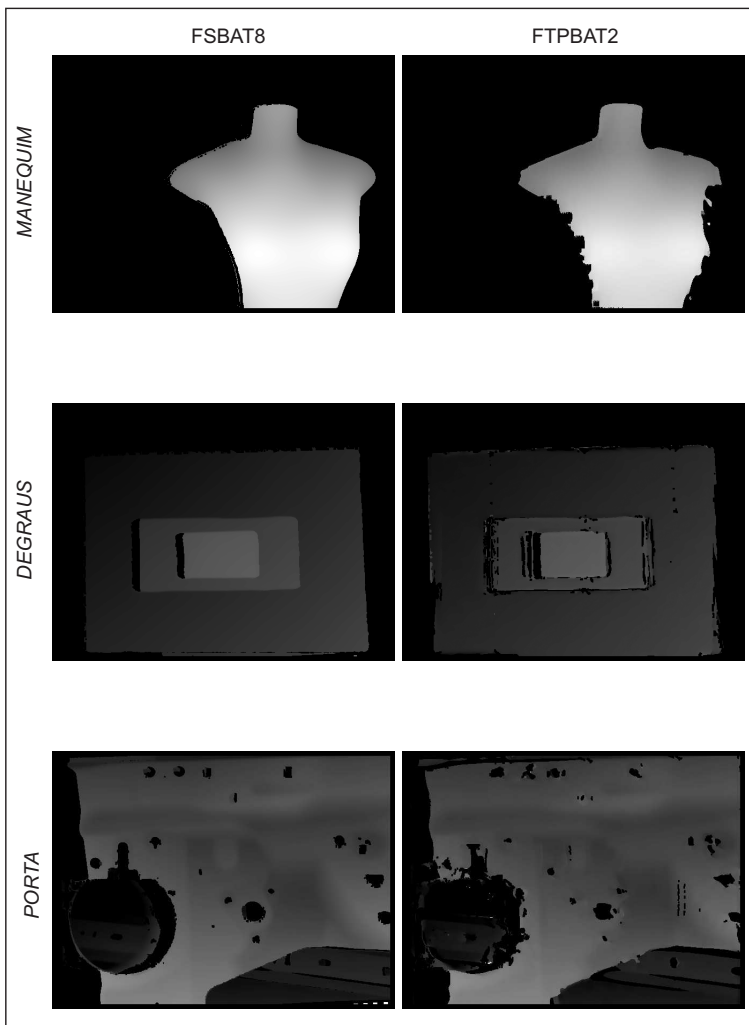


Figura 61: Fluxo de processamento para o algoritmo FSBAT8



**Figura 62: Mapas de fase absoluta (normalizados)**

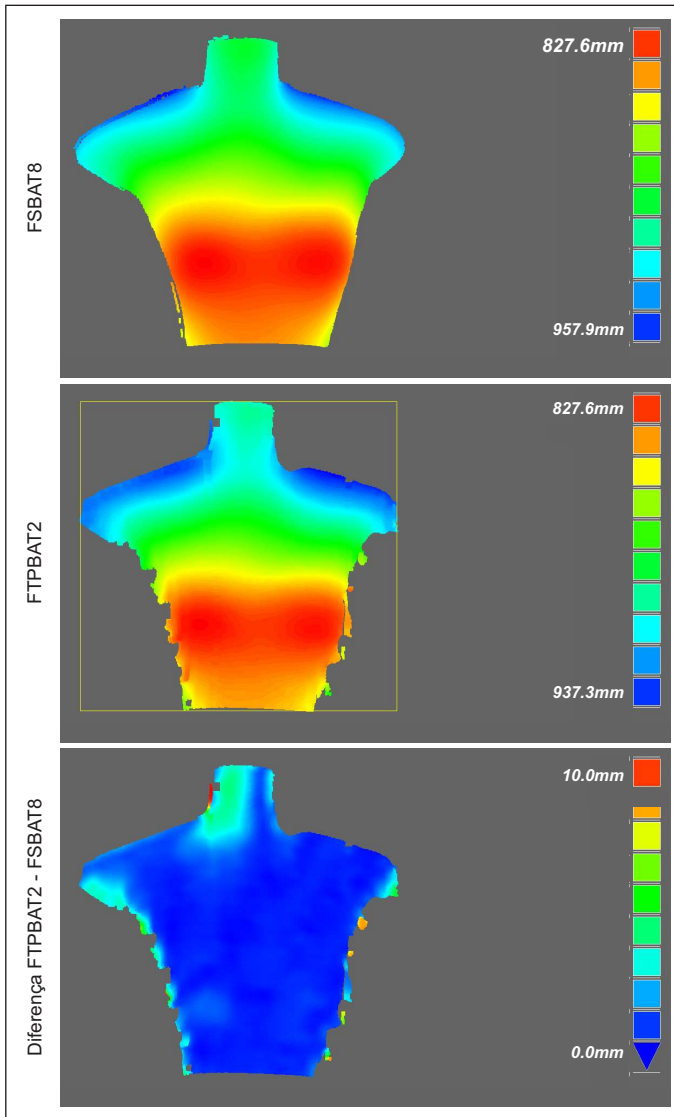
é exibido. Os mesmos resultados de reconstrução, incluindo as nuvens de pontos e o mapa de distância para o objeto Degraus, são exibidos na Figura 65. De forma similar, os mesmos resultados de reconstrução, incluindo as



**Figura 63: Mapas de disparidade (normalizados)**

nuvens de pontos e o mapa de distância para o objeto Porta, são exibidos na Figura 66.

É possível observar que ambos os algoritmos retornam resultados consistentes. Quando observados os mapas de distância, é possível verificar



