

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto

**MEDIÇÃO ÓPTICA, COMPARAÇÃO E SINALIZAÇÃO
DE SUPERFÍCIES COM FORMA LIVRE
DE GRANDE EXTENSÃO**

Florianópolis

2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**MEDIÇÃO ÓPTICA, COMPARAÇÃO E SINALIZAÇÃO
DE SUPERFÍCIES COM FORMA LIVRE
DE GRANDE EXTENSÃO**

tese submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

TIAGO LOUREIRO FIGARO DA COSTA PINTO

**Florianópolis
02 de Junho de 2010**

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da
Universidade Federal de Santa Catarina

P659m Pinto, Tiago Loureiro Figaro da Costa
Medição óptica, comparação e sinalização de superfícies
com forma livre de grande extensão [tese] / Tiago Loureiro
Figaro da Costa Pinto ; orientador, Armando Albertazzi
Gonçalves Júnior. - Florianópolis, SC, 2010.
189 p.: il., grafs., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Tecnológico. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia mecânica. 2. Superfície livre. 3. Controle
geométrico. 4. Visão estéreo. 5. Topogrametria. I.
Gonçalves Junior, Armando Albertazzi. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU 621

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

MEDIÇÃO ÓPTICA, COMPARAÇÃO E SINALIZAÇÃO
DE SUPERFÍCIES COM FORMA LIVRE
DE GRANDE EXTENSÃO

TIAGO LOUREIRO FIGARO DA COSTA PINTO

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de
DOUTOR EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.

Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr.Eng. - Orientador

Christian Kohler, Dr-Ing. – Co-orientador

Eduardo Alberto Fancello, D.Sc. - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng. – Presidente

Hans-Jörg Andreas
Schneebeli, Dr. rer.nat.

Meinhard Sesselmann,
Dr. Eng.

André Roberto de Sousa,
Dr. Eng.

Marcelo Ricardo Stemmer,
Dr-Ing.

À minha avó pela inspiração.

À minha mãe pela dedicação.

À meu irmão pela superação.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior pela orientação, sempre acompanhada de paciência, equilíbrio e sabedoria.

Ao meu co-orientador e amigo Christian Kohler, por sua competência e grande ajuda nas mais diversas áreas das engenharias.

À minha família pelo irrestrito apoio e incentivo.

À minha companheira por dividir os momentos de felicidade e de dificuldades, sempre ao meu lado.

À família Labmetro por tantos anos de companheirismo e aprendizado.

À UFSC por ter me concedido a oportunidade de realização do doutorado.

Ao CNPq que me concedeu os recursos financeiros que permitiram cursar o doutorado.

Aos membros da banca examinadora pelas contribuições.

A todos que atuaram direta ou indiretamente na realização deste trabalho, especialmente à Rosana, aos acadêmicos Cesar e Luis, ao técnico Fabrício e a todo o pessoal dos laboratórios da Fundação CERTI.

RESUMO

Muitas superfícies, como cascos de navio, “carenagens” de automóveis e aeronaves, assim como pás de rotores de turbinas hidráulicas ou de aerogeradores são típicos exemplos de superfícies com forma livre. Como qualquer peça produzida pela indústria, peças que contenham superfícies livres também devem ser medidas para realizar seu controle geométrico, garantindo assim que a função do produto seja realizada de forma satisfatória.

Sistemas ópticos de medição são cada vez mais utilizados para a medição de superfícies livres. Isto se deve ao fato de medições por princípios ópticos possuírem diversas vantagens: (a) medição sem contato; (b) rapidez de medição, onde milhões de pontos podem ser medidos em poucos segundos; (c) relativa portabilidade e (d) incertezas de medição comparáveis a sistemas de medição com contato.

Um sistema óptico portátil, capaz de realizar a medição de superfícies livres de grande extensão, compará-las com superfície de referência e ainda sinalizar localmente parâmetros de interesse através da projeção de mapas de cores na própria superfície, foi desenvolvido no âmbito da tese.

O sistema funde os princípios de visão estéreo passiva e ativa. Alvos circulares são utilizados para concatenar nuvens de pontos tridimensionais em relação a um sistema de coordenadas global. Algoritmos desenvolvidos realizam o cálculo destas nuvens de pontos de forma intrinsecamente estruturada em uma única malha regular, possibilitando ainda utilizar um número qualquer de câmeras e um projetor de luz estruturada. A calibração do projetor, como uma câmera invertida do ponto de vista da óptica geométrica, possibilita calcular e projetar um mapa de cores na própria superfície auxiliando o controle dimensional e o acompanhamento de intervenções.

Avaliações experimentais, utilizando diversos tipos de padrões geométricos e superfícies livres calibradas, demonstram a viabilidade e as vantagens de utilização dos métodos propostos.

Palavras-chave: superfície livre, controle geométrico, visão estéreo, topogrametria.

ABSTRACT

Many surfaces, such as ship hulls, fairing of automobiles and rotors of water or wind turbines are typical examples of free form surfaces. Like any pieces produced by industry, parts that contain free form surfaces should also be measured, to ensure that the product function is performed satisfactorily.

Optical measuring systems are increasingly used for the measurement of free form surfaces. Measurements by optical principles have several advantages: (a) non-contact measuring, (b) speed of measurement, where millions of points can be measured in seconds, (c) high portability and (d) measurement uncertainties are comparable to contact measurement systems. A portable optical system, capable of measuring free form surfaces over large areas, comparing them with reference surfaces and locally project color maps on the surface to signal parameters of interest, was developed within the thesis.

The system merges passive and active stereo vision. Circular targets are used to concatenate three-dimensional point clouds for a global coordinate system. Algorithms perform the calculation of these point clouds intrinsically structured into a single regular mesh, allowing also the use of any number of cameras and a structured light projector. The calibration of the projector, as an inverted camera, allows the calculation and design of a color map, to signalize the surface, helping the dimensional control and monitoring of interventions. Experimental evaluations, using different kinds of geometric patterns and calibrated free form surfaces demonstrate the feasibility and the advantages of using the proposed methods.

Keywords: free form surface, geometric control, stereo vision, topogrammetry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Máquina de medir por coordenadas cartesianas [4].	30
Figura 1-2 – Braço de medição portátil e sua utilização em campo.	30
Figura 1-3 – Sistema de medição óptico e uma nuvem de pontos medida.	31
Figura 2-1 – Pá de turbina hidráulica Francis (a) entrada de água e (b) saída de água.	37
Figura 2-2 – Representação por (a) pontos, (b) retas, (c) curvas, (d) segmentos de superfícies e (e) sólidos [13].	38
Figura 2-3 – Estruturação de conjunto de pontos – (a) objeto original, (b) amostragem pontual, (c) reconstrução ordenada e (d) reconstrução não ordenada [13].	39
Figura 2-4 – Estrutura de dados de uma superfície Bezier [12].	39
Figura 2-5 – Princípio de triangulação na fotogrametria [14].	40
Figura 2-6 – Desenho esquemático de uma <i>câmera obscura - pinhole</i> .	41
Figura 2-7 - Modelo de câmera <i>pinhole</i> .	41
Figura 2-8 – Configuração ótima para medição fotogramétrica [46].	44
Figura 2-9 – Objeto preparado para a medição fotogramétrica [14].	44
Figura 2-10 – Sistema de visão estéreo [51].	45
Figura 2-11 – Restrições epipolares no sistema de visão estéreo [18].	46
Figura 2-12 – Triangulação: (a) ponto médio, (b) correção ótima [23].	47

Figura 2-13 – Círculo projetado na imagem como elipse gera erro de excentricidade.....	48
Figura 2-14–Esquema da topogrametria [17].	49
Figura 2-15 – Franja senoidal e gráficos de intensidade e módulo 2π fase [17][80]......	50
Figura 2-16 – Codificação <i>Graycode</i> e exemplo de projeção [80].	51
Figura 2-17 – Relação entre o movimento do objeto e as linhas de medição resulta em uma malha regular no plano XY (adaptado de [64]).	53
Figura 2-18 – (a) Alvos medidos por fotogrametria possibilitam (b) concatenar distintas nuvens de pontos [66].	54
Figura 2-19 – Sistema de medição por fusão de triangulação passiva e ativa [25]......	55
Figura 2-20 – Formação de triângulos candidatos por (a) malha tetraedral [99] e (b) triangularização <i>Delaunay</i> e respectivos círculos inscritos [102]......	57
Figura 2-21 – Imagens adquiridas por um perfilômetro auto-referenciado [99].	58
Figura 2-22 – Princípio utilizado pela triangulação ativa [10]......	58
Figura 2-23 – Sistema (a) medindo peça e (b) resultado da digitalização [29]......	59
Figura 2-24 – Chapelona para verificação de forma em isolar elétrico.....	60
Figura 2-25 – Mesa, régua e cilindro de controle.	60
Figura 2-26 –Posição e intensidade de desvio entre projeto e peça indicado pela cor [9]......	61

Figura 2-27 – (a) Processo de projeção e formação de imagem; (b) transformação de geometria e intensidade (adaptado de [103][105]).	62
Figura 2-28 – (a) Franjas verticais projetadas sobre a peça e (b) padrão invertido [100].	63
Figura 2-29 – (a) Padrão invertido projetado sobre a peça e (b) identificação das diferenças [104].	63
Figura 2-30 – (a) Identificação das diferenças sobre a própria peça por projeção invertida e (b) projeção adaptada invertida de padrões para visualização regular pela câmera [105].	64
Figura 2-31 – Projeção em (a) canto de parede (b) com imagem original (c) com correção geométrica e (d) com correção de intensidade e cor [115].	66
Figura 3-1– Principais dimensões de uma turbina hidráulica de grande porte.	69
Figura 3-2 – Princípio de busca da coordenada Z [19].	75
Figura 3-3 – Mapa de fase com os pontos 3D projetados variando a coordenada Z.	76
Figura 3-4 – Gráfico do módulo da diferença de fase em função da variação da coordenada Z.	76
Figura 3-5 – Determinação do raio no sistema de coordenadas cilíndrico.	77
Figura 3-6 – Retas paramétricas para busca das coordenadas de pontos de interesse.	78
Figura 3-7 –Relação entre sistemas de coordenadas para concatenação.	83

Figura 3-8 – Sistema de coordenadas (a) incorreto e (b) correto para comparar diretamente cotas Z.	86
Figura 3-9 – Diferença em Z entre superfícies livres.....	86
Figura 3-10 – Diagrama de calculo das componentes RBG para cada cota Z.	88
Figura 3-11 – Imagem para projeção de mapa de cores com iso linhas a cada $\Delta Z = 2$ mm.....	89
Figura 3-12 (a) Malha não regular e (b) interpolação para malha regular [120].....	92
Figura 4-1 – (a) Projeto mecânico e (b) protótipo construído montado sobre suporte com altura ajustável.	94
Figura 4-2 - Principais características dimensionais do sistema de medição.	94
Figura 4-3 - Sistema de coordenadas e volume de medição (200x200x200) mm ³	95
Figura 4-4 (a) Mapa de fase adquirido sobre um plano e (b) perfil fase na linha central da imagem. As coordenadas x e y estão expressas em pixels e o valor da fase em radianos.....	96
Figura 4-5 (a) Resultado da subtração da interpolação de um plano matemático e (b) perfil da diferença. As coordenadas x e y estão expressas em pixels e o valor da fase em radianos.	96
Figura 4-6 (a) Subtração da interpolação de superfície biquadrática e (b) perfil da diferença. As coordenadas x e y estão expressas em pixels e o valor da fase em radianos.....	97

Figura 4-7 (a) Subtração da interpolação de superfície grau 5 e (b) perfil da diferença. As coordenadas x e y estão expressas em pixels e o valor da fase em radianos.	98
Figura 4-8 Artefato de calibração e posições recomendadas no volume de medição [121].	99
Figura 4-9 Artefato de calibração e posições recomendadas no volume de medição [122].	100
Figura 4-10 O erro de medição de planeza RE é a maior faixa de distâncias, entre pontos medidos e cada plano ajustado por mínimos quadrados [122].	101
Figura 4-11 Aquisição para calibração do sistema utilizando padrão bidimensional.	102
Figura 4-12 Estimativa de erros de medição e resíduo de calibração em função do numero de posições do padrão.	103
Figura 4-13 Estimativa dos erros de medição em função da etapa de calibração.	105
Figura 4-14 Diferença entre medições para diferentes configurações de triangulação e calibração do projetor.	107
Figura 4-15 Padrão unidimensional sendo medido para avaliação segundo guia VDI/VDE 2634-1.	108
Figura 4-16 Influência do processamento dos alvos no erro de medição de distância.	109
Figura 4-17 Cilindros concêntricos montados utilizado como alvo.	110
Figura 4-18 Posições efetivas do padrão unidimensional no volume de medição do sistema.	110

Figura 4-19 Gráfico de erros de medição de distância segundo VDI/VDE 2634 Parte 1.	111
Figura 4-20 Sistema realizando a medição de um plano de referência.	112
Figura 4-21 Variação da intensidade média da imagem em função do tempo de integração da câmera.	113
Figura 4-22 Resíduo da fase para (a) 31,00 ms e (b) para 33,34 ms de tempo de integração.	114
Figura 4-23 Resíduo da fase para (a) 4 passos, (b) 4 passos com filtro passa baixa, (c) 8 passos e (b) 8 passos com filtro passa baixa.	115
Figura 4-24 Pontos medidos pelo método Zscan e busca de pontos homólogos.	117
Figura 4-25 Diferença entre as nuvens de pontos	118
Figura 4-26 Resíduo [rad] dos mapas de fase (a) Cam1 vertical e (c) horizontal e (b) Cam0 vertical e (d) horizontal.....	119
Figura 4-27 Medição de esferas e (b) calota de pontos medidos e esfera ajustada.	120
Figura 4-28 Posições efetivamente medidas das esferas no volume de medição do sistema.....	121
Figura 4-29 Posições medidas do plano de referência no volume de medição do sistema.....	122
Figura 4-30 Estimativa dos erros de medição de distância.	124
Figura 4-31 Sistema medindo um plano que pode ser inclinado com ângulos conhecidos.....	126
Figura 4-32 – Gráfico de tendência em função de ângulo entre planos de referência.....	126

Figura 4-33	Projeção de mapas de cores sobre as superfícies sinalizando parâmetros de interesse.	127
Figura 4-34	Distintas medições do plano referência concatenadas em uma única malha regular.....	129
Figura 4-35	Corpo de prova sendo medido em MMC.	131
Figura 4-36	Nuvem de pontos com malha regular em XY e alvos numerados.	132
Figura 4-37	Comparação entre os alvos medidos pela MMC e pelo sistema óptico.	133
Figura 4-38	– Vetores erro das transformações de pontos da estrutura do sistema.	134
Figura 4-39	Erro de medição de distância para pinos concatenados.....	135
Figura 4-40	– Comparação de pontos da superfície medidos pelo sistema e pela MMC.....	135
Figura 4-41	Pontos utilizados na comparação e vetores erro.	136
Figura 4-42	Detalhe da superfície medida e pontos comparados.	137
Figura 4-43	Face do manequim sendo medida.	138
Figura 4-44	Medição da face de um manequim com triangulação entre câmeras.	138
Figura 4-45	Junção de medição de diferentes combinações entre câmeras e projetor.....	139
Figura 4-46	Junção de medição de diferentes combinações entre câmeras e projetor.....	139
Figura 4-47	Replica de cavidade recuperada por soldagem.	140
Figura 4-48	Resultado de medição da replica de cavidade recuperada por soldagem.	140

Figura 4-49 Réplica de molde de injeção.....	141
Figura 4-50 Resultado de medição de réplica de molde de injeção.	141
Figura 4-51 Diferentes combinações para triangulação para medição de réplica de molde.	142
Figura 4-52 Medição de parte de bloco de motor.	142
Figura 4-53 Medição de parte de bloco de motor.	143
Figura 4-54 Medição de seção cilíndrica de duto.	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Boas práticas para medição fotogramétrica, traduzido de [79].....	72
Tabela 2 – Comparação da incerteza máxima desejável e tangível para o sistema.	74
Tabela 3 – Erro máximo em função da etapa de calibração utilizada.	105
Tabela 4 – Erro máximo em função da combinação para triangulação e calibração do projetor.....	106
Tabela 5- Amplitude de resíduo e sensibilidade em função do período da franja projetada.....	116
Tabela 6 – Configuração recomendada de parâmetros do sistema.....	117
Tabela 7 – Erro máximo de apalpação e de distância entre centros das esferas.....	121
Tabela 8 – Erros de planeza para cada posição do plano de referência.	122
Tabela 9 – Erros de medição de distância entre superfícies.	123
Tabela 10 – Determinação da resolução em Z do sistema.	125
Tabela 11 - Erros em função do passo de concatenação.	129
Tabela 12 – Estimativa de erros de medição dos alvos.....	132
Tabela 13 - Estimativa de erros de transformações de pontos da estrutura do sistema.	134
Tabela 14 – Estimativa de erros de medição de pontos medidos sobre a superfície.....	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

X, Y, Z	Coordenadas de um ponto 3D no espaço cartesiano
C_c	Matriz de estrutura de dados de uma superfície Bézier
M	Um ponto (X,Y,Z) no espaço cartesiano
m	Ponto M projetado no plano imagem (x,y)
C	Centro de projeção
P	Matriz de projeção
A	Matriz de parâmetros intrínsecos da câmera
R	Matriz de rotação da câmera
t	Vetor de translação da câmera
p_0	Ponto principal da câmera
k, p	Parâmetros de correção de distorção da lentes
Φ	Fase absoluta [rad]
ζ	Ordem de franja
$V(Z)$	Variância [rad ²] ou diferença [rad] de fase em função da estimativa de Z
n	Número de subdivisões do intervalo na busca de Z
E	Erro máximo de medição de distância
RA	Erro máximo de apalpação
SD	Erro máximo de distância entre esferas
RE	Erro máximo de medição de planeza
SCM	Sistema de coordenadas da medição (cada aquisição)
SCG	Sistema de coordenadas global

SUMÁRIO

1 CONTEXTO.....	29
1.1 INTRODUÇÃO	29
1.2 MOTIVAÇÃO	31
1.3 OBJETIVOS E RESULTADOS ESPERADOS	33
1.4 INOVAÇÕES E CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS	34
1.5 ESTRUTURA	35
2 MEDIÇÃO ÓPTICA DE SUPERFÍCIES LIVRES.....	37
2.1 SUPERFÍCIES LIVRES	37
2.2 TÉCNICAS ÓPTICAS DE MEDIÇÃO.....	40
2.2.1 Fotogrametria.....	40
2.2.2 Visão estéreo	45
2.2.3 Topogrametria.....	49
2.2.4 Perfilômetro <i>laser</i> auto-referenciado.....	54
2.3 IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE INTERESSE	59
2.4 RESUMO DAS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO APRESENTADAS	66
3 SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO	69
3.1 APLICAÇÕES PRETENDIDAS.....	69
3.2 FUNÇÕES A SEREM ATENDIDAS PELO SISTEMA.....	70
3.3 CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS	71
3.4 MEDIÇÃO DA FORMA TRIDIMENSIONAL DE SUPERFÍCIES LIVRES	74
3.4.1 Princípio de medição orientado ao objeto	74
3.4.2 Algoritmo Zscan	79
3.5 CONCATENAÇÃO DAS MEDIÇÕES	80
3.5.1 Concatenação dos alvos	80
3.5.2 Concatenação da nuvem de pontos	82

3.6	COMPARAÇÃO DE SUPERFÍCIES	85
3.7	SINALIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES	87
3.8	OPERAÇÃO DO SISTEMA	89
3.9	DISCUSSÃO SOBRE A SOLUÇÃO PROPOSTA.....	90
4	VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	93
4.1	PROTÓTIPO DE LABORATÓRIO.....	93
4.2	MÉTODO DE ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS	95
4.2.1	Mapas de fase.....	95
4.2.2	Desempenho geométrico.....	98
4.3	MEDIÇÃO A PARTIR DE UM ÚNICO POSICIONAMENTO	101
4.3.1	Calibração de câmeras	102
4.3.2	Estereofotogrametria.....	108
4.3.3	Topogrametria.....	111
4.3.4	Sinalização	127
4.4	MÚLTIPLOS POSICIONAMENTOS DO SISTEMA.....	128
4.4.1	Concatenação e comparação	128
4.5	EXEMPLOS DE PEÇAS MEDIDAS.....	137
4.5.1	Face de manequim	138
4.5.2	Replica de cavidade recuperada.....	140
4.5.3	Réplica de molde de injeção	141
4.5.4	Bloco de motor.....	142
4.5.5	Seção de duto	143
4.6	DISCUSSÃO	144
5	CONCLUSÕES.....	145
5.1	PRINCIPAIS RESULTADOS	145
5.2	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	146
5.3	PRINCIPAIS LIMITAÇÕES.....	147
5.4	AVALIAÇÃO FINAL.....	148
5.5	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	149

REFERÊNCIAS	151
ANEXO A - CALIBRAÇÃO DE CÂMERA E PROJETOR	165
ANEXO B - CORREÇÃO DO CENTRO DA ELIPSE	171
ANEXO C - ORIENTAÇÃO ABSOLUTA.....	177
ANEXO D - ALINHAMENTO REFINADO	181
ANEXO E – PRINCIPAIS COMPONENTES DO SISTEMA	185

1 CONTEXTO

1.1 INTRODUÇÃO

Muitas superfícies, como cascos de navio, carenagens de automóveis e aeronaves, assim como pás de rotores de turbinas hidráulicas ou de aerogeradores são típicos exemplos de superfícies livres [1]. Exemplos mais comuns são superfícies que devem exercer também funções estéticas e ergonômicas como a carenagem de eletrodomésticos e eletroeletrônicos, como o *mouse* utilizado em computadores.

Superfícies livres normalmente são de difícil equacionamento matemático uma vez que não podem ser representadas com boa fidelidade por elementos geométricos simples como planos e superfícies quadráticas. Geralmente possuem normal à superfície bem definida, que é contínua em quase toda sua extensão, e podem ser representadas como superfícies paramétricas Bezier, Spline, B-Spline, NURBS ou em forma de nuvens de pontos tridimensionais [1][2].

Como qualquer peça produzida pela indústria, peças que contenham superfícies livres também devem ser medidas para realizar seu controle geométrico, garantindo assim que a função do produto seja realizada de forma satisfatória. Diversos princípios de medição podem ser utilizados para realizar o controle geométrico de superfícies livres. A tecnologia de medição por coordenadas (TMC) por contato, ou medição tridimensional é hoje uma ferramenta já consolidada nos processos de garantia da qualidade dimensional de produtos em indústrias dos mais diversos setores produtivos. Algumas das vantagens em relação aos meios de medição convencionais que têm garantido o sucesso desta tecnologia são: a alta flexibilidade, alta produtividade, alta informatização, alta exatidão e alta confiabilidade [3].

Além da aplicação no controle dimensional de produtos, a TMC tem se mostrado uma ferramenta poderosa em engenharia reversa, através da digitalização precisa de superfícies com formas livres [3]. Uma máquina de medir por coordenadas convencional medindo um exemplo de superfície livre pode ser visualizada na Figura 1.1.



Figura 1-1 – Máquina de medir por coordenadas cartesianas [4].

Máquinas de medir por coordenadas cartesianas são sistemas que ficam instalados em ambiente propício. Existem variações que podem ser levadas a campo, como os braços de medição que são máquinas de medir por coordenadas portáteis. Este tipo de sistema tem incertezas de medição piores se comparadas às convencionais e as medições são normalmente realizadas de forma manual, ponto a ponto [5][6]. A Figura 1.2 mostra um braço de medição e este sendo utilizado para medir a forma hidrodinâmica de uma pá de turbina hidráulica em campo.



Figura 1-2 – Braço de medição portátil e sua utilização em campo.

Sistemas ópticos de medição são cada vez mais utilizados para a medição tridimensional de superfícies livres. Isto se deve ao fato de medições por princípios ópticos possuem diversas vantagens: (a) medição sem contato, possibilitando realizar a medição de superfícies com baixa rigidez e sem correr o risco de riscar ou danificar superfícies bem acabadas; (b) rapidez de medição, onde milhões de pontos podem ser medidos em poucos segundos; (c) relativa portabilidade e (d) incertezas de medição que podem ser comparadas a sistemas com contato [8]. A Figura 1.3 mostra um sistema de medição óptico composto por duas câmeras e um projetor multimídia e um objeto digitalizado.



Figura 1-3 – Sistema de medição óptico e uma nuvem de pontos medida.

Existe uma demanda crescente para a caracterização de formas livres tridimensionais por sistemas ópticos de medição em projetos de pesquisa ligados ao Laboratório de Metrologia e Automatização (Labmetro) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

1.2 MOTIVAÇÃO

O Labmetro tem um histórico de mais de 28 anos no desenvolvimento de sistemas baseados em metrologia óptica. Diversos projetos envolvendo o Labmetro necessitam caracterizar a forma de superfícies livres e compará-las. Alguns exemplos de aplicações concretas e potenciais aplicações:

- **Projeto Roboturb:** sistema automatizado para medição e deposição por soldagem. Realiza de forma automatizada a recuperação de pás de turbinas hidráulicas de grande porte. Um robô realiza a medição da forma 3D dos defeitos e depois faz deposição por soldagem de forma automática para recompor a superfície hidrodinâmica da pá. Este processo não assegura a preservação da forma do perfil original da pá, pois utiliza apenas informações do entorno da cratera para estimar a superfície original. Uma maneira de corrigir o perfil da pá seria

determinar as diferenças em relação a uma pá em boas condições. Para isto, é necessário realizar as medições de ambas as pás – a de referência e a com defeitos – em um mesmo sistema de coordenadas e compará-las.

Uma segunda frente de trabalho no projeto Roboturb é o auxílio a recuperação manual das pás. Idealmente o reparo deveria recompor os defeitos e preservar o perfil original da pá. Na prática, o reparo feito de forma manual degrada o perfil original da pá e deteriora seu desempenho. Uma forma de preservar, ou mesmo recriar, o perfil original é compará-lo com o de uma pá de referência e apontar as diferenças projetando sobre a superfície medida um mapa de cores para guiar o processo de recuperação manual.

- **Medição da forma externa de dutos.** A forma digitalizada de dutos amassados é analisada e alimenta um programa de elementos finitos para a verificação da necessidade ou não de reparo ou substituição de trechos do duto.

- **Projeto DIVITRI.** Uma bancada de laboratório esta sendo desenvolvida para a digitalização e visualização tridimensional de réplicas de objetos. A bancada inclui dois sistemas ópticos de medição, mesa giratória para digitalização em 360° e acessórios de fixação.

- **Medição de partes de corpo humano.** Médicos e fisioterapeutas encontram dificuldades para quantificar, por exemplo, a evolução de um tratamento de um desvio na coluna. Com um sistema que mede precisamente a forma das costas do paciente e indica com um mapa de cores as mudanças, este acompanhamento se torna viável.

- **Escultura assistida por computador.** Uma peça moldável seria progressivamente modificada, medida e, com o auxílio da projeção de mapa de cores, o escultor seria iterativamente guiado até obter a geometria da superfície desejada.

A experiência acumulada no desenvolvimento de projetos e demandas específicas para medição em laboratório e em campo de superfícies livres, que não são atendidas por sistemas comerciais, foram as principais motivações para buscar o desenvolvimento de uma sistema portátil, capaz de medir superfícies livres de grande extensão com densidade elevada de pontos e com a capacidade de sinalizar características da superfície medida com a projeção de mapas de cores. Esta tese visa contribuir para o desenvolvimento de tal sistema e dar suporte a novos desenvolvimentos.

1.3 OBJETIVOS E RESULTADOS ESPERADOS

O objetivo geral deste trabalho será desenvolver e validar procedimentos e meios para medir e comparar superfícies livres de grande extensão.

O principal objetivo específico será desenvolver, construir e validar um sistema que aplique os conceitos e procedimentos desenvolvidos e seja capaz de realizar medições tridimensionais de superfícies de forma livre de grande extensão. Este permitirá comparar superfícies medidas com superfícies de referência e ainda sinalizará localmente as diferenças encontradas através da projeção de mapas de cores na própria superfície. No escopo deste trabalho, superfície livre de grande extensão é entendida como uma superfície com formas livres que tem a extensão maior do que comporta o volume de medição do sistema de medição, que será um cubo de lado 200 mm.

O sistema utilizará princípios ópticos de medição e diversos algoritmos para aquisição e processamento de dados por um computador. Os algoritmos que serão utilizados se baseiam na integração de técnicas desenvolvidas no âmbito da tese com adaptações de técnicas desenvolvidas pela comunidade científica mundial.

O sistema referência ao sistema de coordenadas global às coordenadas de vários alvos distribuídos pelo objeto, e, adicionalmente, através de projeção de luz estruturada, mede nuvens de pontos locais detalhadas, que representam trechos da superfície, que são referenciados e concatenados em relação ao sistema de coordenadas global.

Dois câmeras digitais e um projetor multimídia compõem o protótipo portátil que realiza a medição de nuvens de pontos tridimensionais, intrinsecamente regulares e organizadas. Uma seqüência de imagens é projetada sobre o objeto e adquirida pelas câmeras, possibilitando o cálculo de mapas de fase que contém informações sobre a forma da peça. O uso de um novo algoritmo para a análise dos mapas de fase resulta na digitalização 3D do objeto.

A medição e manipulação de nuvens de pontos tridimensionais de forma intrinsecamente estruturada, possibilita, entre outras vantagens, uma correspondência direta entre nuvens de pontos ou a comparação direta entre cotas Z.

Cálculos a partir de uma nuvem de pontos que representa uma superfície, ou a comparação com uma superfície de referência, permitem a projeção de um mapa de cores que identifica, sobre a própria peça, características de interesse.

Foram construídas bancadas experimentais, protótipos de laboratório, padrões para calibração e medição e corpos de prova para o

desenvolvimento de algoritmos, validação de conceitos e refinamento dos parâmetros operacionais estimados inicialmente. Procedimentos, protótipos e programas de computador para medição e calibração de câmeras e projetor foram desenvolvidos, testados e validados.

Com o sistema montado e calibrado, os módulos do programa de medição são capazes de:

- Gerar, projetar e adquirir imagens com padrões de iluminação estruturados;
- Determinar as coordenadas 3D de alvos circulares;
- Concatenar a posição dos alvos em relação a um sistema de coordenadas global;
- Realizar a medição de nuvens de pontos estruturadas;
- Estender grade regular, concatenar e refinar o alinhamento de nuvens de pontos;
- Comparar superfícies;
- Projetar mapas de cores identificando características de interesse do objeto;
- Visualizar resultados.

O desenvolvimento de programas e metodologia para calibração das câmeras e do projetor multimídia permitiram determinar os parâmetros de calibração com boa qualidade, pré-requisitos fundamentais para realizar medições e projeções de mapas indicativos de maneira confiável.

1.4 INOVAÇÕES E CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS

Este trabalho incorpora aspectos inovadores e contribuições acadêmicas, dentre eles:

- **Estruturação natural da nuvem de pontos.** Os algoritmos desenvolvidos estruturam e organizam intrinsecamente os pontos 3D em relação a um sistema de coordenadas de interesse, alterando o paradigma de estruturação orientada ao sensor. As medições passam a ser estruturadas de acordo com as necessidades da medição, com o foco no sistema de coordenadas definido por características da peça medida;
- **Algoritmo Zscan.** Algoritmo que se baseia na divisão da faixa de busca em n intervalos, melhorando a estimativa da coordenada Z a cada iteração.
- **Geometria epipolar.** Cada ponto 3D resultante da triangulação intrinsecamente respeita e se beneficia da redução do

esforço computacional proporcionada pelas propriedades da geometria epipolar da montagem do sistema;

- **Nuvem de pontos em grade pré-definida.** É possível definir previamente duas das coordenadas de cada ponto 3D do sistema de coordenadas global adotado e deixar o sistema calcular a terceira coordenada. Assim, é possível descrever a superfície medida a partir de uma grade regular com passo pré-definido. Por exemplo, se coordenadas cartesianas são usadas, a partir de duas coordenadas fixas escolhidas (e.g. X, Y) é realizada a busca ‘virtual’ da coordenada dependente (i.e. Z) numericamente, resultando em uma grade de pontos regular no plano XY ;

- **Extensão da grade regular.** Aquisições adicionais de nuvens de pontos para diferentes posições do sistema podem ser concatenadas em relação a uma mesma grade regular estendida;

- **Diferentes sistemas de coordenadas.** O resultado da medição pode ser calculado em relação a diferentes sistemas de coordenadas de forma estruturada como o cilíndrico ou o esférico, fixando duas coordenadas e realizando a busca na coordenada dependente, de forma semelhante ao realizado com o sistema de coordenadas cartesiano;

- **Flexibilidade na triangulação.** O cálculo da nuvem de pontos por triangulação é possível a partir da combinação de qualquer número de sensores, incluindo o próprio projetor emulando uma câmera;

- **Mapas de fase para triangulação de alvos.** Para determinar os alvos homólogos de modo robusto foram utilizados os dados do mapa de fase do entorno do alvo para remover ambigüidades resultantes das restrições epipolares.

- **Alinhamento e diferença entre superfícies:** A correspondência entre pontos de duas superfícies previamente conhecidas permite o cálculo do alinhamento e diferença entre estas diretamente.

- **Sinalização no objeto.** O projetor multimídia calibrado permite projetar sinais e mapas de cores sobre a superfície medida para sinalizar pontos ou regiões de interesse, considerando as distorções causadas na imagem projetada devido à perspectiva e forma do objeto;

1.5 ESTRUTURA

Este trabalho está estruturado nos seguintes capítulos:

1. **Introdução.** A contextualização, motivação, objetivos, resultados pretendidos e os aspectos inovadores da tese são apresentados e discutidos.

2. **Medição de superfícies livres.** Este capítulo apresenta uma descrição básica de superfícies livres e tipos de representação. A revisão bibliográfica das principais técnicas ópticas utilizadas na medição de superfícies livres é apresentada, focando em assuntos que mantêm relação com o sistema desenvolvido. Métodos de indicação dos defeitos em superfícies são apresentados, assim como técnicas de realidade aumentada.

3. **Sistema de medição.** A concepção, assim como os requisitos e funções do sistema são apresentados neste capítulo. As características metrológicas detalhadas, os conceitos matemáticos e a concepção mecânica básica do sistema precedem a discussão sobre a solução proposta.

4. **Validação experimental.** Este capítulo apresenta os principais ensaios realizados para a validação das técnicas e procedimentos utilizados e para o levantamento dos erros de medição. Uma discussão sobre os resultados apresentados finaliza o capítulo.

5. **Conclusões.** As principais conclusões, uma compilação dos resultados, propostas de trabalhos futuros e agradecimentos são apresentados.

Bibliografia.

Anexo A - Calibração de câmera e projetor. Descrição do modelo matemático utilizado para a calibração de câmeras e projetor de luz estruturada.

Anexo B - Correção do centro da elipse. Descrição do modelo matemático utilizado para o cálculo da correção do erro de excentricidade, ocasionado pela projeção de alvos circulares no plano imagem das câmeras, inclinado em relação ao plano definido pelo alvo.

Anexo C - Orientação absoluta. Descrição do modelo matemático utilizado para o cálculo da transformação (rotação e translação) entre dois sistemas de coordenadas em que diversos pontos estão referenciados. Este modelo é utilizado para determinar qual a transformação, em seis graus de liberdade, que o sistema de medição sofreu entre duas aquisições consecutivas.

Anexo D - Alinhamento refinado tipo *TrICP*. Descrição de um método de como pode ser realizado o alinhamento refinado entre duas nuvens de pontos parcialmente sobrepostas, com pontos espúrios e sem a correspondência entre pontos previamente conhecida. Serve para demonstrar os ganhos em relação aos algoritmos desenvolvidos.

Anexo E - Principais componentes do sistema. Principais especificações técnicas dos componentes utilizados na montagem do sistema, como câmeras, lentes e projetor de luz.

2 MEDIÇÃO ÓPTICA DE SUPERFÍCIES LIVRES

Este capítulo aborda temas ligados à definição e representação de superfícies livres, técnicas e sistemas para sua medição. Algumas maneiras de identificar pontos de interesse na peça são apresentados e ao final é apresentada uma descrição comparativa entre as técnicas abordadas.

2.1 SUPERFÍCIES LIVRES

Pás de turbinas hidráulicas são exemplos de superfícies livres que não podem ser representadas por equações matemáticas na forma implícita ou explícita, sendo normalmente de difícil descrição analítica [10]. A Figura 2.1 mostra pás de uma turbina hidráulica tipo Francis vista (a) pelo lado de entrada da água e (b) pelo lado de saída de água.

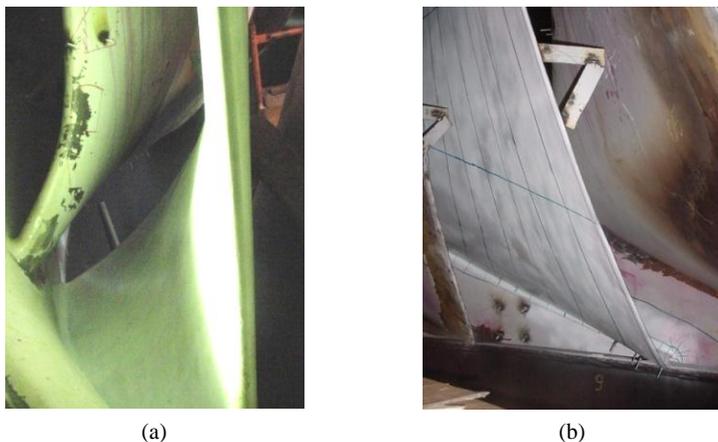


Figura 2-1 – Pá de turbina hidráulica Francis (a) entrada de água e (b) saída de água.

A medição desse tipo de objeto se dá normalmente por meio da medição de pontos tridimensionais sobre sua superfície, seja por processos ópticos ou por apalpação mecânica. O processo de reconstrução numérica de superfícies tem como ponto de partida uma nuvem de pontos amostrada da própria superfície real [13].

As formas de representação de superfícies reconstruídas podem ser categorizadas em [13]:

- Representação por nuvem de pontos: quanto maior o número de pontos, maior é a semelhança entre a representação e o objeto original.

- Representação por malhas: os pontos de representação podem ser ligados através de segmentos de retas ou curvas. Esta é a representação tipo *wireframe* (estrutura de arames), que pode fornecer múltiplas interpretações para uma visualização.

- Representação por segmentos de superfícies: a representação se dá de forma contínua, interpolando informação sobre todos os pontos superficiais, gerando uma representação não-ambigua.

- Representação por sólidos: possibilita a distinção das propriedades de dentro e fora do objeto, fornecendo uma visão volumétrica do mesmo.

A Figura 2.2 mostra as principais formas de representação de superfícies reconstruídas.

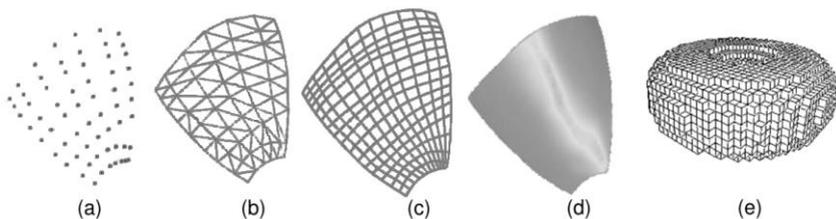


Figura 2-2 – Representação por (a) pontos, (b) retas, (c) curvas, (d) segmentos de superfícies e (e) sólidos [13].

Para fazer a reconstrução de um objeto, os pontos da amostragem devem estar ordenados logicamente, ou seja, ordenados de forma estruturada [12][13]. A Figura 2.3 mostra em (b) uma representação por amostragem do círculo em (a), em (c) a reconstrução com uma estruturação correta e em (d) a reconstrução com uma estruturação incorreta, que não representa o objeto original (círculo).

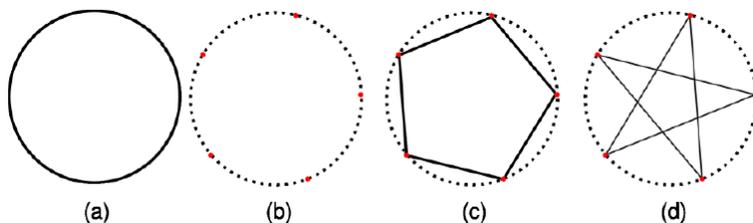


Figura 2-3 – Estruturação de conjunto de pontos – (a) objeto original, (b) amostragem pontual, (c) reconstrução ordenada e (d) reconstrução não ordenada [13].

As técnicas geométricas parametrizadas (representação por segmentos de superfícies), como Bezier, Spline e B-Spline, são as soluções mais adequadas para a modelagem de superfícies livres [10][12][13]. Neste caso, informações como os vetores tangentes, o vetor normal e as curvaturas, em qualquer local da superfície, podem ser obtidas [10]. Além disso, técnicas de suavização da representação matemática da superfície podem ser utilizadas [11].

Estas técnicas de modelagem permitem realizar a geração de trajetórias para o deslocamento de ferramentas por manipuladores na realização de tarefas automatizadas [10][12][13].

Uma maneira de estruturar os pontos para geração de superfícies Bezier pode ser visualizada na Figura 2.4. Cada ponto possui as coordenadas (X, Y, Z) no espaço cartesiano e são representados em termos dos indexadores de linhas e colunas de uma matriz. Cada coordenada c (X, Y ou Z) é representada numa matriz C_c .