**Figura 64: Reconstrução e comparação de nuvens de pontos (mm) - Manequim**

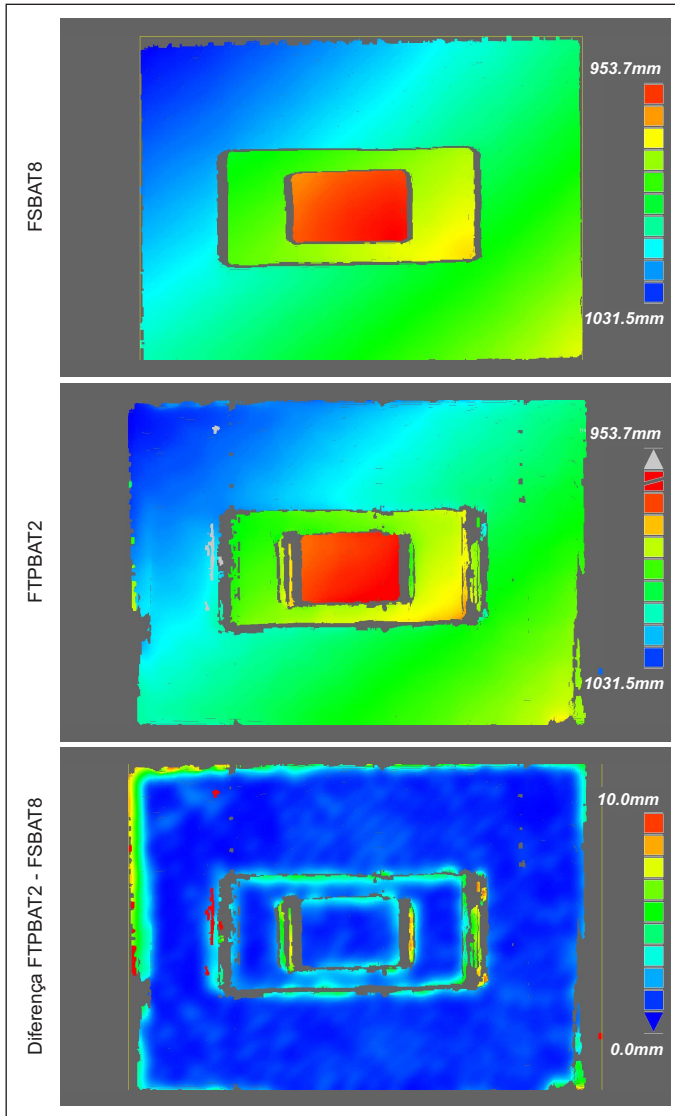


Figura 65: Reconstrução e comparação de nuvens de pontos (mm) - Degraus



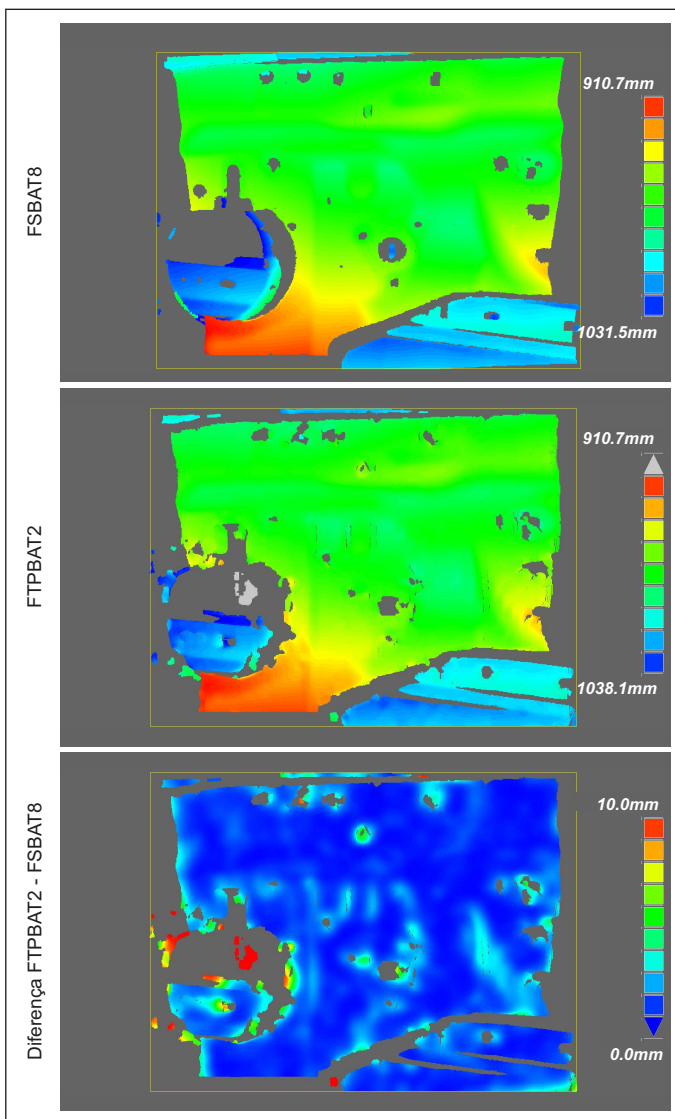


Figura 66: Reconstrução e comparação de nuvens de pontos (mm) - Porta

que para o algoritmo que implementa o método proposto os resultados nas regiões fazendo fronteira a sombras e descontinuidades abruptas são menos confiáveis.

Ainda, é possível observar nas nuvens de pontos apresentadas existem várias regiões com ausência de informação 3D. Estas falhas são originadas de oclusões, regiões que não são visíveis para ambas as câmeras utilizadas. É importante observar que nos métodos de medição implementados, o projetor não é utilizado como fonte de informação para triangulação. É válido destacar que o projetor poderia ser utilizado como uma terceira câmera, de modo que fosse possível medir pontos localizados em regiões de oclusão para uma dada câmera do par estéreo, mas não para o projetor e para a outra câmera do sistema (PINTO, 2010).

Os resultados obtidos pela análise de diferença entre as nuvens de pontos obtidas são apresentados na Tabela 3.10.

**Tabela 3.10: Diferença entre nuvens de pontos (mm)**

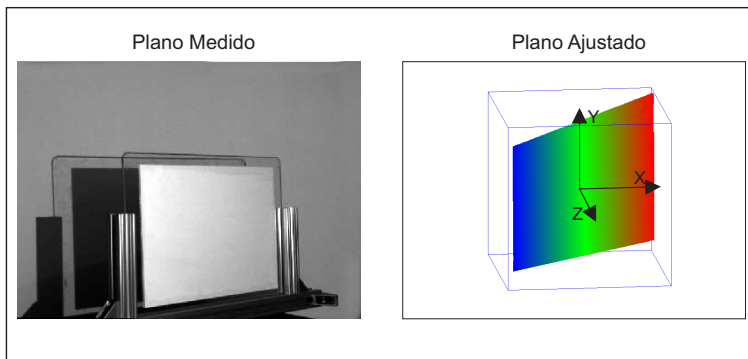
<b>Objeto</b>	<b>Pontos avaliados</b>	$\bar{x}$	$\sigma$
Manequim	82573	1,2034	1,2700
Degraus	235030	1,1810	1,2530
Porta	195992	1,1860	1,6280

Com base nos diferentes resultados apresentados, consideramos que as nuvens de pontos caracterizam adequadamente a forma tridimensional dos objetos de teste. Além disso, é considerado que a informação recuperada é suficiente para guiar diferentes ações em operações de robótica.

### 3.5.5 Avaliação Geral do Sistema

De modo a realizar uma avaliação geral do sistema de medição proposto, mais propriamente relacionada com a dispersão de pontos medidos pelas técnicas empregadas, a métrica *Erro de Pontos-Plano* foi utilizada. Um plano consistindo em uma lâmina de vidro pintada de branco foi posicionada a uma distância de 1000 mm e medida pelo sistema. Um plano foi ajustado à nuvem tridimensional de pontos obtida na etapa de reconstrução, através do uso de um algoritmo de ajuste pelo método de mínimos quadrados.

Na Figura 67 é apresentado o objeto plano testado e o ajuste dos pontos ao plano ideal.



**Figura 67: Avaliação Pontos-Plano**

O plano foi medido empregando os algoritmos FTPBAT2 e FSBAT8. Para cada plano obtido, a distância entre cada ponto ao plano ajustado foi calculada. As distâncias obtidas para cada algoritmo são apresentadas na Tabela 3.11.

**Tabela 3.11: Distâncias Ponto-Plano (mm)**

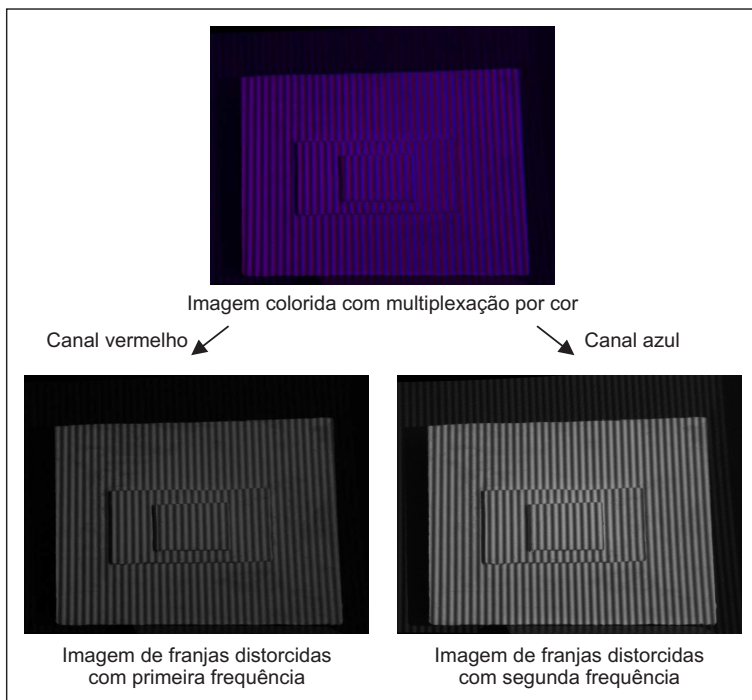
Algoritmo	$\bar{x}$	$\sigma$
FSBAT8	0,0000	0,0004
FTPBAT2	0,0000	0,0039

### 3.5.6 Utilização do Sistema em Medições Instantâneas

De modo a validar a utilização do método proposto para aplicações onde se façam necessárias medições rápidas, uma segunda variação do método descrito na Seção 3.4.1 foi implementada (FTPBAT1). Nesta versão, ao invés de utilizar a projeção consecutiva de dois padrões foi utilizada a técnica de multiplexação por cor para combinar dois padrões e realizar somente uma projeção. Desta forma, somente um quadro é requerido para as

medições e conseqüentemente é possível realizar medições dinâmicas sem a necessidade de equipamentos específicos.

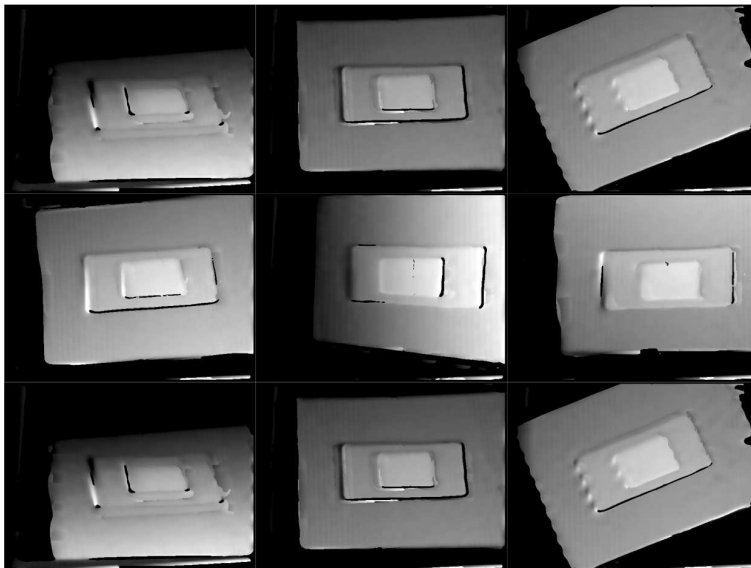
A única diferença entre esta variação quando comparada ao algoritmo FTPBAT2 está na fase de aquisição. Como comentado na Seção 3.4.1.1, e ilustrado na Figura 68, empregando a multiplexação por cor, dois padrões são projetados, cada um em um canal de cor, e posteriormente separados nas imagens adquiridas pelas câmeras. É importante observar que, em adição à calibração estereoscópica descrita na Seção 3.3.1, uma calibração de cor deve ser realizada entre as câmeras e o projetor, de modo que se faça um desacoplamento entre os canais dos dispositivos.



**Figura 68: Padrão de franjas com multiplexação por cor**

Para avaliar um cenário de medições instantâneas, uma série de imagens foi capturada sequencialmente, enquanto o objeto de teste Degraus era movido por movimentos de translação e rotação dentro do volume de medição. As imagens capturadas foram processadas utilizando o algoritmo

FTPBAT1. Mapas de disparidade para alguns dos quadros capturados são exibidos na Figura 69.



**Figura 69: Sequência de medições utilizando projeção de apenas um padrão**

É possível verificar que o método proposto consegue capturar a forma geral do objeto de interesse em apenas um quadro. Desta forma, o mesmo pode ser empregado para ambientes dinâmicos, onde o mensurando ou a plataforma onde o sistema de medição está montado estão em movimento.

### 3.5.7 Avaliação do Tempo de Processamento

O sistema descrito, em conjunto com as técnicas de medição propostas, viabiliza a utilização em aplicações com requisitos de medição rápida ao exigir que apenas 1 (FTPBAT1) ou 2 (FTPBAT2) quadros sejam capturados. A utilização do sistema para medições *on-line*, porém, exige ainda que os algoritmos sejam otimizados de modo a atender aos requisitos de tempo real associados a este modo de utilização.

Na Tabela 3.12 são apresentados os tempos médios de processamento

necessários para a realização de cada uma das etapas existentes no método de medição descrito na Seção 3.4.1.2.

**Tabela 3.12: Tempos de processamento por etapa (s)**

Cálculo de fase	Correspondência	Reconstrução
0,06975	2,5580	0,0150

Em relação aos tempos de processamento obtidos, é possível observar que a etapa com maior consumo corresponde à correspondência estéreo. Conforme descrito na Seção 3.3.3, foram realizados esforços no sentido de reduzir o tempo de processamento desta etapa. Entretanto, maiores esforços serão necessários para reduzir ainda mais o custo computacional dos algoritmos, antes que possam ser utilizados para medições de modo *on-line*.

Sabe-se que os resultados alcançados, principalmente os relacionados com a correspondência, podem ainda ser melhorados explorando recursos de hardware para processamento paralelo, como SIMD (Single Instruction Multiple Data) e GPGPU (General-purpose Computing on Graphics Processing Units). Ao empregar estes recursos, taxas de processamento de até 230 quadros por segundo têm sido alcançadas (JIN *et al.*, 2010; STEFANO; MATTOCCIA, 2000; STEFANO *et al.*, 2004).

### 3.6 ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA E AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO UTILIZADO

Uma série de ferramentas foram utilizadas para o desenvolvimento do software que compõe o sistema de medição descrito. Os requisitos futuros de operação em tempo real, e também a possibilidade de futuramente embarcar o sistema, direcionaram a seleção da linguagem de programação orientada a objetos C++. O ambiente de desenvolvimento principal utilizado foi o Microsoft Visual Studio 9 (2008). A biblioteca OpenCV foi utilizada, de modo a reutilizar as estruturas e funções básicas de manipulação de imagem. A biblioteca FFTW também foi utilizada, visto que disponibiliza versões otimizadas dos algoritmos FFT e IFFT. As interfaces gráficas desenvolvidas foram criadas utilizando as funcionalidades da biblioteca wxWidgets. A modelagem do sistema, por sua vez, foi feita utilizando a linguagem UML através da ferramenta StarUML (STARUML, 2012). Ainda, para realizar simulações preliminares, foi utilizada a ferramenta Matlab.

No diagrama exibido na Figura 70 são apresentadas as principais classes que constituem o sistema, assim como seus relacionamentos mais relevantes. A classe *S2i3DCamera* implementa o modelo de câmera pinhole e as equações da projeção de perspectiva. Dentre as funcionalidades principais disponibilizadas pela classe estão a calibração monocular, a transformação de coordenadas entre sistemas de coordenadas e a obtenção das imagens a partir de uma fonte de dados associada. A classe abstrata *S2i3DImageSource* define o comportamento a ser implementado por uma fonte de dados responsável pelo fornecimento de imagens à câmera. As subclasses que a estendem representam diferentes fontes de imagens, que podem variar de dispositivos de captura à seqüências de imagens estáticas. A classe abstrata *S2i3DDispMapExtrc* define o comportamento a ser implementado por um extrator de mapas de disparidade denso, que corresponde à implementação de um método de correspondência específico. Além disso, compartilha funções comuns às classes especializadas, como por exemplo, consistências sobre os mapas de disparidade gerados. A classe *S2i3DStereoSys* implementa todo o modelo de visão estereoscópica passiva e ativa. Dentre as principais funcionalidades disponibilizadas por esta classe estão a configuração e inicialização do sistema de visão através da calibração, a implementação dos métodos *FTPBAT1*, *FTPBAT2* e *FSBAT8*, incluindo a geração de mapas de fase, o cálculo de mapas de disparidade e a reconstrução dos pontos.