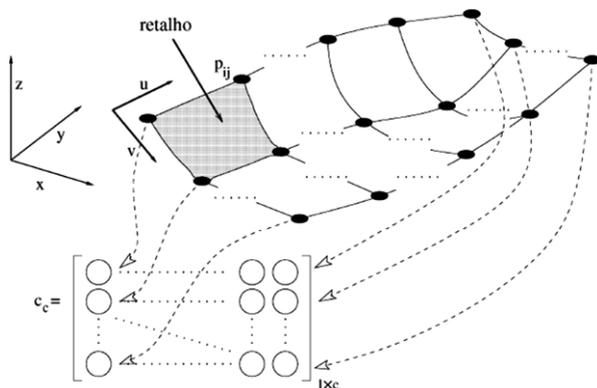


Figura 2-4 – Estrutura de dados de uma superfície Bezier [12].

2.2 TÉCNICAS ÓPTICAS DE MEDIÇÃO

Diversas técnicas ópticas podem ser utilizadas para a medição de superfícies livres, sendo que cada princípio tem suas próprias vantagens e limitações. Esta seção detalha técnicas e modelos matemáticos mais utilizados para medição da forma destes tipos de superfícies, com foco em técnicas e modelos relacionados à tese, sendo que grande parte dos conceitos aqui apresentados foram utilizados nos procedimentos e programas de computador desenvolvidos.

2.2.1 Fotogrametria

A fotogrametria consiste em métodos para aquisição e interpretação de imagens de modo a determinar a forma e localização de um objeto a partir de duas ou mais fotografias obtidas de ângulos distintos. A técnica converte as informações bidimensionais, contidas em imagens, em informações tridimensionais do objeto.

Para o cálculo de pontos tridimensionais, é utilizado o princípio de triangulação, onde as retas que ligam pontos no objeto às suas diversas projeções nas imagens são utilizadas, como pode ser visualizado na Figura 2.5. Estas retas são construídas a partir do modelo matemático de câmera *pinhole* [60][78].

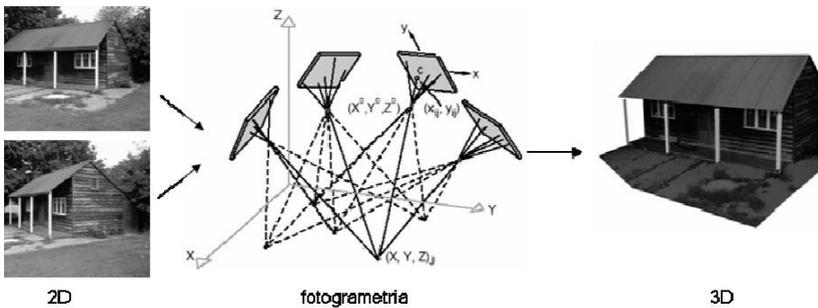


Figura 2-5 – Princípio de triangulação na fotogrametria [14].

A primeira descrição da *câmara obscura* (câmara escura), modelo básico das câmeras *pinhole*, aconteceu no século V pelo filósofo chinês Mo-Ti: raios de luz (retas) passando por um pequeno furo (*pinhole*) para dentro de uma sala escura criam uma imagem invertida do ambiente exterior [119]. Este princípio pode ser observado na Figura 2.6

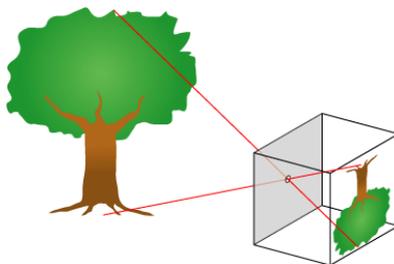


Figura 2-6 – Desenho esquemático de uma câmera obscura - pinhole.

As câmeras fotográficas modernas utilizam basicamente o mesmo conceito, com imagens sensivelmente melhores devido ao desenvolvimento de lentes de alta qualidade e mais recentemente pela tecnologia de imagem digital. O modelo matemático *pinhole* para câmeras é dominante em visão computacional para a reconstrução de cenas 3D baseadas na aquisição de imagens [119].

O modelo *pinhole* considera que a projeção de uma imagem em um anteparo, através de uma lente, pode ser descrita projetando-se pontos 3D em um plano, através de um ponto central denominado de centro de projeção ou pupila. Desta forma, tendo-se um ponto qualquer M no espaço 3D, sua representação m na imagem encontra-se onde a reta que une M ao centro de projeção C intercepta o plano imagem π [21][30][31], como pode ser visto na Figura 2.7.

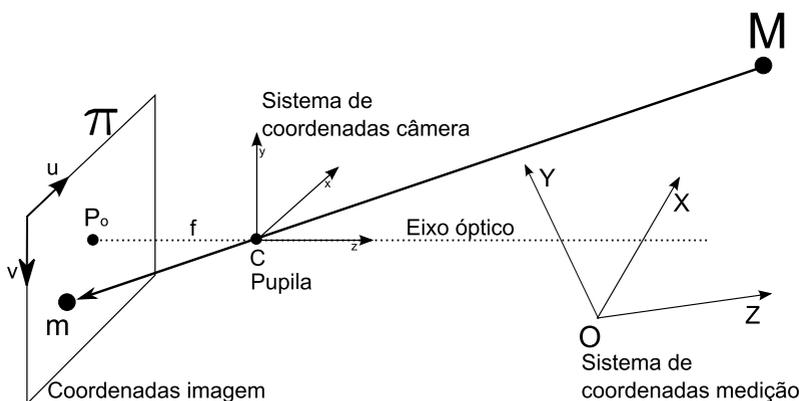


Figura 2-7 - Modelo de câmera pinhole.

A projeção $m = (x.w, y.w, w)^T$ de um ponto tridimensional qualquer $M = (X, Y, Z, 1)^T$ no plano π pode ser descrita pela equação [17][21][30][31][37]:

$$\mathbf{m} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{M} = \mathbf{A} \cdot [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \cdot \mathbf{M} \quad (1)$$

Sendo $\mathbf{P}_{3 \times 4}$ a matriz de projeção da câmera contendo a combinação de parâmetros extrínsecos (\mathbf{R} , \mathbf{t}) e de parâmetros intrínsecos (\mathbf{A}). A matriz \mathbf{R} e o vetor \mathbf{t} são respectivamente a rotação e a translação do sistema de coordenadas da câmera em relação ao sistema de coordenadas do sistema de medição e \mathbf{A} é descrita pela matriz:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

sendo (u_0, v_0) as coordenadas do ponto principal \mathbf{p}_0 , α e β os fatores de escala na imagem nos eixos u e v respectivamente e γ o erro de alinhamento angular entre os eixos u e v , normalmente assumido como sendo igual a zero [30][32]. O modelo *pinhole* apresentado não inclui as distorções introduzidas pelas imperfeições na fabricação das lentes, que podem ser bastante significativas e introduzirem erros nas medições que não devem ser subestimados [34][35][36][37][41].

Um modelo usual para a correção da distorção radial e tangencial (descentralização) é o mapeamento das coordenadas distorcidas (x_d, y_d) , que são captadas pelas câmeras, para as coordenadas corrigidas (x_c, y_c) , de acordo com as equações abaixo [35][36][37]:

$$x_c = x_d + \overline{x_d}(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6) + (p_1(r_d^2 + 2\overline{x_d}^2) + 2p_2 \overline{x_d} \overline{y_d}) \quad (3)$$

$$y_c = y_d + \overline{y_d}(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6) + (p_1(r_d^2 + 2\overline{y_d}^2) + 2p_2 \overline{x_d} \overline{y_d})$$

sendo: $\overline{x_d} = x_d - u_0$, $\overline{y_d} = y_d - v_0$, $r_d^2 = \overline{x_d}^2 + \overline{y_d}^2$ e k_1, k_2, k_3 são os coeficientes da distorção radial, p_1 e p_2 coeficientes da distorção tangencial e r_d é o raio do ponto na imagem em relação ponto principal $\mathbf{p}_0 = (u_0, v_0)$. Os coeficientes de distorção são também considerados parâmetros intrínsecos da câmera.

Ao tirar uma fotografia, a câmera está realizando o mapeamento de algo que está no espaço 3D para um espaço bidimensional [17][21]. Como parte da informação 3D da forma do objeto é perdida na formação da imagem, não é possível reconstruir o objeto a partir de uma única imagem, sem nenhuma informação adicional. Assim, são requeridas pelo menos duas imagens para a reconstrução 3D, sendo que imagens adicionais melhoram sensivelmente a qualidade da reconstrução [14][45][60][78].

A partir de uma estimativa inicial da posição dos pontos 3D do objeto, dos parâmetros extrínsecos e intrínsecos para cada posição da câmera, o resultado final das coordenadas 3D do objeto podem ser

calculado através de uma otimização simultânea destes dados, conhecida como *bundle adjustment* [41]. A estimativa inicial dos parâmetros pode ser calculada a partir de métodos de reconstrução aproximados [41], que podem ser encontrados em [24][60].

O nome *bundle adjustment* (ajuste de feixes) se refere às retas que partem de pontos do objeto e convergem para os centros das pupilas em cada posição das câmeras, que são ajustadas simultaneamente através da solução de um problema de otimização, buscando a minimização de uma função erro [21][41].

No *bundle adjustment*, j pontos 3D M_j são captados por diferentes posições i da câmera com matrizes P_i . Cada ponto M_j pode ser projetado para $m_{ij} = P_i M_j$, m_{ij} sendo as coordenadas da imagem do j -ésimo ponto tridimensional na i -ésima imagem. As estimativas ótimas das matrizes de projeção P_i e das coordenadas 3D M_j são encontradas quando a soma dos quadrados dos erros de reprojeção for mínima, determinada pela seguinte equação [41][50]:

$$\min_{P_i, M_j} \sum_i \sum_j d(P_i, M, m_{ij})^2 \quad (4)$$

sendo $d(a,b)$ a distância euclidiana entre a e b .

Este é um problema de minimização não-linear que provê uma estimativa ótima para a estrutura 3D e parâmetros das câmeras, e pode ser solucionado pelo método de Levenberg-Marquardt [41][42][50]. Detalhes de como programar este algoritmo para este tipo de aplicação podem ser encontrados em [40][41][42][43][44].

Existem variações na formulação do *bundle adjustment*, onde é possível incluir, por exemplo, a calibração simultânea da câmera incluindo parâmetros de distorção (auto-calibração), ou então, apenas o refinamento das coordenadas dos pontos 3D e a utilização de pontos de controle para realizar a medição em escala [8][41][42][43][50].

Na prática, são tiradas diversas fotografias, com variadas posições e rotações da câmera, com elevado grau de convergência, cobertura e redundância em relação ao objeto e com padrões de comprimento na mesma cena, para realizar a medição em escala e com auto-calibração da câmera [14][45][46][47][78]. A Figura 2.8 mostra uma configuração ideal para as medições fotogramétricas, onde as imagens são obtidas de diferentes alturas formando um mosaico de forma esférica ao redor do objeto [46][47].

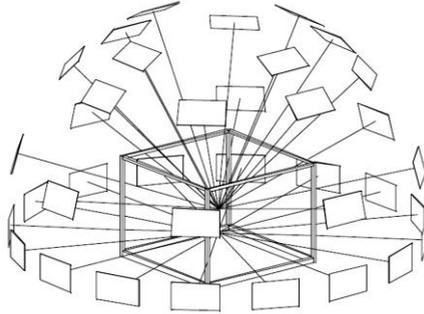


Figura 2-8 – Configuração ótima para medição fotogramétrica [46].

Para a determinação dos pontos de medição nas imagens sem ambigüidades, são utilizados alvos codificados e não codificados, estrategicamente colocados sobre a peça [14][45][78]. Uma peça preparada para a medição fotogramétrica pode ser visualizada na Figura 2.9.

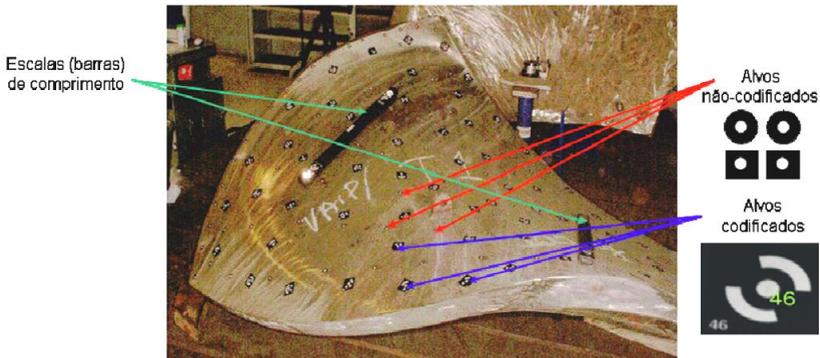


Figura 2-9 – Objeto preparado para a medição fotogramétrica [14].

Os melhores resultados são obtidos com alvos circulares [75][77] e seus centros nas imagens devem ser determinados para realizar a triangulação. O centróide quadrático em níveis de cinza pode ser utilizado através das seguintes equações [69]:

$$i_c = \frac{\sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^k I(i, j)^2 \cdot i}{\sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^k I(i, j)^2} \quad j_c = \frac{\sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^k I(i, j)^2 \cdot j}{\sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^k I(i, j)^2} \quad (5)$$

sendo (i_c, j_c) as coordenadas do centro do alvo na imagem, $I(i, j)$ a intensidade do pixel i, j e (k, s) o tamanho das janelas de análise.

2.2.2 Visão estéreo

Visão estéreo é um metodo para a reconstrução tridimensional de uma cena, a partir de pontos correspondentes por triangulação, onde são utilizadas apenas duas imagens, podendo ser considerada um caso particular da fotogrametria [23].

A percepção de tridimensionalidade para os seres humanos vem da observação do ambiente de pontos de vista ligeiramente distintos, um para cada olho. A visão estéreo, também denominada de estéreo-fotogrametria ou estereoscopia, se baseia neste mesmo principio, uma vez que duas câmeras digitais “observam” o objeto de interesse de pontos de vista distintos [17].

Uma construção típica de um sistema estereoscópico utiliza duas câmeras montadas em uma estrutura rígida, que visualizam simultaneamente a região de interesse. Neste caso, os parâmetros de calibração e a posição relativa entre as câmeras não são alterados durante a medição, possibilitando realizar a calibração como uma etapa preliminar à medição [18][50]. Um sistema de visão estéreo pode ser visualizado na Figura 2.10.



Figura 2-10 – Sistema de visão estéreo [51].

A calibração preliminar pode ser realizada através de padrões especialmente desenhados e com múltiplas aquisições, o que cria redundância e reduz a incerteza da calibração. Se a calibração for realizada simultaneamente em conjunto com a medição (auto-calibração) nem sempre são obtidos resultados confiáveis devido ao numero reduzido de imagens (duas) quando comparado com auto-calibração realizada na fotogrametria convencional (dezenas) [18].

Uma técnica de calibração de câmeras, que pode ser utilizada para sistemas de visão estéreo pode ser encontrada no **Anexo A**, onde são descritos o procedimento de calibração e os modelos matemáticos utilizados.

Para realizar a triangulação e determinar a posição tridimensional de um ponto, é preciso primeiro determinar sua posição correspondente em cada uma das duas imagens. A geometria epipolar descreve a relação geométrica entre duas imagens independente da cena observada, dependendo apenas dos parâmetros de calibração, e pode ser utilizada para facilitar a determinação dos pontos correspondentes, ou pontos homólogos, nas imagens [21].

Em uma das restrições imposta pela geometria epipolar, um ponto 3D que se projeta sobre um ponto m em uma imagem, deve se encontrar sobre a linha epipolar na outra imagem [18][19][21], como pode ser visualizado na Figura 2.11. Com isto, a busca de um ponto homólogo se restringe apenas sobre uma reta.

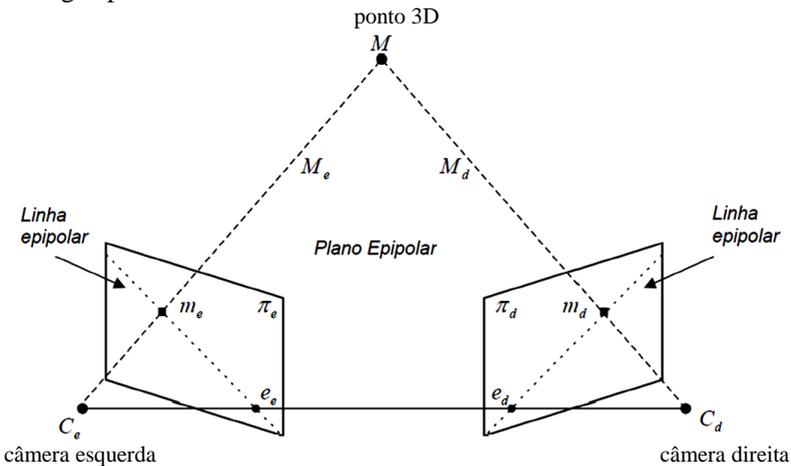


Figura 2-11 – Restrições epipolares no sistema de visão estéreo [18].

A partir do modelo *pinhole* e seus dados de calibração levantados previamente, e de posições nas imagens que correspondem ao mesmo ponto no objeto é possível, para cada imagem, determinar a reta no espaço que contém este ponto. Através da interseção destas retas é determinada a posição do ponto M no espaço pelo processo de triangulação.

Devido aos erros presentes pode ser que as retas não se cruzem, podendo então ser utilizado o ponto médio do segmento com menor

comprimento que liga as duas retas. Existem métodos lineares e não lineares para estimar a posição do ponto 3D. Detalhes e pseudocódigos podem ser encontrados em [17][19][21][23]. Uma comparação de diversas técnicas de triangulação pode ser encontrada em [22].

Um método linear que pode ser utilizado é combinar as equações $\mathbf{m}_e = \mathbf{P}_e \mathbf{M}$ e $\mathbf{m}_d = \mathbf{P}_d \mathbf{M}$ na forma quatro equações lineares em \mathbf{M} que podem ser escritas como $\mathbf{B} \cdot \mathbf{M} = \mathbf{0}$, que é uma equação linear em \mathbf{M} , sendo \mathbf{B} uma matriz 4x4 convenientemente construída. Desta maneira, o ponto \mathbf{M} estimado não satisfaz exatamente as restrições epipolares e não é uma estimativa ótima [21].

A partir da estimativa inicial linear pode ser utilizado um método não-linear, cujo objetivo é estimar um ponto \mathbf{M}' que satisfaz exatamente as restrições epipolares $\mathbf{m}_e' = \mathbf{P}_e \mathbf{M}'$ e $\mathbf{m}_d' = \mathbf{P}_d \mathbf{M}'$. A partir dos pontos medidos \mathbf{m}_e e \mathbf{m}_d são determinados os pontos \mathbf{m}_e' e \mathbf{m}_d' que minimizam a seguinte função, respeitando as restrições epipolares:

$$C(\mathbf{m}_e, \mathbf{m}_d) = d(\mathbf{m}_e, \mathbf{m}_e')^2 + d(\mathbf{m}_d, \mathbf{m}_d')^2 \quad (6)$$

sendo d a distância euclidiana entre os pontos. Isto é equivalente a minimizar o erro de reprojeção do ponto \mathbf{M}' que é mapeado para o ponto \mathbf{m}_e' e o \mathbf{m}_d' , resultando em uma solução ótima [23].

Na Figura 2.12 podem ser observados os princípios dos dois métodos de triangulação, o linear com ponto médio e o da correção ótima, citados acima.

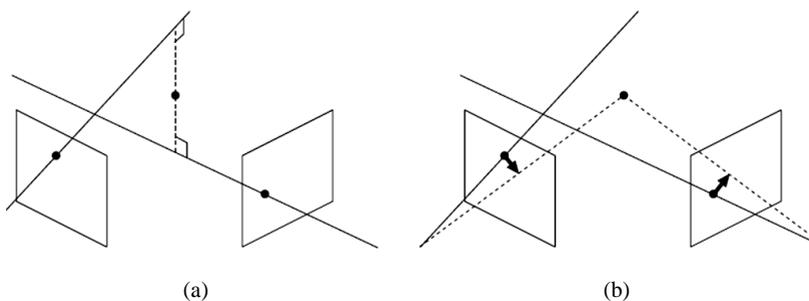


Figura 2-12 – Triangulação: (a) ponto médio, (b) correção ótima [23].

Assumindo uma distribuição de erros gaussianas, os pontos \mathbf{m}_e' e \mathbf{m}_d' são estimativas ótimas dos pontos reais medidos. A função custo (6) pode ser minimizada utilizando o método Levenberg-Marquardt [21].

Conhecendo-se vários pontos homólogos (PH) nas imagens adquiridas, é possível realizar o procedimento de triangulação para cada

um dos PH e assim criar uma nuvem de pontos 3D referentes à geometria da cena fotografada [17].

Para a determinação de pontos homólogos, sem a ajuda de outros sistemas ou marcas especiais, a cena deve conter formas discretas individualizadas, como cenas com grande quantidade de diversidade de objetos, como ruas, construções, peças com bordas salientes, e que não formem uma textura homogênea [48]. É comum, nestes casos a utilização de dois passos para a determinação dos pontos homólogos: primeiro a detecção de pontos notáveis nas imagens, por exemplo, com o *Harris corner detector* (detalhes em [48]) e posteriormente determinando os pontos homólogos através de métodos simples de correlação (detalhes em [49]) [50].

Para a medição de peças que possuem textura contínua marcas especiais, como alvos circulares ou sistemas auxiliares para projeção de luz estruturada, podem ser utilizados.

No caso de alvos circulares, a sua projeção em perspectiva na imagem é de forma aproximadamente elíptica, já que este tipo de transformação não preserva sua forma. O centróide, ou o centro geométrico da elipse na imagem, pode ser utilizado para a triangulação, mas este centro não é o mesmo do que o centro do círculo projetado no plano imagem, se este não for paralelo ao plano do alvo. A Figura 2.13 mostra um círculo projetado no plano imagem como uma elipse, acarretando em um erro de excentricidade. Uma alternativa ao uso do centróide é o ajuste de uma elipse a partir da detecção dos pontos da borda do alvo [37][70][71].

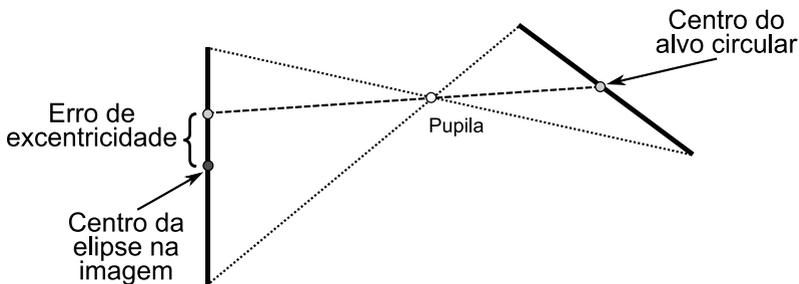


Figura 2-13 – Círculo projetado na imagem como elipse gera erro de excentricidade.

O efeito conhecido como erro de excentricidade gera erros sistemáticos na triangulação se não corrigido [75][77]. O problema do erro de excentricidade, sua formulação e a ambigüidade no valor de sua correção é abordado no **Anexo B**.

2.2.3 Topogrametria

Uma técnica muito utilizada atualmente para medir superfícies, com grande densidade de pontos e de maneira rápida e automatizada, é a topogrametria. Esta técnica resulta da combinação das técnicas de topometria, onde formas espaciais são medidas pela projeção oblíqua de franjas, e a técnica de estereoscopia – onde imagens de duas câmaras são combinadas para, por triangulação, determinar as coordenadas 3D dos pontos observados [16]. É, algumas vezes, denominada de *Fotogrametria Ativa*.

A Figura 2.14 mostra o esquema básico do sistema, que consiste em duas câmaras que observam o objeto de interesse de pontos de vista diferentes e um projetor multimídia que projeta luz estruturada para auxiliar a determinação de pontos homólogos, possibilitando determinar as coordenadas de centenas de milhares de pontos em poucos segundos [19].

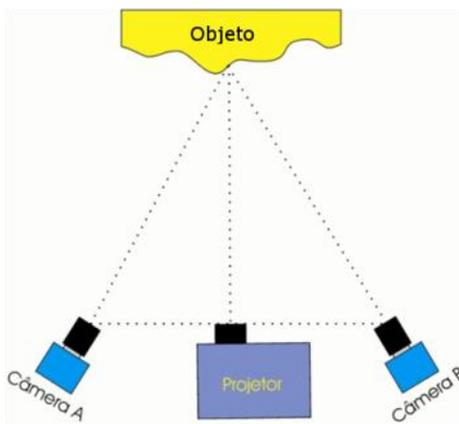


Figura 2-14–Esquema da topogrametria [17].

A projeção de luz estruturada permite realizar a medição da superfície com grande densidade de pontos, pois possibilita a criação bastante eficaz de uma assinatura para identificação de pontos homólogos, através da projeção e aquisição de seqüências de franjas senoidais com subsequente deslocamento de fase. Este método possibilita a geração de um código único para cada ponto da peça. Como a fase varia apenas em uma das direções (vertical ou horizontal), é necessário projetar franjas horizontais e verticais ou com apenas uma das direções, utilizar restrições da geometria epipolar para determinar corretamente os pontos homólogos [17].

A partir do sinal captado nas imagens da seqüência de franjas defasadas projetadas é possível calcular o módulo 2π de um mapa de fases das franjas. Entretanto, o valor de fase obtido conterá ‘saltos de fase’ devido à ambigüidade de fase (Φ) a cada 2π , que tem que ser resolvido por algoritmos especializados. O deslocamento de fase pode ser realizado com diferentes números de passos. A equação seguinte calcula o módulo 2π da fase para uma seqüência de n franjas com deslocamentos de fase relativos de $2\pi/n$, sendo $n > 2$ [80]:

$$\Phi(u, v) = \tan^{-1} \left(\frac{-\sum_{i=1}^n I_i(u, v) \sin\left(\frac{2\pi}{n} i\right)}{\sum_{i=1}^n I_i(u, v) \cos\left(\frac{2\pi}{n} i\right)} \right) \quad (7)$$

sendo $\Phi(u, v)$ o módulo 2π da fase e $I_i(u, v)$ a intensidade do pixel (u, v) na imagem do i -ésimo passo da franja projetada, considerando o incremento em fase de passo ($n > 2$) constante = $2\pi/n$.

A Figura 2.15 mostra o perfil luminoso ideal de uma franja senoidal projetada e os gráficos de intensidade e do módulo 2π da fase ao longo de uma linha horizontal da imagem, para a projeção de franjas verticais.

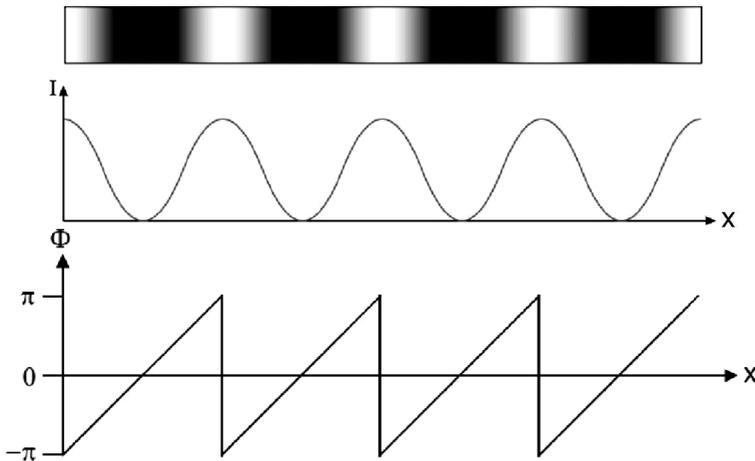


Figura 2-15 – Franja senoidal e gráficos de intensidade e módulo 2π fase [17][80].

Para associar um valor único de fase a cada pixel, é preciso remover os saltos de fase (*phase unwrapping*). A técnica mais robusta é associar à projeção das franjas a projeção de uma segunda seqüência de

imagens binárias denominada ‘*Graycode*’ que identifica a ordem de franja ζ sem ambigüidades, possibilitando remover os saltos, e que não depende de informação dos pixels vizinhos como em outras técnicas [80][81]. A Figura 2.16 mostra o esquema do código *Graycode* e um exemplo de projeção sobre uma peça.

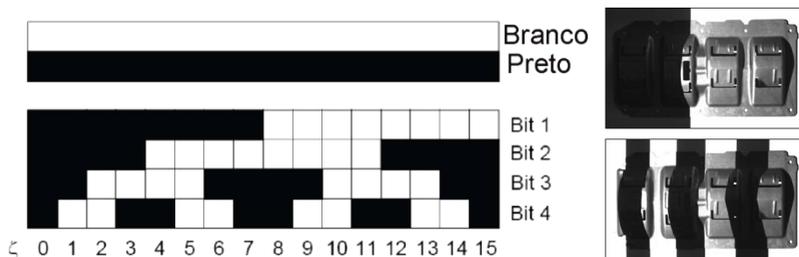


Figura 2-16 – Codificação *Graycode* e exemplo de projeção [80].

A técnica de remoção de salto de fase utilizando *Graycode*, apresentada em [80], utiliza um *bit* a mais (uma imagem a mais projetada) do que o mínimo teoricamente necessário, que, devidamente utilizado, minimiza erros de decodificação nas zonas de transição da ordem de franja.

A partir da projeção *Graycode* de códigos com uma largura equivalente a meio período da senóide projetada, determina-se a ordem de franja inteira de cada ponto e a remoção do salto de fase é realizada considerando o valor do módulo 2π da fase de cada pixel. É possível calcular a fase absoluta (Φ_A) de forma robusta a partir das equações abaixo [80]:

$$\begin{aligned} \Phi_A &= \Phi + 2\pi(\lfloor \zeta + 1 \rfloor / 2) + \pi & \text{se} & \quad \Phi \leq -\pi/2 & (8) \\ \Phi_A &= \Phi + 2\pi(\lfloor \zeta / 2 \rfloor) + \pi & \text{se} & \quad -\pi/2 < \Phi < +\pi/2 \\ \Phi_A &= \Phi + 2\pi(\lfloor (\zeta + 1) / 2 \rfloor - 1) + \pi & \text{se} & \quad \Phi \geq \pi/2 \end{aligned}$$

sendo Φ_A a fase absoluta, Φ a fase relativa e ζ a ordem de franja.

A partir dos mapas de fase absoluta para ambas as câmeras torna-se mais fácil, rápido e preciso determinar os pontos homólogos.

Uma maneira de determinar os pontos homólogos é ler o valor das fases vertical e horizontal em um pixel em uma das câmeras e procurar os mesmos valores de fase na imagem da outra câmera. Mais detalhes de como realizar esta busca com resolução sub-pixel pode ser encontrada em [16]. Este método, que utiliza mapas de fase verticais e horizontais, resulta em uma nuvem de pontos irregular em relação ao sistema de coordenadas da medição, com densidade variável, com passo

de difícil controle pelo usuário, além de elevado custo computacional [19].

Uma maneira mais eficiente de determinar os pontos homólogos é utilizar apenas uma das direções dos mapas de fase absoluta (na direção de maior sensibilidade) em conjunto com as restrições epipolares do sistema, onde para um valor de fase em uma das câmeras, é procurado este mesmo valor ao longo da linha epipolar na outra imagem [60].

Variações do princípio topográfico de medição incluem o perfilômetro de mapas de fase, onde para cada pixel da câmera é ajustado um polinômio, que correlaciona o valor de fase à posição de um plano de calibração que se desloca de maneira conhecida. Posteriormente o mesmo polinômio é utilizado para determinar a posição 3D de um ponto observado com determinado valor de fase no pixel da câmera, resultando numa malha de pontos irregular no sistema de coordenadas da peça [61][62][63].

Outra variação é a utilização do projetor calibrado como uma câmera invertida do ponto de vista da óptica geométrica. Neste caso os pontos homólogos são determinados a partir do mapa de fase adquirido pela câmera e o mapa de fase teórico projetado. A triangulação é realizada de maneira semelhante à triangulação com duas câmeras [30]. A descrição da calibração de um projetor está no **Anexo A**.

Uma técnica, que pode resultar em uma malha regular de pontos em relação ao sistema de coordenadas da medição, utiliza a projeção oblíqua de franjas estáticas sobre um objeto com movimento em direção definida com velocidade constante. Diversos sensores lineares (ex. três) com lentes telecêntricas adquirem de maneira sincronizada as franjas distorcidas pela forma do objeto, permitindo o cálculo de fase [64]. Devido à configuração mecânica e óptica do sistema, o resultado da medição de pontos sobre a superfície pode ser representado numa malha regular no plano XY, como mostra a Figura 2.17.

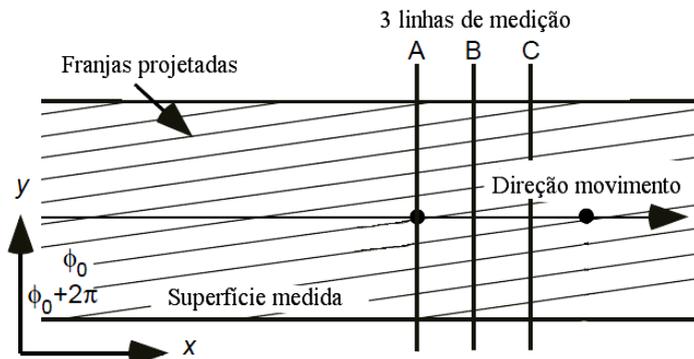


Figura 2-17 – Relação entre o movimento do objeto e as linhas de medição resulta em uma malha regular no plano XY (adaptado de [64]).

Para a medição de grandes peças, onde diversos posicionamentos do sistema topográfico podem ser necessários, alguns princípios podem ser utilizados para concatenar as diferentes medições [65]:

- Realizar o movimento relativo de forma conhecida entre o objeto e o sensor, onde geralmente é necessária a utilização de sistemas de movimentação precisos e robustos, além de estratégias e artefatos de calibração [5][67].
- Fasogrametria (de *phasogrammetry* - *phase value based photogrammetry*), onde são projetadas e adquiridas franjas sobre a peça de diferentes posições, enquanto outras câmeras (chamadas câmeras de calibração) permanecem estacionárias em relação ao objeto. Isto permite o cálculo simultâneo de coordenadas 3D sobre a peça e parâmetros de orientação do sistema usando apenas valores de fase, sem a necessidade de marcas sobre a peça [65].
- Utilizar a fotogrametria para a medição de poucos alvos sobre a peça e posicionar o sistema topográfico para medir trechos da superfície com grande densidade de pontos e, concomitantemente, as coordenadas destes alvos. Com estes dados, a nuvem de pontos densa para cada posicionamento pode ser transformada para o sistema de coordenadas global da medição [60][66].
- Junção de diversas medições usando métodos matemáticos de alinhamento e concatenação. *Iterative Closest Point* (ICP) é o método mais comum empregado para minimizar a diferença entre duas superfícies, realizando iterativamente a busca dos pares de pontos mais próximos e a transformação (translação e rotação) entre os conjuntos de pontos. Este tipo de algoritmo é geralmente utilizado a partir de um

alinhamento inicial que busque garantir a convergência para um mínimo global no alinhamento iterativo refinado [94].

Uma maneira de realizar a concatenação de nuvens de pontos é utilizar dados da fotogrametria para o alinhamento inicial e se necessário realizar o alinhamento refinado posteriormente [66][86], pelo método ICP ou uma de suas variantes [90][91][92][93][94].

Um exemplo de concatenação pode ser visto na Figura 2.18 onde em (a) alvos medidos por fotogrametria são utilizados para em (b) concatenar distintas nuvens de pontos.

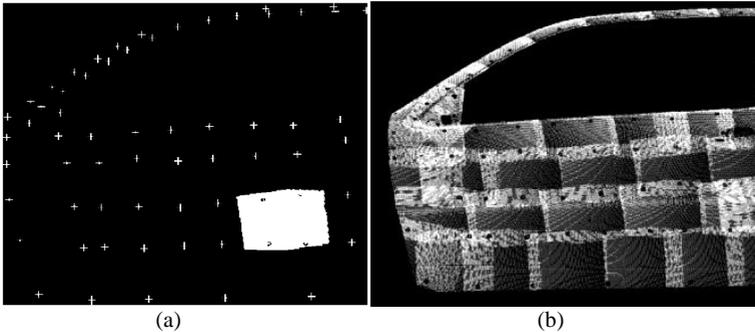


Figura 2-18 – (a) Alvos medidos por fotogrametria possibilitam (b) concatenar distintas nuvens de pontos [66].

O método TrICP (*Trimmed ICP*), uma variante do ICP, pode ser utilizado para realizar o alinhamento refinado e o cálculo das diferenças entre superfícies descritas por nuvens de pontos tridimensionais, aproximadamente alinhadas, parcialmente sobrepostas e com a presença de ruído e pontos espúrios [90]. Este método é detalhado no **Anexo D**.

2.2.4 Perfilômetro *laser* auto-referenciado.

O perfilômetro *laser* auto-referenciado pode utilizar a fusão de dois princípios em um único sistema portátil, a visão estéreo (triangulação passiva) associada à triangulação *laser* (ativa). O auto-referenciamento é associado à não utilização de sistemas externos auxiliares para o referenciamento global das medições, permitindo sua utilização com a flexibilidade da movimentação manual [98][100].

A visão estéreo é utilizada para determinar a postura do sensor em relação à peça de interesse e a triangulação *laser* realiza a medição da superfície com a projeção de linhas *laser* sobre esta. A informação da postura do sensor é utilizada para realizar a concatenação dos dados medidos em diferentes posições sobre a superfície, em um único sistema

de coordenadas. A Figura 2.19 mostra um sistema onde é possível identificar as duas câmeras e o emissor *laser*, abaixo.



Figura 2-19 – Sistema de medição por fusão de triangulação passiva e ativa [25].

Diversos métodos, como automovimento (*ego-motion*) ou *visual odometry*, podem ser utilizados para o sistema se auto-localizar [26][27][28][86][100]. O método *ego-motion* pode ser baseado no deslocamento dos alvos observados entre imagens sucessivas adquiridas por cada câmera. A visão estéreo permite o cálculo das coordenadas 3D dos alvos em uma única aquisição (*e.g.* como descrito na seção 2.2.2), e o deslocamento dos alvos entre aquisições de uma mesma câmera é utilizado para calcular o deslocamento entre uma aquisição e outra [26][27]. Outra abordagem inclui também a fusão de dados de outros sensores, como o inercial, que capta a movimentação do sistema em seis graus de liberdade [100].

Também é possível realizar a auto-localização do sistema apenas com a medição estéreo das coordenadas 3D de marcas sobre a peça. Estas marcas ou alvos devem estar espalhados sobre a peça e pelo menos três devem estar visíveis entre aquisições sucessivas [98][99].

Durante a medição, uma lista das coordenadas 3D das marcas já adquiridas é mantida em relação a um sistema de coordenadas global. A posição das marcas medidas na última aquisição são comparadas com as marcas da lista de modo a formar pares correspondentes (*matching*), que representem os mesmos pontos físicos medidos em sistemas de coordenadas diferentes, global e do sistema.

A correspondência entre os pontos permite o cálculo da transformação do sistema de coordenadas atual do sensor para o global da lista. Uma maneira de calcular a transformação entre pontos expressos em relação a dois sistemas de coordenadas distintos com presença de ruído é detalhada no **Anexo C**.

A busca de pontos correspondentes pode ser realizada através da comparação da distância Euclidiana entre os pontos dos possíveis triângulos formados para cada conjunto, já que pelo menos três pontos são necessários para o cálculo da transformação. É então realizada a busca dos três pares de pontos correspondentes entre os dois conjuntos em que a soma das diferenças das distâncias entre os pares seja mínimo. Esta abordagem é conhecida como busca exaustiva, pois realiza a comparação com todas as combinações de triângulos possíveis [98].

Uma abordagem que busca formar uma quantidade menor de triângulos a comparar, se baseia na formação de malhas tetraedrais a partir dos pontos, onde os triângulos internos são eliminados. A formação das malhas é baseada em técnicas de triangularização *Delaunay* tridimensional (*Delaunay tetrahedrisation*) onde nas malhas nenhum tetraedro formado intercepta outro, podendo ter facetas em comum. A comparação das distâncias entre os pontos candidatos, formados pelos triângulos remanescentes, ocorre como na busca exaustiva [99].

Outra abordagem busca formar triângulos a partir da triangularização *Delaunay* bidimensional, que forma uma rede de triângulos 2D onde os círculos inscritos de cada triângulo estão vazios, sem outros pontos ou arestas de outros triângulos. Esta rede é formada com a projeção dos pontos 3D no plano XY. Neste caso, na comparação são usados apenas os triângulos internos, que compartilham arestas com outros triângulos, e que possuem o raio do círculo inscrito de tamanhos equivalentes. A partir destes pré-requisitos, os lados dos triângulos remanescentes são comparados de maneira semelhante às outras abordagens [101].

A Figura 2.20 mostra um exemplo de formação de triângulos em (a) malha tetraedral *Delaunay* tridimensional e (b) triangularização *Delaunay* 2D e respectivos círculos inscritos.

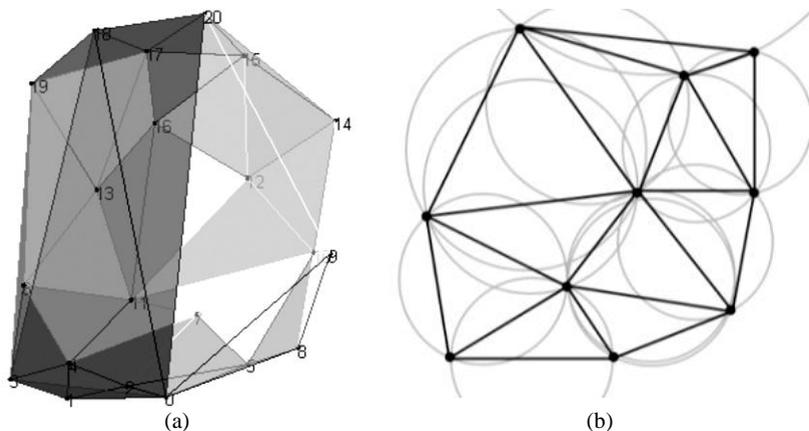


Figura 2-20 – Formação de triângulos candidatos por (a) malha tetraedral [99] e (b) triangularização *Delaunay* e respectivos círculos inscritos [102].

As três maneiras apresentadas para determinar pontos correspondentes possuem em comum a utilização de uma grandeza de comparação invariante a respeito do ponto de observação, a distância entre pontos nos dois sistemas de coordenadas, global e do sensor. Esta correspondência permite o cálculo da transformação entre os sistemas de coordenadas.

A transformação é então verificada através da transformação dos pontos da última aquisição e comparação com os pontos utilizados na lista, e se considerada válida, pode então ser utilizada para adicionar novas marcas na lista e concatenar os pontos medidos sobre a superfície pela triangulação laser para o sistema de coordenadas global [98][99][101].

O cálculo de pontos sobre a superfície, realizado pela triangulação ativa, se baseia no deslocamento da posição da iluminação estruturada *laser* captada pelas câmeras [5][10]. A iluminação laser geralmente é na forma de um ponto, uma linha, múltiplas linhas paralelas ou um par de linhas concorrentes [10][94][98].

A Figura 2.21 mostra uma aquisição estéreo, onde é possível observar as linhas *laser* concorrentes para medição de pontos na superfície e marcas circulares para auto-localização.

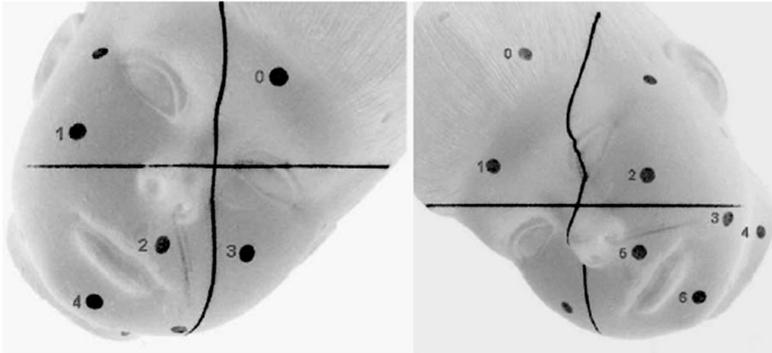


Figura 2-21 – Imagens adquiridas por um perfilômetro auto-referenciado [99].

O princípio básico da triangulação ativa pode ser descrita com a projeção de um ponto laser, onde para diferentes posições do objeto, o feixe *laser* incidido neste é observado em posições distintas no detector (e.g. CCD de uma câmera), como ilustra a Figura 2.22.

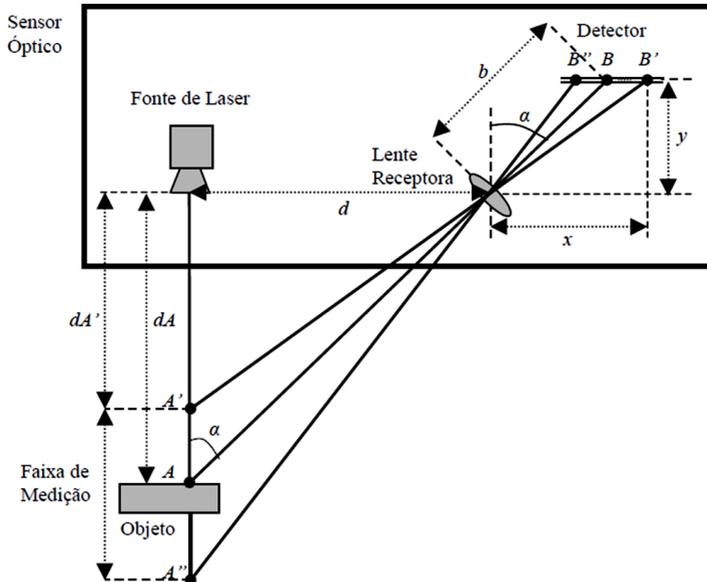


Figura 2-22 – Princípio utilizado pela triangulação ativa [10].

Assim, através da equação (9), é possível determinar a posição da superfície medida em relação ao sistema [5][10]:

$$dA' = \frac{b \cdot d \cdot \cos \alpha}{\overline{BB'} + b \cdot \sin \alpha} \quad (9)$$

sendo dA' a distância do objeto à fonte laser, b a distância entre a lente e a imagem e d a distância entre o emissor laser e a lente, $\overline{BB'}$ o deslocamento do ponto visualizado na câmera e α o ângulo de triangulação.

Através da fusão dos dados extraídos dos sensores de triangulação ativa e passiva, é possível reconstruir a forma da superfície de interesse. A Figura 2.23 mostra um sistema medindo a superfície interna de um carro e o resultado da digitalização desta superfície.

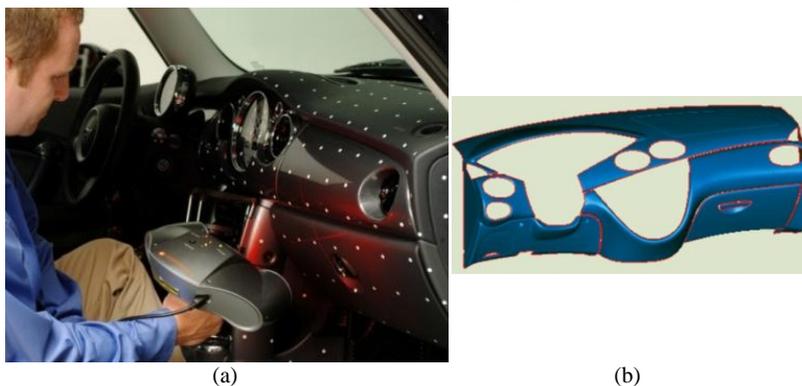


Figura 2-23 – Sistema (a) medindo peça e (b) resultado da digitalização [29].

2.3 IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE INTERESSE

Grande parte das medições de forma de superfícies tem como objetivo realizar o controle geométrico destas, indicando as partes que estão fora ou dentro das especificações geométricas de projeto. Se a identificação destas partes for utilizada para correção ou alteração do perfil, torna-se importante a identificação de forma precisa destes pontos na peça.

Uma maneira de identificar os defeitos sobre a superfície da peça é a utilização de gabaritos, ou ‘chapelonas’. A Figura 2.24 mostra um gabarito sendo utilizado para verificar a forma de um isolador elétrico. Este tipo de gabarito indica, de maneira relativamente grosseira, se a forma da peça esta dentro das especificações, uma vez que depende da observação e experiência do operador e não existem referências confiáveis para o apoio do gabarito na peça. As folgas e os pontos de apoio entre a peça e o gabarito podem identificar os desvios.



Figura 2-24 – Chapelona para verificação de forma em isolar elétrico.

Em superfícies rasqueteadas, uma maneira de realizar o controle geométrico das superfícies é através de mesas, régua e cilindros de controle. As mesas de controle são fabricadas em tamanhos padronizados e utilizadas para verificar os pontos de apoio das superfícies planas rasqueteadas. A verificação é efetuada passando-se tinta na superfície da mesa de controle e a peça é apoiada sobre ela. As marcas de tinta que ficam na superfície da mesa indicam pontos de apoio que deverão ser rasqueteados, dependendo do grau de acabamento que se deseja obter.

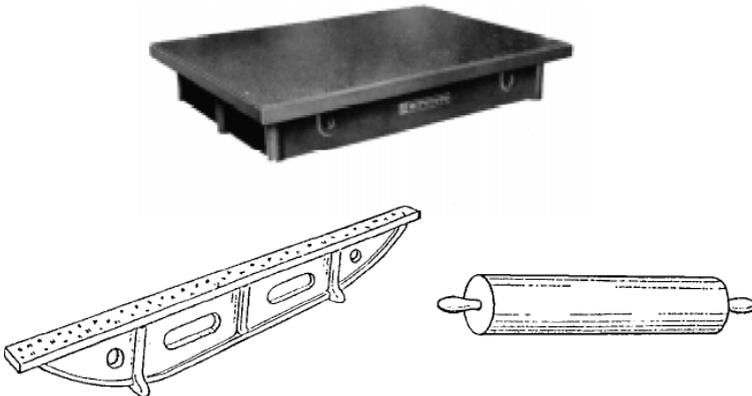


Figura 2-25 – Mesa, régua e cilindro de controle.

Com a evolução de tecnologias de CAD e sistemas de medição, a identificação de partes que estão fora ou dentro das especificações de projeto ficou bem mais detalhada e exata. Algoritmos realizam a

comparação entre superfícies medidas e seu projeto CAD de forma a mostrar através de imagens as diferenças. Relatórios contendo descrição detalhada são realizados com relativa facilidade e rapidez.

A Figura 2.26 mostra o resultado da análise de uma peça medida onde uma escala de cor identifica a posição e o nível de intensidade da diferença entre o projeto CAD e a medição da peça produzida.

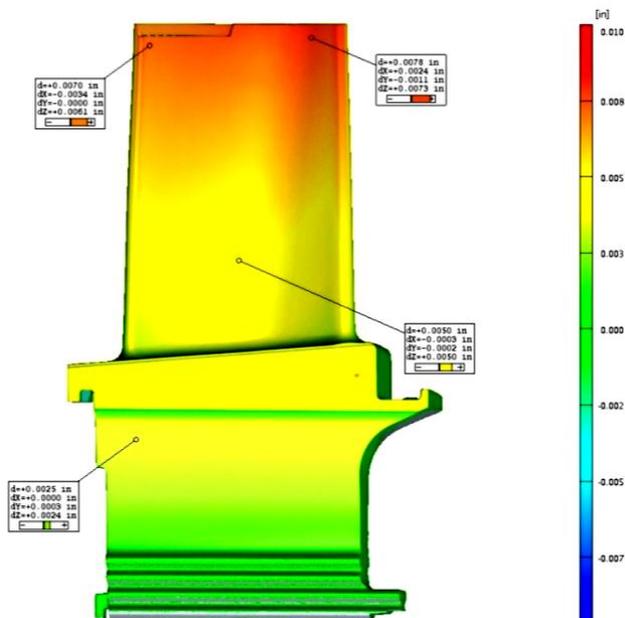


Figura 2-26 –Posição e intensidade de desvio entre projeto e peça indicado pela cor [9].

Mesmo com um relatório tão detalhado fica difícil identificar na própria peça o local e a intensidade do defeito para realizar a correção de forma precisa, principalmente se esta for realizada de forma manual.

Em sistemas de medição que utilizam pelo menos um projetor e uma câmera, é possível realizar a adaptação da fase projetada e identificação de diferenças entre uma medição inicial e a medição de um novo estado do objeto. A geração de um padrão invertido, neste caso, do ponto de vista do projetor, permite identificar estas diferenças sobre a própria peça, em uma técnica de realidade aumentada [103][104].

A idéia por trás da projeção invertida está em colocar a informação da medição inicial na projeção das franjas, assim uma única projeção adaptada permite medir pequenas variações de forma da

superfície. Para a geração da projeção invertida não é necessário modelar todo o processo de formação das imagens, mas apenas mapear a transformação geométrica e de intensidade entre o projetor e a câmera, onde o pixel (l,m) do projetor ilumina um ponto no objeto que é observado pelo pixel (i,j) da câmera [103], como mostra a Figura 2.27.

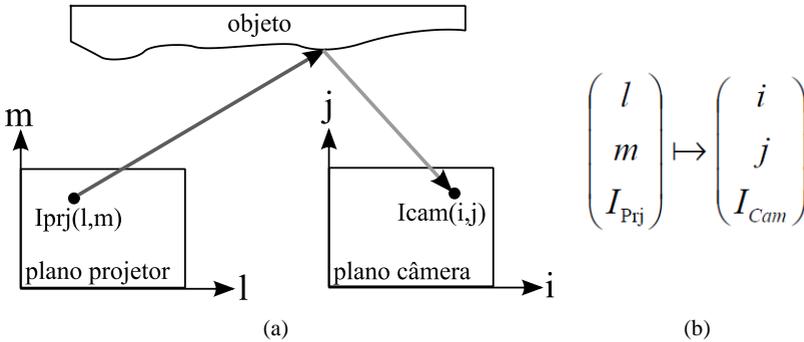


Figura 2-27 – (a) Processo de projeção e formação de imagem; (b) transformação de geometria e intensidade (adaptado de [103][105]).

O mapeamento desta relação pode ser realizado pela projeção e aquisição de mapas de fase absolutos verticais e horizontais, e posterior busca de homólogos entre estes, permitindo determinar também parâmetros da relação de intensidade, como iluminação de fundo I_0 e modulação $I_0\gamma$, que pode ser considerada linear e invertida para pequenas áreas [103][105]:

$$\begin{pmatrix} l \\ m \end{pmatrix} = \mathbf{F} \cdot \begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_0 \\ m_0 \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} = \mathbf{F}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} l \\ m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i_0 \\ j_0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$I_{cam} = 2 \cdot I_0\gamma \cdot I_{prj} + I_0 - I_0\gamma$$

A transformação permite inverter um padrão, distorcendo-o, para quando projetado sobre a peça ser observado pelo ponto de vista da câmera sem distorção. A Figura 2.28 (a) mostra uma imagem adquirida de um padrão regular de franjas projetado sobre a peça e (b) o padrão invertido de franjas calculado.

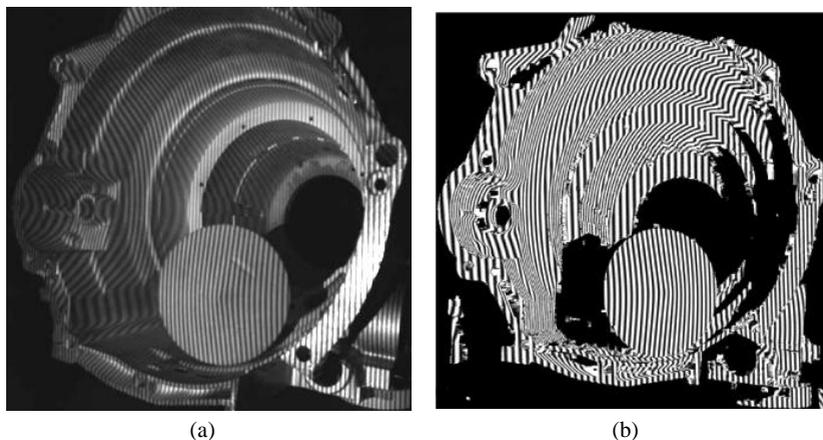


Figura 2-28 – (a) Franjas verticais projetadas sobre a peça e (b) padrão invertido [100].

A projeção adaptada invertida de franjas sobre a peça permite a visualização de franjas regulares pela câmera. Quando pequenas mudanças de forma ocorrem, a análise destas franjas permite determinar as diferenças com uma única imagem [103]. A Figura 2.29 (a) mostra franjas regulares adquiridas pela câmera a partir da projeção invertida (Figura 2.28 (a)), com detalhe de pequeno defeito introduzido e (b) a identificação das diferenças com base na mudança de fase.

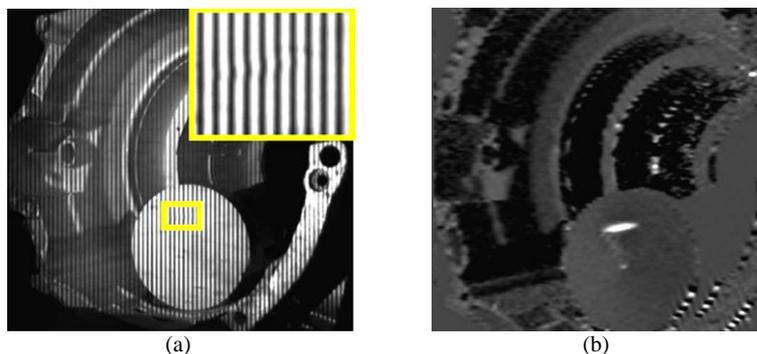


Figura 2-29 – (a) Padrão invertido projetado sobre a peça e (b) identificação das diferenças [104].

A projeção adaptada invertida da diferença entre a superfície antes e depois do defeito introduzido na peça permite determinar sobre esta o defeito, numa técnica de realidade aumentada. A Figura 2.30 (a)

mostra a projeção de um padrão que possibilita identificar as mudanças de forma ocorridas sobre a própria superfície e (b) a projeção adaptada invertida de um padrão qualquer sobre a superfície de modo que a câmera observe um padrão regular.

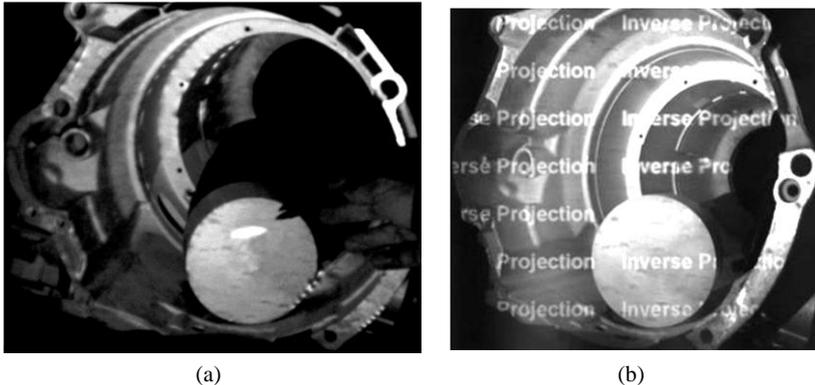


Figura 2-30 – (a) Identificação das diferenças sobre a própria peça por projeção invertida e (b) projeção adaptada invertida de padrões para visualização regular pela câmera [105].

A descrição completa da técnica para o cálculo da projeção adaptada invertida e determinação de pequenas diferenças entre as superfícies com apenas uma imagem para o segundo estado, além de exemplos de aplicação, são encontrados em [103][104][105][106].

Diversas técnicas de realidade aumentada têm sido utilizadas para criar o que é chamado ‘Escritório do Futuro’ (*The Office of the Future*), através da utilização de conceitos de visão computacional e computação gráfica. Um dos objetivos é gerar e projetar imagens que parecem corretas para um observador mesmo quando projetadas em superfícies irregulares, a partir da utilização de câmeras e projetores [107][108].

Para determinar a imagem a ser projetada, é necessário conhecer a forma da superfície, os parâmetros intrínsecos e extrínsecos do projetor, a localização do observador e a imagem que se deseja projetar, geralmente o resultado de algum modelo 3D texturizado. Como o observador pode se mover, algum sistema auxiliar é utilizado para determinar o ponto de vista deste, como sensores magnéticos ou infravermelhos [107].

A imagem projetada é calculada em duas etapas. A primeira calcula a imagem do ponto de vista do observador como um mapa de textura. Na segunda etapa, este mapa é matematicamente projetado no modelo da superfície de projeção, para então ser renderizada a partir do

ponto de vista do projetor multimídia. Estas transformações são realizadas através de texturas projetivas, utilizadas em computação gráfica (e.g. funções OpenGL), que simulam a projeção de luz ou imagens sobre um modelo 3D computacional que é visualizado na tela do computador [107][108][109].

Pontos sobre a superfície de projeção são medidos por triangulação pelo sistema e convertidos para polígonos para ser utilizada nas funções de computação gráfica, que trabalham com primitivas utilizadas pelas placas gráficas como pontos linhas, triângulos e polígonos [107][109].

Variações destas técnicas aplicadas à realidade aumentada incluem: a correção automática de perspectiva da projeção em um plano inclinado [111], a projeção sobre uma grande área utilizando múltiplos projetores [108], a re-calibração do projetor em tempo real sem a interrupção das projeções enquanto o projetor ou a superfície se movem [110][112], a correção da variação de iluminação em função da perspectiva e refletância da superfície [113][114] e a medição da postura do projetor com sistemas de medição externos auxiliares [116][117].

A Figura 2.31 mostra um exemplo, onde diversas destas técnicas foram aplicadas: (a) é mostrado o canto de uma parede para projeção, (b) a imagem projetada sem correção, (c) a imagem com correção geométrica e (d) com correção de cor e intensidade.

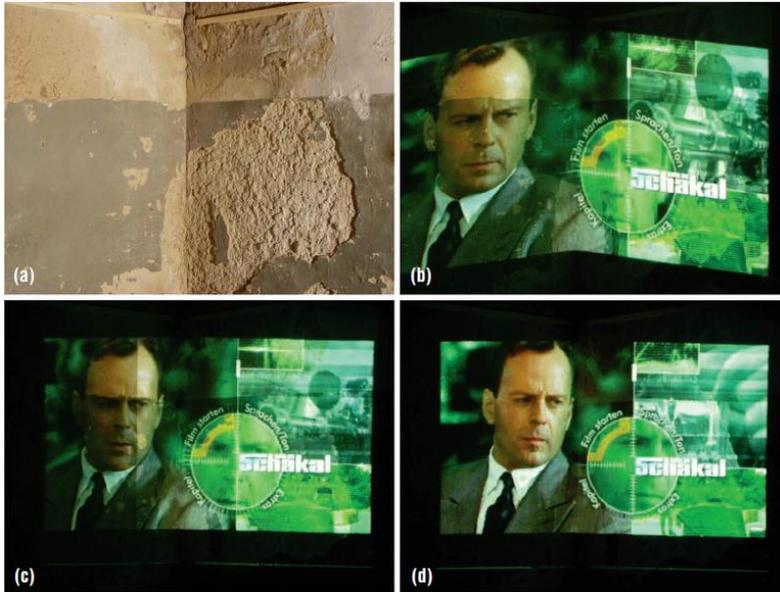


Figura 2-31 – Projeção em (a) canto de parede (b) com imagem original (c) com correção geométrica e (d) com correção de intensidade e cor [115].

2.4 RESUMO DAS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO APRESENTADAS

Esta seção resume algumas das principais características dos princípios de medição apresentados neste capítulo.

A fotogrametria de curta distância é geralmente utilizada colocando-se alvos especiais sobre a peça, para então serem tomadas diversas fotografias da cena, de modo a garantir uma grande cobertura e convergência das imagens. A cena medida deve conter padrões de comprimento para realizar a medição em escala, que é realizada em conjunto com a calibração. Estas características permitem a fotogrametria medir grandes áreas com ótima exatidão, principalmente por causa da grande quantidade de imagens e da calibração ser realizada nas mesmas condições e em conjunto com a medição.

Um grande diferencial da fotogrametria estéreo, ou visão estéreo, em relação à fotogrametria é que a calibração da posição relativa entre as duas câmeras pode ser realizada como uma etapa anterior à medição. Na calibração, pode ser utilizado um número adequado de imagens para garantir uma boa convergência dos resultados. A partir destes dados, passa a ser possível realizar a medição com apenas duas imagens, uma de cada câmera, adquiridas pelo sistema simultaneamente.

A topogrametria permite através da projeção de luz estruturada, a determinações de milhões de pontos homólogos. Os pontos homólogos podem então ser utilizados para a triangulação, resultando em uma nuvem de pontos bastante densa, mesmo em superfícies sem pontos notáveis, como bordas e saliências, textura rica em detalhes ou alvos.

O perfilômetro *laser* auto-referenciado permite realizar a medição com a movimentação livre do sistema, uma vez que esta realizada a medição de pontos sobre a superfície simultaneamente à determinação de sua própria posição no espaço, utilizando alvos sobre a peça. Esta característica permite uma grande flexibilidade durante as medições.

3 SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO

Este capítulo descreve a concepção e o desenvolvimento de um sistema para medição, comparação e sinalização de superfícies. As principais aplicações, funções e características do sistema, as técnicas e algoritmos utilizados para o processamento de dados, assim como uma concepção básica do projeto óptico e mecânico são apresentados. Inovações, aspectos positivos e limitações são discutidos ao final do capítulo.

3.1 APLICAÇÕES PRETENDIDAS

Diversos projetos que envolvem o Labmetro - UFSC, demandam a medição de superfícies de forma livre. As principais características do ponto de vista metrologico são:

- Roboturb: A Figura 3-1 mostra as principais dimensões de uma turbina, onde cada pá tem aproximadamente $(5 \times 1 \times 1) \text{ m}^3$ com tolerância de posição de pontos sobre a pá da ordem de 15 mm. Idealmente, a incerteza de medição para este caso deve ser da ordem de $\sim 1,5 \text{ mm}$.

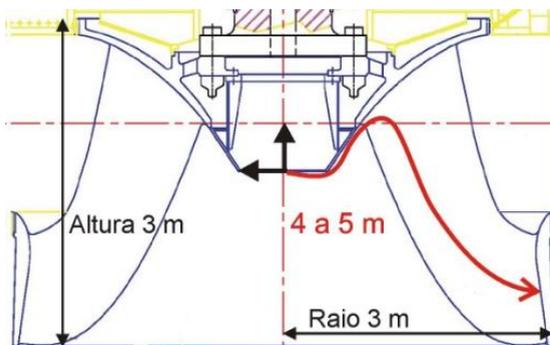


Figura 3-1– Principais dimensões de uma turbina hidráulica de grande porte.

- Medição da forma externa de dutos. Os defeitos em dutos anteriormente testados são da ordem de milímetros, portanto a incerteza de medição deve ser da ordem de décimos de milímetro ($\sim 0,5 \text{ mm}$).

- DIVITRI. A incerteza de medição da replicas dos objetos previstos no projeto na ordem de décimos de milímetro ($\sim 0,5 \text{ mm}$) não tem influência significativa na sua visualização tridimensional.

- Medição de partes de corpo humano: Um bom acompanhamento da evolução de tratamentos deve ser possível com uma incerteza de medição da ordem de milímetros (~ 2 mm).
- Escultura assistida por computador: O processo de medição e sinalização para assistir os trabalhos do escultor deve ser bem executado com incertezas da ordem de milímetros (~ 2 mm).
- Outras aplicações: rotineiramente surgem demandas específicas para medição de superfícies livres como: forma da asa e da hélice de aeromodelos, rosto de manequim, partes do corpo antes e após a realização de cirurgias plásticas e reparadoras, onde a incerteza de décimos de milímetro ($\sim 0,5$ mm) é suficientemente pequena.

A portabilidade do sistema garante uma grande gama de aplicações, tanto em laboratório quanto em campo, sendo esta uma característica altamente desejável para as aplicações citadas. A menor incerteza de medição possível, com os equipamentos disponíveis, é um dos principais focos do trabalho.

3.2 FUNÇÕES A SEREM ATENDIDAS PELO SISTEMA

O sistema desenvolvido incorpora diversas funções que visam possibilitar a medição de superfícies livres de grande extensão. Também permite a comparação entre superfícies e a sinalização de parâmetros medidos na própria superfície através de projeção de um mapa de cores.

O sistema possui basicamente dois modos de medição, o estéreo-fotogramétrico e o topogramétrico. O primeiro modo mede a posição tridimensional de alvos esparsos, espalhados em grandes áreas em relação a um sistema de coordenadas global. O outro modo mede com grande detalhamento uma pequena área da peça de cada vez e a alinha com o sistema de coordenadas global em uma única malha regular definida no plano XY, por exemplo. Ambos os modos de medição utilizam duas câmeras e um projetor de luz estruturada.

No modo estéreo-fotogramétrico, alvos devem estar presentes e estrategicamente distribuídos na região onde será realizado o alinhamento do sistema de coordenadas global e a medição detalhada. O sistema é deslocado manualmente realizando, para cada posicionamento, a aquisição de imagens de maneira sincronizada pelas duas câmeras em toda a região que contém os alvos, possibilitando reconstruir tridimensionalmente a posição destas marcas, em relação a um único sistema de coordenadas de interesse que será considerado global.

O modo topogramétrico realiza a medição de forma detalhada através da projeção de luz estruturada sobre a peça e a aquisição de uma

seqüência de imagens pelas câmeras. Estas seqüências de imagens permitem calcular mapas de fase absoluta e posteriormente uma nuvem de pontos tridimensionais bastante densa (e.g. milhões de pontos), referenciados ao sistema de coordenadas global de interesse, com passo definido nas direções X e Y.

Na prática, as aquisições nos dois modos de medição são realizadas para cada posicionamento do sistema. Em cada posição, os alvos e os mapas de fases são medidos pelas duas câmeras, possibilitando assim calcular as nuvens de pontos detalhadas e referenciadas ao sistema de coordenadas global.

A partir dos dados de medição, superfícies podem ser comparadas entre si através de algoritmos especiais de modo relativamente simples, já que estas podem ser confrontadas em relação a um mesmo sistema de coordenadas com os mesmos pares (X,Y) para cada ponto.

Para realizar a indicação das diferenças entre reparos, diferença entre superfícies, zonas de sobre ou sub material, ou outras características da superfície, o sistema utiliza uma técnica que permite projetar um mapa de cores e sinais indicativos sobre a própria peça pelo projetor multimídia do sistema. Isto possibilitara, por exemplo, o acompanhamento e a avaliação da qualidade de reparos, assim como auxiliar os técnicos que realizam o reparo, indicando zonas que necessitam de mais deposição e zonas onde necessitam a remoção de material.

3.3 CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS

Considerando as aplicações pretendidas para o sistema, a mais critica é a medição de pás de turbina, devido principalmente às suas grandes dimensões. Assim, a incerteza de medição do sistema deveria ser idealmente igual a, ou menor que, 1,5 milímetros para uma distância percorrida de 5 metros (1:3300) no modo estéreo-fotogramétrico e a 0,2 milímetros para uma diagonal de 350 milímetros (1:1750) do volume de medição de $(200 \times 200 \times 200)$ mm³ para o modo topogramétrico.

Os principais fatores que afetam a incerteza de medição do princípio fotogramétrico, conseqüentemente também no sistema estéreo-fotogramétrico, são [60][79]:

1. Resolução da câmera: quanto maior a resolução espacial da câmera menor a incerteza, pois objetos na imagem podem ser definidos com maior exatidão, como o centro dos alvos.
2. Calibração da câmera: determina diversos parâmetros que modelam a câmera. Utilizar grande número de pontos de

calibração construídos de maneira precisa, e utilizar um modelo adequado, melhora a incerteza de medição.

3. Ângulo entre pontos de vista das imagens: pontos e objetos que aparecem apenas em imagens que foram adquiridas com pequeno ângulo entre si (duas imagens tiradas com posturas próximas da câmera) tem incerteza maior do que imagens que foram obtidas com ângulo maior (e.g. ~90°).
4. Qualidade de posicionamento: a qualidade de posicionamento aumenta quando aumenta a quantidade de alvos bem posicionados e que cubram uma grande porcentagem da imagem adquirida e da peça medida.
5. Redundância das imagens: a posição de um ponto é mais precisamente calculada quando este é captado em muitas imagens sobrepostas ao invés de somente duas.
6. Alvos: a incerteza de medição de um ponto 3D é diretamente relacionada com a incerteza de sua localização na imagem. A localização de pontos pode ser melhorada utilizando alvos com detecção sub-pixel de seu centro.

A Tabela 1 mostra como estes fatores afetam a incerteza de medição para o princípio fotogramétrico de curta distância. Em negrito estão as características aplicáveis ao sistema desenvolvido.

Tabela 1 - Boas práticas para medição fotogramétrica, traduzido de [79].

Desempenho	Baixo (1:100)	Médio (1:5000)	Elevado (1:30k)
Resolução	640x480	5-6 Mpixel	11 Mpixel
Calibração	Sem calibração	Padrão calibração	Auto calibração
Ângulo imagens	Maioria < 15°	Maioria entre 20° e 90°	Maioria entre 60° e 90°
Qualidade posições	Baixa cobertura	25 a 60% cobertura	50 a 80% cobertura
Redundância imagens	Pontos em apenas 2 imagens	Apenas 3 ou mais imagens	Pontos em 8 ou mais imagens
Alvos	Sem alvos, indicação manual	Pontos naturais bem definidos	Alvos reflexivos

Outros fatores como nitidez das imagens, iluminação adequada e homogênea, distância câmera-alvos e ruído nas imagens também afetam a incerteza de medição.

No princípio topográfico, os itens 1, 2 e 3 citados acima também influenciam a medição de maneira semelhante, mas outros fatores também afetam a incerteza de medição:

1. Resolução e tipo do projetor: além do número de pixels do projetor, a relação (área útil)/(área do pixel) influencia na medição, pois pode ocorrer um batimento entre a matriz de pixels da câmera e do projetor, ocorrendo uma sub-amostragem do sinal;
2. Sensibilidade dos mapas de fase: deve-se buscar equilibrar a sensibilidade (função da frequência das senóides projetadas) com a qualidade do mapa de fase. Projeções de senóides com frequência demasiadamente elevada podem ser sub-amostradas pela resolução do projetor/câmera;
3. Ângulo entre câmeras: quanto maior o ângulo entre os eixos ópticos das câmeras, maior a sensibilidade na coordenada Z, mas também aumentam significativamente as possibilidades de ocorrerem pontos oclusos e distorções dos alvos detectados.
4. Vibração ou movimentos indesejados realizados entre as aquisições para uma mesma posição do sistema;
5. Linearidade da relação intensidade da luz projetada/adquirida;
6. Preparo da superfície: sempre que possível realizar o recobrimento da superfície com revestimento branco fosco, o que favorece a medição, ao contrário de superfícies escuras ou reflexivas.

Experiências anteriores do laboratório mostram que é possível atingir incertezas da ordem de 1:4000 para as medições topográficas, utilizando câmeras de baixa resolução (640x480). No caso da medição estéreo-fotogramétrico, a literatura mostra que é possível realizar medições, com refinamento através de algoritmos tipo '*bundle-adjustment*', com incertezas da ordem de (1:5000) com a calibração da câmera realizada previamente. Para condições ótimas e com calibração da câmera realizada concomitantemente com a medição, as incertezas de sistemas fotogramétricos podem chegar de (1:30.000) a (1:120.000) [78][79]. A Tabela 2 compara os dados de incerteza de medição para cada modo de utilização do sistema.

Tabela 2 – Comparação da incerteza máxima desejável e tangível para o sistema.

Modo de operação	Incerteza necessária	Incerteza tangível
Estéreo-fotogramétrico	$\leq 1:3300$	1:5000
Topogramétrico	$\leq 1:1750$	1:4000

Assim, segundo dados da literatura, é possível atingir os níveis de incertezas de medição requeridos para realizar a medição e comparação de superfícies de pás de turbinas de modo satisfatório.

3.4 MEDIÇÃO DA FORMA TRIDIMENSIONAL DE SUPERFÍCIES LIVRES

Nesta seção são descritos os métodos e algoritmos desenvolvidos para realizar a medição de pontos tridimensionais sobre superfícies de grande extensão, resultantes da concatenação de diversas aquisições parcialmente sobrepostas.

3.4.1 Princípio de medição orientado ao objeto

Uma nova maneira de realizar as medições com uma malha regular, utilizando apenas uma direção dos mapas de fase foi desenvolvida e é explorada neste trabalho. A idéia principal é fixar duas coordenadas independentes para um nó de uma malha regular. A terceira coordenada é determinada a partir da sua varredura através do volume de medição até que os valores de fase absolutos do ponto projetado em ambas as câmeras (mapas de fase adquiridos por cada câmera) tenham o mesmo valor.

O sistema de coordenadas da medição é definido de maneira conveniente por um dos posicionamentos do padrão de calibração, ou posteriormente pelos alvos estrategicamente colocados sobre a peça. A malha regular é definida em relação a este sistema de coordenadas. Sistemas de coordenadas cartesianos, cilíndricos, esféricos, ou outros tipos, podem ser convenientemente definidos com a densidade de pontos desejada considerando o tipo de objeto a ser medido. Por razões de simplicidade, o sistema de coordenadas cartesiano será utilizado para explicar o princípio.

A partir dos mapas de fase adquiridos pelas câmeras e dadas as coordenadas X e Y de cada nó da malha regular, a busca de cada coordenada Z é realizada numericamente. O valor de Z é alterado e o ponto 3D resultante é projetado em cada plano imagem das câmeras (e projetor) usando as equações de projeção (1) e correção de distorções (3). O valor de fase com resolução subpixel correspondente de cada câmera para cada ponto projetado é determinado. Este princípio pode ser observado na Figura 3-2, onde a variação da coordenada Z , para um mesmo nó XY da malha, gera uma variação do ponto projetado no plano da imagem (fase) de cada câmera.

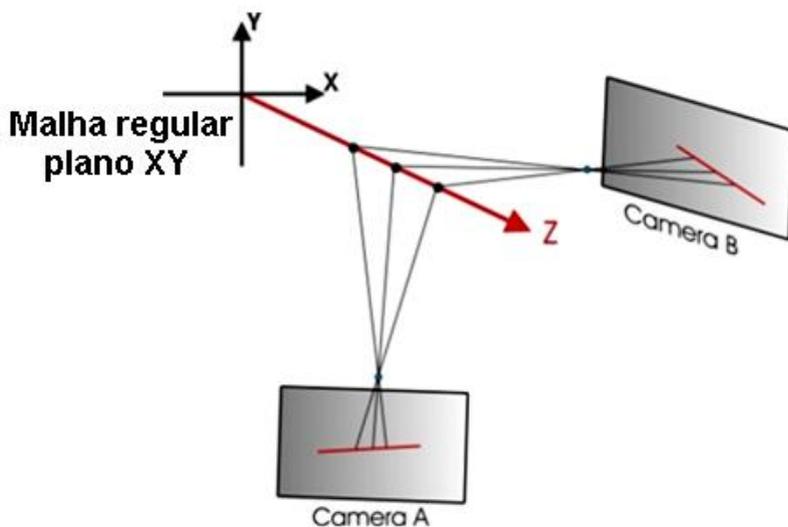


Figura 3-2 – Princípio de busca da coordenada Z [19].

Teoricamente, o valor correto da coordenada Z vai ser o que resulte em mesmo valor de fase para todas as câmeras. Na prática, se apenas duas câmeras são utilizadas, a menor diferença entre os valores de fase deve ser encontrado. Se três ou mais câmeras forem utilizadas, a busca de Z cessa quando a menor variância entre os valores de fase é achada. Desta maneira, a estimativa da coordenada Z associada a cada ponto X, Y da malha é determinada. A Figura 3-3 mostra um exemplo de mapa de fase adquirido, os pontos projetados no mapa de fase para o nó da malha $(X, Y) = 0$ e os valores da coordenada Z variados de $(-150$ a $+ 50)$ mm e a Figura 3-4 o gráfico de diferença de fase em função da coordenada Z .

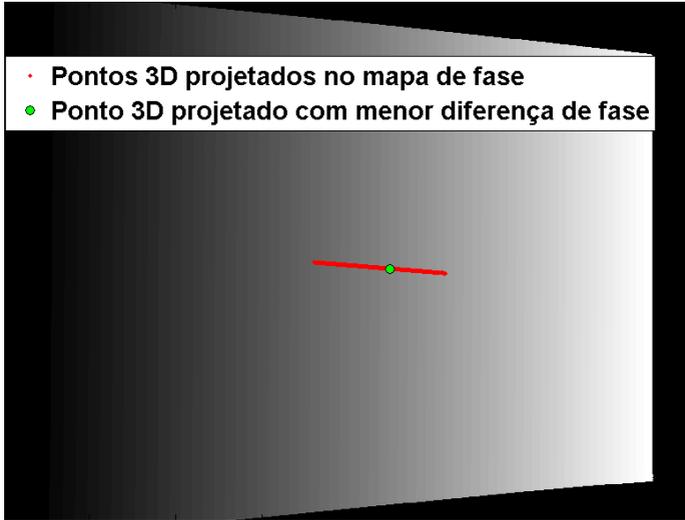


Figura 3-3 – Mapa de fase com os pontos 3D projetados variando a coordenada Z.

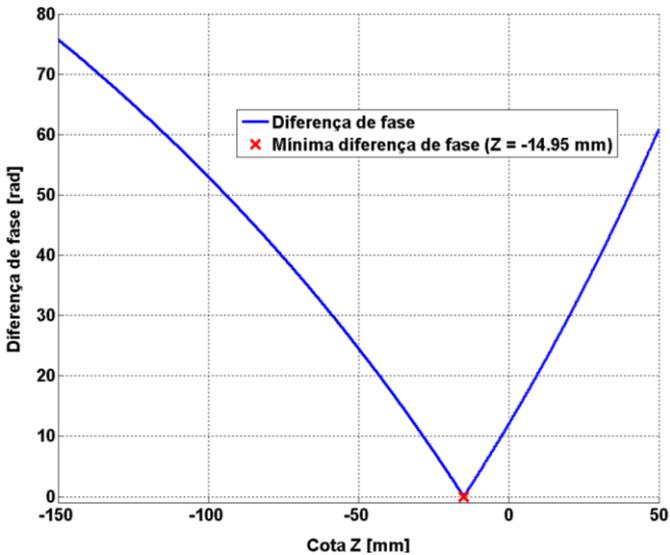


Figura 3-4 – Gráfico do módulo da diferença de fase em função da variação da coordenada Z.

Se outro sistema de coordenadas for utilizado, a busca se dá com varredura ao longo do caminho definido pela coordenada faltante. Por exemplo, num sistema de coordenadas cilíndrico, a busca pode ser realizada varrendo o raio da malha cilíndrica. Para cada seção do cilindro e para cada direção radial, a variação do valor do raio determina as coordenadas a serem projetadas nos mapas de fase permitindo determinar qual o raio que define a menor diferença ou variância entre os valores de fase. A Figura 3-5 ilustra em (a) o princípio para o sistema de coordenadas cilindro e em (b) um gráfico que relaciona o raio ao valor de fase em duas câmeras.