O sistema foi modelado e implementado da maneira descrita de modo a atender a um requisito de extensão funcional, visto que novas funcionalidades podem ser incluídas pela especialização das classes já existentes. Além disso, o modelo utilizado foi desenvolvido observando a arquitetura existente na biblioteca de visão estereoscópica *S2i3DLib*, desenvolvida em trabalho anterior (STIVANELLO, 2008). Desta forma, os arquivos executáveis e seus códigos-fonte, poderão ser disponibilizados de forma integrada.

Na Figura 71 é apresentada a tela principal do sistema de medição. As diferentes operações, como calibração, medição e exportação de resultados, podem ser realizadas através de uma interface gráfica que combina interações por *linha de comando* e também por *janelas gráficas*.

Além do sistema de medição, apresentado na Figura 71, foi implementado um sistema para visualização de nuvens de pontos. Este sistema, cuja tela principal é apresentado na Figura 72, foi implementado utilizando a biblioteca gráfica *OpenGL*.

Além de visualização, este módulo permite a realização de diversas operações e avaliações sobre as nuvens de ponto carregadas.

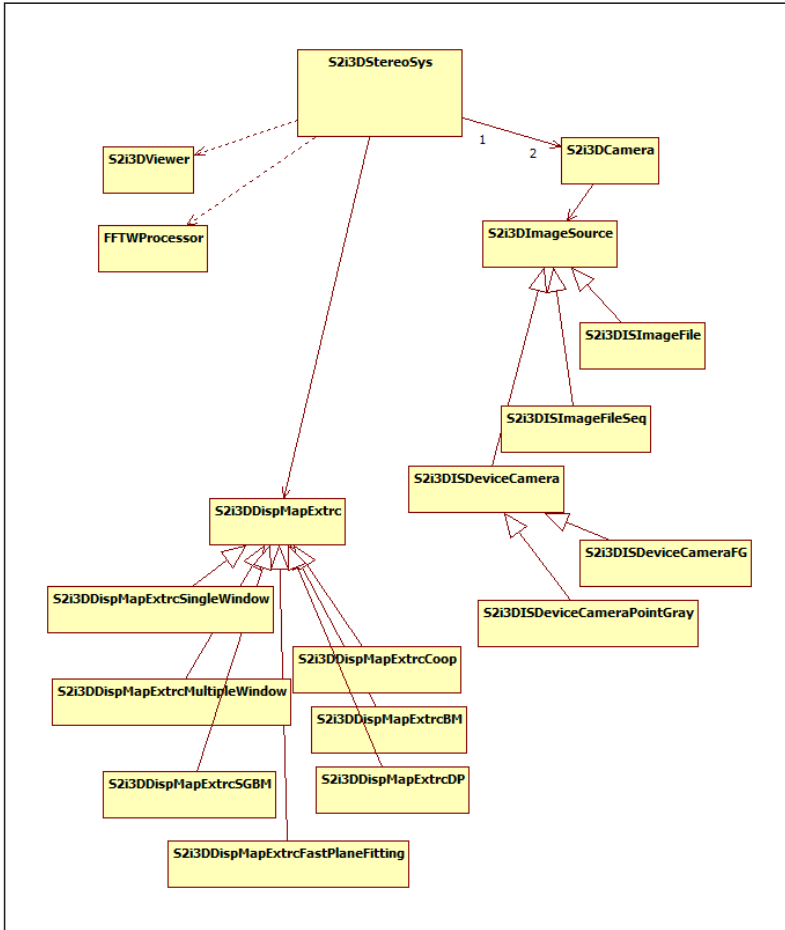


Figura 70: Diagrama de classes (componentes principais)



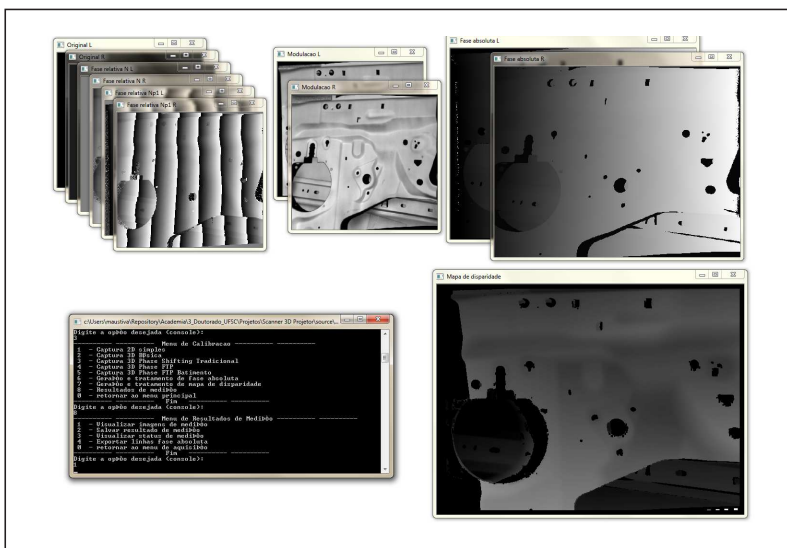
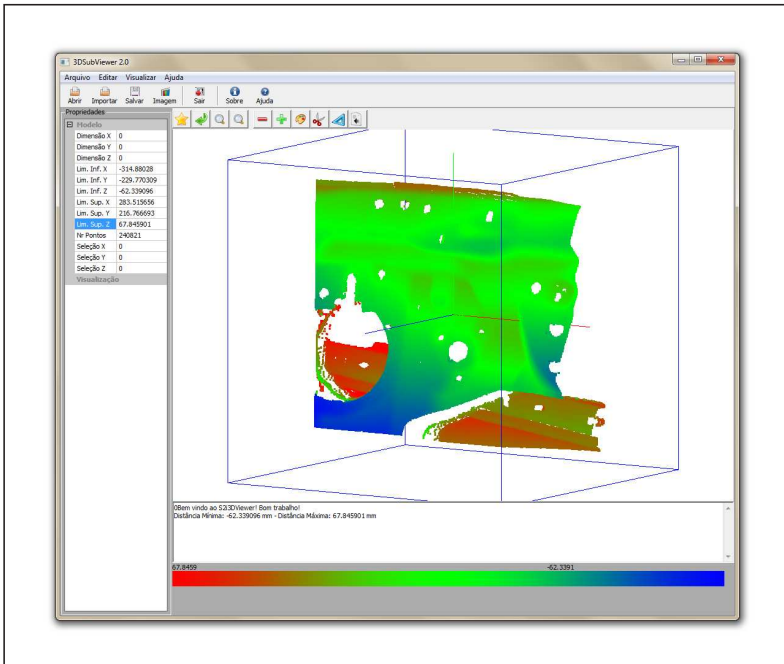


Figura 71: Tela principal do sistema de medição



**Figura 72:** Módulo de visualização de nuvens de pontos

## 4 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

### 4.1 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi apresentado o desenvolvimento de um sistema de visão computacional para aplicações de robótica móvel. Para tal, é utilizada uma abordagem que combina as técnicas ativa e passiva de medição, procurando prover informação tridimensional suficiente para a operação geral de um robô. Estas informações poderão, por exemplo, ser utilizadas para um melhor planejamento das ações em intervenções complexas e no cálculo de trajetórias a serem seguidas em operações automatizadas.

O modelo de sistema de visão utilizado permite realizar medições empregando diferentes técnicas, incluindo estereoscopia passiva e estereoscopia ativa baseada em projeção de luz estruturada. Ao empregar um sistema como este, durante o ciclo de operação do robô é possível alternar entre os métodos de medição com base no tipo de ação a ser realizada, em função da qualidade de informação desejada.

A técnica de estereoscopia passiva tem sido muito empregado em aplicações deste tipo. Porém, o problema de correspondência de pontos representa um desafio, e reduz a robustez na sua aplicação. Originalmente os valores de intensidade são utilizados para corresponder os pontos. Esta abordagem falha em ambientes com objetos com intensidade homogênea. A proposta de um novo método de correspondência que leva em conta a informação periférica, de modo a dar suporte à correspondência neste tipo região, melhorou os resultados obtidos. Entretanto, assim como outros métodos de medição baseada em estereoscopia passiva, os resultados ainda não se mostraram suficientes para aplicações práticas onde maior qualidade é necessária. Para contornar esta dificuldade, utilizou-se também de estereoscopia combinada à projeção de luz estruturada. Desta forma, ao invés de utilizar valores de intensidade, são empregados valores de fase, que se mostraram descritores muito mais robustos.

Dois métodos de medição baseados em estereoscopia ativa foram implementados. O primeiro, baseado na técnica de deslocamento de fase, é muito robusto e apresenta resultados excelentes (FSBAT8). Porém, uma limitação relacionada a esta abordagem é que são necessárias a projeção e

aquisição de 8 quadros para cada medição. Desta forma, sua aplicação em cenários de operação dinâmicos, onde a plataforma do robô ou mesmo quando os objetos sendo medidos estão em movimento, se torna difícil. Em função disso, um novo método de medição é proposto. Neste método, uma versão modificada da técnica FTP é combinada à técnica de batimento de modo a contornar as limitações originalmente existentes na medição de superfícies com descontinuidades ou saltos abruptos. Através do método proposto é possível realizar medições rápidas pela projeção sequencial sincronizada de 2 quadros (FTPBAT2), ou ainda pela projeção de apenas 1 quadro utilizando multiplexação por cor (FTPBAT1).

Foram realizadas comparações entre o método de referência, baseado em deslocamento de fase, e o método proposto. Objetos com forma de diferentes complexidades foram avaliados. Pela avaliação dos resultados obtidos é possível concluir que com o método proposto é alcançado um interessante compromisso entre precisão e velocidade de medição. Este fato é evidenciado pelo reduzido número de quadros necessários nas medições, em contraste com os vários quadros requeridos pelas técnicas tradicionais.

O sistema desenvolvido atendeu aos requisitos levantados na fase de análise. Considera-se que os resultados obtidos na medição caracterizam adequadamente a forma tridimensional de objetos, incluindo aqueles contendo descontinuidades abruptas. Desta forma, a informação é suficiente para guiar diferentes ações em aplicações de robótica variadas.

Finalmente, como principais contribuições do trabalho é possível citar a disponibilização de uma infraestrutura básica para auxiliar no desenvolvimento de sistemas robóticos, a proposta de um novo método de correspondência densa local com suporte regional e a proposta de um método de medição rápida de forma 3D que pode ser utilizado de diferentes maneiras (FTPBAT1 e FTPBAT2).

## 4.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

Tanto o método de medição baseado em estereoscopia passiva, quanto o método de medição proposto (FTPBAT1/FTPBAT2), permitem medições com um número de quadros reduzidos. Entretanto, apesar das otimizações realizadas, não houve tempo hábil para alcançar uma implementação para uso de forma *on-line*, atendendo aos requisitos de tempo real. Sabe-se que utilizando recursos de hardware específicos é possível reduzir em muito o tempo necessário para algumas das etapas envolvidas. Desta forma, a

implementação dos métodos utilizando estes recursos representa uma direção natural para a continuidade do trabalho.

Também seria importante investigar o efeito de anelamento, que degrada o resultado de medição obtido com o método proposto nas regiões próximas a descontinuidades de profundidade. Ainda em relação a este método, seria interessante avançar no sentido de combinar duas frequências portadoras em apenas 1 padrão monocromático, de modo a adquirir dois mapas de fase com a projeção e aquisição de apenas uma imagem sem utilizar multiplexação por cor.

Finalmente, de modo a reduzir o número de pontos não medidos em função de oclusões, seria interessante integrar no sistema técnicas de medição que permitam realizar medições por triangulação entre as câmeras e o projetor.



## REFERÊNCIAS

- ARTTU, O.; ANSSI, M. Range imaging using a time-of-flight 3d camera and a cooperative object. **Proceedings of 12 MTC 2009 - International Instrumentation and Measurement Technology Conference**, p. 817 – 821, 2009.
- BENEVENUTI, F. **Calibração de um Conjunto Binocular para Uso em Estereoscopia e Robótica Móvel**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- BIEGELBAUER, G.; VINCZE, M. 3d vision-guided bore inspection system. In: **Proceedings of the Fourth IEEE International Conference on Computer Vision Systems**. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2006. (ICVS '06), p. 22–. ISBN 0-7695-2506-7.
- BIRCHFIELD, S.; TOMASI, C. Depth discontinuities by pixel-to-pixel stereo. **IEEE International Conference on Computer Vision**, v. 35, p. 269–293, 1999.
- BRADSKI, G.; KAEHLER, A. **Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library**. Cambridge, MA: O’Reilly, 2008.
- BUDIYONO, A. Advances in unmanned underwater vehicles technologies: Modeling, control and guidance perspectives. **Indian Journal of Marine Sciences**, v. 38, p. 282–295, 2009.
- CAPTURE3D. **3D Industrial Measurement Solutions**. 05 2009. Página Web. Disponível em: <http://www.capture3d.com/applications-reveng-Model-helmet.html>.
- CHEN, Q.; OZGUNER, U.; REDMILL, K. Ohio state university at the 2004 darpa grand challenge: Developing a completely autonomous vehicle. **IEEE Intelligent Systems**, v. 19, n. 5, p. 8–11, 2004.
- DASTUR, J. Novel design for a semi-autonomous combat robot with extension capability. In: **Proceedings of the 2009 International Conference on Computing, Engineering and Information**. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009. p. 127–131. ISBN 978-0-7695-3538-8.
- DROESCHEL, D. Towards joint attention for a domestic service robot - person awareness and gesture recognition using time-of-flight cameras. In:

- IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).** [S.l.: s.n.], 2011.
- FALCAO, N. H. G.; MASSICH, J. **Plane-based calibration of a projector-camera system.** [S.l.], 2008.
- FANTIN, A. V. **Medição de Formas Livres Tridimensionais por Topografia.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- FITZGERALD, I. **A Vision System for an Autonomous Underwater Vehicle.** Tese (Doutorado) — AUSTRALIAN NATIONAL UNIVERSITY, 1999.
- FRANÇA, J. A. de. **Calibração de um Sistema de Visão Estéreo: de Correspondência de Pontos à Reconstrução Euclidiana.** Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- FRANÇA, M. R. S. José A. de; FRANÇA, M. B. de M. **Calibração monocular com gabaritos 1d: Uma ferramenta prática com o matlab. VIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2007.**
- GAGALOWICZ, A. **Towards a vision system for a domestic robot.** In: **International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1993. 'Systems Engineering in the Service of Humans.** [S.l.: s.n.], 1993.
- GASPAR, J. **Visão para Robótica Móvel: Detecção de Obstáculos sobre pavimento Plano.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Técnica de Lisboa, 1994.
- GERKEY, R. T. V. B.; HOWARD, A. **The player/stage project: Tools for multi-robot and distributed sensor systems.** In: **11th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2003).** [S.l.: s.n.], 2003.
- GORTHI, S. S.; LOLLA, K. R. **A new approach for simple and rapid shape measurement of objects with surface discontinuities.** p. 184–194, 2005.
- GORTHI, S. S.; RASTOGI, P. **Fringe projection techniques: Whither we are?** **Optics and Lasers in Engineering**, v. 48, p. 133–140, 2010.
- HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. **Multiple View Geometry in Computer Vision.** [S.l.]: Cambridge University Press, 2003.