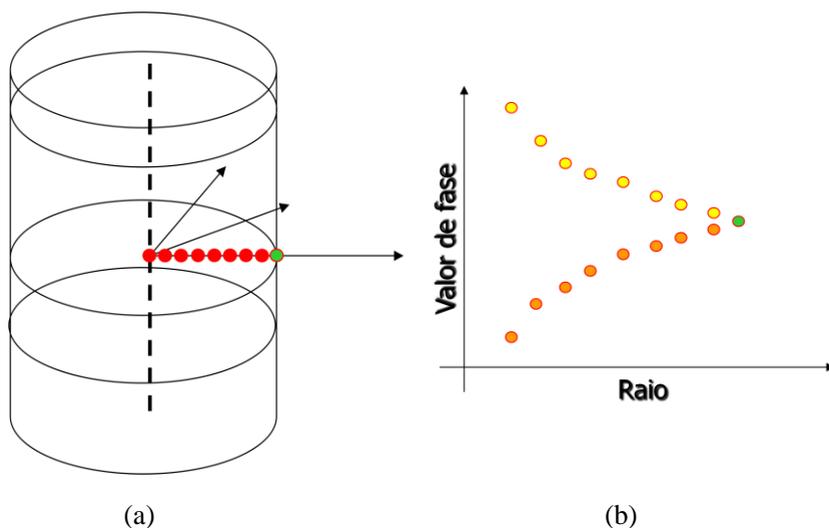


Figura 3-5 – Determinação do raio no sistema de coordenadas cilíndrico.

O mesmo princípio pode ser estendido para o sistema de coordenadas esférico onde o raio é variado para cada direção de maneira semelhante ao sistema de coordenadas cilíndrico.

Outra vantagem do princípio é a possibilidade de medição de pontos específicos de controle, minimizando o esforço computacional para medição e posterior análise de dados. Assim, uma peça que tem apenas alguns pontos que necessitam de controle não é necessária a medição de uma nuvem de pontos densa. A busca de menor diferença ou variância de fase pode ser realizada variando as coordenadas X, Y e Z ao longo de retas paramétricas que interceptam o ponto de interesse e que

sejam normais a superfície medida naquele ponto. A Figura 3-6 ilustra este princípio.

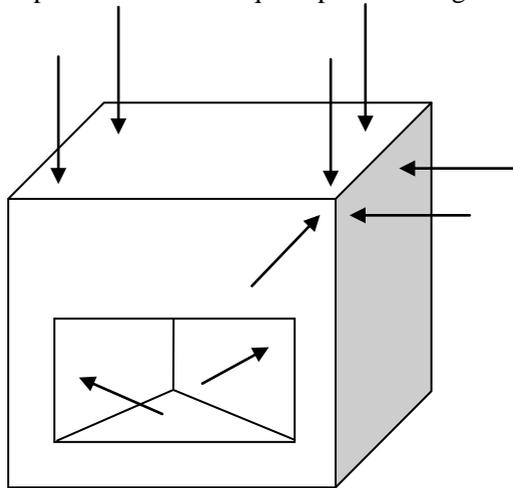


Figura 3-6 – Retas paramétricas para busca das coordenadas de pontos de interesse.

A abordagem de busca de coordenadas que determinam a menor diferença ou variância de fase permite a utilização de mais de duas câmeras e ainda possibilita utilizar o projetor como uma ‘câmera’ utilizando os mapas de fase nominais projetados para realizar as medições. Este princípio possibilita utilizar o sistema como se possuísse três câmeras, o que pode diminuir a incerteza da medição do ponto 3D, pois quanto mais câmeras observam um ponto, menor a incerteza de medição deste [19]. Além disso, em pontos onde ocorrem sombras ou oclusões para uma determinada câmera, é possível realizar a medição utilizando apenas a outra câmera e o projetor.

O princípio apresentado estrutura e organiza intrinsecamente os pontos 3D em relação a um sistema de coordenadas qualquer, alterando o paradigma de estruturação orientada ao sensor, em que a organização de dados se baseia na morfologia das câmeras, para a estruturação orientada ao objeto de interesse. Além disso, o princípio proporciona grande flexibilidade para a utilização de um número ‘qualquer’ de câmeras e projetores de maneira relativamente simples e automática.

3.4.2 Algoritmo Zscan

Um algoritmo simples de minimização 1D pode ser utilizado para determinar a coordenada Z com menor diferença de fase, para cada nó X, Y . Aqui são apresentadas duas abordagens distintas. A primeira é baseada no método *Newton-Raphson* para minimização da diferença ou variância $V(Z)$ entre as fases dos pontos projetados nas imagens, através da equação abaixo:

$$Z_{i+1} = Z_i - \frac{\Delta}{2} \frac{V(Z_i + \Delta) - V(Z_i - \Delta)}{V(Z_i + \Delta) - 2V(Z_i) + V(Z_i - \Delta)} \quad (11)$$

Sendo Z_i e Z_{i+1} os valores de Z atual e o próximo no processo iterativo, Δ é o incremento usado para computar as derivadas numericamente (por exemplo $\Delta = 0,05$ mm) e $V(Z)$ é a variância entre os valores de fase das câmeras em função do valor Z .

O processo iterativo pára quando $V(Z)$ for suficientemente pequeno ou não puder ser mais decrementado. Esta abordagem funciona bem para superfícies contínuas e com curvatura suave. Entretanto, nem todas as superfícies medidas possuem estas características. Uma segunda abordagem, mais robusta pode ser utilizada.

Esta outra abordagem realiza a procura em todo o volume de medição ao longo da coordenada Z em busca da mínima diferença de fase para duas câmeras ou mínima variância para mais de duas. O algoritmo pode ser resumido como:

1. Definir o nó X, Y da malha a ser testado;
2. Definir os limites das coordenadas Z no volume de medição: Z_{min} e Z_{max} ;
3. Definir ΔZ dividindo intervalo entre Z_{min} e Z_{max} em n partes;
4. Projetar nos mapas de fase cada ponto M formado pelas coordenadas X, Y e $(Z_{min} + \Delta Z * i)$ com $i = 0, 1, \dots, n$, utilizando a equação (1) e (3) para cada câmera ou projetor.
5. Determinar o ponto projetado com menor diferença ou variância entre fases;
6. Definir os novos valores de Z_{min} e Z_{max} como um incremento ΔZ imediatamente anterior e um incremento ΔZ imediatamente posterior ao definido como de menor diferença de fase;
7. Retornar para o passo 3, redefinir ΔZ e reiniciar a procura variando o novo valor de ΔZ até que a diferença de fase ou a variância seja suficientemente pequena (e.g. 0,005 mm);

8. Definir a coordenada Z como a média do ultimo Z_{min} e Z_{max} atribuídos pelo programa;
9. Retornar para o passo 1 até medir toda a malha com passo pré-definido.

Quanto maior a quantidade de descontinuidades na superfície maior o número de n partes que o intervalo entre Z_{min} e Z_{max} inicial deve ser dividido para realizar as medições de modo satisfatório. No caso extremo, um passo pequeno ($\sim 0,01$ mm) na variação da coordenada Z testada poderia ser utilizado para melhorar a convergência nas medições, acarretando aumento no esforço computacional. Para superfícies contínuas, um passo em Z da ordem de 10 mm ($n = 20$ para o volume de medição do sistema) se mostrou adequado para realizar as medições.

A análise da continuidade dos mapas de fase adquiridos pode ser utilizada para determinar de modo automático um valor de n que minimize o esforço de busca e que garanta boa qualidade dos pontos medidos, para diferentes tipos e características das superfícies medidas.

Com as técnicas expostas nesta secção, é possível realizar a medição de uma nuvem de pontos bastante densa (podendo chegar a milhões de pontos), em relação a um sistema de coordenadas local de cada medição de forma estruturada e com passo definido pelo usuário.

Na próxima seção é mostrado como realizar a concatenação de diversas medições dos alvos e das nuvens de pontos detalhadas em um único sistema de coordenadas global.

3.5 CONCATENAÇÃO DAS MEDIÇÕES

A fusão da estéreo-fotogrametria com a topogrametria, em um único sistema de medição, possibilita realizar a medição de superfícies de grande extensão com grande densidade de pontos. O resultado da medição pode ser expresso em relação a um único sistema de coordenadas, mesmo que sejam necessários vários posicionamentos do sistema, mas para isso é necessário realizar a concatenação dos dados provenientes das diferentes aquisições.

3.5.1 Concatenação dos alvos

Para realizar a concatenação dos alvos medidos é necessário estimar a movimentação do sistema entre as aquisições. A técnica que foi utilizada para realizar esta concatenação pode ser chamada de estéreo-odometria (*stereo odometry*) e é descrita em [50]. Estéreo-

odometria é o processo de estimar o movimento do sistema estéreo no ambiente de medição através da correspondência de pontos 3D entre consecutivas aquisições, sem o conhecimento prévio da movimentação do sistema ou da posição dos pontos. Como resultado, as posturas do sistema e a estrutura tridimensional dos pontos podem ser determinadas. Esta abordagem tem sido utilizada para diferentes aplicações, até mesmo para veículos autônomos em Marte [50].

Para cada postura do sistema são calculadas as posições tridimensionais dos alvos em relação ao sistema de coordenadas original das medições (do sistema). Estes pontos devem ser calculados de maneira robusta, uma vez que o algoritmo utilizado para determinar a transformação entre posturas do sistema não deve conter pontos espúrios.

A determinação dos alvos homólogos conta com as restrições impostas pela geometria epipolar, mas em alguns casos, dependendo da posição dos alvos, não é possível resolver ambigüidades. Com isso a informação de fase também é utilizada para determinar os pontos homólogos sobre os alvos de maneira robusta. Assim, diversas restrições foram impostas para considerar um alvo medido como válido.

Após a correção de distorção das imagens com resolução subpixel, o processamento das imagens detecta apenas alvos com características de circularidade, área e intensidade dentro de faixas limitadas. Posteriormente para cada alvo de uma câmera, a distância entre o alvo testado na outra imagem e a linha epipolar correspondente deve ser suficientemente pequena. Como validação final, a fase no centro do alvo (para alvos cilíndricos com anel preto e centro branco) ou a fase no entorno do alvo (para alvos circulares pretos) deve ser suficientemente próxima entre os alvos homólogos.

Determinadas as posições nas imagens que correspondem a cada alvo é realizada a triangulação, primeiro pelo método linear e posteriormente pelo método não linear, expostos em [21]. A determinação dos centros dos alvos é realizada por ajuste de uma elipse e posterior correção do erro de excentricidade, detalhados no **Anexo B**.

Para determinar a correspondência de alvos entre aquisições consecutivas, parcialmente sobrepostas, é realizada uma busca exaustiva com todas as possíveis combinações de três a três alvos para cada aquisição. Para cada combinação é calculada a transformação que relaciona os pontos da segunda aquisição com a primeira, sendo considerada válida a que possuir o menor resíduo abaixo de um limiar pré-estabelecido. O algoritmo para cálculo da transformação e resíduo é detalhado no **Anexo C**.

A transformação válida é então utilizada para transformar todos os alvos da segunda aquisição para a primeira. Para todos os pontos que estiverem suficientemente próximos, uma segunda iteração de cálculo da transformação é realizada, refinando a transformação aplicada com a utilização de mais alvos. Como resultado, os pontos que estiverem suficientemente próximos são fundidos através da média de suas coordenadas e os que estiverem distantes são considerados novos pontos da lista de alvos.

Com isso, os alvos adquiridos na primeira e segunda aquisição passam a fazer parte de uma única lista em relação ao sistema de coordenadas da primeira aquisição. Para cada aquisição posterior o processo é repetido, entre aquisições consecutivas, até ser formada uma única lista com todos os alvos medidos sobre a superfície em relação ao sistema de coordenadas da primeira aquisição.

A partir do conjunto de alvos concatenados em uma única lista é possível definir o sistema de coordenadas de interesse com base nestes pontos. A transformação é então aplicada aos alvos medidos e posteriormente utilizada também no cálculo da nuvem de pontos com uma malha regular sobre a superfície em relação ao novo sistema de coordenadas.

O novo sistema de coordenadas pode ser definido com a técnica Plano-Reta-Ponto, como utilizada na medição por coordenadas convencional [55]. Por exemplo, a normal do plano ajustado com diversos pontos define a direção do eixo Z. A reta que liga dois pontos, projetada no plano, define a direção do eixo X e um ponto define a origem do sistema de coordenadas. A direção do eixo Y resulta do produto vetorial dos eixos Z e X.

3.5.2 Concatenação da nuvem de pontos

A concatenação convencional de nuvens de pontos pode ser realizada transformando as medições detalhadas, de cada posição do sistema, para um único sistema de coordenadas com as transformações calculadas através dos alvos. Um refinamento iterativo destas transformações pode ser utilizado para diminuir a diferença entre as diversas aquisições concatenadas, por exemplo, com algoritmos tipo *ICP*. Uma variante deste tipo de algoritmo, o *TrICP*, aplicado a nuvens de pontos com características semelhantes as medidas no contexto deste trabalho é detalhada no **Anexo D**. Este tipo de algoritmo gera grande esforço computacional e o resultado final é uma malha irregular, mesmo que cada aquisição separada seja regular.

A concatenação das diversas aquisições, desenvolvida na tese, resulta em uma nuvem de pontos com a malha regular estendida para todas as aquisições. As nuvens de pontos para cada aquisição são calculadas em relação ao sistema de coordenadas da primeira aquisição ou a qualquer sistema de coordenadas de interesse definido pelos alvos medidos e concatenados.

Para realizar a medição da nuvem de pontos regular em relação a um sistema de coordenadas qualquer, é utilizada uma transformação G_q que relaciona a posição q do sistema de coordenadas da medição (SCM) ao sistema de coordenadas de global (SCG). Assim, para cada câmera (ou projetor) é utilizada a equação de projeção com os parâmetros extrínsecos transformados de modo que a postura das câmeras passe a ser expresso em relação ao sistema de coordenadas global:

$$m = A \cdot G_q \cdot M \quad (12)$$

$$\text{Sendo: } \begin{bmatrix} G_q \\ \mathbf{0} \quad \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}_{cam} \cdot \begin{bmatrix} R & t \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}_q$$

A Figura 3-7 mostra a relação entre o sistema de coordenadas da medição (SCM), o global (SCG) e a postura de uma câmera.

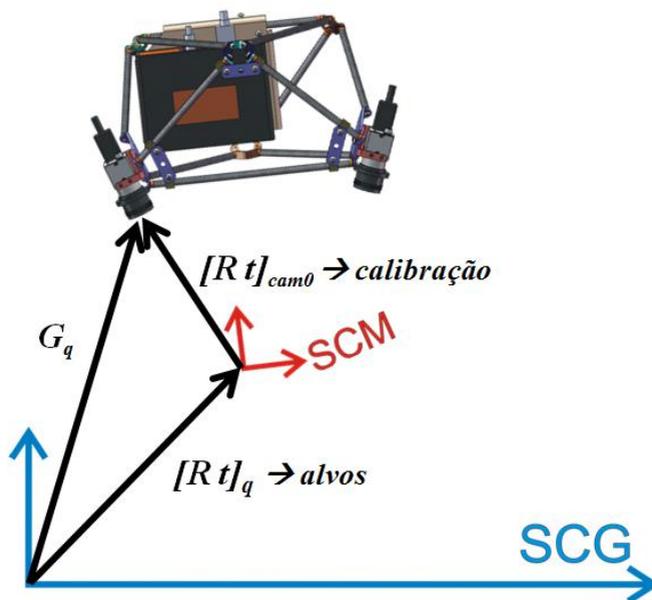


Figura 3-7 –Relação entre sistemas de coordenadas para concatenação.

Os limites da malha para cada medição (X_{min} e Y_{min}) também são transformados de modo que os pontos medidos cubram o volume de medição do sistema em relação ao sistema de coordenadas global.

Para cada posição q do sistema, a mesma transformação $[R \ t]_q$ é realizada para ambas as câmeras, mantendo fixa a relação entre estas, pré-estabelecida em calibração no sistema de coordenadas da medição: $[R \ t]_{cam0}$ e $[R \ t]_{cam1}$

Com isto, duas nuvens de pontos medidas com sobreposição parcial terão pontos com coordenadas X e Y regulares na malha estendida definida pelo SCG, e com pontos de exatamente as mesmas coordenadas X e Y nas zonas de sobreposição. As coordenadas Z não serão necessariamente as mesmas para cada ponto, devido aos erros de medição e da transformação calculada através dos alvos.

Com os pontos medidos nas zonas de sobreposição, entre uma aquisição q e uma aquisição anterior $q-1$ é possível realizar um alinhamento refinado $[Rt]_{q-1}^q$ de modo semelhante ao que é realizado pelo método *ICP*, com o grande diferencial de que a correspondência entre os pontos é previamente conhecida, pois estes possuem as mesmas coordenadas X e Y . Com isto, o alinhamento refinado entre as nuvens de pontos passa a ser realizado com apenas uma iteração, o que diminui significativamente o custo computacional desta etapa.

Como resultado da transformação realizada para este refinamento, as diferentes nuvens de pontos transformadas não são mais exatamente regulares em relação ao SCG. Mais uma iteração do cálculo das nuvens de pontos pode ser realizada, agora com as transformações refinadas pela etapa anterior, resultando mais uma vez em uma malha regular estendida.

Para cada posição q do sistema, a equação de projeção de pontos M 3D no SCG nas posições m do plano imagem de cada câmera passam a ser:

$$m_{cam0} = A_{cam0} \cdot G_{SCG0} \cdot M_{SCG} \quad (13)$$

$$m_{cam1} = A_{cam1} \cdot G_{SCG1} \cdot M_{SCG}$$

$$\text{Sendo: } \begin{bmatrix} G_{SCG0} \\ \mathbf{0} \ \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}_{cam0} \cdot \begin{bmatrix} R & t \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}_q \cdot \begin{bmatrix} R & t \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}_{q-1}^q$$

$$\begin{bmatrix} G_{SCG1} \\ \mathbf{0} \ \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}_{cam1} \cdot \begin{bmatrix} R & t \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}_q \cdot \begin{bmatrix} R & t \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}_{q-1}^q$$

As distorções em cada câmera são computadas de modo inverso ao descrito na equação (3). A equação (3) considera a correção de um ponto distorcido real captado pela câmera para o ponto teoricamente projetado pela equação de projeção em (1), possibilitando então realizar o ajuste de feixes (*bundle adjustment*). No caso da busca da coordenada Z descrita, o ponto 3D M é projetado no plano imagem pela equação (1), ou (13) se o ponto testado estiver no SCG, que deve então ser distorcido de modo a se aproximar do ponto real projetado. As equações utilizadas para introduzir as distorções no ponto M projetado são descritas em [36] e no **Anexo A**.

Na etapa final do cálculo de uma única malha regular estendida no SCG, todos os pontos com coordenadas X e Y que possuem aquisições sobrepostas, ou seja, mais de uma coordenada Z , são unidos pela média das diferentes coordenadas Z .

Com o intuito de minimizar o esforço computacional durante as diversas etapas de medição, concatenação e refinamento da malha regular estendida, é possível calcular as malhas intermediárias com um passo maior nas direções X e Y (e.g. 10 mm) e a malha final com uma densidade maior de pontos (e.g. passo 1 mm).

3.6 COMPARAÇÃO DE SUPERFÍCIES

Realizar a comparação da superfície medida com uma de referência, seja ela um modelo computacional ou uma previamente medida, possibilita realizar o controle geométrico da superfície de interesse. Este controle pode ser utilizado de diversas formas, como o controle do processo de fabricação da superfície, para determinar a quantidade de material depositado ou como meio de controlar a alteração de um perfil hidrodinâmico, entre outros.

A utilização de uma malha regular para realizar as medições sobre a peça traz uma grande vantagem para realizar a comparação diretamente através das diferenças de cota Z , para cada ponto que possuir a mesma coordenada X e Y . Para possibilitar esta comparação direta, o sistema de coordenadas global da medição precisa ser escolhido criteriosamente, pois erros significativos podem ser introduzidos na comparação dependendo de sua escolha. A Figura 3-8 mostra dois sistemas de coordenadas distintos, em (a) o sistema de coordenadas original das medições, em que a direção Z se afasta muito do vetor normal às superfícies medidas. Em (b), alvos sobre a peças são utilizados para

determinar um sistema de coordenadas que permite a comparação direta entre cotas Z de cada medição.

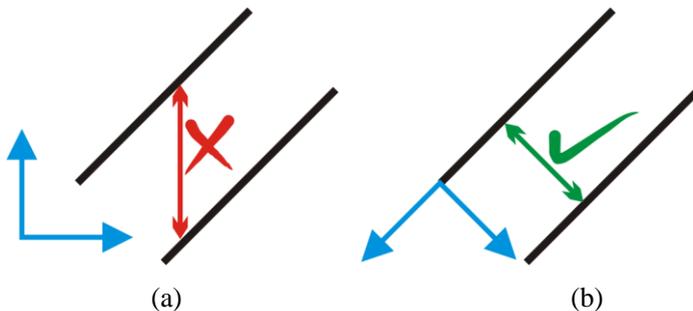


Figura 3-8 – Sistema de coordenadas (a) incorreto e (b) correto para comparar diretamente cotas Z.

Dependendo da forma da superfície medida e do tipo de comparação que se deseja realizar, pode ser necessário o cálculo das distâncias em relação às normais de pontos de interesse sobre as superfícies. Nestes casos é possível utilizar a técnica de medição por retas paramétricas nos pontos de interesse, como ilustrado na Figura 3-6, e comparar diretamente as diferenças sobre estas retas.

Em geral, a comparação das diferenças das cotas Z atende uma grande gama de aplicações e é bastante simples de ser implementada. A Figura 3-9 mostra um exemplo simples de diferença entre duas superfícies livres apenas com a diferença das cotas Z (retas verticais). Neste caso seria possível, por exemplo, quantificar o volume de material necessário para preencher a cavidade.

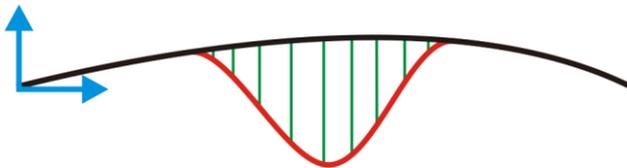


Figura 3-9 – Diferença em Z entre superfícies livres.

No caso ilustrado na Figura 3-9 acima, se a cavidade for suficientemente pequena para que o sistema de medição possa realizar apenas uma aquisição para a medição completa, apenas o alinhamento aproximado entre a peça e o sistema seria necessário para realizar as comparações, desde que não exista movimento relativo durante o preenchimento da cavidade e sua posterior medição. Se houver o

movimento, ou mais de uma aquisição, alvos podem ser colocados no entorno da cratera e os mesmo sistema de coordenadas global ser definido antes e depois do preenchimento.

Como resultado uma malha das diferenças de cotas Z pode ser calculada com esforço computacional relativamente pequeno, diferentemente de comparações convencionais entre nuvens de pontos que podem requerer a determinação da correspondência entre pontos das superfícies antes de realizar sua comparação

3.7 SINALIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES

Uma das maiores dificuldades de utilizar os dados provenientes da medição da superfície, ou da comparação entre superfícies, é a associação destes dados com a superfície física em si, principalmente em superfícies livres. Pequenos defeitos de sobre-material, por exemplo, são dificilmente localizados com exatidão na superfície, dificultando o trabalho de recuperação desta.

Para auxiliar a localização de áreas de interesse relevante na superfície, a projeção de um mapa de cores sobre esta possibilita a inspeção visual e o acompanhamento da evolução de alteração do seu perfil, em casos de intervenção. O critério para a associação de cores para cada ponto da superfície pode ser proporcional à diferença em relação à superfície de referência, à curvatura em cada ponto, ou à amplitude da coordenada Z , por exemplo. Podem ainda ser projetadas curvas de nível ou outras marcas de referência e de interesse.

Para realizar o cálculo do mapa de cores e projetar cada ponto colorido ao respectivo ponto físico da superfície, o projetor é considerado como uma câmera invertida do ponto de vista da geometria óptica. Este conceito se baseia no princípio denominado Reciprocidade de Helmholtz, onde o fluxo de luz pode ser revertido sem serem alteradas as suas propriedades de transporte [33].

Como os parâmetros de calibração do projetor são conhecidos, pontos tridimensionais M medidos podem ser projetados no plano imagem do projetor através da Equação (1) ou (13) e corrigidas as influencias das distorções. Para cada ponto projetado e corrigido no plano imagem, uma cor pode ser associada a algum parâmetro de interesse que tenha relação com o ponto M tridimensional correspondente. Este mapa de cores, na forma de uma imagem, é projetado pelo projetor multimídia. Cada ponto na imagem agora é projetado no mesmo ponto da superfície no qual esta associado,

indicando assim características de interesse de modo fiel na própria peça.

Cada ponto tridimensional projetado no plano imagem do projetor pode ser associado a uma cor relativa à cota Z, como mostra a Figura 3-10. Diferentes mapas de cores associados à curvatura da superfície ou qualquer outro parâmetro como curvas de nível ou diferença entre cotas podem ser elaborados.

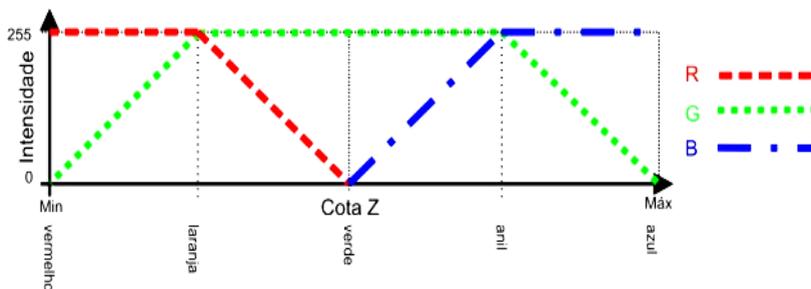


Figura 3-10 – Diagrama de cálculo das componentes RGB para cada cota Z.

O cálculo do mapa de cores a projetar tem que considerar a forma atual da superfície, ou seja, as coordenadas dos pontos 3D da superfície medida/sinalizada quando projetadas na imagem do projetor. Para isso, o sistema deve estar na mesma posição durante a medição e a projeção do mapa de cores, ou alvos devem ser medidos para determinar a posição do sistema em relação ao sistema de coordenadas global da medição e esta transformação deve ser considerada nos cálculos.

A Figura 3-11 mostra um exemplo de imagem para projeção sobre uma peça com superfície livre, com cores associadas às cotas Z.

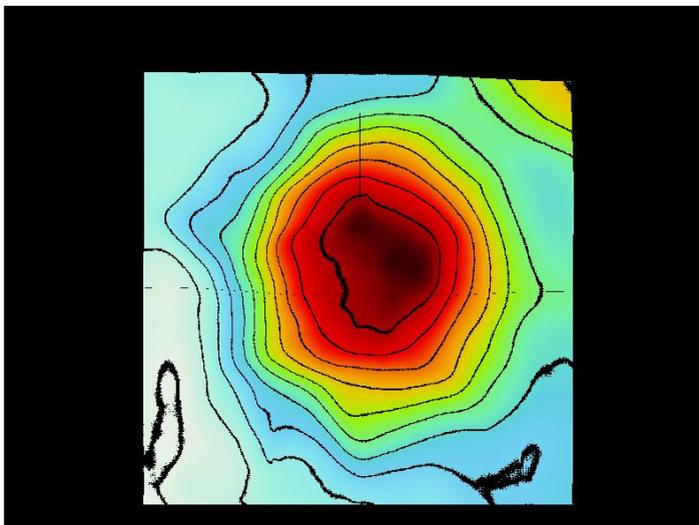


Figura 3-11 – Imagem para projeção de mapa de cores com iso linhas a cada $\Delta Z = 2$ mm.

Esta aplicação do projetor multimídia abre espaço para uma grande gama de aplicações que requerem a sinalização de informações no próprio local de interesse, superando em muito a visualização destas informações numa tela de computador ou relatório impresso e possibilitando avaliar as medições ‘*in loco*’ de maneira inédita.

Outras aplicações deste tipo de sinalização incluem, por exemplo:

- Aplicações médicas: acompanhar de forma precisa a evolução de tratamentos para desvio na coluna, com sinalização das mudanças nas próprias costas do paciente, auxiliando a avaliação medica;
- Escultura assistida por computador: uma peça é sucessivamente moldada, medida e sinalizada para guiar o escultor de forma precisa e iterativa até atingir a forma final prevista;
- Alinhamento de peças: a sinalização indica onde deve ser ajustado para realizar determinado alinhamento entre peça de referência e peça a alinhar, desde que as tolerâncias sejam condizentes com as incertezas do sistema.

3.8 OPERAÇÃO DO SISTEMA.

Para a utilização do sistema, algumas etapas estão previstas e devem ser seguidas para as medições de peças de grande extensão em geral. São elas:

1. Inspeção inicial e limpeza da superfície a medir;
2. Planejamento da medição, que inclui definir se será apenas uma medição ou se haverá a comparação depois de alguma intervenção realizada, com outra superfície pré-medida ou com modelo CAD;
3. Pintura da superfície;
4. Colocação dos alvos em posições estratégicas e com densidade adequada;
5. Aquisições parcialmente sobrepostas (~50%) sobre a área coberta pelos os alvos;
6. Cálculo da posição tridimensional dos alvos;
7. Concatenação das nuvens de pontos em relação ao sistema de coordenadas global;
8. Se aplicável, comparação com superfície de referência;
9. Sinalização da superfície através da projeção de mapas de cores (pode necessitar medição dos alvos para determinação da posição do sistema em relação ao SCG);
10. Intervenção na superfície se necessário;
11. Repetir desde o passo 4 se alvos da área que sofreu intervenção foram retirados, senão, repetir desde o passo 7.

3.9 DISCUSSÃO SOBRE A SOLUÇÃO PROPOSTA

Além da extensa pesquisa bibliográfica para determinação e utilização das técnicas e algoritmos no estado da arte para o desenvolvimento do sistema, foram incorporadas inovações de modo a tornar o sistema melhor, mais robusto, flexível para utilizar um número ‘qualquer’ de câmeras, com diversos tipos de aplicação e que auxilie de forma inovadora seus usuários.

Dentre as principais inovações e aspectos positivos estão:

- Algoritmos relativamente simples de cálculo de nuvem de pontos tridimensionais de forma intrinsecamente estruturada, com malha regular e passo definido pelo usuário;
- Extensão da malha regular para medições realizadas com posicionamentos distintos;
- Algoritmos relativamente simples de cálculo de nuvem de pontos tridimensionais que permitem utilizar qualquer número de

câmeras (inclusive o projetor) para realizar a medição. Também possibilita descartar seletivamente câmeras em que a observação de determinado ponto esteja obstruída para esta, mas não para outras. Esta abordagem possibilita a medição com maiores detalhes e menos falhas (locais sem pontos medidos) em objetos complexos;

- Possibilidade de utilizar diversos tipos de sistema de coordenadas para medição de nuvem de pontos tridimensionais, de forma intrinsecamente estruturada, com malha regular e passo definido pelo usuário, como por exemplo, cartesiana, cilíndrica e esférica;
- Algoritmo que permite realizar alinhamento refinado entre superfícies com correspondência previamente conhecida entre pontos;
- Realizar a sinalização de superfícies através da projeção de um mapa de cores associado à cada ponto da superfície de modo a auxiliar a inspeção e intervenção sobre esta;
- Realizar a fusão, em um único sistema portátil, de princípios estéreo-fotogramétricos, topogramétricos, de auto-localização e de sinalização por mapas de cores.

Estas diversas inovações introduzidas no sistema de medição permitem realizar uma espécie de sinergia entre os diversos aspectos do sistema. Por exemplo, o cálculo da nuvem de pontos de forma estruturada permite encontrar diretamente, ou de forma muito mais otimizada, os pontos correspondentes para realização do alinhamento refinado entre superfícies.

Uma outra característica importante é que cada ponto da malha regular, independentemente da densidade e sistema de coordenadas escolhido, é calculado com base em dados adquiridos sobre a superfície (mapas de fase), ao contrário de métodos convencionais onde uma amostragem não regular é utilizada para, através de interpoladores, estimar pontos em uma grade regular em locais que não foram amostrados. Alguns exemplos de interpoladores são: vizinho mais próximo, média local e inverso da distância [120]. A Figura 3-12 (a) mostra um exemplo de malha não regular que é utilizada para (b) a interpolação de uma malha regular. Para cada ponto interpolado existe uma área em que os pontos amostrados são utilizados.

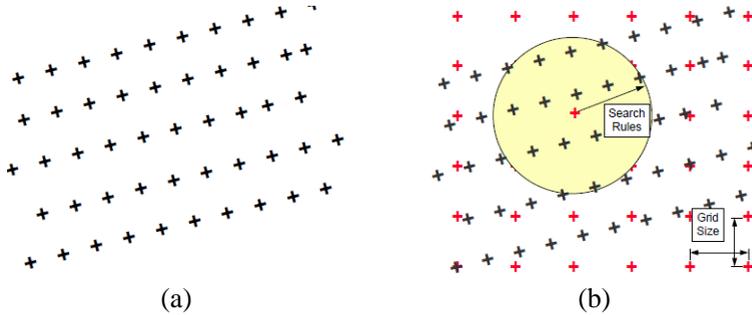


Figura 3-12 (a) Malha não regular e (b) interpolação para malha regular [120].

Estes tipos de interpolação demandam um esforço computacional, que pode ser minimizado pelo cálculo direto dos pontos na malha regular com a densidade desejada. Além disso, são evitados os erros adicionais introduzidos pelos métodos de interpolação de dados.

4 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritas as principais características do protótipo desenvolvido, os principais experimentos realizados para ajuste, determinação de parâmetros de calibração e avaliação de desempenho do sistema de medição desenvolvido, buscando a validação dos conceitos apresentados, tanto para medições em uma única posição do sistema, quanto para diversas medições concatenadas em um único sistema de coordenadas.

Alguns resultados obtidos são comparados com técnicas desenvolvidas em outros trabalhos e para cada experimento, uma interpretação crítica dos dados é apresentada, finalizado numa conclusão geral a respeito da parte experimental da tese.

4.1 PROTÓTIPO DE LABORATÓRIO

Para a realização dos experimentos foi montada uma bancada de ensaios composta principalmente por uma base com dispositivos de fixação, padrões de calibração, peças para medição e um protótipo portátil do sistema de medição.

O projeto mecânico foi desenvolvido de modo a tornar o sistema portátil. Montagens e testes preliminares auxiliaram a determinar uma configuração adequada, de modo a integrar mecanicamente componentes, como câmeras digitais e projetor multimídia. A estrutura de fixação dos componentes foi concebida de modo a minimizar os custos de fabricação, a massa e o volume ocupado pela estrutura, mantendo rigidez suficiente da relação espacial entre os componentes.

A estrutura em forma de octaedro foi construída com tubos de fibra de carbono, componentes usinados, chapas cortadas e dobradas em liga de alumínio, cola epóxi e elementos de fixação. Esta estrutura foi montada em uma base de apoio com regulagem de altura. Imagens do projeto mecânico e do sistema montado podem ser visualizadas na Figura 4-1.

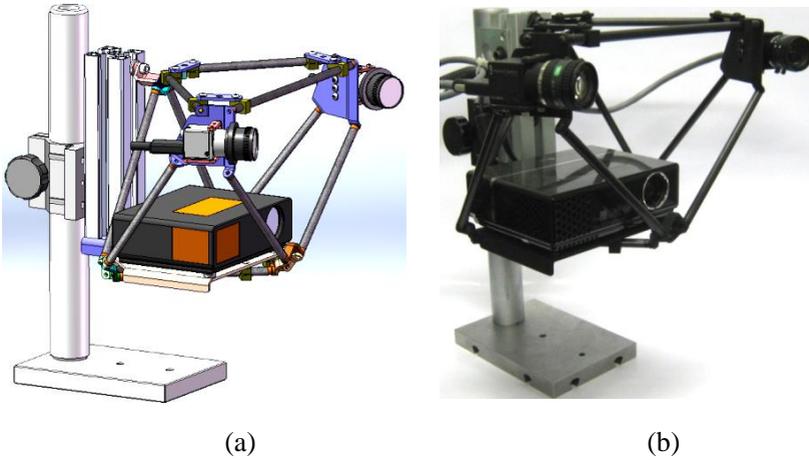


Figura 4-1 – (a) Projeto mecânico e (b) protótipo construído montado sobre suporte com altura ajustável.

O projeto óptico também foi desenvolvido com base em montagens e testes preliminares, utilizando componentes disponíveis no laboratório, e consistiu basicamente em determinar o ângulo e distância entre as câmeras e o volume de medição do sistema, definido como mostra a Figura 4-2 e a Figura 4-3.

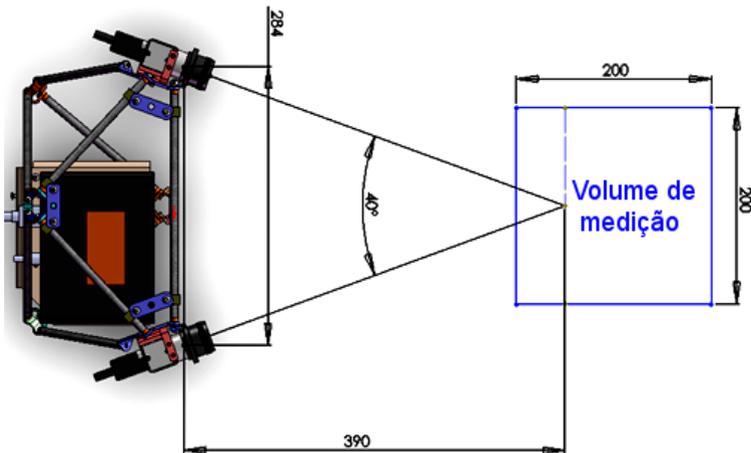


Figura 4-2 - Principais características dimensionais do sistema de medição.

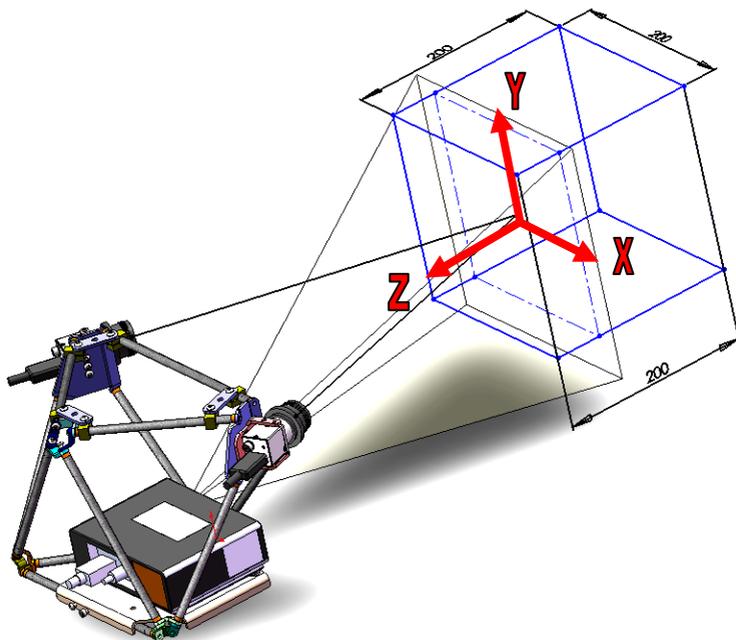


Figura 4-3 - Sistema de coordenadas e volume de medição (200x200x200) mm³.

A descrição detalhada dos principais componentes utilizados se encontra no **Anexo E**.

4.2 MÉTODO DE ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

A análise dos dados adquiridos e processados pelo sistema se baseia em medições de padrões ou artefatos que possuem geometria ou medição de referência. Neste item serão feitas considerações acerca da forma como os mapas de fase são avaliados e como os dados do desempenho geométrico serão considerados.

4.2.1 Mapas de fase

Mapas de fase, por exemplo, adquiridos a partir da projeção de franjas sobre um plano de referência, permitem analisar a influência da variação de diversos parâmetros do sistema através da separação de seus diversos componentes. É possível realizar esta separação através do ajuste de planos ou superfícies polinomiais de graus variados e subtrações consecutivas do mapa original.

Um exemplo de um mapa de fase adquirido sobre um plano e um gráfico com os valores de fase na linha central do mapa pode ser visualizada na Figura 4-4 abaixo.

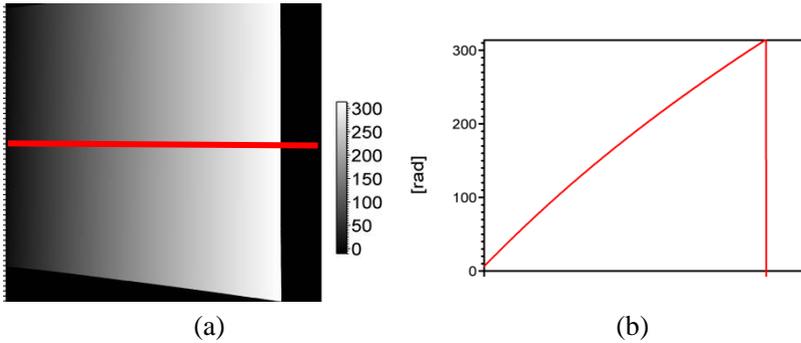


Figura 4-4 (a) Mapa de fase adquirido sobre um plano e (b) perfil fase na linha central da imagem. As coordenadas x e y estão expressas em pixels e o valor da fase em radianos.

A variação da fase deste mapa na direção horizontal, como mostrada no gráfico, se deve principalmente à direção vertical das franjas senoidais projetadas sobre o plano. Diversos outros componentes que influenciam os valores de fase de cada pixel estão sobrepostos a esta componente principal, que em condições ideais deveria se comportar como um plano inclinado.

Para visualizar os outros componentes presentes e sobrepostos ao plano ideal, é ajustado um plano matemático e subtraído do mapa de fase original, como mostra na Figura 4-5.

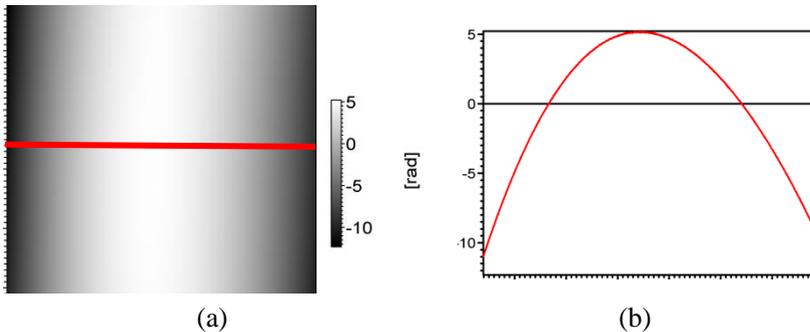


Figura 4-5 (a) Resultado da subtração da interpolação de um plano matemático e (b) perfil da diferença. As coordenadas x e y estão expressas em pixels e o valor da fase em radianos.

No resíduo visualizado na figura anterior, é possível observar um comportamento nitidamente quadrático, decorrente da variação de magnificação da lente, pois o eixo óptico desta se encontra inclinado em relação ao plano medido. Note que o gráfico mostra a taxa de variação de magnificação, uma vez que parte da componente desta influência foi subtraída com o plano ajustado anteriormente. Para remover a influência da variação de magnificação da lente, é ajustada uma superfície biquadrática que é subtraída do mapa. O resultado desta operação pode ser visualizado na Figura 4-6 abaixo.

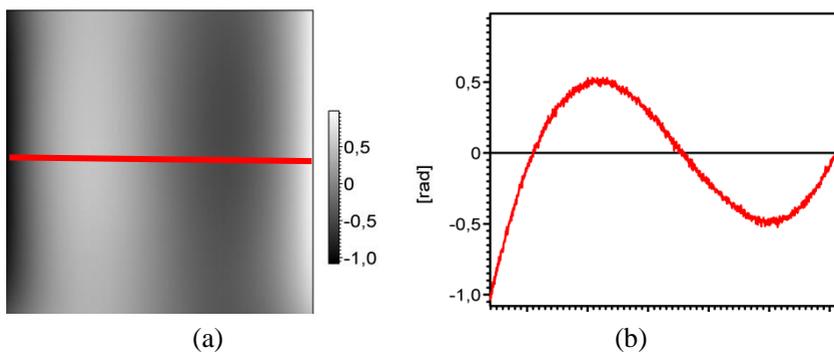
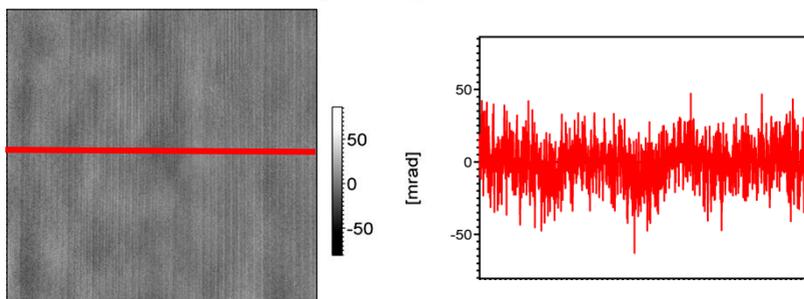


Figura 4-6 (a) Subtração da interpolação de superfície biquadrática e (b) perfil da diferença. As coordenadas x e y estão expressas em pixels e o valor da fase em radianos.

O mapa resultante da operação anterior contém agora resíduos de grau mais elevado, como a influência residual da variação de magnificação das lentes do projetor e da câmera e distorções das lentes do projetor e da câmera. Como as distorções das lentes podem ser modeladas através de polinômios de grau mais elevado, uma superfície polinomial de grau 5 em ambas as direções pode ser ajustada e subtraída dos dados, resultando no mapa da Figura 4-7.



(a) (b)

Figura 4-7 (a) Subtração da interpolação de superfície grau 5 e (b) perfil da diferença. As coordenadas x e y estão expressas em pixels e o valor da fase em radianos.

O mapa resultante contém diversos componentes, sendo os principais:

- Ruído: inerente à projeção e aquisição das imagens;
- Ondulações: devido ao erro de sincronização entre projeção e aquisição, ocasionando variação de intensidade nas imagens adquiridas, resultando num comportamento semelhante a um pequeno deslocamento de fase da franja senoidal projetada;
- Padrões tipo *Moiré*: devido ao batimento entre os pixels da imagem projetada e os pixels da câmera.

Este tipo de análise do mapa de fase permite avaliar a influência da variação de diversos parâmetros de ajuste do sistema de medição, com será detalhado adiante.

4.2.2 Desempenho geométrico

Análise semelhante pode ser realizada a partir da medição de pontos tridimensionais de um plano de referência, onde é determinado o resíduo da diferença de ajuste de um plano matemático à nuvem de pontos. Recomendações específicas para avaliação de desempenho de sistemas de medição ópticos podem ser encontradas no guia VDI-VDE 2634 partes 1 e 2 (*Optical 3-D measuring systems*) [121][122].

A parte 1 do guia (*Optical systems with point-by-point probing*) trata sobre a sistemática para medição de pontos discretos definidos por alvos, como os utilizados na fotogrametria, de modo a possibilitar a realização de ensaios de aceitação e verificação de equipamentos. A Figura 4-8 mostra o esquema de um artefato padrão unidimensional que deve ser medido em pelo menos sete locais do volume de medição do sistema.

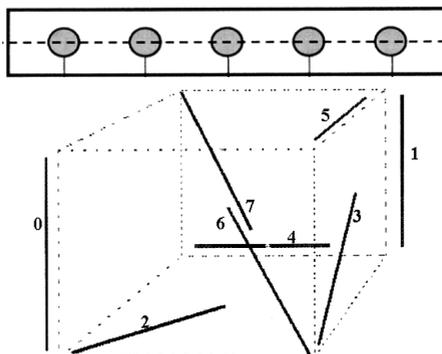


Figura 4-8 Artefato de calibração e posições recomendadas no volume de medição [121].

A distância entre as marcas mais afastadas entre si deve ter pelo menos o comprimento do menor lado do cubo e pelo menos dois terços da diagonal principal do cubo. De cinco a dez distâncias entre as marcas devem ser calculadas e comparadas com as distâncias calibradas, conforme a equação:

$$\Delta l = l_m - l_c$$

Onde Δl é o erro de medição de distância (*length measurement error*), l_m é a distância medida pelo sistema e l_c é a distância calibrada. Os erros máximos de medição podem ser expressos em função da distância medida como na equação abaixo:

$$E = A + K \cdot L \leq B$$

Onde E é o erro máximo de medição de distância em função da distância medida, A , K e B constantes e L o comprimento medido. Os dados levantados na determinação do erro máximo de medição de distância podem ser representados de forma gráfica com a distância de referência no eixo das abscissas e cada erro de distância no eixo das ordenadas.

Uma grande vantagem deste tipo de avaliação é que os sistemas de coordenadas dos dados medidos e dos dados calibrados não precisam ser coincidentes. Com isto não são introduzidos erros na avaliação devido ao alinhamento, já que a comparação é baseada apenas na distância entre pontos tridimensionais.

A parte 2 do guia (*Optical systems based on area scanning*) trata principalmente sobre a realização de ensaios de aceitação e verificação

de equipamentos que projetam luz estruturada sobre a peça para auxiliar a medição. A avaliação, que considera apenas uma posição do sistema (i.e. sem concatenação de distintas medições), é dividida em três parâmetros:

- RA - erro máximo de apalpação (*Probing error*)
- SD - erro máximo de distância entre esferas (*Sphere-spacing error*)
- RE - erro máximo de medição de planeza (*Flatness measurement error*)

O artefato para a determinação do erro de apalpação e do erro de distancia entre esferas é composto por duas esferas com diâmetros e distância entre si definidos pelas equações em (14).

$$L_p \geq 0,3 \cdot L_0 \quad (14)$$

$$D_p = (0,1 \dots 0,2) \cdot L_0$$

Onde L_p é a distância entre os centros das esferas, L_0 é o comprimento da diagonal principal do maior cubo que define o volume de medição e D_p é o diâmetro das esferas. Desenhos esquemáticos do artefato de calibração e das posições recomendadas no volume de medição do sistema podem ser visualizados na Figura 4-9 abaixo.

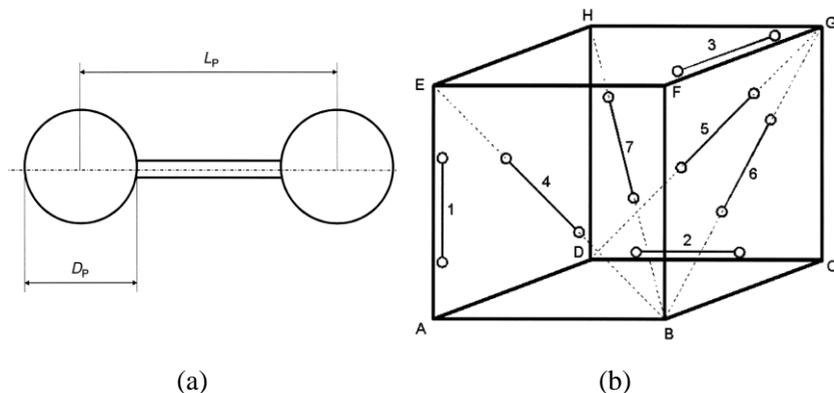


Figura 4-9 Artefato de calibração e posições recomendadas no volume de medição [122].

O erro de apalpação RA é a maior faixa de distância radial entre os pontos medidos sobre a esfera e a interpolação de uma esfera por mínimos quadrados com raio livre, entre todas as posições medidas.

O erro de distância entre esferas SD deve é o maior erro encontrado entre as distancias medidas entre as esferas e a distância calibrada. A distância entre as esferas é determinada pela interpolação de esferas por mínimos quadrados impondo o raio determinado em calibração prévia.

O artefato para a determinação do erro de medição de planeza é um plano com pelo menos 50mm de largura e de comprimento maior ou igual a 50% da diagonal principal do volume de medição. As posições recomendadas para medições do plano de calibração podem ser visualizadas na Figura 4-10.

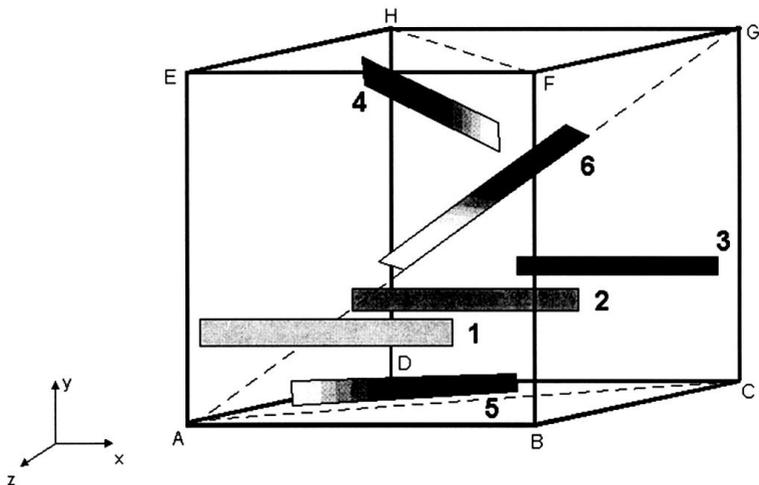


Figura 4-10 O erro de medição de planeza RE é a maior faixa de distâncias, entre pontos medidos e cada plano ajustado por mínimos quadrados [122].

4.3 MEDIÇÃO A PARTIR DE UM ÚNICO POSICIONAMENTO

Esta seção descreve as avaliações realizadas com o sistema adquirindo dados em uma única posição, ou seja, sem concatenação de dados para distintas posições. As estimativas dos erros de medição são determinadas sobre os dados adquiridos do padrão unidimensional segundo VDI/VDE 2364 parte 1.

4.3.1 Calibração de câmeras

A calibração das câmeras de maneira adequada é um dos itens de maior importância para realizar medições confiáveis e com erros minimizados. Após intensa experimentação para implementação e ajustes no programa de calibração e determinação da configuração adequada do padrão de calibração, dois experimentos foram realizados, um para quantificar a influência do número de posições do padrão de calibração e outro para quantificar a contribuição de cada passo na seqüência de calibração. A Figura 4-11 mostra o padrão bidimensional sendo medido para a calibração do sistema.



Figura 4-11 Aquisição para calibração do sistema utilizando padrão bidimensional.

4.3.1.1 Número de posições do padrão para calibração

A calibração é realizada a partir de aquisições de imagens para diversas posições de um padrão 2D com uma matriz de anéis com diâmetro e passo conhecido por calibração prévia em microscópio de medição com mesa Xy acionada por parafuso micrométrico. No total foram adquiridas 18 imagens do padrão e calculados os parâmetros de calibração para diferentes números de imagens. A cada novo cálculo da calibração, foram sendo retiradas dos cálculos as imagens que mais contribuíam com o resíduo quadrático médio por pixel na calibração.

Para cada conjunto de parâmetros de calibração foi realizado o processamento de um mesmo conjunto de imagens adquiridas do padrão unidimensional conforme indicado pela VDIVDE 2634 Parte 1 citada anteriormente.

Calibrações realizadas com uma ou duas imagens foram descartadas, pois acarretaram em erros muito grandes ($T_d > 12$ mm para duas posições) e com mais de 18 imagens não foram realizadas porque não foi observada uma tendência de melhora dos resultados com o aumento de número de imagens e por causa da falta de praticidade em fazer um grande número de aquisições.

A Figura 4-12 abaixo mostra na escala da esquerda a tendência e a repetitividade para 95% de confiabilidade ($T_d \pm Re_{95\%}$) dos erros de medição de distância para cada número de imagens do padrão. Na escala da direita, observa-se o do resíduo quadrático médio de reprojeção dos pontos de calibração das duas câmeras, que os algoritmos de calibração buscam minimizar.

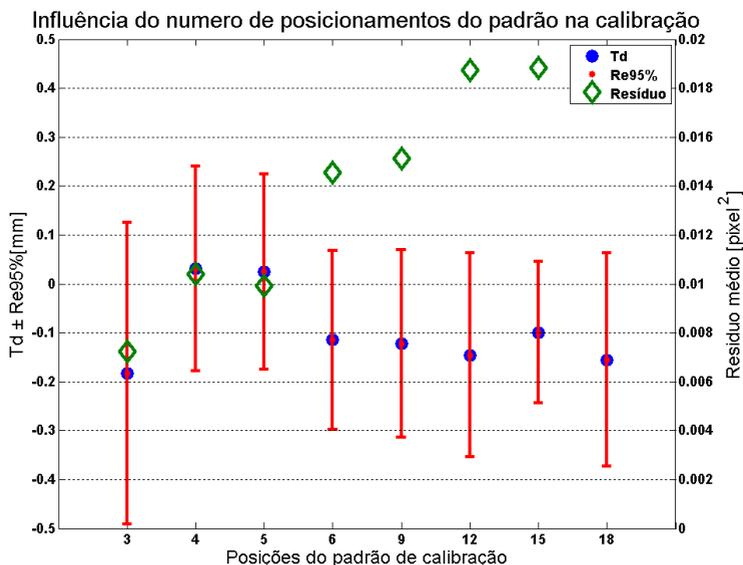


Figura 4-12 Estimativa de erros de medição e resíduo de calibração em função do número de posições do padrão.

Ao observar este gráfico é possível verificar que o menor erro máximo encontrado foi para cinco posicionamentos do padrão ($Emáx_{95\%} = 0,224$ mm). Avaliações posteriores utilizaram estes dados de calibração. Esta conclusão é válida apenas para este conjunto de dados adquiridos. Durante os experimentos realizados com calibração de câmeras foi observada uma grande variação dos resultados, que são fortemente afetados pela qualidade das imagens do padrão que são influenciadas pela posição e orientação e iluminação do padrão.

Existe uma tendência do resíduo de reprojeção crescer com o número de imagens devido à dificuldade de encontrar parâmetros que minimizem os resíduos para uma quantidade maior de diferentes configurações do padrão de calibração, devido a imperfeições no próprio padrão e limitações do modelo matemático utilizado.

Por sua vez, uma quantidade pequena de imagens (e.g. 3) resulta num resíduo pequeno porque o modelo encontra mais facilmente parâmetros que minimizam o erro para estas posições do padrão, mas quando pontos são medidos em outras regiões o erro de medição de distância aumenta significativamente. Além disso, os poucos posicionamentos do padrão não permitem adquirir imagens com este em diferentes orientações, que gera problemas de condicionamento numérico que deterioram o cálculo dos parâmetros de calibração.

Pelos motivos expostos, geralmente 4 ou 5 posições do padrão equilibra uma pequena quantidade de imagens a uma configuração adequada de posicionamentos do padrão. Estes resultados são aplicáveis à configuração aqui avaliada, uma vez que foi observada uma grande variação dos resultados com a mudança de características do sistema como configuração e posicionamentos do padrão de calibração, ângulo entre câmeras, comprimento focal, distorção e qualidade das lentes.

As avaliações posteriores utilizaram os dados de calibração para cinco posicionamentos do padrão.

4.3.1.2 Tipo de calibração

A calibração das câmeras e projetor é realizada através de diversas etapas e estimativas intermediárias dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos de calibração, conforme detalhado no **Anexo A**. Frequentemente estes dados intermediários são utilizados para realizar medições porque são abordagens mais simplistas tanto para entendimento quanto para implementação de programas para calibração de câmeras. Para mostrar que um modelo mais completo para calibração de câmeras pode resultar em uma melhora significativa dos resultados de medição, foi realizado o cálculo dos erros de medição de distância (com padrão unidimensional conforme VDI/VDE2634-1) para cada tipo de calibração. Os diversos passos realizados na calibração visam estimar parâmetros suficientemente próximos do mínimo global para a otimização não-linear final. A estimativa dos erros de medição em função de cada passo na calibração pode ser visualizada na Figura 4-13.

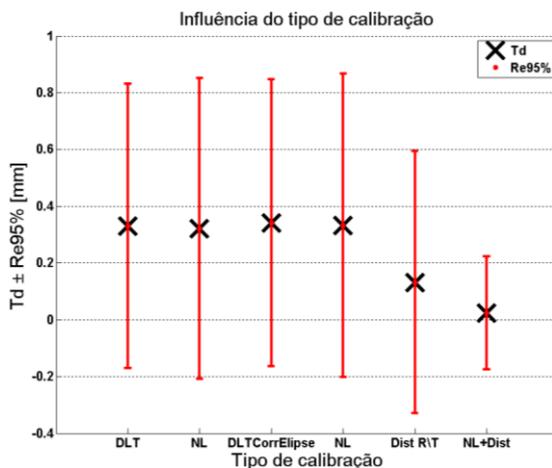


Figura 4-13 Estimativa dos erros de medição em função da etapa de calibração.

Tabela 3 – Erro máximo em função da etapa de calibração utilizada.

#	Tipo de calibração		Emáx [mm]
1	DLT	Estimativa linear	0,832
2	NL	Refinamento não linear	0,852
3	CorrElipse	DLT correção do centro das elipses	0,848
4	NL	Refinamento não linear	0,867
5	Dist R/T	Estimativa distorção radial tangencial	0,593
6	NL+ Dist	Refinamento NL com distorção R/T	0,224

A interpretação do gráfico permite verificar que não existe alteração significativa dos resultados até introdução da estimativa de distorção radial e tangencial das lentes. Isto se deve à grande influência destas distorções na lente utilizada. Quando é realizado uma otimização não-linear de todos os parâmetros o resultado melhora em mais de 60%, mostrando que os parâmetros de calibração possuem significativa interdependência.

4.3.1.3 Calibração do projetor

Os algoritmos utilizados para calibração do projetor são praticamente os mesmos utilizados nas câmeras. A principal diferença vem na determinação da projeção dos centros dos alvos do padrão no plano imagem do projetor. Esta determinação pode ser realizada com o auxílio

de uma ou das duas câmeras do sistema. A descrição completa dos algoritmos de calibração de câmera e projetor se encontra no **Anexo C**.

Foi realizado um experimento para determinar se existe diferença em como são utilizados estes dados no resultado da medição. Um plano de referência foi medido por projeção de franjas e a nuvem de pontos resultante da triangulação com as duas câmeras foi tomada como referência.

Nuvens de pontos calculadas por triangulação, incluindo o mapa de fase teórico do projetor e seus dados de calibração, foram comparadas através da diferença de suas coordenadas Z, uma vez que as medições foram realizadas numa grade regular em X e Y.

Na tabela abaixo estão os resultados das diferentes combinações para triangulação e calibração, que são os erros máximos (95%) em relação ao plano medido de referência. A Figura 4-14 mostra a diferença ponto a ponto de cada medição. Sendo Cam0 a câmera direita do sistema e Cam1 a câmera esquerda.

Tabela 4 – Erro máximo em função da combinação para triangulação e calibração do projetor.

Triangulação	Calibração do projetor	Emáx [mm]
Cam0 – Cam1 – Projetor	Cam0 – Cam1	0,008
Cam0 – Cam1 – Projetor	Cam0	0,006
Cam0 – Cam1 – Projetor	Cam1	0,029
Cam0 – Projetor	Cam0 – Cam1	0,214
Cam0 – Projetor	Cam0	0,120
Cam0 – Projetor	Cam1	0,618
Cam1 – Projetor	Cam0 – Cam1	0,211
Cam1 – Projetor	Cam0	0,117
Cam1 – Projetor	Cam1	0,644

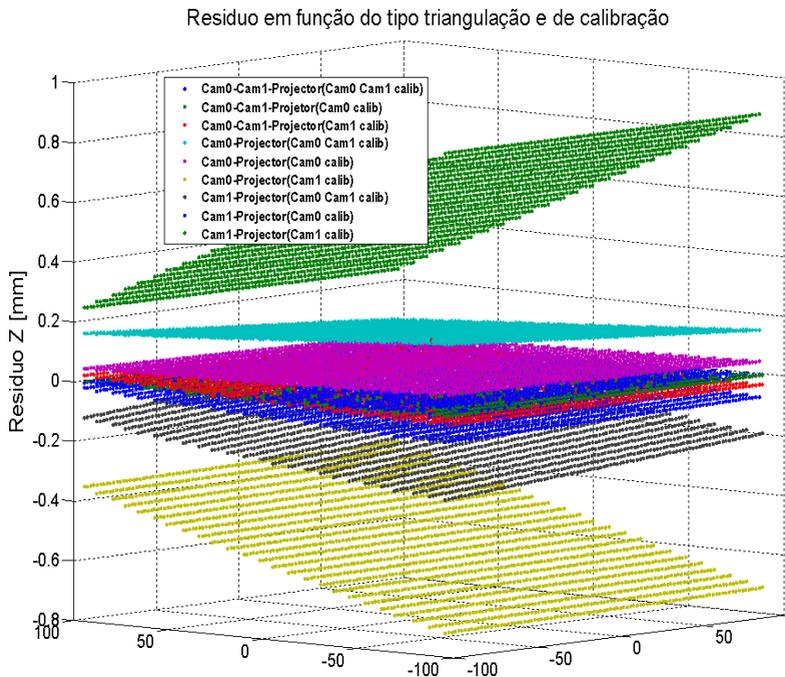


Figura 4-14 Diferença entre medições para diferentes configurações de triangulação e calibração do projetor.

Os menores erros de medição podem ser encontrados quando a triangulação é realizada com as duas câmeras em conjunto com o projetor. Esta característica pode ser interpretada como resultado de uma comparação com a medição com as duas câmeras, que foram utilizadas para a medição de referência. Mas também existe a influência benéfica de uma maior quantidade de informação sobre a medição, uma vez que são utilizados três mapas de fase ao invés de apenas dois.

Foi observado que a calibração com apenas a Cam1 está influenciando de forma negativa os erros, provavelmente por alguma imperfeição na lente utilizada por esta câmera.

Com base nos dados expostos, a melhor configuração para calibração do projetor é utilização da Cam0. Sem a realização de ensaios para determinar se existe uma câmera com resultados melhores do que outra, a melhor opção passa a ser a utilização de ambas as câmeras na calibração do projetor, uma vez que mesmo com a influência de uma câmera com erro significativamente maior, é possível realizar a

triangulação com qualquer combinação de forma mais confiável do que utilizar uma câmera que possa ter dados ruins.

4.3.2 Estereofotogrametria

A estereofotogrametria realiza a medição dos alvos, que possibilitam realizar posteriormente a concatenação das nuvens de pontos. Nesta seção são detalhadas as avaliações para a determinação da melhor configuração do sistema para estas medições. Os dados resultantes são baseados nas mesmas imagens adquiridas do padrão unidimensional de pinos utilizada nas outras avaliações semelhantes. A medição de uma das posições do padrão pode ser visualizada na Figura 4-15 abaixo.



Figura 4-15 Padrão unidimensional sendo medido para avaliação segundo guia VDI/VDE 2634-1.

4.3.2.1 Processamento dos alvos

A partir da aquisição é necessária a determinação de centro de cada alvo para realizar a triangulação e determinar suas coordenadas 3D. Esta avaliação determinou a influência do tipo de processamento, que foram realizadas de três maneiras distintas: Centróide, após binarização da imagem por limiar determinado empiricamente; Elipse, ajustada a partir da determinação de pontos na borda, na direção radial com resolução sub-pixel (360 pontos); Correção de excentricidade do centro da elipse ajustada. A Figura 4-16 mostra a estimativa dos erros de medição de distância, para cada tipo de processamento dos alvos.

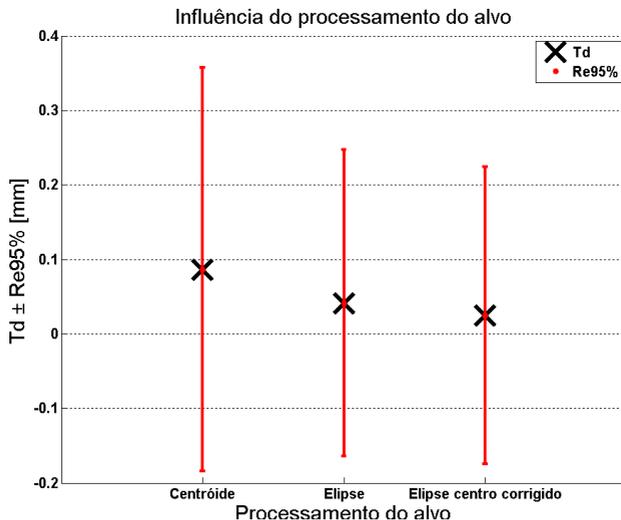


Figura 4-16 Influência do processamento dos alvos no erro de medição de distância.

O ajuste da elipse apresenta um desempenho melhor que o centróide binário porque utiliza resolução subpixel na determinação da borda e não é tão susceptível a influência da variação de intensidade na imagem e do limiar de binarização, uma vez que determina cada ponto da borda na metade do contraste entre o alvo e o entorno, para cada direção radial. Por sua vez, a correção do erro de excentricidade da elipse retira uma componente sistemática de deslocamento do centro do alvo, presente tanto no caso do centróide como na elipse ajustada, resultando na melhor opção de processamento.

4.3.2.2 Erro de medição de distância

Esta seção detalha a avaliação de erro de medição de distancia, segundo guia VDI-VDE 2634 Parte 1. Um padrão unidimensional foi construído segundo recomendações do guia e calibrado em máquina de medir por coordenadas de referência com $E_{\max 95\%}$ de 0,004 mm. O alvo foi projetado e fabricado para possibilitar a calibração do padrão por apalpação mecânica e garantir uma definição de sua borda com alto contraste para apalpação óptica. É composto por um cilindro ($\varnothing 8 \times 3,5 \text{ mm}$), com uma face pintada de branco fosco, inserida com interferência em um anel usinado e anodizado preto fosco ($\varnothing 12 \times 4 \text{ mm}$). Um detalhe do cilindro montado pode ser visualizado na Figura 4-17.

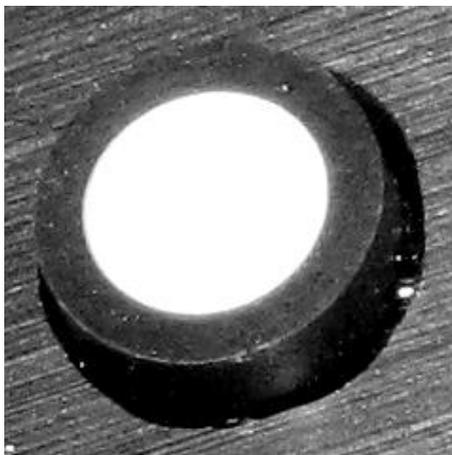


Figura 4-17 Cilindros concêntricos montados utilizado como alvo.

As posições do padrão no volume de medição recomendadas pelo guia são impraticáveis devido à configuração física do sistema. Posições adequadas para realizar a medição e que buscam mapear os erros no volume de medição do sistema foram utilizadas e são mostradas na Figura 4-18 abaixo.

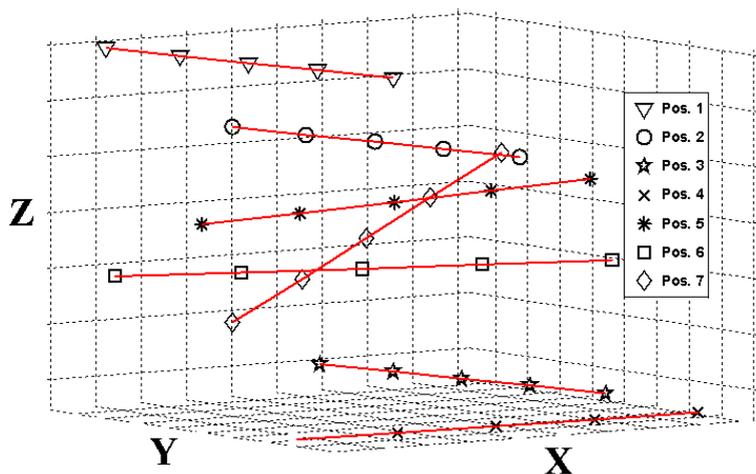


Figura 4-18 Posições efetivas do padrão unidimensional no volume de medição do sistema.

Todas as dez possíveis combinações de distâncias entre os cinco alvos do padrão foram calculadas e comparadas com os valores de

referência. Cada erro de medição de distância pode ser visualizado na Figura 4-19, que também indica a linha de erro máximo das medições realizadas (0,284 mm) e a linha de erro máximo estatístico para 95% de confiabilidade (0,224 mm).

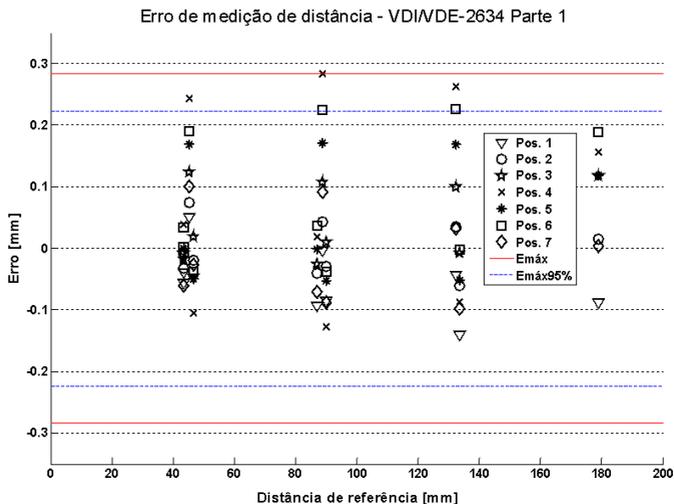


Figura 4-19 Gráfico de erros de medição de distância segundo VDI/VDE 2634 Parte 1.

Os maiores erros podem ser encontrados nas posições (4-5-6), em que o padrão se encontra mais alinhado ao eixo X do sistema de medição. Isto deve ocorrer porque nesta direção é a que ocorre a maior variação da magnificação entre cada alvo do padrão, devido à posição rotacionada das câmeras em torno do eixo Y, e esta variação é ainda inversa entre as câmeras. Um pequeno erro na determinação da magnificação na calibração das câmeras teria sua influência aumentada por causa desta configuração. Possivelmente um ângulo menor entre as câmeras diminua este efeito em particular, mas tenderia a piorar o desempenho do sistema com um todo. Nas demais posições os erros de medição não superaram $\pm 0,15$ mm.

4.3.3 Topogrametria

Esta seção detalha as avaliações realizadas com medição por projeção de franjas. São apresentados resultados decorrentes de variações de parâmetros de ajuste, comparação com uma técnica diferente da proposta na tese para medição de nuvem de pontos e a avaliação de

desempenho do sistema no modo topográfico segundo guia VDI/VDE. A Figura 4-20 mostra a medição sendo realizada.



Figura 4-20 Sistema realizando a medição de um plano de referência.

4.3.3.1 Ajuste de parâmetros

Diversos parâmetros influenciam na qualidade dos mapas de fase adquiridos. A variação destes parâmetros foi avaliada com a aquisição de mapas de fase sobre um plano de referência com erro de planeza de 0,05 mm, medido em máquina de medir por coordenadas de referência.

A utilização de um projetor multimídia convencional não permite uma sincronização por conexão física (por *hardware*) entre a projeção e a aquisição da imagem. Esta impossibilidade gera oscilações na intensidade das imagens adquiridas, que são dependentes do tempo de integração da câmera (*shutter time*). Teoricamente, o tempo de integração da câmera deve ser igual ou um múltiplo do tempo de atualização da imagem do projetor. Quando isto não ocorre, é introduzido um erro de sincronização que degrada a qualidade dos mapas de fase.

Foi realizado um experimento onde a variação de intensidade média na imagem, para 60 imagens adquiridas, para cada valor de tempo de integração foi analisada. Para buscar manter um nível de intensidade constante nas imagens, o ganho foi variado linearmente entre o menor e o maior tempo de integração avaliada. A utilização da média de intensidade para cada imagem adquirida compensa a variação de ruído causada pela variação do ganho entre as aquisições.

O gráfico mostrado na Figura 4-21 mostra o desvio padrão normalizado das intensidades adquiridas em função do tempo de

integração das câmeras, onde cada vale indica valores onde ocorre uma melhor sincronização entre a projeção e aquisição das imagens.

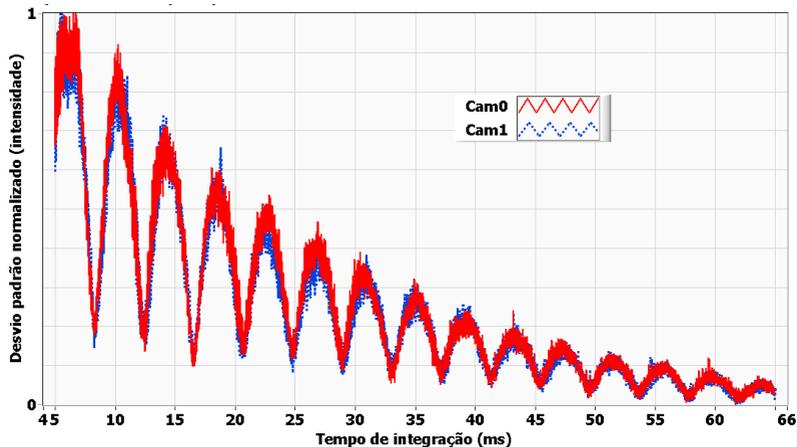


Figura 4-21 Variação da intensidade média da imagem em função do tempo de integração da câmera.

É possível observar no gráfico que os valores de tempo de exposição que acarretam uma menor variação de intensidade na imagem adquirida estão relacionados com a frequência de atualização do projetor, neste caso 60 Hz que equivale a um período de 16,67 ms para a atualização de uma imagem completa projetada, que pode ser observado com um ponto de vale no gráfico.

A Figura 4-22 abaixo mostra a influência desta variação no mapa de fase para dois valores de tempo de integração, 31,00 ms em (a) que acarreta em uma amplitude de ~ 45 mrad de resíduo e 33,34 ms em (b) que acarreta em uma amplitude de ~ 30 mrad de resíduo. Estes dados foram calculados para o deslocamento de fase de 4 passos com as franjas projetadas contendo 16 pixels por período e as imagens mostradas abaixo são os resíduos de fase filtradas com um passa-baixa 5x5, da Cam0.

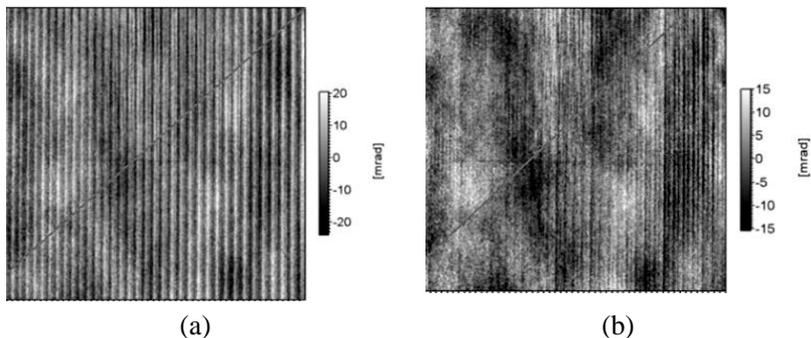


Figura 4-22 Resíduo da fase para (a) 31,00 ms e (b) para 33,34 ms de tempo de integração.

Além da diferença entre amplitudes, é possível observar um padrão mais intenso de linhas verticais para 31,00 ms de tempo de integração (um pico no gráfico) em relação ao tempo de integração de 33,34 ms (um vale no gráfico e que equivale a dois períodos de atualização do projetor). Este padrão surge porque uma variação de intensidade média equivale como a introdução de um erro no passo de deslocamento de fase, variável dependendo da fase atual do pixel.

Outro parâmetro que interfere na qualidade dos mapas de fase é o número de passos do deslocamento de fase. A não idealidade da projeção e aquisição da forma da senóide teórica faz com que ocorram distorções no mapa de fase. Um maior número de passos tende a minimizar estas distorções porque possibilita extrair a componente fundamental do sinal separando os harmônicos de ordem mais elevada de maneira mais adequada. Foi realizado um experimento que utilizou o deslocamento de fase em 4 e 8 passos, com tempo de integração de 33,34 ms e 16 pixels por período da franja projetada. Os resíduos das fases da Cam0 podem observados nas imagens da Figura 4-23, onde em (a) é mostrado o resíduo de fase para 4 passos, em (b) após a filtragem com um passa-baixas 5x5, em (c) o resíduo para 8 passos e em (d) após a filtragem com um passa-baixas 5x5.

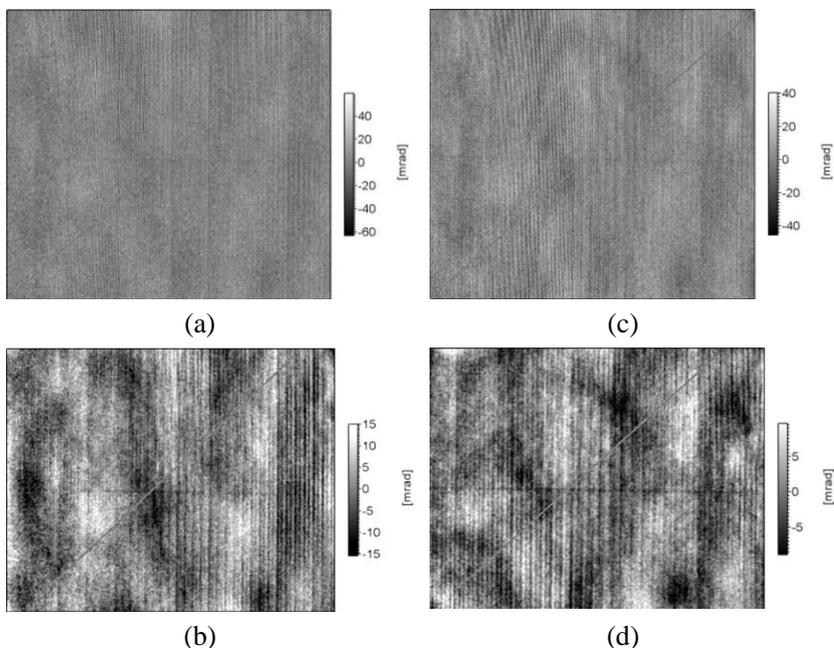


Figura 4-23 Resíduo da fase para (a) 4 passos, (b) 4 passos com filtro passa baixa, (c) 8 passos e (d) 8 passos com filtro passa baixa.

A amplitude do resíduo diminuiu de ~ 120 mrad para ~ 80 mrad com o aumento do número de passos de 4 para 8 (Figura 4-23 (a) e (c)). Experimentos com um sistema de pior qualidade, em que estes efeitos são mais severos, mostram que o aumento do número de passos para além de 8 não diminui de forma significativa a amplitude do resíduo, além de aumentar o número de imagens adquiridas e o tempo de medição. Ao aplicar um filtro passa baixas nestas imagens de resíduo é possível verificar ainda que o resíduo para 4 passos é maior do que para 8 passos, Figura 4-23 (b) e (d) respectivamente, mostrando que um número maior de passos diminui a influência da imagem não ideal da senóide, assim como o ruído na aquisição.