- HIRSCHMULLER, H.; SCHARSTEIN, D. Evaluation of cost functions for stereo matching. **IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, 2007.
- HUANG, P. S.; ZHANG, S. Fast three-step phase-shifting algorithm. **Applied Optics IP**, v. 45, p. 5086–5091, 2006.
- IWASHITA Y. MURASE, Y. Y. e. a. S. 3d vision system for an office service robot. In: **IEEE International Conference on Mechatronics and Automation**. [S.l.: s.n.], 2005.
- JIN, S.; CHO, J.; PHAM, X. D.; LEE, K. M.; PARK, S.-K.; KIM, M.; JEON, J. W. Fpga design and implementation of a real-time stereo vision system. **IEEE Trans. Cir. and Sys. for Video Technol.**, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, v. 20, n. 1, p. 15–26, 2010. ISSN 1051-8215.
- JR., A. A. G.; SOUSA, A. R. de. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. [S.l.]: Editora Manole, 2008.
- KAMNIK, R.; AMBROZ, M.; KUZELICKI, J.; PREBIL, I.; MUNIH, M. Robot environment for combat vehicle driving simulation. In: **ICRA**. [S.l.]: IEEE, 2012. p. 4136–4141. ISBN 978-1-4673-1403-9.
- KEMKEMIAN, S. Mimo radar for sense and avoid for uav. In: **IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (ARRAY)**. [S.l.: s.n.], 2010.
- KEMKEMIAN, S. A wide field of view radar for sense and avoid on uav using space coloring waveforms. In: **European Radar Conference (EuRAD)**. [S.l.: s.n.], 2010.
- KRAGIC, D.; BJÖRKMAN, M.; CHRISTENSEN, H. I.; EKLUNDH, J.-O. Vision for robotic object manipulation in domestic settings. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 52, n. 1, p. 85–100, 2005. ISSN 09218890.
- LEADER. **Leader Coordinate Measuring Machines**. 6 2009. Disponível em: <<http://www.leadermetrology.com/>>.
- LEICA. **Leica Geosystems - HDS**. 7 2009. Disponível em: <<http://hds.leica-geosystems.com/en/index.htm>>.
- LIMA, C. R. G. de. **Um Estudo Comparativo de Sistemas de Medição Aplicáveis ao Controle Dimensional de Superfícies Livres em Peças de**

- Médio e Grande Porte.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- LIN, J.; SU, X. Two-dimensional fourier-transform profilometry for the automatic measurement of three-dimensional object shapes. In: **Opt. Eng.** **11**. [S.l.: s.n.], 1995.
- LINGEMANN, H. S. e. a. K. Indoor and outdoor localization for fast mobile robots. **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**, p. 2185–2190, 2004.
- LIU, J. A small window-cleaning robot for domestic use. In: **International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence**. [S.l.: s.n.], 2009.
- MARK, W. van der; GAVRILA, D. M. Real-time dense stereo for intelligent vehicles. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 7, p. 38–50, 2006.
- MICHEL, P. Vision-guided humanoid footstep planning for dynamic environments. In: **5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots**. [S.l.: s.n.], 2005.
- NEGAHDARIPOUR, S.; FIROOZFAM, P. An rov stereovision system for ship hull inspection. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 31, p. 551–564, 2006.
- NG-THOW-HING, V. Expanding task functionality in established humanoid robots. In: **7th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots**. [S.l.: s.n.], 2007.
- ORTEGA, J. W. R. M. e. a. J. C. P. Image processing for 3d reconstruction using a modified fourier transform profilometry method. **6th Mexican international conference on Advances in artificial intelligence**, p. 705–712, 2007.
- PINTO, T. L. F. da C. **Medição óptica, Comparação e Sinalização de Superfícies com Forma Livre de Grande Extensão.** Tese (Doutorado) — POSMEC - Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- QUAN, W. C. C.; TAY, C. J. Phase-retrieval techniques in fringe-projection profilometry. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 48, p. 235–243, 2010.

- REICH, C.; RITTER, R.; THESING, J. White light heterodyne principle for 3d-measurement. **Sensors, Sensor Systems, and Sensor Data Processing**, p. 236–244, 1997. Disponível em: <+ <http://dx.doi.org/10.1117/12-287750>>.
- RICCI, F. Use of rovs in operation of ean underwater installation in the north sea. **Intervention Sous-Marine ISM**, p. 65–76, 1990.
- SCHARSTEIN, D.; SZELISKI, R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. **International Journal of Computer Vision**, v. 47, p. 7–42, 2002.
- STARUML. **StarUML - The Open Source UML/MDA Platform**. 12 2012. Disponível em: <<http://staruml.sourceforge.net/en/>>.
- STEFANO, L. D.; MARCHIONNI, M.; MATTOCCIA, S. A pc-based real-time stereo vision system. **MG&V**, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland, Poland, v. 13, n. 3, p. 197–220, 2004. ISSN 1230-0535.
- STEFANO, L. D.; MATTOCCIA, S. Fast stereo matching for the videt system using a general purpose processor with multimedia extensions. In: **In Fifth IEEE International Workshop on Computer Architecture for Machine Perception**. [S.l.: s.n.], 2000. p. 356–362.
- STIVANELLO, M. E. **Desenvolvimento De Uma Biblioteca Para Sistemas De Visão Estereoscópica Para Robótica Móvel**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal De Santa Catarina, 2008.
- STIVANELLO, M. E.; LEAL, E. S.; PALLUAT, N.; STEMMER, M. R. Dense correspondence with regional support for stereo vision systems. In: **Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing**. [S.l.: s.n.], 2010.
- TAKEDA, H. I. M.; KOBAYASHI, S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. **Optical Society of America**, v. 72, p. 156–160, 1982.
- TAKEDA, M.; MUTOH, K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-d object shapes. **Applied Optics**, v. 22, p. 3977–3982, 1983.
- TAKEDA, Q. G. e. a. M. Frequency-multiplex fourier-transform profilometry: a single-shot three-dimensional shape measurement of objects with

- large height discontinuities and/or surface isolations. **Applied Optics Communications**, v. 36, p. 5347–5354, 1997.
- TRIGGIA, C. V. F. e. a. A. A. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. [S.l.]: Interciencia, 2001.
- TRUCCO, E.; VERRI, A. **Introductory Techniques for 3-D Computer Vision**. [S.l.]: Prentice Hall, 1998.
- TSAI, R. Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. **IEEE Journal of Robotics and Automation**, v. 3, p. 323–344, 1987.
- WEISE, T.; LEIBE, B.; GOOL, L. V. Fast 3d scanning with automatic motion compensation. In: **2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**. [S.l.]: IEEE, 2007. p. 1–8. ISBN 1-4244-1179-3.
- WHITCOMB, L. Underwater robotics: Out of the research laboratory and into the field. **Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation**, p. 709–716, 2000.
- WILLE, J. M.; FORM, T. Realizing complex autonomous driving maneuvers the approach taken by team carolo at the darpa urban challenge. **Vehicular Electronics and Safety, 2008. ICVES 2008. IEEE International Conference on**, p. 232–236, October 2008.
- YAMAGUCHI, I.; ZHANG, T. Phase-shifting digital holography. **Optics Letters**, v. 22, p. 1268–1270, 1997.
- YANG, S. C. e. a. R. Robust and accurate surface measurement using structured light. **IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT**, v. 57, p. 1275–1280, 2008.
- YOON, J. Ladar based obstacle detection in an urban environment and its application in the darpa urban challenge. **International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS**, p. 581–585, 2008.
- YUAN, A. S. e. a. F. Laser-based navigation enhanced with 3d time-of-flight data. **2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation**, p. 12–17, 2009.
- ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 22, p. 1330–1334, 2000.

- ZHANG, Z.; ZHANG, S. One-shot 3d shape and color measurement using composite rgb fringe projection and optimum three-frequency selection. **2009 International Conference on Optical Instruments and Technology**, p. 751103–751103–12, 2009.
- ZHONG-WEI, S. Y.-s. e. a. L. Complex object 3d measurement based on phase-shifting and a neural network. **Optics Communications**, v. 282, p. 2699–2706, 2009.
- ZUMBRUNN, R. Automated fast shape determination of diffuse reflecting objects at close range by means of structured light and digital phase measurement. **ISPRS**, p. 363–379, 1987.



## **APÊNDICE A – EXPERIMENTOS E TESTES CONCEITUAIS REALIZADOS**

Em uma etapa inicial do trabalho foi realizada uma revisão teórica dos tópicos que se considerou mais relevantes ao tema. Neste momento, métodos clássicos de medição foram estudados.

Adicionalmente, foram realizados experimentos práticos e diversos ensaios com o objetivo de avançar no entendimento das técnicas de medição e modelos relacionados, além de se adquirir um aprofundamento nos requisitos existentes na aplicação.

Na sequência são descritas as principais atividades neste sentido.

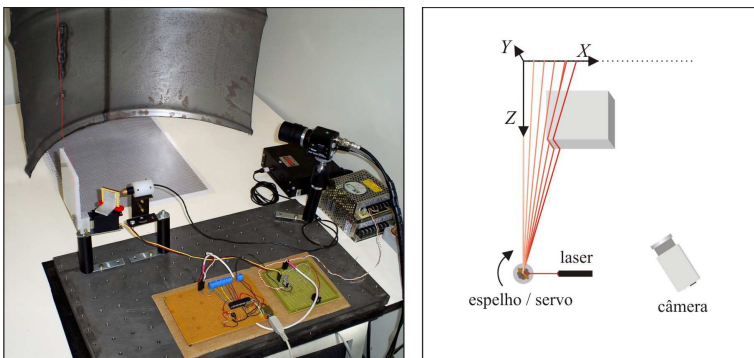
### **A.1 DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DE MEDIÇÃO POR TRIANGULAÇÃO LASER**

O objetivo deste trabalho foi estudar, desenvolver e avaliar um sistema de visão 3D ativa por triangulação. Pela realização desta atividade desenvolveu-se experiência prática e teórica relacionada à visão ativa e metrologia e aprofundou-se a compreensão nos requisitos e problemas relacionados com o tema de Doutorado. Adicionalmente, foi disponibilizado ao laboratório uma bancada composta por hardware e software para realização de experimentos, testes conceituais e estudos preliminares.

Uma bancada foi desenvolvida com base na técnica descrita na Seção 2.1.3. O sistema foi desenvolvido com o objetivo de caracterizar estruturas metálicas. Os principais requisitos que orientaram o projeto foram a necessidade de medição a uma distância aproximada de 500 mm e a restrição ao deslocamento do sistema ou do mensurando durante a medição.

Uma imagem do sistema desenvolvido e uma ilustração simplificada da sua configuração são apresentadas na Figura 73. O sistema é composto basicamente por uma câmera de vídeo, um projetor de folha laser e um sistema de atuação. A câmera de vídeo é conectada ao computador através de uma placa de aquisição. O projetor de laser encontra-se direcionado a um espelho que está acoplado a um servo motor. Tanto a emissão da luz como o funcionamento do servo motor são realizados através de uma placa de controle, que por sua vez encontra-se conectada a um computador através da interface USB.

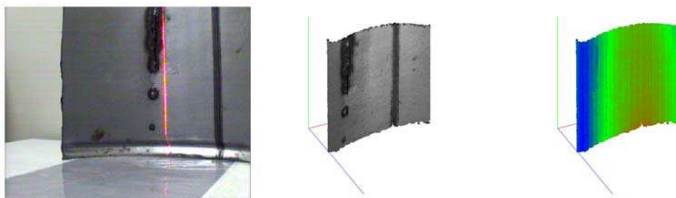
Através da configuração utilizada é possível direcionar a folha de luz



**Figura 73: Bancada de medição laser construída**

ao longo do mensurando alterando-se a orientação do espelho. Para uma dada orientação, o projetor laser emite uma folha de luz na direção do espelho, que por sua vez reflete a folha em direção ao mensurando. A câmera, em ângulo, captura uma imagem com a presença da linha formada pela intersecção da folha de luz com a superfície do objeto. As distorções observadas na extensão desta linha são interpretadas como variações de distância. Pelo direcionamento da folha laser sobre toda a extensão do mensurando e pela repetição do processo de avaliação da linha laser são obtidos vários perfis que, unidos, fornecem uma descrição 3D do objeto.

Na Figura 74 é apresentado um modelo 3D uma peça metálica curva medida pelo sistema. A primeira imagem corresponde à imagem da linha laser incidindo sobre o mensurando, capturada pelo sistema em um dos passos da medição. Na segunda imagem é apresentado o modelo tridimensional reconstruído, obtido pela medição. Na terceira imagem é apresentada uma avaliação do modelo empregando uma das funcionalidade da ferramenta desenvolvida, onde os pontos são coloridos em função da profundidade.



**Figura 74: Medição com bancada laser**

Através de uma avaliação visual é possível observar que o sistema

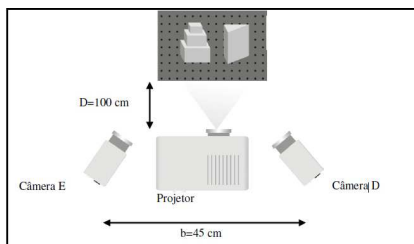


caracteriza satisfatoriamente a forma 3D de objetos e superfícies. Pela realização de uma avaliação metrológica (JR.; SOUSA, 2008) obteve-se uma incerteza de medição expandida igual a 2,0 mm. Considera-se que os níveis de incerteza alcançados são suficientes para operações gerais de robótica. Além disso, durante a avaliação do sistema observou-se que as fontes de incertezas que mais contribuem para o erro de medição são a rotação do espelho e a resolução espacial da câmera. O uso de um sistema de rotação com passo angular menor e uma câmera com maior resolução são suficientes para melhorar significativamente o resultado obtido.

O desenvolvimento deste trabalho contribuiu para a disponibilização de uma ferramenta de visualização e avaliação de modelos 3D construída utilizando-se OpenGL, necessária ao atendimento de requisito específico descrito na seção 3.1, e que continuou a ser utilizada e aperfeiçoada durante o andamento do trabalho.

## A.2 ESTUDO DE MEDIÇÃO COM DIFERENTES PADRÕES PROJETADOS

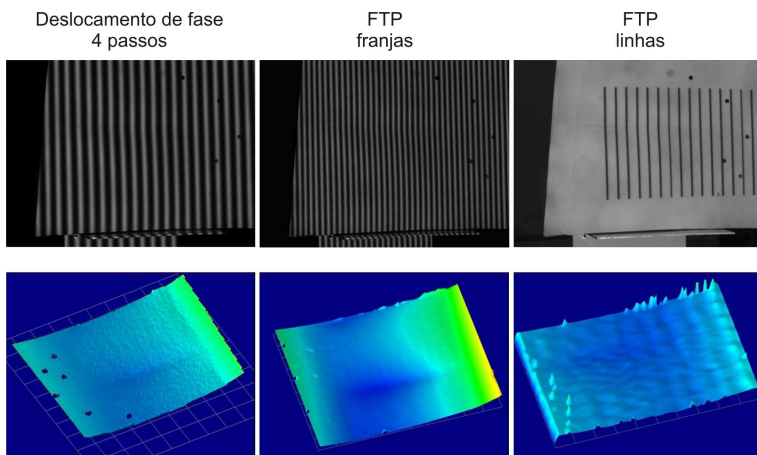
O objetivo geral deste estudo foi avaliar um sistema de medição capaz de medir formas 3D de superfícies suaves empregando fotogrametria ativa. O objetivo específico do trabalho foi estudar os efeitos de diferentes estruturas projetadas sobre a capacidade do sistema em medir formas 3D. O trabalho foi realizado utilizando o sistema de medição fotogramétrico ativo apresentado na Figura 75 (esquerda), já existente no laboratório, que utiliza duas câmeras CCD e um projetor multimídia. Este sistema disponibiliza as funcionalidades necessárias para a realização de medições, incluindo calibração, correspondência e reconstrução. A configuração utilizada nos experimentos é apresentada na Figura 75 (direita).



**Figura 75: Sistema de Medição Estéreo Ativa utilizada nos estudos**

O sistema foi avaliado através de medições empregando diferentes padrões de iluminação. Nestas medições foram empregados o método de deslocamento de fase e o método FTP, descritos na Seção 2.1.5. Para avaliação dos resultados empregando foram medidos diferentes objetos, incluindo um segmento de asa de aeromodelo, uma peça de madeira usinada com ondulações e uma superfície plana calibrada por uma máquina de medição de coordenadas.

Na Figura 76 são apresentados alguns dos resultado de medição obtidos empregando diferentes padrões sobre a asa de aeromodelo.



**Figura 76: Estudo de diferentes padrões projetados**

Apesar das diferenças apresentadas, todos os métodos recuperaram a forma geral da região medida. O método de deslocamento de fase apresentou resultados bastante suaves. Já os métodos baseados em um único padrão apresentaram artefatos periódicos associados ao padrão da portadora, principalmente quando utilizadas franjas de baixa frequência.

## APÊNDICE B – ARTIGOS PUBLICADOS

Durante a realização desta Tese de Doutorado uma série de artigos científicos foram escritos, de modo a publicar os resultados de pesquisa e desenvolvimento alcançados.

Abaixo são listados os trabalhos diretamente relacionados com o tema da tese de doutorado:

- STIVANELLO, M. E., STEMMER, M. R., ALBERTAZZI JR, A. Active Vision System for 3D Shape Characterization in Dynamic Environments. In: Journal of Real-Time Image Processing - Springer, Submetido em 2013.
- STIVANELLO, M. E., STEMMER, M. R. Development of an Active Stereo Vision System for Robotics Applications. In: 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2012, Fortaleza CE. Anais do 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2012.
- STIVANELLO, M. E., STEMMER, M. R. Development of a Hybrid Stereo Vision System for 3D Shape Estimation. In: SIBGRAPI 2012 (XXV Conference on Graphics, Patterns and Images), 2012, Ouro Preto MG. Workshops of SIBGRAPI (2012), 2012.
- STIVANELLO, M. E., LEAL, E. S., PALLUAT, N., STEMMER, M. R. Dense Correspondence with Regional Support for Stereo Vision Systems. In: 23rd SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images, 2010, Gramado - RS. 23rd SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images, 2010. p. 368-375.
- STIVANELLO, M. E. VIEIRA, L. H., CUNHA, R. F., STEMMER, M. R., ALBERTAZZI JR, A. Desenvolvimento de um Sistema de Medição 3D por Triangulação Laser Aplicado à Caracterização de Superfícies Metálicas. In: ANAIS DO IX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 2009, Brasília. Anais do IX Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI). Brasília, 2009.
- STIVANELLO, M. E., VIEIRA, L. H., CUNHA, R. F., CALGAROTO, A. S., ALBERTAZZI JR, A., STEMMER, M. R. Caracterização 3D de Superfícies Metálicas por Meios Ópticos. In: 5 Congresso Brasileiro

de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 2009, Ceará. Anais do 5 Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 2009.

- STIVANELLO, Mauricio E., LEAL, Eduardo S., Palluat, Nicolas, Stemmer, Marcelo R. - Desenvolvimento de uma Biblioteca para Sistemas de Visão Estereoscópica para Robótica móvel. In: VIII INDUSCON - Conferência Internacional de Aplicações Industriais, 2008, Poços de Caldas MG, 2008.
- STIVANELLO, Mauricio E., LEAL, Eduardo S., Palluat, Nicolas, Stemmer, Marcelo R. - Correspondência Densa para Sistemas de Visão Estereoscópica para Robótica Móvel. In: XVII CBA - Congresso Brasileiro de Automática, 2008, Juiz de Fora MG, 2008.

Adicionalmente, outros trabalhos na área de Visão computacional foram produzidos ao longo do período, resultantes de trabalhos realizadas em paralelo:

- STIVANELLO, M. E., BUENO, M. M., VARGAS, S., FEDECHEN, E. A. Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento Automático de Ambientes Através de Visão Computacional. In: XIX Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2012, 2012, Campina Grande (PB). Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, 2012.
- STIVANELLO, M. E., BUENO, M. M., VARGAS, S., FEDECHEN, E. A. Sistema de Visão Computacional para Extração Automática de Estatísticas em Ambientes Monitorados. In: SIBGRAPI 2012 (XXV Conference on Graphics, Patterns and Images), 2012, Ouro Preto MG. Workshops of SIBGRAPI (2012), 2012. p. 11-12.
- VARGAS, S., STIVANELLO, M. E., STEMMER, M. R., Reis, D. S., GOMES, P. C. R. Interação Humano-Computador Baseada em Vídeo Através de Descritores de Fourier e Redes Neurais Artificiais. In: WRVA 2012 - VIII Workshop de Realidade Virtual e Aumentada, 2012, Paranavaí (PR). Anais do VIII Workshop de Realidade Virtual e Aumentada, 2012.
- ROSA, A. L. B., Reis, D. S., GOMES, P. C. R., STIVANELLO, M. E. Sistema de Rastreamento de Objetos Através de Múltiplas Câmeras. In: XXI Seminário de Computação (SEMINCO), 2012, Blumenau SC. Anais do XXI Seminário de Computação (SEMINCO), 2012.

- STIVANELLO, M. E., BENKE, D., MELLO JUNIOR, L. J., VARGAS, S., FEDECHEN, E. A., ABATEPAULO, A. R. R. Desenvolvimento de um Sistema para Contagem Automática de Células Sanguíneas Através de Visão Computacional. In: XXI Seminário de Computação (SEMINCO), 2012, Blumenau SC. Anais do XXI Seminário de Computação (SEMINCO), 2012.
- SANTOS, Daniel, REIS, Dalton, S., STIVANELLO, Mauricio E., GOMES, Paulo C. R. - Desenvolvimento de um Sistema de Visão Computacional Para Monitoramento Automatizado de Veículos. In: IX SBAI - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2009, Brasília DF, 2009.