Quanto maior a frequência das franjas projetadas maior a sensibilidade do sistema (maior inclinação do mapa de fase). Por outro lado, franjas muito densas perdem a forma senoidal e limitam a inclinação da peça medida. Um experimento foi realizado variando o período das franjas projetadas, com 8 passos para deslocamento de fase e tempo de integração de 33,34 ms. O período das franjas é definido no programa como pixels por período da imagem projetada. Na Tabela 5 abaixo é mostrada a amplitude do resíduo de fase, a amplitude relativa à

fase máxima e a sensibilidade teórica na câmera para cada frequência de franja testada.

Tabela 5- Amplitude de resíduo e sensibilidade em função do período da franja projetada.

Período [pixels]	Amplitude resíduo [rad]	Amplitude relativa resíduo [%]	Sensibilidade [rad/pixel]	Fase máxima [rad]
4	0,50	0,040	0,79	1257
8	0,20	0,032	0,39	628
12	0,16	0,038	0,26	419
16	0,10	0,032	0,20	314
32	0,10	0,064	0,10	157
64	0,10	0,127	0,05	79

É possível observar pelos dados contidos na tabela que a amplitude do resíduo de fase diminui com o aumento do período (diminuição da frequência da senoide) das franjas projetadas, sendo que a partir do período de 16 pixels o resíduo se mantém constante. A sensibilidade, por sua vez, diminuiu com o aumento de pixels por período. Uma configuração ótima pode ser considerada a utilização de 16 pixels de período, pois possui a menor amplitude do resíduo e amplitude relativa aliada a maior sensibilidade. A amplitude relativa de 8 pixels por período tem o mesmo valor de 16 pixels por período, mas pode ser considerado no limite superior da frequência projetada, que limita a inclinação da peça a ser medida. No caso de 16 pixels por período a sensibilidade teórica ainda é o dobro da amplitude do resíduo de fase.

A partir das avaliações realizadas com o sistema para ajuste de parâmetros é possível determinar uma configuração ótima entre os valores testados. A tabela abaixo resume os principais parâmetros utilizados durante as demais avaliações.

Tabela 6 – Configuração recomendada de parâmetros do sistema.

Tempo de integração da câmera [ms]	n*16,67
Deslocamento de fase [passos]	8
Período das franjas projetadas [pixels]	16

4.3.3.2 Comparação entre técnicas de triangulação

O novo método proposto na tese (Zscan) para triangulação parte de informação 3D no sistema de coordenadas de interesse e verifica a informação de fase nas câmeras. Métodos anteriores (i.e. busca de homólogo) geralmente buscam pontos nas duas câmeras com mesma fase para então determinar a coordenada 3D correspondente através de triangulação. Neste contexto foi realizado um experimento que compara a medição de um mesmo plano (mesmos dados adquiridos) entre os dois métodos.

No método de busca de homólogo, para cada pixel avaliado de uma câmera (passo 3 pixel), foi determinado com resolução subpixel na outra câmera as mesmas fases nas direções vertical e horizontal. A partir da determinação dos pontos homólogos foi realizada a triangulação não-linear definida na revisão bibliográfica. No método Zscan, foi definido um passo regular de 0,5 mm na direção X e na direção Y do sistema de coordenadas da medição. A Figura 4-24 seguinte mostra uma vista do plano XY do sistema de coordenadas da medição, comum aos dois métodos.

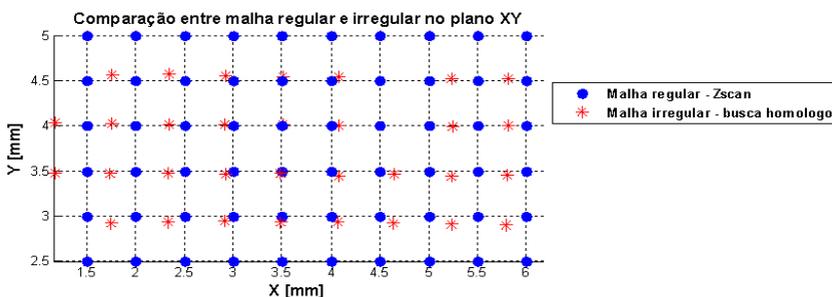


Figura 4-24 Pontos medidos pelo método Zscan e busca de pontos homólogos.

É possível observar na figura que a medição resultante do método de busca de homólogo resulta em uma nuvem de pontos não regular no plano XY, mesmo em condições favoráveis como a medição de um plano. Além disso, não é possível determinar a priori de forma precisa a

densidade de pontos sobre a peça e para um passo menor pode ser necessário realizar a determinação da fase nas duas câmeras com resolução subpixel. A medição com o método Zscan resulta em uma malha regular, com passo definido. Outro método de determinação de homólogos, que não foi testado, utiliza as restrições epipolares e mapas de fase somente em uma direção também resulta em uma malha não regular no sistema de coordenadas da medição, semelhante ao método testado que utiliza as duas direções de fase.

A planeza das duas medições do plano foi definida numa área de $(150 \times 50) \text{ mm}^2$, como sendo o erro máximo estatístico para 95% de confiabilidade. A planeza medida com o Zscan foi de 0,034 mm e com a busca de homólogos de 0,054 mm. Ao analisar a diferença entre as nuvens de pontos foi possível observar que ocorreu um erro sistemático, como mostra o gráfico na Figura 4-25 abaixo.

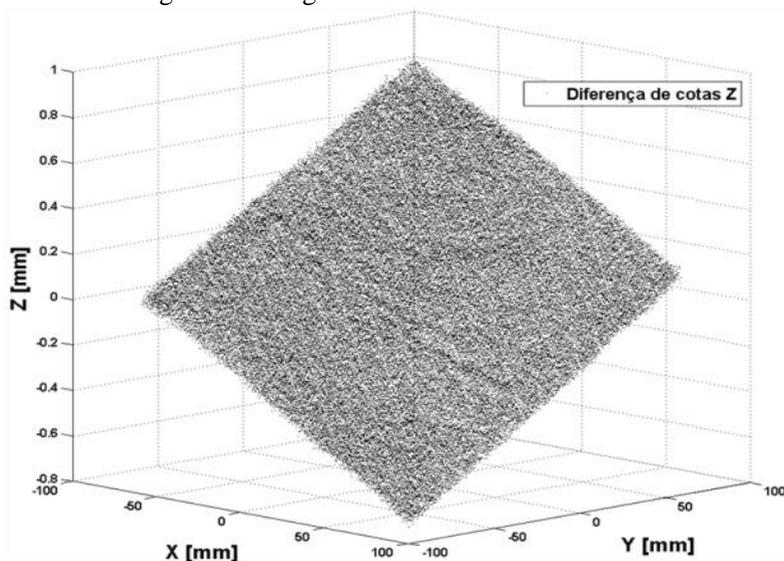


Figura 4-25 Diferença entre as nuvens de pontos

Para determinar as causas da diferença sistemática entre as nuvens de pontos medidas foram analisados os mapas de fase utilizados para determinação dos pontos homólogos. A Figura 4-26 mostra os resíduos dos mapas de fase depois de ser subtraído o plano ajustado no mapa original.

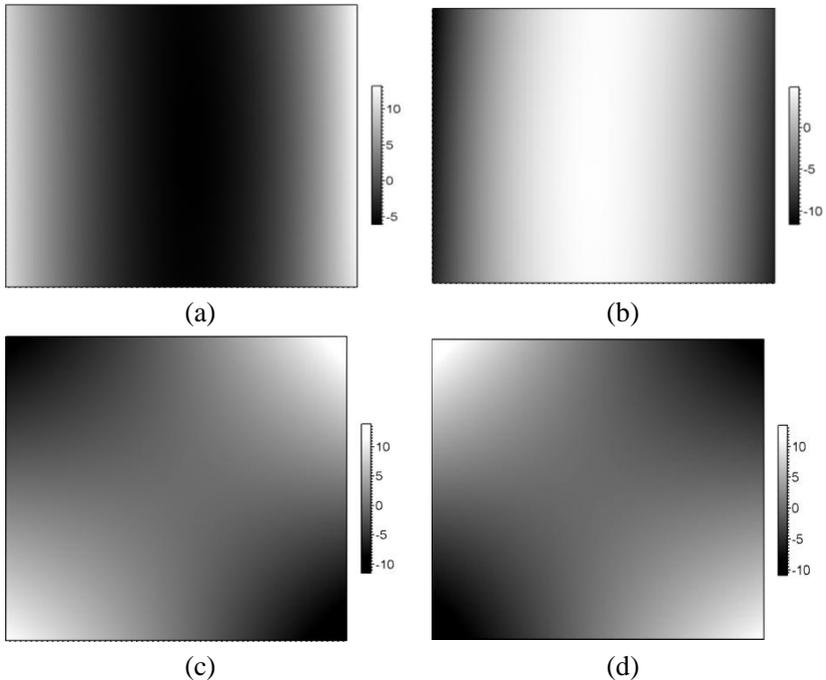


Figura 4-26 Resíduo [rad] dos mapas de fase (a) Cam1 vertical e (c) horizontal e (b) Cam0 vertical e (d) horizontal

É possível observar que os resíduos dos mapas de fase horizontais possuem a distorção de uma forma distinta dos resíduos de fase vertical. Estas distorções, tipo cela, são causadas pela direção horizontal das franjas projetadas que são observadas como franjas não paralelas pelas câmeras, em direções opostas para cada câmera, sobrepostas ao efeito da diferença de magnificação devido à inclinação da câmera em relação ao plano medido.

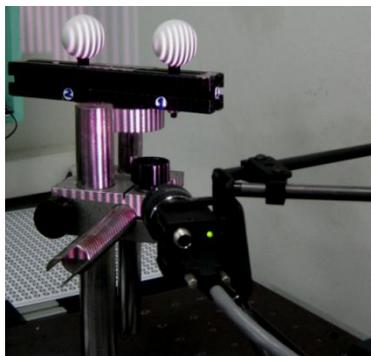
Enquanto no algoritmo Zscan são utilizados apenas os mapas de fase verticais, no algoritmo de busca de homólogos são utilizados os dois mapas de fase (vertical e horizontal) para cada câmera, o que pode estar introduzindo erros sistemáticos na detecção dos homólogos e conseqüentemente no cálculo dos pontos tridimensionais. Os mapas de fase na direção horizontal resultam em uma sensibilidade baixa em relação à disposição das câmeras, acarretando em uma relação sinal/ruído pior nesta direção.

Além disso, no algoritmo Zscan, cada ponto 3D testado respeita intrinsecamente as restrições epipolares do sistema. Na busca de pontos

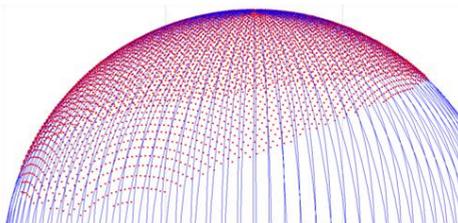
homólogos utilizada, não há garantias que estes pontos homólogos detectados respeitem a geometria epipolar do sistema, o que também pode estar introduzindo erros sistemáticos nas medições. Testes utilizando as restrições epipolares e apenas uma direção dos mapas de fase para detecção de pontos homólogos devem ser realizados para verificar se estes erros sistemáticos mantêm o mesmo padrão.

4.3.3.3 Avaliação VDI/VDE 2634 Parte2

O guia VDI/VDE indica a utilização de dois tipos de padrão para a avaliação deste tipo de sistema: um plano de referência e um artefato com duas esferas. Uma imagem mostrando o sistema medindo o padrão de esferas pode ser visualizada na Figura 4-27 abaixo.



(a)



(b)

Figura 4-27 Medição de esferas e (b) calota de pontos medidos e esfera ajustada.

A distância entre os centros das esferas foi definida em calibração em máquina de medir por coordenadas ($U_{95\%} = 0,005$ mm) como 112,5647 mm e diâmetros 50,0537 mm e 50,0501 mm, com erros de forma de 0,013 mm e de 0,010 mm da esfera 1 e da esfera 2 respectivamente.

O sistema de medição realizou a medição de calotas das esferas em posições aproximadas ao indicado pelo guia. As posições efetivamente medidas podem ser vistas na Figura 4-28.

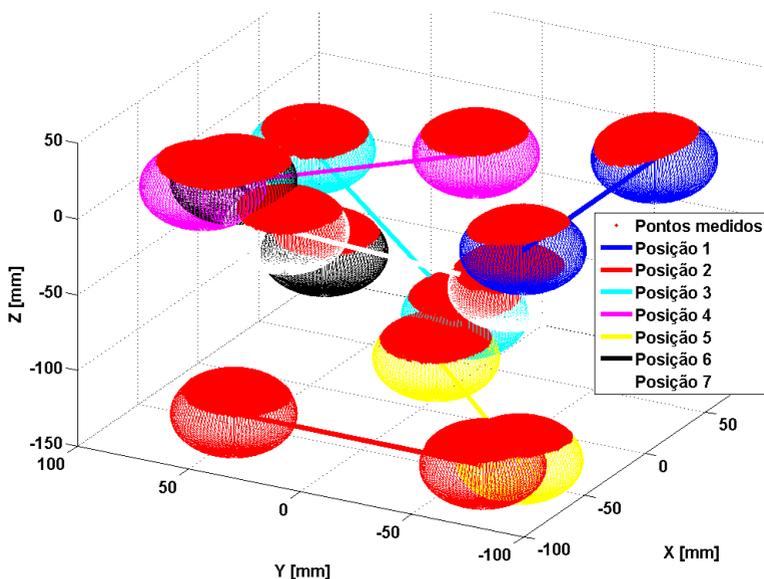


Figura 4-28 Posições efetivamente medidas das esferas no volume de medição do sistema.

Os resultados mostrando as diferenças entre os valores medidos e os de referência, calculados com base nas aquisições das 7 posições do padrão, são mostrados na Tabela 7 abaixo, sendo R o erro de apalpação e SD o erro de distância entre os centros das esferas:

Tabela 7 – Erro máximo de apalpação e de distância entre centros das esferas.

Posição	RA (Esfera 1) [mm]	RA (Esfera 2) [mm]	SD [mm]
1	0,104	0,091	-0,048
2	0,210	0,188	-0,167
3	0,097	0,180	-0,471
4	0,095	0,088	-0,034
5	0,177	0,198	-0,151
6	0,141	0,090	-0,390
7	0,135	0,089	-0,253

Como resultado, o erro máximo de apalpação RA é de 0,210 mm e o erro máximo de distância entre esferas SD é de -0,471 mm. O maior

erro de apalpação ocorreu na posição do padrão mais afastado do sistema e o maior erro de distância entre esferas ocorreu na posição com maior diferença de profundidade na coordenada Z.

Para determinar o erro de medição de planeza RE, foi realizada a medição de planos de referência em distintas posições do volume de medição com indica o guia VDI/VDE. As medições efetivamente realizadas podem ser visualizadas na Figura 4-29.

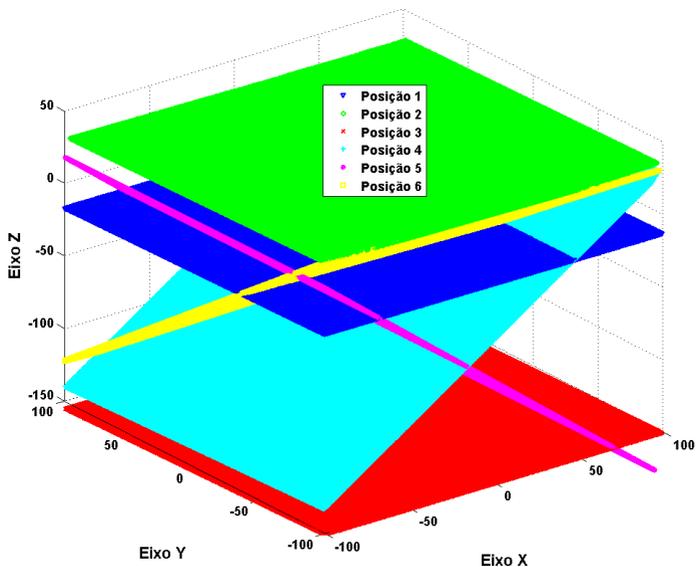


Figura 4-29 Posições medidas do plano de referência no volume de medição do sistema.

A Tabela 8 abaixo mostra os resultados da análise das nuvens de pontos adquiridas para as diversas posições do plano.

Tabela 8 – Erros de planeza para cada posição do plano de referência.

Posição	Área adquirida (200 x 200) mm ²		Área recomendada (50 x 200) mm ²	
	RE [mm]	Emáx [mm]	RE [mm]	Emáx [mm]
1	0,160	0,053	0,139	0,043
2	0,124	0,042	0,106	0,032
3	0,320	0,104	0,315	0,098
4	0,264	0,075	0,254	0,071

5	0,241	0,078	0,249	0,068
6	0,327	0,099	0,235	0,076

O erro de medição de planeza (RE) foi definido como 0,315 mm para a posição 3 indicada pelo guia, que é a posição mais distante do sistema (menor cota Z). Os dados analisados estatisticamente para 95% de confiança (Emáx) também indicam a posição 3 como a de maior repetitividade. A posição 2 foi que obteve o menor erro de medição de planeza. Esta posição é próxima a origem do sistema de coordenadas, onde foi colocado o padrão para calibração de ambas as câmeras simultaneamente, resultando em menores erros nesta região. Nas outras posições, ou a posição do plano medido não era a mesma do padrão de calibração das câmeras, ou a mesma imagem do padrão nestas regiões não foram utilizadas para a calibração das duas câmeras. Corroborando esta conclusão, as posições inclinadas do plano (4,5 e 6) têm um erro intermediário entre as posições próximas (1 e 2) e a afastada (3).

4.3.3.4 Comparação de superfícies.

Para testar a comparação entre superfícies, foi realizada a medição de diferença entre superfícies através do deslocamento de um plano de forma controlada com a utilização de blocos padrão. O experimento buscou determinar o erro para grandes e pequenos deslocamentos dentro do volume de medição do sistema. A diferença entre as superfícies foi calculada através da subtração direta das coordenadas Z para cada X,Y da malha regular e coincidente entre as superfícies medidas. O deslocamento foi realizado na direção do eixo Z.

Para os grandes deslocamentos, os valores medidos podem ser observados na Tabela 9 e no gráfico da Figura 4-30.

Tabela 9 – Erros de medição de distância entre superfícies.

Deslocamento [mm]	Medido [mm]	Td [mm]	Re_{95%} [mm]	% erro
9	8,945	-0,055	0,039	-0,61
29	28,827	-0,173	0,051	-0,60
59	58,661	-0,339	0,076	-0,58
99	98,413	-0,587	0,108	-0,60
169	167,854	-1,146	0,188	-0,68

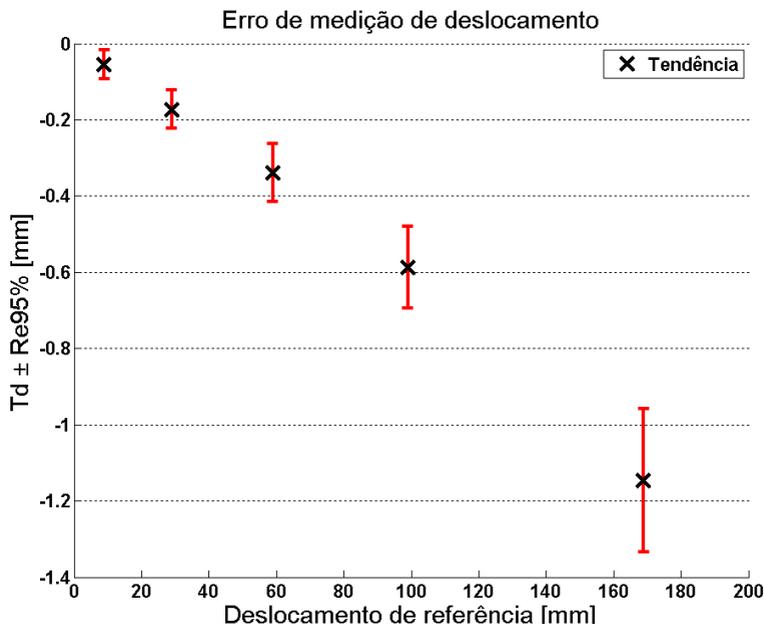


Figura 4-30 Estimativa dos erros de medição de distância.

É possível observar que quanto maior o deslocamento, maior o erro e a variação de medição, possivelmente causado por erros residuais nos parâmetros de calibração das câmeras, como comprimento focal das lentes, que se traduz em erros de magnificação. No maior deslocamento medido (~170 mm) foi encontrado o maior erro porque são utilizadas medições dos extremos da coordenada Z, que mostram erros mais elevados, como mostrado em avaliações citadas anteriormente. Além disso, existe possivelmente, uma contribuição da falta de rigidez da montagem desta bancada onde um plano se movimenta sobre uma guia para diversas posições sucessivamente, sendo o deslocamento de 170 mm o resultado de diversos deslocamentos consecutivos. Para pequenas diferenças, como esperado entre a fabricação de uma peça e seu desenho CAD, os erros são suficientemente pequenos para diversos tipos de aplicação.

Para determinar a resolução do sistema na direção Z, foram realizados pequenos deslocamentos do plano para determinar qual o menor deslocamento que o sistema consegue captar, e os resultados podem ser visualizados na Tabela 10 seguinte.

Tabela 10 – Determinação da resolução em Z do sistema.

Deslocamento [mm]	Medido [mm]	Td [mm]	Re _{95%} [mm]	% erro
1	0,981	0,019	0,059	1,94
0,5	0,500	0,000	0,056	0,08
0,1	0,113	-0,013	0,055	-11,43
0,05	0,064	-0,014	0,055	-21,88
0,01	0,023	-0,013	0,055	-56,52
0,005	0,018	-0,013	0,054	-72,07
0,001	0,014	-0,013	0,055	-92,86

Ao analisar os dados da Tabela 10 é possível afirmar que o sistema é capaz de captar diferenças de até 0,1 mm, podendo esta ser considerada a resolução do sistema. Nesta faixa de deslocamento a repetitividade (Re_{95%}) ainda permanece na ordem de 50% do valor medido, sendo que um deslocamento menor da tabela já é da mesma ordem do desvio.

Para determinar a resolução lateral nas direções X e Y é necessário outro tipo de dispositivo não disponível no laboratório. Um exemplo deste tipo de dispositivo é um padrão com ranhuras de largura variável. A medição deste padrão é analisada de modo a determinar qual a menor largura que o sistema consegue medir, possibilitando determinar a resolução lateral em uma das direções de cada vez.

Um experimento com uma mesa-seno foi realizado para determinar os erros de medição de ângulo do sistema. Uma imagem do sistema de medição adquirindo imagens sobre um plano que pode ser inclinado com ângulos conhecidos é mostrado na Figura 4-31.



Figura 4-31 Sistema medindo um plano que pode ser inclinado com ângulos conhecidos.

Para o cálculo do ângulo medido pelo sistema, um plano matemático foi ajustado para cada aquisição e os parâmetros do plano matemático foram utilizados para o cálculo do ângulo. O gráfico da Figura 4-32 abaixo mostra a tendência na medição do ângulo em função do ângulo de referência.

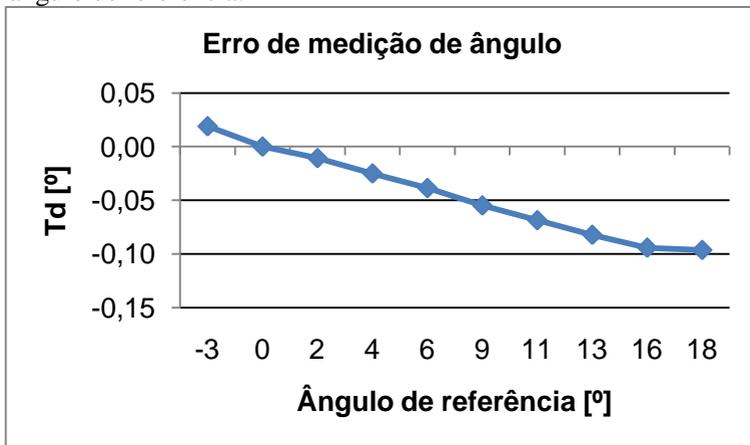


Figura 4-32 – Gráfico de tendência em função de ângulo entre planos de referência.

É possível observar no gráfico que o módulo da tendência de medição de ângulo aumenta com o aumento do ângulo de referência.

4.3.4 Sinalização

A sinalização de peças por projeção de mapas de cores visa auxiliar a inspeção de parâmetros de interesse sobre a própria peça, podendo ser considerada uma técnica de realidade aumentada. Foram realizados alguns experimentos qualitativos para avaliar a técnica. A projeção de um mapa de cores que sinaliza a diferença entre medições realizadas sobre o plano fixado sobre a mesa-seno, em diferentes ângulos, buscou verificar se as linhas que indicam as iso-diferenças estavam alinhadas ao eixo de rotação da mesa-seno. Outro experimento qualitativo foi a realização da medição e da projeção de um mapa de cores e iso-linhas associado as cotas Z da peça medida, no formato de uma cratera com formas livres construída manualmente. As imagens da Figura 4-33 mostram em (a) uma escala de cores associadas a diferença entre superfícies e iso-linhas a cada 5 mm e em (b) uma escala de cores associadas a cota Z da peça com iso-linhas a cada 2 mm em Z.

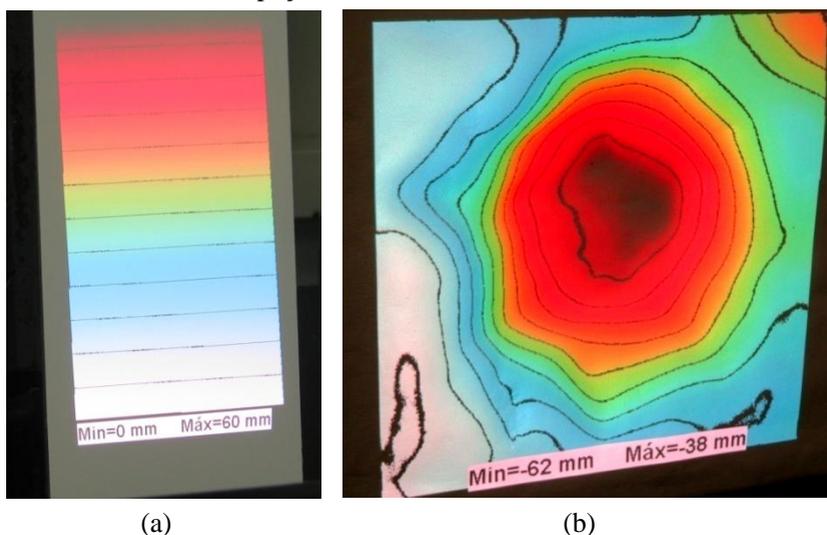


Figura 4-33 Projeção de mapas de cores sobre as superfícies sinalizando parâmetros de interesse.

É possível observar também a indicação de valores e mínimo e máximo nas imagens, sendo as diferenças em Figura 4-33 (a) e as cotas Z relativas ao sistema de coordenadas em Figura 4-33 (b).

Apesar de não ter sido realizado nenhum experimento quantitativo para avaliar a exatidão das projeções utilizadas para sinalização, os algoritmos utilizados para o cálculo da imagem a ser

projetada são os mesmos do que os utilizados para a busca da cota Z no método desenvolvido para cálculo da nuvem de pontos, validados pelos experimentos realizados. Assim, não se esperam erros na indicação de parâmetros de interesse sobre a superfície, através de mapas de cores ou similares, maiores do que encontrados nas medições. Os maiores erros devem estar presentes na associação da cor para um determinado ponto se estiver sendo calculada a diferença entre superfícies, mas não na posição do ponto em si, que depende apenas da medição da posição atual da superfície sendo sinalizada.

4.4 MÚLTIPLOS POSICIONAMENTOS DO SISTEMA

A concatenação de múltiplas aquisições de nuvens de pontos requer a utilização de marcas sobre a peça para a estimativa inicial da movimentação deste que posteriormente é refinada com base em pontos medido sobre a superfície. Uma avaliação das etapas de concatenação e refinamento entre as nuvens de pontos é realizada com a medição de um plano e posteriormente são apresentados os resultados da medição de um corpo de prova de grandes dimensões, que necessitou de aproximadamente 60 aquisições para a representação do corpo de prova.

4.4.1 Concatenação e comparação

Para analisar as diversas etapas de concatenação de distintas aquisições parcialmente sobrepostas, foi realizado um experimento onde foram adquiridos dados para seis posições do sistema de modo a medir a forma de um plano de referência de aproximadamente (300×350) mm². A Figura 4-34 mostra a concatenação das medições segundo uma única malha regular.

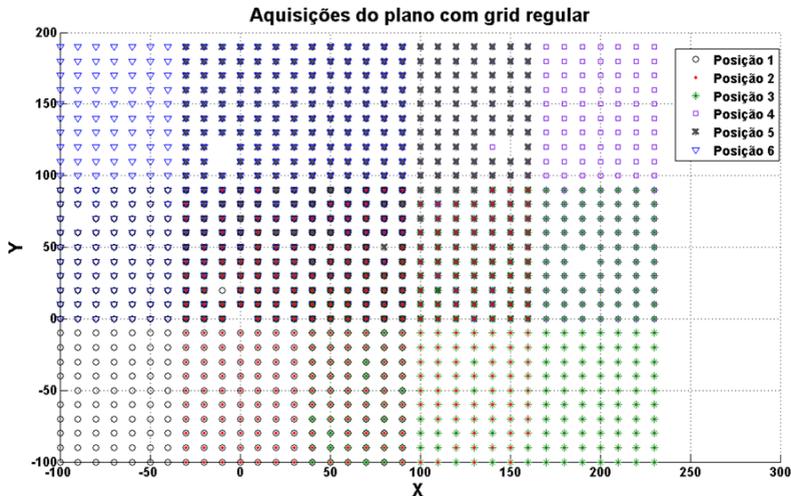


Figura 4-34 Distintas medições do plano referência concatenadas em uma única malha regular.

Para cada etapa do processamento os pontos de todas as aquisições foram colocados em um único conjunto e a diferença em relação a um plano ajustado foi avaliada.

As etapas de processamento são:

- Transformação das nuvens de pontos independentes para cada postura do sistema para o sistema de coordenadas comum definido pela primeira aquisição;
- Cálculo da malha regular estendida para todas as posições do sistema, sendo que a sobreposição de parte da aquisição resulta em uma parte de pontos sobrepostos com mesmos valores nas coordenadas X e Y, podendo diferir na coordenada Z;
- Utilização de pontos medidos sobre a superfície (ao invés dos alvos) para refino da transformação previamente calculada com os alvos, resultando em uma malha não regular;
- Recálculo da malha regular com as transformações refinadas.
- Cálculo da média das coordenadas Z para mesmo XY, resultando numa única malha regular.

A Tabela 11 abaixo mostra o erro máximo para 95% de confiabilidade ($Emáx$) e o erro de medição de planeza (RE) para cada etapa da concatenação.

Tabela 11 - Erros em função do passo de concatenação.

#	Tipo de concatenação	Pontos superfície		Alvos	
		Emáx [mm]	RE [mm]	Emáx [mm]	RE [mm]
1	Somente alvos	0,097	1,558	0,253	0,401
2	Malha regular inicial	0,092	0,318		
3	Refino pontos da malha	0,081	0,298	0,241	0,368
4	Recálculo malha regular	0,081	0,294		
5	Malha única - média de Z	0,081	0,099	0,276	0,327

A primeira etapa apresenta erro maior porque a transformação calculada apenas pelos alvos, normalmente de 3 a 7, apresenta ainda um resíduo na transformação calculada, que é compensado em parte quando um novo cálculo da malha regular é realizado na etapa 2. O cálculo dos pontos na etapa 2 facilita muito a busca de pontos correspondentes entre as nuvens de pontos, já que os pontos correspondentes entre aquisições distintas passam a ter a mesma coordenada X e Y . Normalmente esta busca e refinamento requerem um grande esforço computacional, por exemplo, realizando a busca de correspondência entre pontos mais próximos e transformações de modo iterativo.

O refinamento da transformação calculado através dos pontos correspondentes, na etapa 3, diminui os erros já que melhora o alinhamento entre as nuvens de pontos, mas faz com que as coordenadas X e Y entre as nuvens de pontos passem a não ser mais exatamente iguais. Por isso surge a necessidade de um novo cálculo das nuvens de pontos segundo uma malha regular novamente na etapa 4. Nesta etapa não há uma melhora significativa dos erros, mas agora a malha volta a ser regular.

Na etapa 5 os pontos que foram medidos em mais de uma postura do sistema, possuem mais de um valor Z para cada XY . Nestes casos é realizada a média da coordenada Z , resultando em um erro de medição de planeza, uma vez que o ruído na medição e a influencia de pontos espúrios é minimizada. Os erros de medição de planeza calculados com os alvos, também melhoram através das etapas de concatenação, mas o resultado final permanece significativamente maior do que o erro de planeza para pontos medidos sobre a superfície por projeção de franjas.

4.4.1.1 Medir forma livre de grandes dimensões

Um corpo de prova que possui uma superfície com geometria de forma livre foi especialmente construído e medido pelo sistema desenvolvido. O corpo de prova com dimensões aproximadas de (1200 x 450 x

100) mm³ e medições de referência foram realizadas em uma máquina de medir por coordenadas cartesianas (MMC) com incerteza de $U_{95\%} = 0,016$ mm para estas medições. As medições de referência foram realizadas para determinar a posição dos alvos cilíndricos, do mesmo tipo utilizado no padrão unidimensional, e a posição de pontos sobre a superfície. Uma fotografia do corpo de prova sendo medido na MMC pode ser visualizada na Figura 4-35.

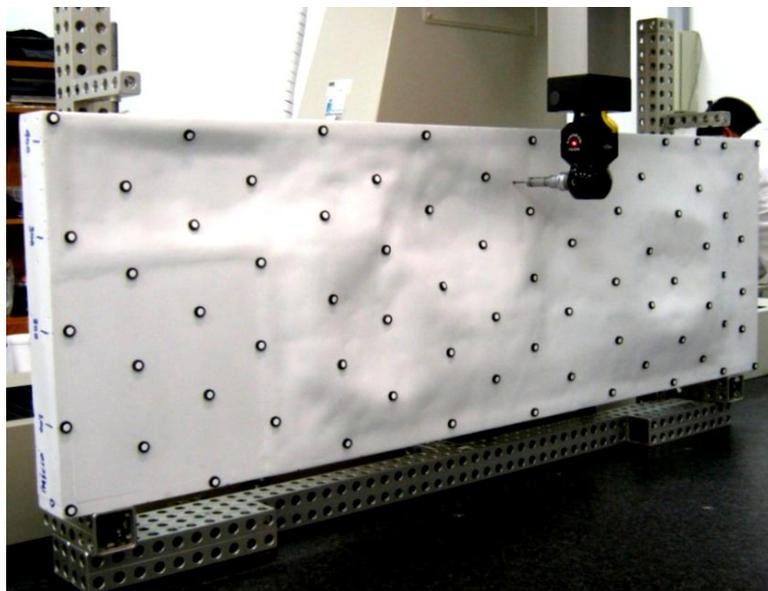


Figura 4-35 Corpo de prova sendo medido em MMC.

Com a mesma posição do corpo de prova na MMC, foram realizadas 59 aquisições parcialmente sobrepostas (~50%) com o sistema de medição óptico de modo a abranger toda a superfície frontal. O resultado desta medição pode ser observado no gráfico da Figura 4-36 abaixo, onde é possível observar os pontos medidos sobre a superfície em uma malha regular nas coordenadas XY com passo 10 mm estendida sobre toda a peça e os alvos numerados na ordem resultante do processamento.

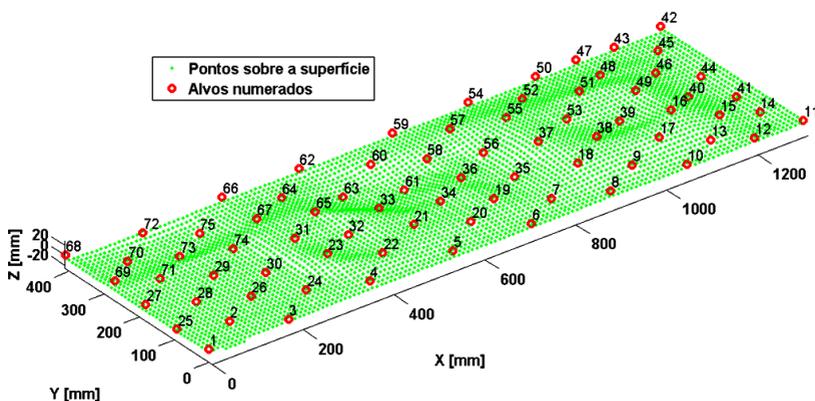


Figura 4-36 Nuvem de pontos com malha regular em XY e alvos numerados.

Uma comparação entre a posição dos pinos medidos pelo sistema óptico e pela MMC foi realizada. Esta comparação pôde ser realizada diretamente, uma vez que ambos os sistemas de coordenadas foram previamente alinhados com dados de medição dos próprios alvos. A Tabela 12 com as componentes de tendência e erro máximo para 95% de confiabilidade ($E_{máx}$) para cada coordenada e do erro espacial 3D pode ser vista abaixo e a Figura 4-37 mostra os vetores de erro para cada alvo.

Tabela 12 – Estimativa de erros de medição dos alvos.

	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	3D [mm]
Td	-0,765	0,343	-0,272	1,032
$E_{máx}$	1,728	1,005	0,945	1,836

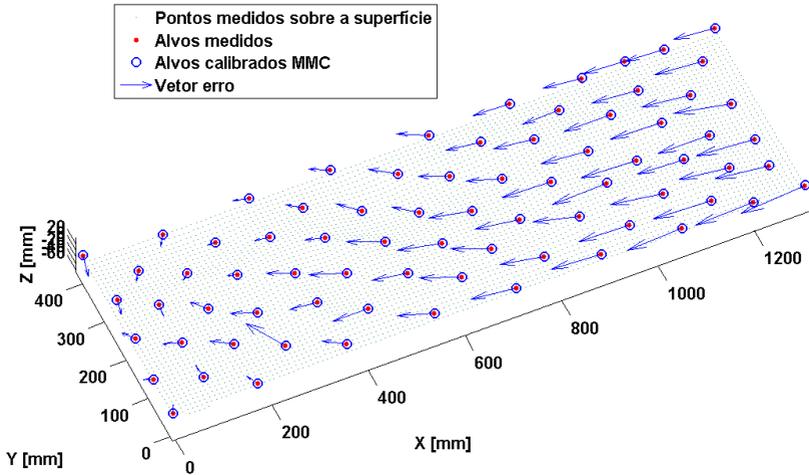


Figura 4-37 Comparação entre os alvos medidos pela MMC e pelo sistema óptico.

Ao analisar os dados da tabela e a direção preferencial dos vetores de erro é possível verificar que os maiores erros se encontram na direção X da medição da peça, sendo erros mais negativos quanto maior a coordenada X. O eixo X da peça está aproximadamente alinhado ao eixo X do sistema de medição para as diversas aquisições, eixo que apresenta os erros mais elevados na avaliação de erro de medição de distância (erros positivos – medem uma distância maior do que a verdadeira).

Como a concatenação dos dados é baseada na transformação da postura do sistema entre aquisições consecutivas, determinada através dos alvos, foi realizada uma avaliação que comparou a transformação medida pela MMC com a transformação determinada pelo sistema. Para algumas posições do sistema, três pontos de referência em sua estrutura foram medidos. Esses pontos foram comparados com a transformação consecutiva dos pontos da primeira posição. A Tabela 13 lista os erros medidos, e a Figura 4-38 mostra as diversas posições do sistema, definido pelos três pontos iniciais transformados consecutivamente, os pontos de referência medidos na MMC (anéis), os vetores erro e a superfície medida.

Tabela 13 - Estimativa de erros de transformações de pontos da estrutura do sistema.

	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	3D [mm]
Td	2,043	-0,903	0,477	2,413
Emáx	4,451	2,023	1,607	4,817

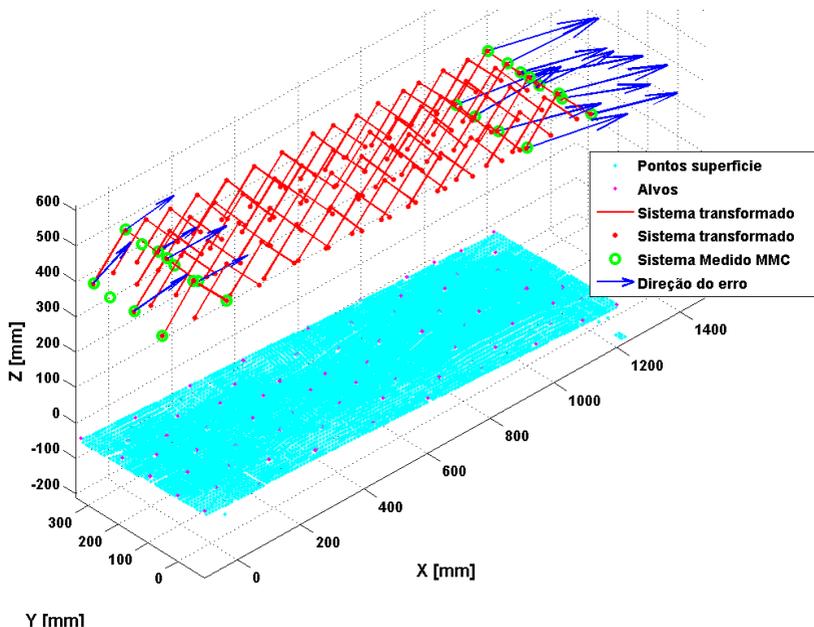


Figura 4-38 – Vetores erro das transformações de pontos da estrutura do sistema.

É possível observar uma tendência em direções opostas entre os erros das transformações e os erros dos alvos. Se para cada aquisição ocorre um erro com uma direção preferencial, a transformação entre duas aquisições consecutivas contém um erro na mesma direção preferencial. Quando esta transformação é utilizada para transformar a segunda aquisição de volta para o sistema de coordenadas da primeira, um erro de sentido contrário passa influenciar os resultados.

A análise do gráfico de erros de medição de distância para pinos concatenados, mostrado na Figura 4-39, permite observar que o erro de medição de distância é mais negativo quanto maior a distância medida. Esta característica é oposta aos erros de medição de distância para apenas uma aquisição que tem uma tendência positiva de erro.

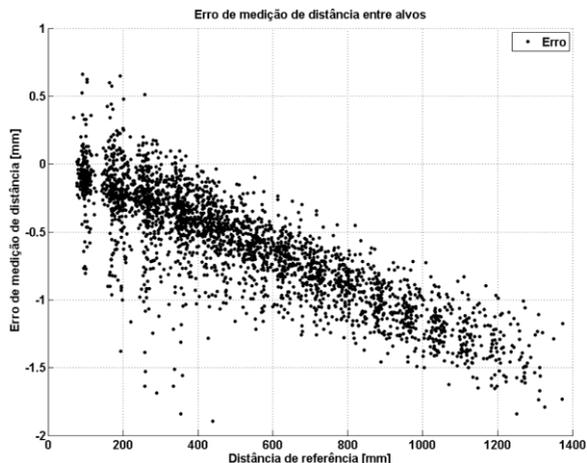


Figura 4-39 Erro de medição de distância para pinos concatenados.

Para analisar os erros de pontos medidos sobre a superfície com projeção de franjas, pontos de referência foram medidos com a MMC. Estes pontos foram medidos no modo superfície da MMC que compensa o raio da esfera de apalpação na direção normal a superfície. A análise foi feita entre o ponto de referência mais próximo ao ponto da nuvem de pontos medida pelo sistema com passo 1,0 mm. Uma visão geral da nuvem de pontos medida com passo 1,0 mm, os pontos de referência medidos pela MMC, os pontos medidos pelo sistema utilizados na comparação e os vetores erro podem ser visualizados na Figura 4-40.

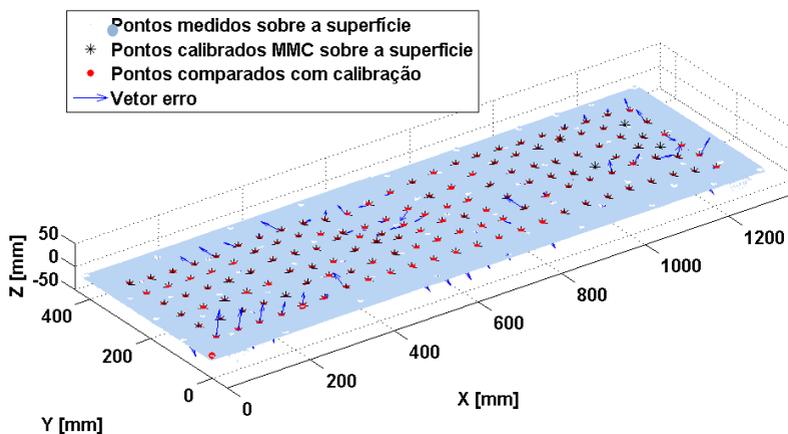


Figura 4-40 – Comparação de pontos da superfície medidos pelo sistema e pela MMC.

Os principais dados da comparação entre os pontos medidos e os de referência estão listados na tabela abaixo.

Tabela 14 – Estimativa de erros de medição de pontos medidos sobre a superfície.

	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	3D [mm]
Td	0,037	-0,018	-0,182	0,427
Re_{95%}	0,350	0,578	0,524	0,369
Emáx	0,387	0,561	0,343	0,796

Ao analisar os dados da Tabela 14, é possível observar que os erros de medição de forma da superfície não ultrapassam 0,8 mm em toda a área de medição avaliada e são menores do que os erros encontrados na medição do alvo (1,836 mm). Esta tendência nos resultados está de acordo com os dados encontrados na medição de erro de planeza para concatenação de planos (RE superfície = 0,099 mm x RE alvos = 0,327 mm).

Na Figura 4-41 é possível observar os pontos utilizados na comparação e os vetores erro e na Figura 4-42 uma vista detalha dos pontos medidos sobre a superfície, os de referencia e os vetores erro.

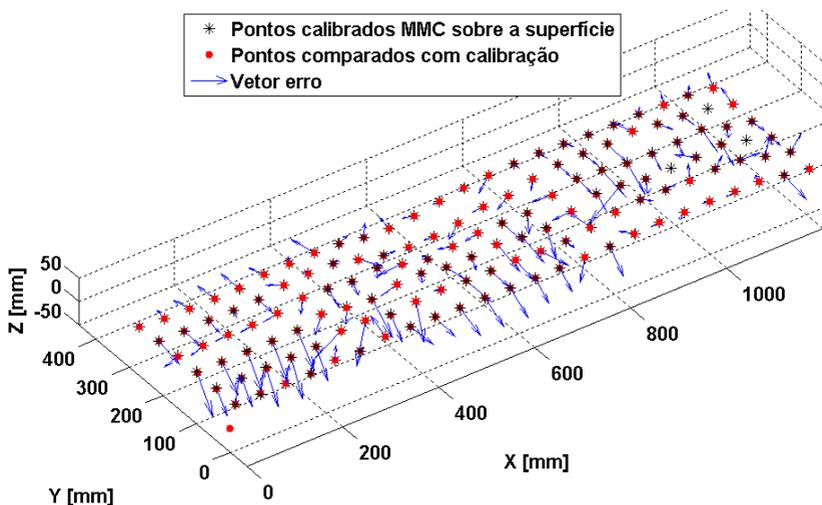


Figura 4-41 Pontos utilizados na comparação e vetores erro.

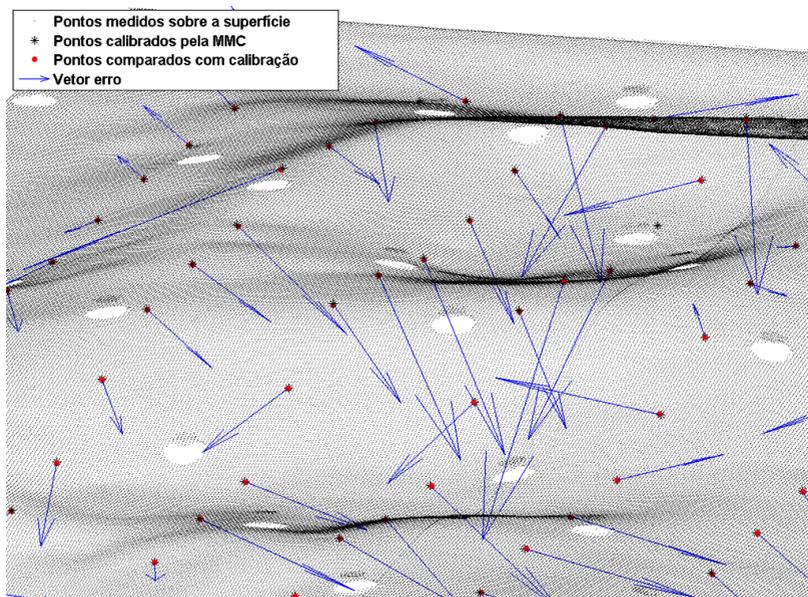


Figura 4-42 Detalhe da superfície medida e pontos comparados.

Os erros menores na medição por projeção de franjas e concatenação devem ocorrer pelo fato de serem utilizados muito mais pontos para o refinamento da transformação entre as nuvens de pontos e também por causa da média de pontos nas zonas de sobreposição entre aquisições.

4.5 EXEMPLOS DE PEÇAS MEDIDAS

Nesta seção são apresentados alguns resultados da medição de peças com variados formatos, de forma a ilustrar a capacidade do sistema de medição de medir formas de relativa complexidade.

Em alguns casos, também é mostrado o ganho que pode ser obtido realizado as diferentes combinações para triangulação entre as câmeras e o projetor de forma a obter uma nuvem de pontos mais completa, principalmente em pontos onde ocorre a oclusão para uma das câmeras.

4.5.1 Face de manequim

A face de um manequim, mostrada na Figura 4-43, foi medida e a nuvem de pontos resultante, com passo XY de 0,5 mm pode ser observado Figura 4-44.



Figura 4-43 Face do manequim sendo medida.

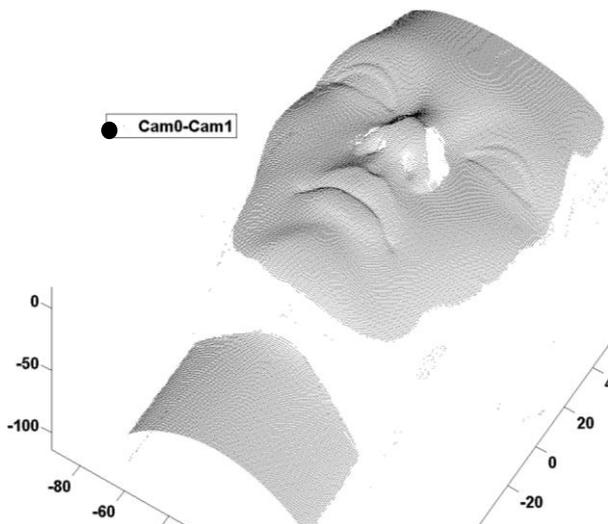


Figura 4-44 Medição da face de um manequim com triangulação entre câmeras.

A Figura 4-45 e a Figura 4-46 evidenciam os ganhos de se utilizar diferentes combinações de câmeras e projetor na triangulação para realizar a medição de uma nuvem de pontos mais completa.

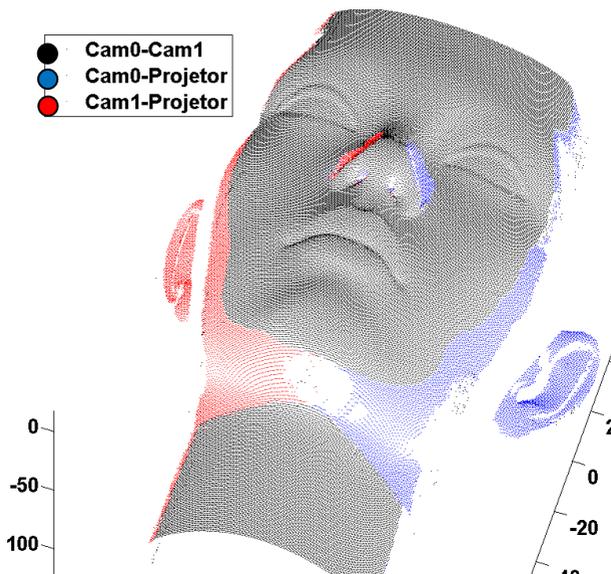


Figura 4-45 Junção de medição de diferentes combinações entre câmeras e projetor.

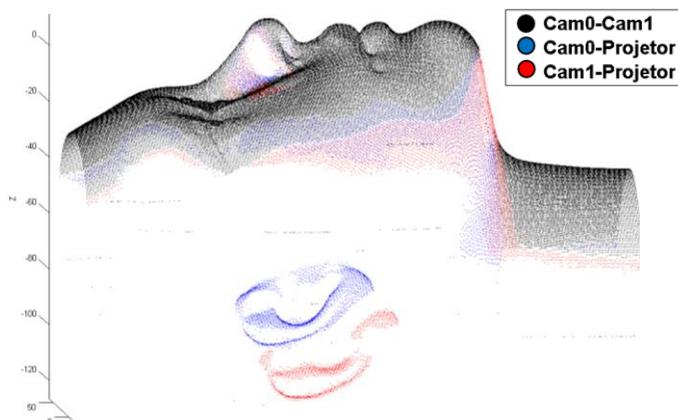


Figura 4-46 Junção de medição de diferentes combinações entre câmeras e projetor.

4.5.2 Replica de cavidade recuperada

Uma replica de uma cavidade ocasionada por cavitação em pás de turbinas hidráulicas de grande porte foi utilizada para testes de deposição por soldagem no projeto Roboturb. Esta peça pode ser visualizada na Figura 4-47 e o resultado de sua medição pode ser observado na Figura 4-48.

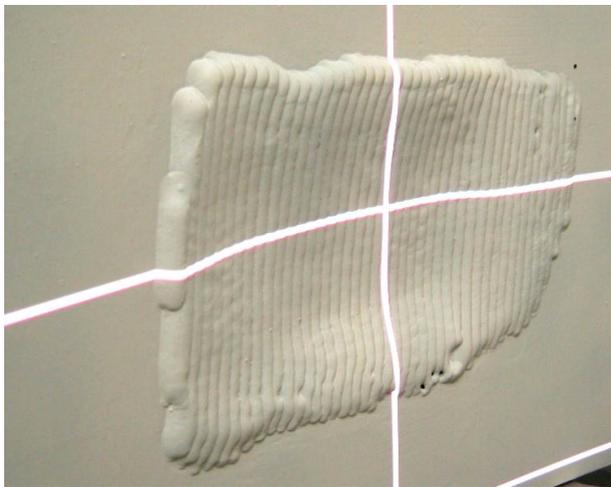


Figura 4-47 Replica de cavidade recuperada por soldagem.

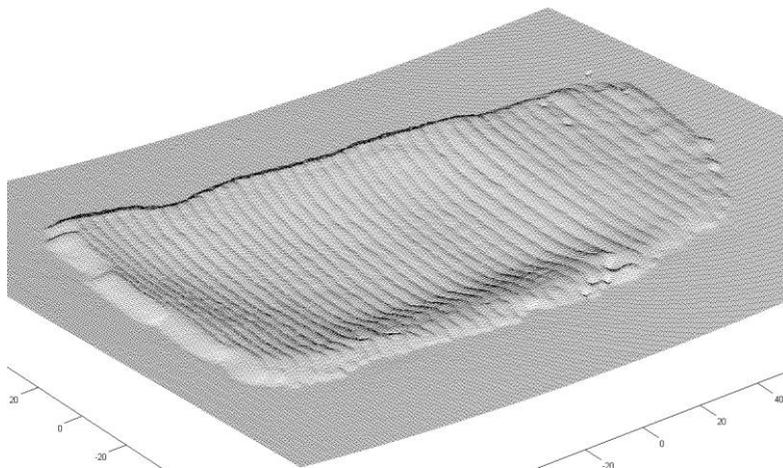


Figura 4-48 Resultado de medição da replica de cavidade recuperada por soldagem.

4.5.3 Réplica de molde de injeção

A medição de uma réplica parcial de um molde de injeção pode ser visualizada na Figura 4-49 e o resultado de sua medição com a triangulação entre as duas câmeras pode ser visualizado na Figura 4-50, onde podem ser notadas algumas descontinuidades.

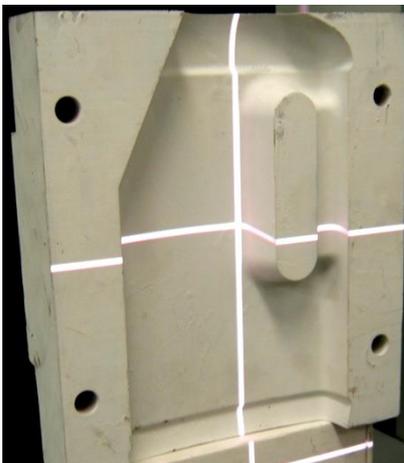


Figura 4-49 Réplica de molde de injeção.

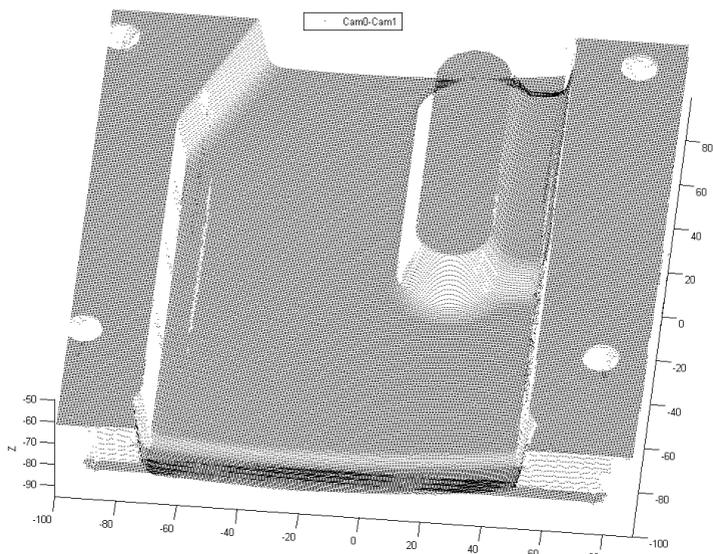


Figura 4-50 Resultado de medição de réplica de molde de injeção.

A Figura 4-51 mostra que algumas partes que não puderam ser medidas com a triangulação entre as câmeras, foram medidas com as combinações de triangulação entre cada câmera e o projetor.

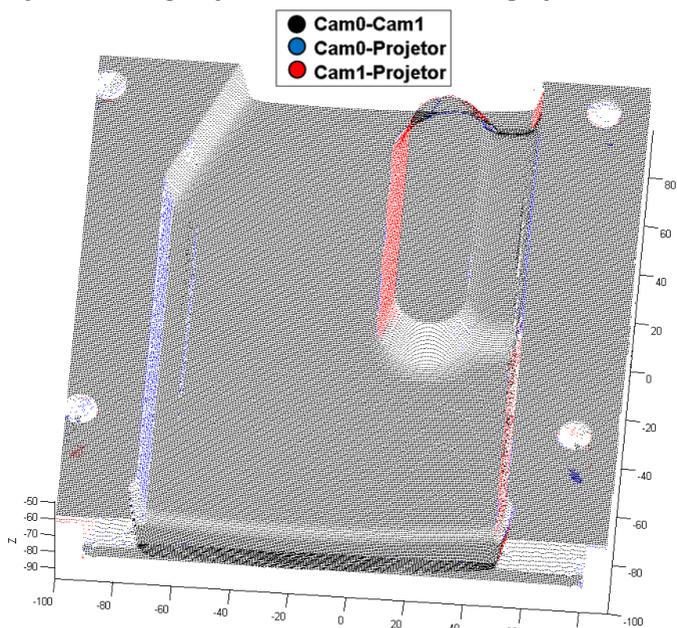


Figura 4-51 Diferentes combinações para triangulação para medição de réplica de molde.

4.5.4 Bloco de motor

Foi realizada uma aquisição para a medição de uma face de um bloco de motor, como mostra a Figura 4-52 e os resultados na .

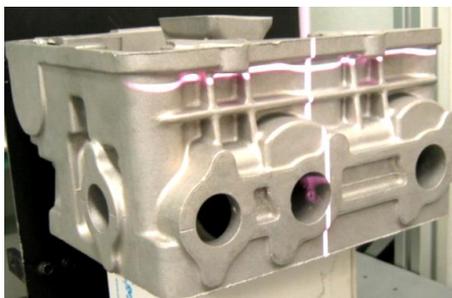


Figura 4-52 Medição de parte de bloco de motor.

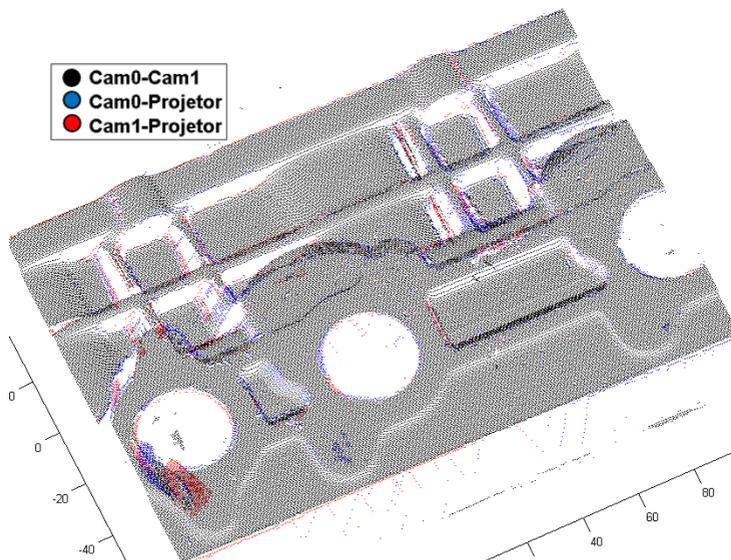


Figura 4-53 Medição de parte de bloco de motor.

4.5.5 Seção de duto

A Figura 4-54 mostra uma seção cilíndrica de um duto medida com apenas uma aquisição.

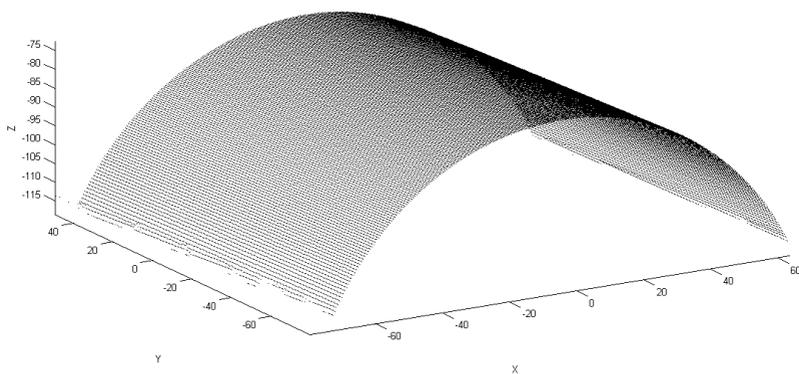


Figura 4-54 Medição de seção cilíndrica de duto.

4.6 DISCUSSÃO

As avaliações realizadas buscaram determinar a configuração ideal de parâmetros para o sistema construído, além de levantar os erros de medição utilizando diversos tipos de padrão e superfícies livres calibradas em máquina de medir por coordenadas de referência. Incluíram a concatenação de 59 aquisições em uma única malha regular de pontos com passo de 1 mm nas direções X e Y segundo um sistema de coordenadas global de interesse, definido pelo usuário.

Os resultados mostraram que a técnica desenvolvida para a medição de nuvens de pontos em que é realizada a busca da coordenada Z para uma malha regular nos eixos XY é viável e mostra bons resultados se comparada com outra técnica anteriormente desenvolvida. A análise dos dados levantados nos ensaios não é trivial e demandou a implementação de programas específicos para cada avaliação realizada.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho investiga a medição de superfícies de forma livre através da aquisição de nuvens de pontos tridimensionais intrinsecamente estruturadas em uma malha regular, através da projeção de luz estruturada por um projetor multimídia, e a aquisição e processamento de imagens com um número qualquer (≥ 1) de câmeras. Também são abordadas a comparação entre superfícies e a projeção de mapas de sinalização sobre a superfície.

Neste capítulo são apresentados os principais resultados, inovações, e conclusões decorrentes deste trabalho, assim como propostas para trabalhos futuros.

5.1 PRINCIPAIS RESULTADOS

O desenvolvimento da tese resultou na construção e operacionalização de uma bancada de ensaios composta principalmente de um protótipo portátil de um sistema de medição óptico, dispositivos de fixação e padrões e superfícies para medição e validação dos algoritmos desenvolvidos.

O protótipo para operação em laboratório é composto principalmente de duas câmeras digitais e lentes para aquisição de imagens, um projetor multimídia compacto para projeção de luz estruturada sobre a peça e uma estrutura em forma de octaedro para integração mecânica dos componentes.

Diversos módulos de *software* foram desenvolvidos para realizar a aquisição e projeção de imagens, processamento de imagens e dados, apresentação e interpretação de resultados. Um *software* específico para calibração das câmeras e projetor também foi desenvolvido e demandou significativo trabalho, pois foi pré-requisito para viabilizar a realização de medições com o sistema.

Foi necessária a construção de diversos padrões geométricos, padrões para calibração das câmeras e projetor, superfícies com forma livre e alvos especiais para testes de desenvolvimento e validação dos conceitos apresentados.

Assim, o sistema é capaz de (a) realizar a medição de superfícies livres de grande extensão, com pontos distribuídos em uma única malha regular com densidade predefinida, (b) comparar as diferenças entre

superfícies medida e de referência e (c) sinalizar, através da projeção de mapas de cores na própria superfície, parâmetros de interesse.

Os erros de medição determinados segundo o guia VDI/VDE 2634 são, para um volume de medição de (200 x 200 x 200) mm³:

	[mm]
Erro máximo de medição de distância	0,284
Erro máximo de apalpação	0,210
Erro máximo de distância entre os centros das esferas	0,471

5.2 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

As principais inovações e contribuições acadêmicas introduzidas por este trabalho são:

- **Estrutura da nuvem de pontos.** Os tradicionais algoritmos de triangulação para medição das nuvens de pontos partem de pontos homólogos definidos nos sensores (câmeras), resultando em nuvens de pontos que são estruturadas e organizadas em relação à matriz de *pixels* do sensor [16]. Os algoritmos desenvolvidos na tese alteram este paradigma para estruturar e organizar os pontos em relação a um sistema de coordenadas qualquer, por exemplo, localizado no objeto de interesse;

- **Nuvem de pontos pré-definida.** Normalmente, o resultado de uma triangulação resulta em um ponto 3D com coordenadas X , Y e Z não conhecidas a priori [20]. Com os algoritmos desenvolvidos, a medição da nuvem de pontos tridimensionais possibilita definir previamente duas coordenadas de pontos 3D que serão medidos, de forma a criar uma grade regular de pontos com passo pré-definido. A partir de duas coordenadas fixas escolhidas (*e.g.* X , Y) é realizada a busca ‘virtual’ da coordenada dependente (*i.e.* Z) numericamente, resultando em uma grade de pontos regular no plano XY ;

- **Algoritmo Zscan.** Algoritmo para a busca da melhor estimativa da coordenada dependente (*e.g.* Z), para cada ponto de uma malha regular escolhida. O ajuste de parâmetros, como o número de subdivisões n do intervalo testado, permite processar o resultado de maneira mais rápida para superfícies contínuas ou de maneira mais robusta para superfícies com descontinuidades;

- **Diferentes sistemas de coordenadas.** O resultado da medição pode ser calculado em relação a diferentes sistemas de coordenadas de forma estruturada como o cilíndrico ou o esférico, fixando duas coordenadas e realizando a busca na coordenada dependente, de forma

semelhante ao realizado com o sistema de coordenadas cartesiano. É possível também medir apenas pontos específicos, através da busca sobre retas paramétricas no espaço cartesiano, em direções pré-determinadas de interesse.

- **Flexibilidade na triangulação.** Existem diferentes técnicas de triangulação para calcular a nuvem de pontos dependendo do número de sensores, e.g. utilizando a matriz fundamental para duas câmeras ou a matriz tensor trifocal para três [20]. O algoritmo desenvolvido permite o cálculo da nuvem de pontos a partir da combinação de qualquer número de sensores, incluindo o próprio projetor emulando uma câmera: duas câmeras, duas câmeras e o projetor, cada câmera e o projetor, no caso do *hardware* utilizado. A mesma técnica pode ser estendida para um número qualquer de sensores;

- **Alinhamento e diferença entre superfícies:** O alinhamento e o cálculo da diferença entre nuvens de pontos podem ser realizados por diversas variantes do método iterativo conhecido como *ICP (Iterative Closest Point)*, que busca a cada iteração o ponto mais próximo entre as nuvens e calcula a transformação para minimizar a diferença. Este tipo de algoritmo exige grande esforço computacional [90]. Nos algoritmos desenvolvidos neste trabalho a correspondência entre os pontos é previamente conhecida possibilitando o cálculo do alinhamento e diferença entre as superfícies diretamente.

- **Sinalização no objeto.** A utilização de um projetor multimídia para projetar sinais e mapas de cores na superfície medida, sinalizando pontos ou regiões de interesse na superfície de modo preciso. Estes mapas de cores podem indicar, por exemplo, a intensidade de defeitos e locais de sobre e sub-material em relação a uma superfície de referência;

Outras inovações de menor impacto incluem a utilização dos mapas de fase para realizar a determinação de alvos homólogos com robustez e a remoção de ambigüidade na determinação da correção do centro da elipse utilizando a informação de calibração (rotação) das câmeras e os ângulos entre as possíveis combinações das normais ambíguas, como descrito no **Anexo B**.

5.3 PRINCIPAIS LIMITAÇÕES

As principais limitações de caráter tecnológico do sistema desenvolvido incluem:

- Projetores extremamente compactos têm normalmente menor potência luminosa, o que pode causar dificuldades na medição

topogramétrica e na projeção do mapa de cores, principalmente fora do ambiente laboratorial. Estes projetores também limitam a distância mínima da peça;

- Como o sistema deve ser extremamente compacto e sua operação pode ser realizada em ambientes confinados (e.g. entre pás de turbina por) o volume de medição é relativamente pequeno, o que leva a necessidade de uma elevada quantidade de aquisições parciais e suas concatenações;

- Devido à grande quantidade de dados para processar, oriundos do processamento de imagens de alta resolução e de diversos algoritmos iterativos, o computador para processamento dos dados deve ser de alta capacidade (troca de dados, processamento e memória);

- O elevado tempo ($>2s$) para projeção e aquisição de imagens de medição não permite a operação do sistema sem a utilização de um apoio que mantenha sua posição fixa durante as aquisições.

- Diminuir os erros de medição do sistema implica em melhorar a qualidade do *hardware* utilizado, uma vez que se buscou a determinação de parâmetros ótimos de utilização do sistema.

5.4 AVALIAÇÃO FINAL

As principais inovações introduzidas com o desenvolvimento desta tese, como os algoritmos de medição e concatenação numa única malha regular com um número qualquer de câmeras, se mostraram funcionais e vantajosas frente a outras técnicas anteriormente desenvolvidas.

A implementação dos diversos módulos do programa de aquisição e processamento de dados levaram à validação dos diversos conceitos introduzidos e utilizados na tese. Trabalhos futuros de otimização dos algoritmos devem ser realizados de forma a minimizar o tempo de processamento para visualização dos resultados no mesmo ambiente de medição, permitindo ao usuário verificar de forma rápida, ou durante a aquisição, se a medição está sendo realizada com sucesso.

A introdução de inovações, a concepção do sistema e a utilização de algoritmos oriundos de diversas áreas do conhecimento visam não apenas contribuir significativamente para o desenvolvimento dos conhecimentos acadêmicos, mas também contribuir com a comunidade industrial com um sistema que possa ser utilizado, no futuro, em campo.

A utilização de um padrão bidimensional facilitará a calibração e o transporte do próprio padrão de maneira significativa para realizar calibrações em campo. Estas características são muito desejáveis e foram identificadas através de diversas experiências anteriores de

equipes da UFSC que realizaram tarefas variadas em ambiente industrial como reparos em turbinas hidráulicas de grande porte.

5.5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da experiência adquirida com o atual protótipo, novos componentes podem ser especificados e os projetos óptico e mecânico podem ser atualizados para, no futuro, realizar a montagem de um protótipo capaz de ser utilizado em campo e que supere limitações impostas pela primeira versão.

As principais sugestões para trabalhos futuros incluem:

- Determinar, de modo automático, o número n de subdivisões do intervalo testado (de Z_{\min} a Z_{\max}) de modo a otimizar o tempo de processamento.
- Utilizar lentes e padrão de calibração de câmeras de melhor qualidade;
- Sincronização via *hardware* de projeção e aquisição de imagens, com a utilização de câmeras e projetor com maior frequência de aquisição e projeção respectivamente, buscando minimizar o tempo total de aquisição (para ≤ 150 ms), possibilitando a utilização do sistema sendo manipulado manualmente sem a necessidade de fixação;
- Calcular mapas para projeção de cores de modo que seja possível deslocar o sistema manualmente enquanto a projeção se adapta conforme a posição relativa do sistema em relação à superfície medida;
- Avaliação da estabilidade da calibração do sistema ao longo do tempo;
- Impor novas restrições nos algoritmos de calibração, utilizando a informação de que a relação entre as câmeras permanece constante para aquisições simultâneas de posições diferentes do padrão;
- Realizar a otimização da busca de alvos correspondentes entre aquisições consecutivas;
- Determinar a relação entre a densidade entre alvos espalhados sobre a peça e os erros de medição da forma de superfícies de grande extensão;
- Construir um protótipo mais compacto, robusto e que o centro de projeção esteja alinhado aos centros ópticos das câmeras;
- Implementar os algoritmos para realizar medições com outros tipos de sistemas de coordenadas como o esférico e o de retas paramétricas;

REFERÊNCIAS

- [1] K.H. Ko, T. Maekawa, N.M. Patrikalakis – “*An algorithm for optimal free-form object matching*” Computer-Aided Design 35 913–923, 2003.
- [2] Yadong Li, Peihua Gu, “*Free-form surface inspection techniques state of the art review*”, Elsevier, Computer-Aided Design 36 1395–1417, 2004.
- [3] Mitutoyo, Portal de fabricante de sistema de medição: www.mitutoyo.com.br/noticias/pdf/aplicacao.pdf, ultimo acesso em maio de 2010.
- [4] Hexagon Metrology GmbH, Wetzlar, Germany, imagem de www.leitz-metrology.com/q19_turbine_blade_air_foil_inspection.shtml ultimo acesso em janeiro de 2010.
- [5] Nerosky, L. A. “*Medição de Formas Livres Através da Integração de um Sensor Óptico Tipo "Folha de Luz" em um Braço de Medição*” Dissertação, PósMCI, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- [6] Pinto, T.L.F.C “*Avaliação de desempenho de robôs industriais utilizando um braço de medição portátil*” Dissertação, PósMCI, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- [7] ITG Romer, portal de fabricante de sistema de medição: www.itgromer.com.br, ultimo acesso em fevereiro de 2008.
- [8] Werner B. “*Advances in photogrammetric measurement solutions*”, Elsevier, Computers in Industry 56 886–893, 2005.
- [9] GOM, portal de fabricante de sistema de medição: www.gom.com, ultimo acesso em fevereiro de 2008.
- [10] Bonacorso, N. G. “*Automatização dos processos de medição de superfícies e de deposição por soldagem visando a*

recuperação de rotores de turbinas hidráulicas de grande porte”, Tese, PósMec, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

- [11] Quiulín, D. “*Surface engineering for computed-aided design and manufacture*”, Ellis Horwood Limited Publisher, 1987.
- [12] Simas, H. “*Planejamento de Trajetórias e Evitamento de Colisões em Tarefas de Manipuladores Redundantes Operando em Ambientes Confinados*” Tese, PósMEC, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- [13] Tonetto, C.P. “*Uma proposta de sistematização do processo de planejamento de trajetórias para o desenvolvimento de tarefas de robôs manipuladores*” Dissertação, PósMEC, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- [14] Lima, C.R.G. “*Um estudo comparativo de sistema de medições aplicáveis ao controle dimensional de superfícies livres em peças de médio e grande porte*” Dissertação, PósMCI, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- [15] Kovac, I., Frank, A. – “*Testing and calibration of coordinate measuring arms*”, Precision Engineering, Journal of the International Societies for precision Engineering and Nanotechnology, N. 25, 2001.
- [16] Fantin, A. V. “*Medição de formas livres tridimensionais por topogrametria*” Dissertação, PósMCI, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- [17] Hoffman, A. C. “*Sistema endoscópico estereoscópico para medição geométrica de uniões soldadas de duto*” Dissertação, PósMCI, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- [18] Stivanello, M. E. “*Desenvolvimento de uma biblioteca para sistemas de visão estereoscópica para robótica movel*” Dissertação, PPGEEL, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

- [19] Fantin, A.V, Albertazzi, A, Pinto, T.L.F.C “*An Efficient Mesh Oriented Algorithm for 3D Measurement in Multiple Camera Fringe Projection*” SPIE, 2007.
- [20] T. L. Pinto, et al “*Optical measurement and color map projection system to highlight geometrical features on free form surfaces*” The 6th International Workshop on Advanced Optical Metrology, v. 1. p. 497-500, Nürtingen, Alemanha FRINGE 2009.
- [21] Hartley, R.; Zisserman, A. ‘*Multiple View Geometry*’. Cambridge University Press, 2003.
- [22] Hartley R., Sturm P., “*Triangulation*”, Computer Vision and Image Understanding, Vol. 68, No. 2, pp. 146-157, 1997.
- [23] Kanatani K. et al “*Triangulation from two views revisited: Hartley-Sturm vs. optimal correction*” Proceedings of the 19th British Machine Vision Conference, 2008.
- [24] Mikhail, E.D. *et al* “*Introduction to Modern Photogrammetry*” John Wiley Sons Publisher, 2001.
- [25] Z Corporation, Portal de fabricante de sistema de medição: www.zcorp.com, ultimo acesso em fevereiro de 2008.
- [26] Childers; Edwin M.C., ‘*Method and system for obtaining high resolution 3-D images of moving objects by use of sensor fusion*’ United States Patent Application 20070064242, 2007.
- [27] Tina, Y.; Tomasi, C.; Heeger, D.J. ‘*Comparison of Approaches to Egomotion Computation*’ Stanford University CA 94305, CVPR, pp. 315--320, 1996.
- [28] Vassalo, R. F., Vitor, J. A., Schneebeli, H. J. “*Aprendizagem por Imitação Através de Mapeamento Visuomotor Baseado em Imagens Omnidirecionais*” Revista Controle & Automação, Vol.18 no.1, 2007.

- [29] Portal de fabricante de sistema de medição: www.handyscan3d.com, ultimo acesso em fevereiro de 2008.
- [30] Zhang, Z. “*A Flexible New Technique for Camera Calibration*” Technical Report MSR-TR-98-71, Microsoft Corporation, 1998.
- [31] Zhang, Z. “*Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations*” Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on, Vol. 1, pp. 666-673, 1999.
- [32] Zhang, S. *et al* “*Novel method for structured light system calibration*” Optical Engineering 45(8), 083601, 2006.
- [33] Sen, P. *et al* “*Dual Photography*” ACM SIGGRAPH 2005.
- [34] Fryer, J.G. Clarke, T.A. & Chen, J., “*Lens distortion for simple 'C' mount lenses*”, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 30(5): 97-101, 1994.
- [35] Moumen T. El-Melegy, Aly A. Farag “*Nonmetric Lens Distortion Calibration: Closed-form Solutions, Robust Estimation and Model Selection*” IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 2003) Vol. 2, 2003.
- [36] Weng, J. *et al* “*Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation*” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, N. 10, 1992.
- [37] Heikkilä, J., Silvén, O. “*A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction*” Proceedings of the 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '97), 1997.
- [38] Chen, D. Zhang, G. “*A New Sub-Pixel Detector for X-Corners in Camera Calibration Targets*” The 13th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision' 2005.

- [39] Lucchese, L. Mitra, S.K. “*Using Saddle Points for Subpixel Feature Detection in Camera Calibration Targets*” IEEE, Circuits and Systems, Vol. 2, 2002.
- [40] Mittrapiyanuruk, P. “*A memo on how to use the Levenberg-Marquardt Algorithm for Refinig Camera Calibration Parameters*” Teaching Notes, Robot Vision Laboratory, Purdue University, USA, 2004.
- [41] Triggs, B. Zisserman, A. *et al* “*Bundle adjustment – A modern synthesis*” Vision Algorithms’99 LNCS, 2000.
- [42] Arora, J. “*Introduction to Optimum Design*” Mc Graw Hill Inc., ISBN 0-07-100123-9, edição 1989.
- [43] Lourakis, M. “*A Brief Description of the Levenberg-Marquardt Algorithm Implemened*” Institute of Computer Science, Foundation for Research and Technology - Hellas (FORTH) Greece, 2005.
- [44] Lourakis, M., Código Fonte do Algoritmo Levenberg-Marquardt: www.ics.forth.gr/~lourakis/levmar/, último acesso em fevereiro de 2008.
- [45] Remondino, F. , Fraser, C. “*Digital Camera Calibration Methods: Considerations And Comparisons*” ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology', IAPRS Volume XXXVI, Part 5, Dresden 25-27 September 2006.
- [46] Rautenberg, U., Wiggenhagen M.,. “*Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI-2634*” Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, No. 2, pp. 117-124, 2002.
- [47] Raguse, K.;Wiggenhagen, M. “*Quality Parameters of the Optical Data Channel used in Impact Tests*” Optical Photogrammetry and Geodesy, Band II. Zürich, 252-258, 2003.

- [48] Harris, C. “*A combined edge and corner detector*” In Proc. of the Alvey Vision Conference, pg. 147-151, 1988.
- [49] Nister, D. *et al* “*Visual Odometry*” In Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVRP) pages 652-659, 2004.
- [50] Sünderhauf, N. Protzel, P. “*Towards Using Sparse Bundle Adjustment for Robust Stereo Odometry in Outdoor Terrain*” In Proc. of Towards Autonomous Robotic Systems, TAROS2006, UK, pp 206-213, 2006.
- [51] Point Grey Research, Inc. Imagem de sistema de visão estéreo retirada de www.ptgrey.com.
- [52] Correa, J. D. *et al* “*Centro Geodésico e Centróide: Uma Abordagem Conceitual*” Cartografia e Cadastro No. 5, 1996.
- [53] Brunson Instrument Company, fabricante de apoios especiais para alvos fotogramétricos, www.brunson.us, ultimo acesso em fevereiro de 2008.
- [54] Hubbs Machine & Manufacturing, Inc., fabricante de apoios especiais para alvos fotogramétricos, www.hubbsmachine.com, ultimo acesso em fevereiro de 2008.
- [55] Bosch, J. A. “*Coordinate Measuring Machines and Systems*” CRC Press, 1995.
- [56] Michaelis, M. “*Automatic Identification of Textcoded Measurement Targets*” Photogrammetric Record, 16(96): 823-830, 2000.
- [57] Knyaz V., Sibiryakov A. “*Non Contact 3D Model Reconstruction Using Coded Targets*” International Conference on Computer Graphics and Visualization, 1998.
- [58] Mills D., Carty G. “*Semi-Automated Crush Determination Using Coded and Non Coded Targets with Close-Range*

- Photogrammetry**” Relatório tecnico, DCM Technical Services Inc.
- [59] Ganci G., Clement R. “***The Use of Self-identifying Targeting for Feature Based Measurement***” Coordinate Measuring System Committee, Michigan, 2000.
- [60] Luhmann T. N. “***Nahbereichs-photogrammetrie: Grundlagem, Methoden und Anwendungen***” Herbert Wichmann Verlag, ISBN 3-87907-398-8, 2003.
- [61] Sitnik, R. *et al* “***Digital fringe projection system for large-volume 360-deg shape measurement***” Optical Engineering, Vol. 41, No. 2, 2002.
- [62] Xiaoling, Z. “***Calibration of a fringe projection profilometry system using virtual phase calibrating model planes***” Journal Of Optics A: Pure And Applied Optics 7 (2005) 192–197.
- [63] Fujigaki, M., Morimoto, Y., “***Shape Measurement with Grating Projection Using Whole-Space Tabulation Method***”, Journal of JSEM, Vol. 8, No.4, 92-98(2008).
- [64] Yoneyama, S. *et al* “***Phase-measuring profilometry of moving object without phase-shifting device***” Optics and Lasers in Engineering 40, 153–161, 2003.
- [65] Kühmstedt P. *et al* “***Phasogrammetric optical 3D-sensor for the measurement of large objects***” Optical Metrology in Production Engineering, Proc. of SPIE Vol. 5457, 2004.
- [66] Reich, C. “***3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection***” SPIE, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Opt. Eng. 39(1) 224–231, 2000.
- [67] Halioua M. *et al* “***Automated 360° profilometry of 3-D diffuse objects***” Applied Optics, vol. 24, no. 14, 1985.
- [68] D’oring T, *et al* “***Autonomous calibration of Moving line scanners with coded photogrammetric targets recognition***”

ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology' 2006.

- [69] Shortis, M.R. et al., "***A comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images***", Videometrics III. SPIE Vol. 2350. Boston. pp. 239-250, 1994.
- [70] SungJoon A., Wolfgang R. "***Circular Coded Landmark for Optical 3D-Measurement and Robot Vision***" IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1999.
- [71] Fitzgibbon A., Pilu M. "***Direct Least Square Fitting of Ellipses***" IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine, VOL. 21, NO. 5, MAY 1999.
- [72] Shiu Y., Huang C. "***Pose Determination of Circular Cylinders Using Elliptical and Side Projections***" IEEE, 1991.
- [73] Shiu Y., Ahmad S. "***3D Location of Circular and Spherical Features by Monocular Model-Based Vision***" IEEE, 1989.
- [74] Kolesnik M., Baratoff G. "***3-D Interpretation of Sewer Circular Structures***" International Conference on Robotics & Automation, IEEE, 2000.
- [75] Otepka J., Fraser C. "***Accuracy Enhancement of Vision Metrology Through Automatic Target Plane Determination***" International Society for Photogrammetry and Remote Sensing XXth Congress, Istanbul; Vol. XXXV, Part B/5, 2004.
- [76] Kerrigan S. *et al* "***Eccentricity Error Correction for Automated Estimation of Polyethylene Wear after Total Hip Arthroplasty***" Medical Image Understanding and Analysis (2005).
- [77] Ahn S., Warnecke H. "***Systematic Geometric Image Measurement Errors of Circular Object Targets: Mathematical Formulation and Correction***" Photogrammetric Record, 16(93): 485-502, 1999.

- [78] Geodetic, “*The Basics of Photogrammetry*” Geodetic Systems, Inc. www.geodetic.com ultimo acesso em fevereiro de 2008.
- [79] PhotoModeler PRO, Desenvolvedor de software para medição fotogramétrica profissional, base de dados, www.photomodeler.com ultimo acesso em fevereiro de 2008.
- [80] Klaus, P.P. “*Optische Topometrie mit räumlichen Lichtmodulatoren*” Tese, Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart, 2004.
- [81] Bräuer-Burchardt, C. *et al* “*Phase Unwrapping in Fringe Projection Systems Using Epipolar Geometry*” Springer, ACIVS 2008, LNCS 5259, pp. 422–432, 2008.
- [82] C. Munkelt, *et al* “*Cordless portable multi-view fringe projection system for 3D reconstruction*” IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems, ProCams 2007.
- [83] Horn, B. K. P. “*Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions*” Vol. 4, page 629, Optical Society of America, 1987.
- [84] Horn, B. K. P. “*Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices*” Journal of the Optical Society of America A, Vol. 5, page 1127, 1988.
- [85] Eggert, D.W. *et al* “*Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms*” Machine Vision and Applications 9: 272–290, (1997)
- [86] Majid Z. ”*Integration of Stereophotogrammetry and Triangulation Based Laser Scanning System for Precise Mapping of Craniofacial Morphology*” The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. 2008.
- [87] Nister, D. “*Preemptive RANSAC for Live Structure and Motion Estimation*” IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'03), Vol. 1 - p. 199, 2003.

- [88] Hagnelius, A. “*Visual Odometry*” Tese, Department of Computing Science, Umeå University, Sweden, 2005.
- [89] Umeyama, S. “*Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns*” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.13 N. 4, 1991.
- [90] Chetverikova, D. *et al* “*Robust Euclidean alignment of 3D point sets: the trimmed iterative closest point algorithm*” Image and Vision Computing 23 299–309, 2005.
- [91] Besl, P. McKay, N. “*A Method for Registration of 3-D Shapes*” IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, N 2, 1992.
- [92] Salvi, J. *et al* “*A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation*” Image and Vision Computing, 2006.
- [93] X Huang, *et al* “*Localization and comparison of two free-form surfaces*” Computer-Aided Design. Vol. 26, No. 12. pp. 1017-1022, 1996.
- [94] Geron`es, C. M. “*Hand-held 3D-scanner for large surface registration*” Tese, Universitat de Girona, Espanha, 2007.
- [95] Rusinkiewicz, S. Levoy, M. “*Efficient Variants of the ICP Algorithm*” Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, 2001.
- [96] Chen, Y. Medioni, G. “*Object Modeling by Registration of Multiple Range Images*” IEEE, International Conference on Robotics and Automation, 1991.
- [97] Gelfand, N. *et al* “*Geometrically Stable Sampling for the ICP Algorithm*” IEEE, International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, 2003.
- [98] Hébert P. “*A Self-Referenced Hand-Held Range Sensor*” 3-D Digital Imaging and Modeling, Page(s):5 - 12, 2001.

- [99] Khoury, R.; “*An Enhanced Positioning Algorithm for a Self-Referencing Hand-Held 3D Sensor*” IEEE, Computer and Robot Vision, 2006.
- [100] Strobl, K. H. *et al* “*The Self-Referenced DLR 3D-Modeler*” The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2009.
- [101] Huang K. *et al* “*A novel matching algorithm for a hand-held 3D laser scanning sensor*” Virtual and Physical Prototyping, Vol. 4, No. 1, March 2009.
- [102] Creativecommons, Imagem retirada de en.wikipedia.org/wiki/Delaunay_triangulation com licença de utilização em creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/
- [103] Li, W. *et al* “*Object adapted pattern projection—Part I: generation of inverse patterns*” Optics and Lasers in Engineering 41, 2004.
- [104] Bothe, T., *et al* “*Object Adapted Inverse Pattern Projection: Generation, Evaluation and Applications* ”; Proc. SPIE; Volume 4933, p. 291-296, 2003.
- [105] Li, W., *et al* “*Applications for Inverse Pattern Projection*”; Proc. SPIE; Volume 5144; p. 493-503, 2003.
- [106] Bothe, T.; *et al* “*Generation and Evaluation of Object Adapted Inverse Patterns*”, International Symposium on Photonics in Measurement, VDI_Berichte 1694, 299-304, 2002.
- [107] Raskar, R. *et al* “*The Office of the Future: A Unified Approach to Image-Based Modeling and Spatially Immersive Displays*” Computer Graphics Proceedings, SIGGRAPH 1998.
- [108] Raskar, R. *et al* “*Multi-Projector Displays Using Camera-Based Registration*” Proceedings IEEE VIS '99, 1999.
- [109] Segal, M. *et al* “*Fast Shadows and Lighting Effects Using Texture Mapping*” Computer Graphics, 26,2, July 1992.

- [110] Johnson, T. Fuchs, H. “*Real-Time Projector Tracking on Complex Geometry Using Ordinary Imagery*” IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR '07, 2007.
- [111] Raskar, R. Beardsley, P. “*A Self-Correcting Projector*” IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2001
- [112] Cotting, D. et al “*Embedding Imperceptible Patterns into Projected Images for Simultaneous Acquisition and Display*” IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2004).
- [113] Raskar, R.; et al “*Shader Lamps: Animating Real Objects with Image Based Illumination*”, Eurographics Workshop on Rendering, EGWR 2001.
- [114] Grossberg, M. et al “*Making One Object Look Like Another: Controlling Appearance Using a Projector-Camera System*” IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'04), 2004.
- [115] Bimber, O. et al “*Embedded Entertainment with Smart Projectors*” IEEE Computer Society, Vol. 38 , Issue 1, 2005.
- [116] Cao, X. Balakrishnan, R. “*Interacting with dynamically defined information spaces using a handheld projector and a pen*” ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST 2006.
- [117] Cao X. et al “*Multi-user interaction using handheld projectors*”.ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Proceedings of UIST 2007.
- [118] Sciavicco, L. Siciliano, B. “*Modeling and Control of Robot Manipulators*” Editora McGraw-Hill Inc., Series in Electrical and Computer Engineering, Ed. 1996.
- [119] Daniilidis, K. Klette, R. “*Imaging Beyond the Pinhole Camera*” Editora Springer, ISBN-13 978-1-4020-4894-4, 2006.

- [120] Moore, M. "*An Investigation into the accuracy of yield maps and their subsequent use in crop management*" Ph.D thesis, Cranfield University, United Kingdom, 1998.
- [121] VDI/VDE 2634 Part 1 "*Optical 3D measuring systems – Imaging systems with point-by-point probing*" VDI/VDE Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2002.
- [122] VDI/VDE 2634 Part 2 "*Optical 3D measuring systems – Optical systems based on area scanning*" VDI/VDE Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2002.

ANEXO A - Calibração de câmera e projetor

A calibração de câmeras é realizada para levantar os dados do modelo de câmera *pinhole* e correção das distorções radial e tangencial adotados neste trabalho.

Visando a necessidade da calibração das câmeras e do projetor em laboratório e em campo, optou-se por utilizar um modelo de calibração que utiliza um padrão bidimensional. Este padrão pode ser confeccionado com menor custo do que um padrão tridimensional e possui características específicas para a calibração do projetor, além de maior portabilidade.

O padrão bidimensional é composto de um plano com uma matriz de anéis igualmente espaçados nas duas direções. Os centros dos anéis que compõe o padrão formam as coordenadas X e Y do padrão, com passo constante, sempre associadas à coordenada $Z = 0$.

Sem a perda de generalização, assume-se que o padrão bidimensional está em $Z = 0$ no sistema de coordenadas da medição (sistema de coordenadas do sistema de medição). Sendo r_i a i -ésima coluna da matriz de rotação \mathbf{R} , de (1), tem-se [30][31]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = A[r_1 \ r_2 \ r_3 \ t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = A[r_1 \ r_2 \ t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

A Figura A-1 mostra uma das imagens do padrão bidimensional utilizado para as calibrações, adquirida pela Cam0 (direita).

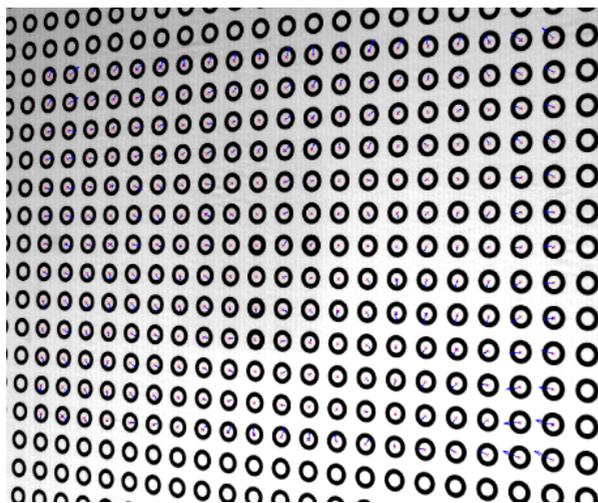


Figura A-1– Imagem do padrão de calibração bidimensional e erros de reprojeção.

Para cada centro do círculo projetado como uma elipse na imagem, as coordenadas 3D do centro do círculo do padrão bidimensional são associadas. A resolução de um sistema linear, a partir dos dados das imagens e de calibração do padrão, determina uma primeira aproximação dos parâmetros de calibração. Um método linear que pode ser utilizado é combinar as equações $\mathbf{m}_e = \mathbf{P}_e \mathbf{M}$ e $\mathbf{m}_d = \mathbf{P}_d \mathbf{M}$ na forma de $\mathbf{B} \cdot \mathbf{M} = \mathbf{0}$, que é uma equação linear em \mathbf{M} . Desta maneira, o ponto \mathbf{M} estimado não satisfaz exatamente as restrições epipolares e não é uma estimativa ótima [21].

Após esta primeira aproximação os resultados podem ser refinados utilizando um método não linear que visa minimizar o erro de reprojeção dos pontos 3D na câmera, como mostra a equação 16.

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|\mathbf{m}_{ij} - \hat{\mathbf{m}}(\mathbf{A}, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{M}_j)\|^2 \quad (16)$$

sendo \mathbf{m}_{ij} o ponto j captado pela imagem i e $\hat{\mathbf{m}}(\mathbf{A}, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{M}_j)$ o respectivo ponto \mathbf{M}_j 3D projetado na imagem i de acordo com a equação (1).

Minimizar a equação 16 é um problema de minimização não linear que pode ser resolvido através do algoritmo de *Levenberg-Marquardt* com a estimativa inicial definida pela aproximação linear [28][29][34]. Detalhes de como implementar este tipo de algoritmo podem ser encontrados em [37][38][39][40][41].

A partir dos parâmetros determinados pela minimização da equação 16, a correção dos centros das elipses projetadas nas imagens é realizada como descrito por Heikkilä em [37]. Esta correção é relativamente simples pelo fato de ser conhecida *a priori*, através dos dados de calibração calculados, a postura da câmera em relação ao do padrão. Com os centros das elipses corrigidos, uma nova iteração da estimativa linear e não linear é realizada.

O modelo de câmera *pinhole* é uma representação simplificada da projeção real, que não é totalmente válida quando níveis de incerteza pequenos são requeridos nas medições. Para modelar de maneira mais adequada a projeção real, é usual que se realize a correção de distorções das lentes [37]. Neste caso, é necessário que o modelo introduza a distorção no ponto teórico projetado matematicamente de modo a resultar no ponto efetivamente capturado pela câmera, como descrito em [36].

Um modelo para introdução da distorção radial e tangencial (descentralização) da lente é o mapeamento das coordenadas teóricas

projetadas matematicamente (x_p, y_p) sem distorção, para as coordenadas correspondentes com distorção (x_d, y_d) , que devem se aproximar das coordenadas reais captadas pelas câmeras, de acordo com as equações abaixo [36][37]:

$$x_d = x_t + \bar{x}_t(k_1 r_t^2 + k_2 r_t^4 + k_3 r_t^6) + (p_1(r_t^2 + 2\bar{x}_t^2) + 2p_2\bar{x}_t\bar{y}_t) \quad (17)$$

$$y_d = y_t + \bar{y}_t(k_1 r_t^2 + k_2 r_t^4 + k_3 r_t^6) + (p_1(r_t^2 + 2\bar{y}_t^2) + 2p_2\bar{x}_t\bar{y}_t)$$

sendo: $\bar{x}_t = x_t - u_0$, $\bar{y}_t = y_t - v_0$, $r_t^2 = \bar{x}_t^2 + \bar{y}_t^2$ e k_1, k_2, k_3 coeficientes da distorção radial, p_1 e p_2 coeficientes da distorção tangencial e r_t é o raio do ponto na imagem em relação ponto principal $P_0 = (u_0, v_0)$. Os coeficientes de distorção são também considerados parâmetros intrínsecos da câmera.

Os parâmetros de correção das distorções podem ser inicialmente determinados a partir de um sistema de equações lineares, conforme descrito em [31], que pode ser resolvido por mínimos quadrados. A Figura A-2 mostra o modelo e os efeitos destas distorções sobre a imagem.

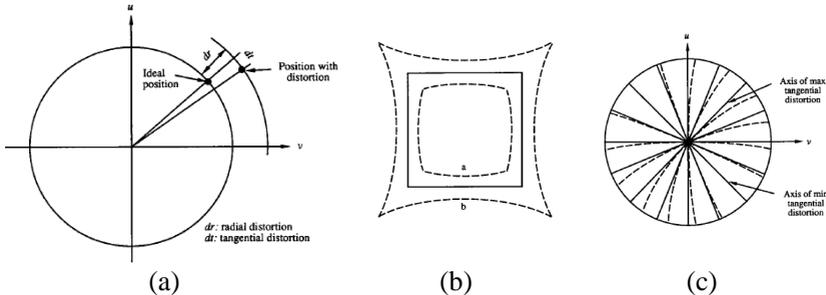


Figura A-2 – (a) Modelo das distorções e (b) efeito da radial e (c) efeito da tangencial [34].

De forma semelhante, um novo refinamento dos dados pode ser agora realizado com todas as variáveis envolvidas através do mesmo método [30][31]:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|m_{ij} - \hat{m}(A, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, R_i, t_i, M_j)\|^2 \quad (17)$$

Na prática, o programa de calibração realiza uma série de iterações alternando a minimização do erro de reprojeção apenas do conjunto de parâmetros intrínsecos ou extrínsecos, finalizando com uma minimização com todo o conjunto de variáveis.

Nota-se que devem ser utilizadas diversas posições (≥ 3) do padrão 2D em todo o volume de medição para realizar a calibração de forma satisfatória. A variação de posição deve incluir diversas rotações no padrão da ordem 90° de modo a evitar mau condicionamento dos dados no processo de minimização dos erros de reprojeção. Estas rotações “quebram” o acoplamento projetivo entre os parâmetros intrínsecos e extrínsecos [45].

Apenas uma matriz A de parâmetros intrínsecos e coeficientes de distorção são determinados para todas as posições do padrão, mas para cada posição, os parâmetros extrínsecos (R, t) são determinados separadamente. Apenas um conjunto de parâmetros extrínsecos, que define o sistema de coordenadas das medições realizadas pelo sistema, deve ser escolhido para formar o conjunto de dados de calibração da câmera e deve ser baseado na mesma posição do padrão para as câmeras e projetor.

Calibração do projetor

Como dito anteriormente, o projetor pode ser considerado como uma câmera invertida, porque projeta imagens ao invés de captá-las. Se o projetor pudesse capturar imagens, sua calibração seria como a de uma câmera. Obviamente a captura direta de imagens pelo projetor não é possível, mas existem técnicas que permitem usar a câmera para “capturar imagens pelo projetor” e transformar estas imagens em imagens do projetor, como se estas tivessem sido capturadas por este. O fundamental desta técnica é determinar a correspondência entre os pixels da câmera e do projetor [32].

É possível utilizar métodos de deslocamento de fase para determinar esta correspondência [32]. Na mesma posição do sistema em que a câmera capturou uma imagem de calibração do padrão 2D, são projetados mapas senoidais com deslocamento de fase para cálculo de um mapa de fase absoluto na direção vertical e outro na direção horizontal.

Para cada centro dos anéis detectados na imagem é possível associar um valor de fase absoluta vertical e outro horizontal, uma vez que a imagem do padrão e as fases absolutas foram obtidas com a mesma posição do padrão, da câmera e do projetor. Mapas de fase absoluta vertical e horizontal nominais do projetor podem ser calculados com base nas imagens nominais projetadas pelo projetor.

Com os valores de fase vertical e horizontal de um determinado ponto de calibração (centro da elipse) na câmera, é procurado o mesmo valor de fase vertical e horizontal na fase nominal do projetor. Com isto

é determinada a correspondência entre os pixels da câmera, do projetor e do ponto do padrão de calibração. Uma técnica para encontrar as correspondências entre os mapas de fase com resolução subpixel pode ser encontrada em [16]. A Figura A-3 mostra um mapa de fase nominal do projetor com os pontos de calibração do projetor como se estes tivessem sido adquiridos por uma câmera.

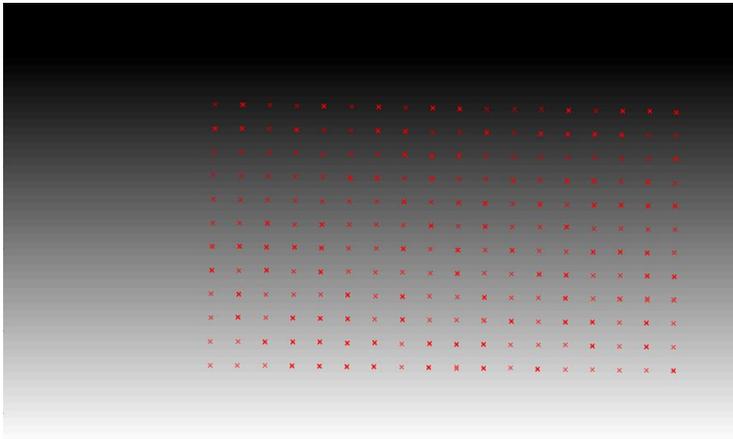


Figura A-3 Pontos de calibração associados à fase nominal do projetor.

Uma vez determinados os pontos de calibração na imagem do projetor, a calibração é realizada de modo semelhante à câmera, como exposto anteriormente, resultando na determinação dos parâmetros de calibração do projetor $(\mathbf{A}, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, \mathbf{R}, \mathbf{t})$.

ANEXO B - Correção do centro da elipse

Diferente do que ocorre na calibração, na medição de alvos circulares projetados como elipses nas câmeras, a correção do erro de excentricidade não é tão trivial pois não é conhecido a priori a inclinação do alvo em relação ao plano imagem. Este anexo detalha como é realizada a correção do erro de excentricidade do centro das elipses captadas pelas câmeras.

Considere $\mathbf{p} = [x, y, 1]^T$ um ponto da borda da elipse, sua equação implícita é dada por $\mathbf{p}^T \mathbf{Q}_e \mathbf{p} = 0$, sendo \mathbf{Q} a matriz cônica [74]:

$$\mathbf{Q}_e = \begin{vmatrix} a & b/2 & d/2 \\ b/2 & c & e/2 \\ d/2 & e/2 & f \end{vmatrix} \quad (20)$$

e a equação cônica pode ser expressa por $\mathbf{x}^T \mathbf{q} = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0$, o vetor de coeficientes como $\mathbf{q} = [a, b, c, d, e, f]^T$ e o conjunto de pontos da borda da elipse detectada na imagem como $\mathbf{x}_i = [x_i^2, x_i y_i, y_i^2, x_i, y_i, 1]^T$, o objetivo é determinar a elipse que minimiza o seguinte critério [74]:

$$\sum_{i=1, N} (\mathbf{p}_i^T \mathbf{Q}_e \mathbf{p}_i)^2 = \mathbf{q}^T (\mathbf{X}^T \mathbf{X}) \mathbf{q} \quad (21)$$

A solução deste problema de minimização é dada pelo autovetor da matriz $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})$ correspondente ao menor autovalor [74]. As equações que relacionam os coeficientes da elipse na forma implícita para a forma explícita (e.g. centro, tamanho dos eixos e ângulo) podem ser encontradas em [75].

O centro da elipse pode ser utilizado para a triangulação, mas este centro não é o mesmo do que o centro do círculo projetado no plano imagem, se este não é paralelo ao plano do alvo. Este efeito é conhecido como erro de excentricidade e gera erros sistemáticos se não corrigido [75][77]. Para determinar corretamente o centro do círculo projetado na imagem, é necessário determinar o cone que produziu a elipse captada. A Figura B-1 mostra o cone formado pela elipse na imagem, o alvo circular e a origem do sistema de coordenadas (SC) da câmera [73].

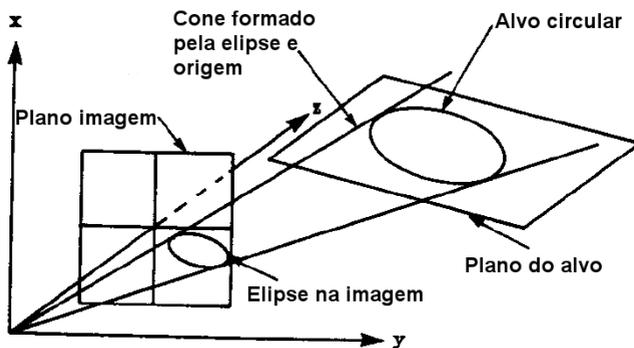


Figura B- 1 – Cone formado pela elipse na imagem e origem do SC da câmera [73].

A equação do cone é dada por:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dxz + Eyz + Fz^2 = 0$$

sendo $A = af_0^2$, $B = cf_0^2$, $C = bf_0^2$, $D = df_0$, $E = ef_0$, $F = f$ e f_0 o comprimento focal da lente, permitindo a determinação direta dos coeficientes do cone [73].

A partir da construção da matriz cônica Q_c do cone elíptico, sua diagonalização, a extração e manipulação dos autovetores e autovalores, são determinados os planos (posição e ângulo) que interceptam o cone formando círculos de raio R (raio conhecido dos alvos), conforme a dedução encontrada em [73]. A posição do centro do círculo de raio R , em relação ao sistema de coordenadas da câmera é dada por [73]:

$$\begin{aligned} x_0 &= \pm e_{1x} R \sqrt{\frac{|\lambda_3|(|\lambda_1| - |\lambda_2|)}{|\lambda_1|(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} + e_{3x} R \sqrt{\frac{|\lambda_1|(|\lambda_2| + |\lambda_3|)}{|\lambda_3|(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \\ y_0 &= \pm e_{1y} R \sqrt{\frac{|\lambda_3|(|\lambda_1| - |\lambda_2|)}{|\lambda_1|(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} + e_{3y} R \sqrt{\frac{|\lambda_1|(|\lambda_2| + |\lambda_3|)}{|\lambda_3|(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \\ z_0 &= \pm e_{1z} R \sqrt{\frac{|\lambda_3|(|\lambda_1| - |\lambda_2|)}{|\lambda_1|(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} + e_{3z} R \sqrt{\frac{|\lambda_1|(|\lambda_2| + |\lambda_3|)}{|\lambda_3|(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \end{aligned} \quad (22)$$

O vetor normal ao plano do alvo circular é dado por [73]:

$$\begin{aligned} v_x &= \pm e_{1x} \sqrt{\frac{|\lambda_1| - |\lambda_2|}{|\lambda_1| + |\lambda_3|}} + e_{3x} \sqrt{\frac{|\lambda_2| + |\lambda_3|}{|\lambda_1| + |\lambda_3|}} \\ v_y &= \pm e_{1y} \sqrt{\frac{|\lambda_1| - |\lambda_2|}{|\lambda_1| + |\lambda_3|}} + e_{3y} \sqrt{\frac{|\lambda_2| + |\lambda_3|}{|\lambda_1| + |\lambda_3|}} \\ v_z &= \pm e_{1z} \sqrt{\frac{|\lambda_1| - |\lambda_2|}{|\lambda_1| + |\lambda_3|}} + e_{3z} \sqrt{\frac{|\lambda_2| + |\lambda_3|}{|\lambda_1| + |\lambda_3|}} \end{aligned} \quad (23)$$

Sendo $[x_0, y_0, z_0]$ a posição do centro do alvo, $[v_x, v_y, v_z]$ o vetor normal ao plano do alvo, R o raio do alvo, $P = [e_1, e_2, e_3]$ a matriz de transformação que traz os resultados do sistema de coordenadas do cone para o da câmera, e λ os autovalores da matriz \mathbf{Q}_c ordenados convenientemente. A posição corrigida na imagem do centro do alvo pode então ser calculada por $x = f_0 x_0/z_0$ e $y = f_0 y_0/z_0$ [73].

A partir destes equacionamentos é possível verificar que existe uma ambigüidade na solução do problema, uma vez que os sinais dos autovetores utilizados na dedução são arbitrários. Esta ambigüidade acontece porque existem duas direções possíveis do plano em que um círculo projetado de raio R gera uma elipse de mesma forma.

Esta ambigüidade entre as duas interpretações não pode ser resolvida a menos que exista informação adicional [74]. Diversos autores resolvem esta ambigüidade com informações específicas da cena sendo medida, como considerando a direção previamente conhecida, por exemplo, com alvos co-planares (*i.e.* três), permitindo o cálculo do vetor normal ao plano ([77]), com restrições definidas pela montagem do sistema ([76]), restrições oriundas da medição de cilindros ([72][74]), numericamente, com o erro de excentricidade modelado dentro do *bundle adjustment* nas últimas iterações ([75]) ou ainda quando é realizada a calibração através de um plano com alvos circulares em que a orientação é conhecida ([37]).

Alguns autores afirmam que na fotogrametria convencional o efeito do erro de excentricidade pode ser quase completamente compensado pela utilização de alvos relativamente pequenos e pela auto-compensação ocorrida no *bundle-adjustment* [75][77].

Neste trabalho foi desenvolvida uma técnica simples que permite resolver a ambigüidade com base nas informações das duas câmeras. Os ângulos entre cada um dos dois vetores de vetores das câmeras são calculados. Como a normal de cada câmera esta em relação ao sistema de coordenadas local da câmera, o inverso da matriz de rotação determinada na calibração é utilizada para transformar os vetores para um sistema de coordenadas único, o do sistema de medição.

Após a transformação, o menor valor do ângulo calculado entre as normais das duas câmeras define a direção correta da normal do alvo para cada câmera, possibilitando assim remover a ambigüidade do e corrigir o erro de excentricidade. A figura B-2 ilustra a normal ao plano do alvo e as normais ambíguas de cada câmera.

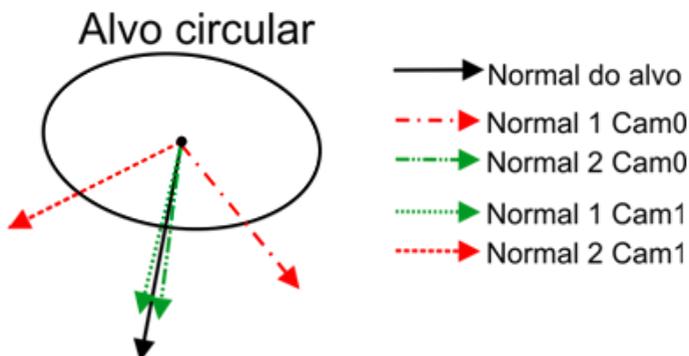


Figura B – 2 Normais ambíguas de cada câmera comparadas com a normal do alvo.

ANEXO C - Orientação absoluta

Após a detecção de dois conjuntos de coordenadas de alvos correspondentes, um conjunto com coordenadas antes da movimentação do sistema e outro com coordenadas depois da movimentação é possível estimar o movimento (seis graus de liberdade) entre as duas observações dos alvos. O problema de determinar a movimentação relativa que transforma um conjunto de pontos 3D em outro é conhecido como ‘problema de orientação absoluta’ (*absolute orientation problem*) [50]. A solução aqui apresentada é descrita em [50] e mais detalhes do desenvolvimento matemático pode ser encontrado em [83][88].

Suponha que são dados dois conjuntos de pontos rígidos 3D:

$H_1 = \{M_1^{H_1}, M_2^{H_1}, \dots, M_n^{H_1}\}$ e $H_2 = \{M_1^{H_2}, M_2^{H_2}, \dots, M_n^{H_2}\}$ onde $M_i^{H_1}$ e $M_i^{H_2}$ são coordenadas do i -ésimo ponto correspondente antes e depois da movimentação do sistema, respectivamente. O objetivo é determinar qual a translação t e a rotação R que transforma H_1 em H_2 de modo que o erro médio quadrático se torna mínimo. O erro médio quadrático se calcula pela equação:

$$e_{(R,t)}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|M_i^{H_2} - (R \cdot M_i^{H_1} + t)\|^2 \quad (22)$$

A idéia por trás do algoritmo utilizado é desacoplar translação e rotação. As distâncias dos pontos $M_i^{H_1}$ e $M_i^{H_2}$ em relação aos seus centróides μ_{H1} e μ_{H2} serão iguais antes e depois da translação. Neste caso, o centróide pode ser visto como o centro geométrico associado à média de suas coordenadas [52]. Isso acontece porque rotação e translação são transformações euclidianas e não afetam a posição relativa entre os pontos do mesmo conjunto, eles se movem como um corpo rígido. Com esta informação o problema pode ser dividido em dois:

1. Achar R que minimiza $e_{(R)}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|M_i^{H_2} - R \cdot M_i^{H_1}\|^2$
2. Então achar a translação t dada por: $t = \mu_{H2} - R \cdot \mu_{H1}$

O problema de minimização em pode ser resolvido através da decomposição singular de valor SVD (*Singular Value Decomposition*), através dos seguintes passos:

$$\text{Calculo dos centróides: } \mu_{H1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i^{H_1} \text{ e } \mu_{H2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i^{H_2}$$

Calculo da matriz $\Sigma_{H_1H_2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mathbf{M}_i^{H_2} - \mu_{H_2}) \times (\mathbf{M}_i^{H_1} - \mu_{H_1})^T$

Considere UDV^T como os valores singulares da decomposição de $\Sigma_{H_1H_2}$, ou seja: $UDV^T = SVD(\Sigma_{H_1H_2})$ e $S = I$ se $\det(U) \cdot \det(V) = 1$ ou $S = \text{diag}(1, 1, \dots, -1)$ se $\det(U) \cdot \det(V) = -1$. Note que S tem a mesma dimensão que D .

Com isto é possível determinar R e t através de:

$$R = USV^T$$

$$t = \mu_y - R \cdot \mu_x$$

A formulação exposta acima é um problema de mínimos quadrados, uma vez que deve-se minimizar uma função erro quadrática, que são muito sensíveis a pontos espúrios que podem levar a resultados errôneos. Se todos os pontos estão corretos, apenas afetados por ruído gaussiano, o algoritmo funciona muito bem. Este é um dos motivos de realizar testes para garantir a medição dos alvos de forma robusta. Outros algoritmos para este tipo de calculo são comparados em [85].

ANEXO D - Alinhamento refinado

O algoritmo TrICP (*Trimmed ICP*) pode ser utilizado para realizar o alinhamento refinado e o cálculo das diferenças entre superfícies descritas por nuvens de pontos tridimensionais, aproximadamente alinhadas, parcialmente sobrepostas e com a presença de ruído e pontos espúrios [90]. O algoritmo apresentado é descrito em [90] com base em [91].

Considere dois conjuntos de pontos 3D, $X = \{x_i\}_1^{N_p}$ pontos a alinhar e $Y = \{y_i\}_1^{N_m}$ pontos de referência. Normalmente o número de pontos nos dois conjuntos é diferente ($N_p \neq N_m$) e uma grande porção dos pontos a alinhar pode não ter correspondência nos pontos de referência. Assim, o número de pontos a alinhar que tem correspondência pode ser expresso por $N_{po} = \xi N_p$, onde ξ é um número entre 0 e 1 denominado relação de sobreposição (correspondência) dos conjuntos de pontos.

É necessário definir qual a transformação que leva o subconjunto de N_{po} pontos de X_A para o melhor alinhamento possível com X_R . Para a rotação \mathbf{R} e a translação \mathbf{t} a transformação dos pontos é:

$$x_i(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \mathbf{R}x_i + \mathbf{t} \quad X(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \{x_i(\mathbf{R}, \mathbf{t})\}_1^{N_p} \quad (26)$$

A distância individual de um ponto $x_i(\mathbf{R}, \mathbf{t})$ em relação ao conjunto Y é definida como a distância ao ponto mais próximo y_{cl} de Y :

$$y_{cl}(i, \mathbf{R}, \mathbf{t}) = \min_{y \in Y} \|y - x_i(\mathbf{R}, \mathbf{t})\| \quad (27)$$

Com os pares de pontos definidos pela menor distância em (27), é calculada a transformação (\mathbf{R}, \mathbf{t}) que minimiza a soma dos quadrados das N_{po} distâncias individuais $d_i^2(\mathbf{R}, \mathbf{t})$ onde:

$$d_i(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \|y_{cl}(i, \mathbf{R}, \mathbf{t}) - x_i(\mathbf{R}, \mathbf{t})\| \quad (28)$$

Esta transformação pode ser determinada pelo método de orientação absoluta (*absolut orientation problem*) descrito em [50] e descrito no **Anexo C**.

A transformação é aplicada no conjunto de pontos X e as distâncias entre os novos pontos correspondentes são recalculadas. Estes passos são iterativamente repetidos até que algum critério de parada seja atingido, como a média das distâncias entre os pontos for pequena, variar pouco entre iterações ou um número máximo de iterações foi atingido, resultando em nuvens de pontos alinhadas.

O TrICP utiliza a máxima quantidade de pontos com correspondência válida, evitando pontos espúrios, ajustando automaticamente o valor de ξ a cada iteração minimizando a seguinte equação:

$$\psi(\xi) = \frac{e(\xi)}{\xi^{1+\lambda}} \quad (29)$$

sendo $\lambda \geq 0$ um parâmetro predefinido através de experimentos (tipicamente 1 ou 2) e $\psi(\xi)$ busca minimizar o erro médio quadrático $e(\xi)$ em ordem crescente dos N_{po} pares utilizando o maior numero de pontos possíveis.

A forma típica das curvas $\psi(\xi)$ e $e(\xi)$ pode ser visualizada na Figura 7.7. As funções são suaves e começam a crescer drasticamente quando ξ é maior do que a sobreposição das superfícies. Usualmente $\psi(\xi)$ tem um único valor mínimo, enquanto $e(\xi)$ não tem ou seu mínimo é menos evidente.

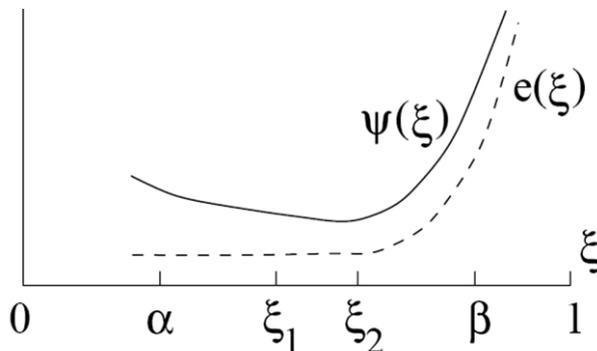


Figura D-1 Curvas típicas de $\psi(\xi)$ e $e(\xi)$ [90].

O processo de minimização é realizado no intervalo $[\alpha, \beta]$. É assumido que neste intervalo $\psi(\xi)$ tem apenas um único valor mínimo. Como a função é unidimensional, o processo de busca do mínimo pode ser realizado através do algoritmo unidimensional da seção áurea [90]. Detalhes deste tipo algoritmo pode ser encontrado em [42]. O algoritmo TrICP exige grande esforço computacional por ser iterativo e ter que formar novas pares de pontos a cada iteração [95].

ANEXO E – Principais componentes do sistema

Neste anexo são listados os principais itens do sistema de medição.

Cameras digitais para aquisição de imagens:

Marca: Point Grey (www.ptgrey.com)

Modelo: Flea2 - FL2-20S4M/C

Resolução: (1600x1200) pixel

Tamanho do pixel: (4,4x4,4) μm

Sensor: Sony ICX274 1/1.8"

Padrão de montagem da lente: C-mount

Padrão de comunicação: IEEE-1394b (Firewire B)



Figura E-1 Modelo de câmera utilizada na montagem do sistema.

Lentes:

Marca: Computar (<http://computarganz.com/>)
Modelo: Computar M0814-MP Megapixel Lens
Comprimento focal: 8mm
Máxima abertura: 1:1.4
Tamanho máximo CCD : 2/3" C-Mount
Foco e Iris manual



Figura E-2 Modelo da lente utilizada no sistema.

Projektor multimídia

Marca: LG (www.lge.com)

Modelo: HS101

Tecnologia LED / DLP

Luminosidade: 100 ANSI lumens.

Contraste 2000:1

Principais dimensões: (154 x 117 x 50) mm

Padrão de comunicação: Digital HDMI

Resolução: (800 x 600) pixel

Frequência de atualização: 60 Hz

Comprimento focal da lente: 15,17 mm

Foco da projeção manual



Figura E-3 Projetor multimídia utilizado pelo sistema.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco