



**FERRAMENTA DE ANÁLISE E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL
DE SISTEMA CATADIÓPTRICO OMNIDIRECIONAL
HIPERBÓLICO DE LOBO DUPLO.**

Marcello Marinho Ribeiro

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FERRAMENTA DE ANÁLISE E SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL DE SISTEMA CATADIÓPTRICO
OMNIDIRECIONAL HIPERBÓLICO DE LOBO DUPLO**

MARCELLO MARINHO RIBEIRO

ORIENTADORA: JOSÉ MAURÍCIO SANTOS TORRES DA MOTTA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO: ENM.DM - 056 A/12

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO – 2012

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FERRAMENTA DE ANÁLISE E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL
DE SISTEMA CATADIÓPTRICO OMNIDIRECIONAL
HIPERBÓLICO DE LOBO DUPLO.**

MARCELLO MARINHO RIBEIRO

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM SISTEMAS MECATRÔNICOS.**

APROVADA POR:

**Prof José Maurício Santos Torres da Motta, PhD (EMM-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Díbio Leandro Borges, PhD (CIC-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Adolfo Bauchspiess, Dr. -Ing. (ENE - UnB)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 18 DE DEZEMBRO DE 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

RIBEIRO, MARCELLO MARINHO

Ferramenta de Análise e Simulação Computacional de Sistema Catadióptrico Omnidirecional Hiperbólico de Lobo Duplo [Distrito Federal] 2012.

xvii, 113p. 210 x 297 mm (EMN/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2012).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Visão Omnidirecional

2. Processamento de Imagens

3. Esterescopia

4. Sensor Catadióptrico

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RIBEIRO, M. M. (2011). Ferramenta de Análise e Simulação Computacional de Sistema Catadióptrico Omnidirecional Hiperbólico de Lobo Duplo. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos ENM.DM - 056 A/12, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 113p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Marcello Marinho Ribeiro.

TÍTULO: Ferramenta de Análise e Simulação Computacional de Sistema Catadióptrico Omnidirecional Hiperbólico de Lobo Duplo.

GRAU: Mestre

ANO: 2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Marcello Marinho Ribeiro
Av. Parque Águas Claras, Lotes 695/755,
Bloco A, Apartamento 105, Águas Claras
71.906-500 Brasília – DF – Brasil.
marcellomrib@hotmail.com

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado a todos que acreditaram no meu potencial, e continuam acreditando, servindo de motivação para minha evolução tanto como pessoa, quanto como profissional:

A minha família: mãe Mary, irmão Aymar e pai Marcos (*in memoriam*).

Aos meus parentes: por todas as horas de diversão, de descontração e por me fazer sentir tão querido, mesmo estando tão longe de casa.

A minha namorada: Bethânia, por suportar esta distância e mesmo de longe, me passar tanta força e conseguir me fazer sentir tão bem. Eu te amo minha princesa!

Aos colegas de trabalho e amigos pessoais por gastarem seu bom humor comigo e me aturarem.

Aos demais que de alguma forma me deram ajudaram e colaboraram para a realização deste sonho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a todos aqueles que de alguma forma colaboraram com o desenvolvimento deste trabalho, tornando possível assim sua conclusão. Agradeço

Ao CNPQ e pelo auxílio financeiro que possibilitou o início do desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu Orientador: Professor José Maurício S.T. Motta, PhD, por todo o auxílio ao longo do desenvolvimento deste.

Aos professores que passaram em meu caminho. Em especial ao Professor Marco Antonio F. Menezes, que durante a graduação, me abriu os olhos para a ciência e mostrou que o real conhecimento sempre vem acompanhado de simplicidade e humildade.

Aos Membros da banca: Professor Díbio Leandro Borges, PhD e Professor Adolfo Bauchspiess, Dr. por prestarem grande ajuda ao sugerirem as melhorias necessárias para que o trabalho fosse realizado da melhor forma possível.

RESUMO

A cada dia tornam-se mais comuns aplicações de Visão Computacional no cotidiano. Com o intuito de fortalecer este tipo de aplicações, torna-se interessante o estudo de técnicas e métodos que permitam aumentar o campo de visão de câmeras (ferramentas básicas para captura de imagens em sistemas computacionais de visão). O campo de estudo da visão computacional omnidirecional aparece então como uma estratégia promissora para dar vazão a este interesse. Com foco em aumentar a capacidade da câmera em capturar informações do ambiente, a visão omnidirecional levanta uma variedade de técnicas com tal propósito, entre elas a visão omnidirecional catadióptrica, que baseia-se na utilização de espelhos para permitir a captura de imagens com campo de visão de 360° do ambiente.

Entre os diferentes perfis de espelhos possíveis de se utilizar junto à câmera, este trabalho foca no uso do espelho convexo hiperbólico de lobo duplo. Este espelho além de possuir a propriedade de centro único de projeção (que minimiza as distorções geométricas das imagens geradas pelo ambiente), permite a captura de duas imagens diferentes da mesma cena, permitindo assim o uso de estereoscopia omnidirecional para cálculo de informações do ambiente.

Este trabalho tem como objetivo verificar a influência dos parâmetros de criação do espelho hiperbólico de lobo duplo na reconstrução de cenas simples. Para tal, a simulação computacional de um sistema omnidirecional estéreo catadióptrico baseado em espelho duplo, a partir de imagens panorâmicas cilíndricas, é realizada. Estas imagens servem de base para a realização da estereoscopia omnidirecional.

Um sistema computacional denominado de OmniViz foi elaborado para tal tarefa. Ele permite que o usuário personalize os parâmetros de construção do espelho, simula a imagem omnidirecional a partir de uma imagem panorâmica cilíndrica, acentua as características que serão utilizadas (neste caso os cantos dos objetos), realiza a correlação dos pontos e calcula as distâncias destas para o sistema de visão simulado.

Além disso um trabalho de análise dos resultados é realizado com a ajuda do MatLab® para se validar a eficiência do sistema apresentado. Esta análise baseia-se no erro associado às alterações dos parâmetros do espelho, em relação ao cálculo das informações do ambiente. Os resultados demonstram que as escolhas corretas de parâmetros do espelho, implicam na capacidade do espelho de gerar imagens que podem facilitar ou dificultar a reconstrução de uma determinada cena.

ABSTRACT

Each day computer vision applications become more common in daily life. Aiming at strengthening this type of applications the study of techniques and methods to increase the cameras field of view becomes interesting. The field of omnidirectional computer vision appears as a promising strategy to give vents to this interest. With focus on increasing the camera's capacity to capture information from an environment, the omnidirectional vision raises a variety of techniques for that purpose, including the catadioptric omnidirectional vision, which is based on the use of mirrors to allow the capture a wide angle image from the environment.

Among different profiles of possible mirrors that could be used with the camera, this work focuses on the use of convex hyperbolic double lobed mirror. This mirror also has the single view point property (minimizing geometric images distortions generated by the environment), which allows to capture two different images of the same scene, thus making it possible the use of omnidirectional stereoscopic for calculating environmental information.

This work aims to verify of the parameters influence to create the hyperbolic double lobed mirror to allow the scene reconstruction. For this, the simulation of a double lobed catadioptric omnidirectional system from cylindrical panoramic images is performed. These images are basis for performing stereoscopic omnidirectional to calculate the distances between objects corners present in the scene relative the capture system.

A software called OmniViz was prepared for such task. It allows the user to customize the mirror design parameters, simulates the omnidirectional image from a cylindrical panoramic image, emphasizes the features that will be used (in this case the objects corners), performs the points correlation and calculates the distances between points and the simulated vision system.

Still an analysis is performed with aid of MatLab ® to validate the efficiency of the presented system. This analysis is based on the error associated with the parameter changes of the mirror design, in relation to calculating environmental data. The results demonstrate that the correct choices of the design mirror parameters imply in the mirror ability to generate images that can facilitate or hinder the reconstruction of a particular scene.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	APLICAÇÕES EM VISÃO OMNIDIRECIONAL	5
3	VISÃO OMNIDIRECIONAL CATADIÓPTRICA.....	13
3.1	CENTRO ÚNICO DE PROJEÇÃO	13
3.2	PARÂMETROS DO CONJUNTO ESPELHO/CÂMERA	16
3.3	PROJETO DO ESPELHO HIPERBÓLICO.....	16
3.4	CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE IMAGEM OMNIDIRECIONAL	20
3.5	RETIFICAÇÃO DE IMAGENS	24
3.5.1	<i>Retificação Direta</i>	<i>25</i>
3.5.2	<i>Retificação com o Centro único de projeção e equação do espelho.....</i>	<i>26</i>
4	ESTEREOSCOPIA OMNIDIRECIONAL UTILIZANDO ESPELHOS DE LOBO DUPLO	32
4.1	EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS	34
4.2	CORRESPONDÊNCIA DE PONTOS	36
4.3	TRIANGULAÇÃO.....	38
5	METODOLOGIA	39
5.1	O SISTEMA OMNIDIRECIONAL PROPOSTO	40
5.2	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA	44
5.2.1	<i>Definição da retificação de imagens panorâmicas em imagens omnidirecionais.....</i>	<i>46</i>
5.2.2	<i>Filtragem de imagens.....</i>	<i>49</i>
5.2.3	<i>Estereoscopia omnidirecional implantada.....</i>	<i>51</i>
5.2.3.1	<i>Extração de características</i>	<i>52</i>
5.2.3.2	<i>Correspondência de pontos</i>	<i>57</i>
5.2.3.3	<i>Triangulação.....</i>	<i>60</i>
5.2.4	<i>Processo de avaliação dos resultados adquiridos</i>	<i>64</i>
6	RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES	66
7	CONCLUSÕES	92

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – CLASSIFICAÇÃO DE ALGUNS TRABALHOS EM VISÃO OMNIDIRECIONAL.	5
FIGURA 2.2 - SISTEMA ROTACIONAL DE CÂMERA PARA AQUISIÇÃO DE IMAGEM PANORÂMICA. (GRASSI JR, (2002).....	6
FIGURA 2.3 - ARRANJO COM MÚLTIPLAS CÂMERAS PARA AQUISIÇÃO DE IMAGENS OMNIDIRECIONAIS (YODA <i>ET AL</i> , 2006).....	7
FIGURA 2.4 - SISTEMA DE VISÃO OMNIDIRECIONAL CATADIÓPTRICO (GRASSI JR, 2002).	8
FIGURA 2.5 - GANHO ANGULAR VERTICAL DO ESPELHO CÔNICO (CH AHL & SRINIVASAN, 2004 – ADAPTADO).	10
FIGURA 2.6 - MAPEAMENTO LINEAR DO PLANO HORIZONTAL. (HICKS & BAJCSY, 1999);	11
FIGURA 3.1 - VISÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DE VISÃO OMNIDIRECIONAL CATADIÓPTRICO.	13
FIGURA 3.2 - FORMAS DE ESPELHOS CONVEXOS: A) NÃO POSSUI CENTRO ÚNICO DE PROJEÇÃO (F'). B) E C) POSSUEM TAL PROPRIEDADE (GRASSI JR, 2002 - ADAPTADO).	14
FIGURA 3.3 – HIPÉRBOLE (SOUZA & MOTTA, 2008).	17
FIGURA 3.4 - GEOMETRIA DO ESPELHO HIPERBÓLICO ASSOCIADO A UMA CÂMERA DE PERSPECTIVA)(SOUZA & MOTTA, 2008 - ADAPTADO)..	18
FIGURA 3.5 - FORMAS DO ESPELHO HIPERBÓLICO EM FUNÇÃO DO PARÂMETRO B , CONSIDERANDO O PARÂMETRO $A= 30$ (SVOBODA <i>ET AL</i> , 1997 - ADAPTADO)	20
FIGURA 3.6 - PROJEÇÃO ESFÉRICA (PEREIRA <i>ET AL.</i> , 2005 – ADAPTADO).	22
FIGURA 3.7 - GRADE DE CALIBRAÇÃO PARA UM SISTEMA OMNIDIRECIONAL (PEREIRA <i>ET AL</i> , 2005).	23
FIGURA 3.8 - PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DE IMAGENS OMNIDIRECIONAIS (JUNIOR, 2002 - ADAPTADO).	25
FIGURA 3.9- PLANO DE PROJEÇÃO CILÍNDRICA E O CENTRO ÚNICO DE PROJEÇÃO (GRASSI JR, 2002 - ADAPTADO).	27
FIGURA 3.10 - IMAGEM OMNIDIRECIONAL (GRASSI JR, 2002).	28

FIGURA 3.11 - IMAGEM PANORÂMICA CILÍNDRICA ORIGINADA A PARTIR DA RETIFICAÇÃO DIRETA DA IMAGEM OMNIDIRECIONAL (GRASSI JR, 2002).	28
FIGURA 3.12 - IMAGEM PANORÂMICA CILÍNDRICA ORIGINADA A PARTIR DA RETIFICAÇÃO PROPOSTA POR GRASSI JR (2002) QUE LEVA EM CONSIDERAÇÃO A EQUAÇÃO DO ESPELHO E O CENTRO ÚNICO DE PROJEÇÃO (GRASSI JR, 2002).	28
FIGURA 3.13 - RETIFICAÇÃO UTILIZANDO A GEOMETRIA DO ESPELHO JUNTO À PROPRIEDADE DE CENTRO ÚNICO DE PROJEÇÃO (GRASSI JR, 2002 - ADAPTADO)	29
FIGURA 4.1 – ESPELHO DE LOBO DUPLO COM DESLOCAMENTO HORIZONTAL DE UM DOS SEUS PONTOS FOCAIS (CABRAL <i>ET AL</i> , 2008).....	34
FIGURA 4.2 – CORRESPONDÊNCIA DE PONTOS (C1 E C2) EM UM SISTEMA OMNIDIRECIONAL EM ESPELHO DE LOBO DUPLO, USANDO A BUSCA EM UMA LINHA RADIAL (EM VERMELHO) (SOUZA, 2009). ...	37
FIGURA 4.3 - REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE TRIANGULAÇÃO PARA UM SISTEMA DE VISÃO ESTÉREO OMNIDIRECIONAL.	38
FIGURA 5.1 - ESQUEMA DE SISTEMA OMNIDIRECIONAL BASEADO EM ESPELHO DE LOBO DUPLO.	39
FIGURA 5.2 – R_{pixel1} E R_{pixel2}	41
FIGURA 5.3 - DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE ESPELHO HIPERBÓLICO DE LOBO DUPLO, CONSEGUIDOS ATRAVÉS DAS VARIAÇÕES DOS PARÂMETROS DO CONJUNTO ESPELHO/CÂMERA.....	43
FIGURA 5.4 - TELA DE CONFIGURAÇÃO DE PARÂMETROS DO SISTEMA IMPLEMENTADO OMNIVIZ.	45
FIGURA 5.5 – IMAGEM PANORÂMICA GERADA PELOS SOFTWARE POVRAY® COM DIMENSÃO DE 1600 X 1200 <i>PIXELS</i>	45
FIGURA 5.6 - POSICIONAMENTO DOS OBJETOS NA CENA UTILIZADA PARA VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA. OBJETOS RETANGULARES (EM CINZA) RODEANDO O PONTO FOCAL DO SISTEMA (EM VERMELHO).	46
FIGURA 5.7 –RESULTADO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DIRETA APLICADO À FIGURA 5.5.....	47
FIGURA 5.8 - PERFIL DO ESPELHO SIMULADO.	48

FIGURA 5.9- RESULTADO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO UTILIZANDO A PROPRIEDADE DE CENTRO ÚNICO DE PROJEÇÃO ASSOCIADO À EQUAÇÃO DO ESPELHO, APLICADO À FIGURA 5.5.....	48
FIGURA 5.10 - RESULTADO DO PROCESSO DE FILTRAGEM GAUSSIANA EM RELAÇÃO A FIGURA 5.6, UTILIZANDO-SE UMA MÁSCARA COM JANELA $W=5$	51
FIGURA 5.11 OPERADORES DE SOBEL.....	53
FIGURA 5.12 - DETECÇÃO DE CONTORNOS E BINARIZAÇÃO DE IMAGEM APLICADOS À FIGURA 5.6, COM VALOR DE $T = 105$	54
FIGURA 5.13 - RESULTADO DA TÉCNICA DE DETECÇÃO DE CANTOS APLICADA AO SISTEMA OMNIVIZ ($T=100000$).....	56
FIGURA 5.14 - JANELA QUADRADA PARA REALIZAR O SOMATÓRIO DOS QUADRADOS DA DIFERENÇAS.....	58
FIGURA 5.15 - MODELO RADIAL DA JANELA DO SOMATÓRIO DOS QUADRADOS DAS DIFERENÇAS (SOUZA, 2009).....	59
FIGURA 5.16 – EXEMPLO DE PAR DE PONTOS CORRESPONDENTES DETECTADOS (ASSINALADOS EM VERMELHO).....	59
FIGURA 5.17 - ESQUEMA GEOMÉTRICO PARA MAPEAMENTO: A) TRIANGULAÇÃO DE INFORMAÇÕES, B) CCD DA CÂMERA (SOUZA, 2009; ADAPTADO) . -.....	60
FIGURA 5.18 - FLUXOGRAMA DO SISTEMA OMNIVIZ, PARA A TRIANGULAÇÃO DE PONTOS CORRESPONDENTES.....	63
FIGURA 5.19 - MAPEANDO COORDENADAS DOS PONTOS CALCULADOS.....	64
FIGURA 6.1 - AMBIENTE EXPERIMENTAL SIMULADO PARA AFERIÇÃO DOS RESULTADOS. ALÉM DOS CUBOS QUE COMPÕEM A CENA, O PONTO VERMELHO REPRESENTA A POSIÇÃO DO PONTO FOCAL DA CÂMERA.	67
FIGURA 6.2 - IMAGEM PANORÂMICA CILÍNDRICA COM RESOLUÇÃO DE 2400X1400 <i>PIXELS</i> UTILIZADA NA PRIMEIRA RODADA DE EXPERIMENTOS.....	68
FIGURA 6.3 - IMAGENS REALIZADAS NO AMBIENTE SIMULADO COM DISTÂNCIAS DE: A) 100 <i>CM</i> , B) 150 <i>CM</i> E C) 200 <i>CM</i> , DOS OBJETOS EM RELAÇÃO AO PONTO FOCAL DA CÂMERA. ESTAS, POR SUA VEZ	

GERAM AS IMAGENS PANORÂMICAS PARA AS DISTÂNCIAS DE: D) 100 CM, E) 150 CM E F) 200 CM.....	69
FIGURA 6.4 - CANTOS DOS OBJETOS VISÍVEIS PELA CÂMERA.....	71
FIGURA 6.5 - 1ª RODADA DE EXPERIMENTOS.....	72
FIGURA 6.6 – A) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 1ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA R_{topo1} E B) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 1ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA R_{topo2}	73
FIGURA 6.7 - A) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 1ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA R_{pixel1} E B) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 1ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA R_{pixel2}	74
FIGURA 6.8 – A) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 1ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA C_1 E B) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 1ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA C_2	75
FIGURA 6.9 – A) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 2ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA R_{topo1} E B) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 2ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA R_{topo2}	76
FIGURA 6.10 – A) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 2ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA R_{pixel1} E B) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 2ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA R_{pixel2}	77
FIGURA 6.11 - RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 2ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA C_1 E B) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 2ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA C_2	78
FIGURA 6.12 – A) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 3ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA R_{topo1} E B) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 3ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA R_{topo2}	79
FIGURA 6.13 – A) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 3ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA R_{pixel1} E B) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 3ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA R_{pixel2}	80

FIGURA 6.14 – A) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 3ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA C_1 E B) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 3ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA C_2	81
FIGURA 6.15 – A) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 4ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA R_{topo1} E B) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 4ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA R_{topo2}	82
FIGURA 6.16 - A) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 4ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA R_{pixel1} E B) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 4ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA R_{pixel2}	83
FIGURA 6.17 – A) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 3ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA A) C_1 E B) RESULTADOS DOS ERROS GERADOS NA 3ª RODADA DE EXPERIMENTOS PARA C_2	84
FIGURA 6.18 - RETIFICAÇÃO DE IMAGEM PANORÂMICA DE 2400 X 1400 PIXELS, EM UMA IMAGEM OMNIDIRECIONAL DE 1100X1100 PIXELS ($R_{pixel2} \leq \frac{V_{pn}}{3}$)	86
FIGURA 6.19 - RELAÇÃO DOS INDICADORES DE ERRO POR PARÂMETRO EM FUNÇÃO DAS RODADAS DE EXPERIMENTOS REALIZADAS A) RELAÇÃO PARA ERRO DE POSIÇÃO E B) RELAÇÃO PRA ERRO DE FORMA.	87
FIGURA 6.20 - MÉDIA DOS ERROS NAS 4 RODADAS DE EXPERIMENTOS A) MÉDIA DO ERRO DE POSIÇÃO E B) MÉDIA DO ERRO DE FORMA EM CADA RODADA DE EXPERIMENTOS.	90

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1 - PARÂMETROS DOS ESPELHOS PRESENTES NA FIGURA 5.3.....	42
TABELA 5.2 - PARÂMETROS UTILIZADOS PARA RETIFICAÇÃO DA FIGURA 5.5.	47
TABELA 6.1 - POSICIONAMENTOS DOS OBJETOS PRESENTE NO AMBIENTE.	66
TABELA 6.2 - ALTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DURANTE OS EXPERIMENTOS	67

TABELA 6.3 - VALORES DOS CANTOS DOS OBJETOS NO AMBIENTE GERADO PELA FERRAMENTA POVRAY®.....	71
TABELA 6.4 - EXPOSIÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE DE ERRO POR DISTÂNCIAS ENCONTRADO TANTO NA MÉDIA DE ERROS DE POSIÇÃO QUANTO NA MÉDIA DE ERROS DE FORMA.....	90

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
a, b	Catetos de um triângulo retângulo. (mm)
A	Distância entre foco do espelho e o plano de projeção cilíndrica usado para obter a imagem panorâmica. (mm)
C	Matriz de autovetores de um ponto p .
CCD	<i>Charge Coupled Device</i> .
$c1$ e $c2$	Janelas para realizar o somatório das diferenças.
e	Excentricidade do Espelho.
f	Distância entre o CCD e o foco da câmera. (mm)
G_x	Gradiente da imagem na direção x .
G_y	Gradiente da imagem na direção y .
h	Distância entre a borda do espelho e o foco da câmera. (mm)
I	Matriz que representa a imagem.
k	Constante que relaciona a medida de f em milímetros para um equivalente em pixels.
l	Distância entre o centro da esfera unitária e o centro de projeção. (mm)
m	Distância entre o centro da esfera unitária e o plano de projeção da imagem. (mm)
SSD	<i>Squared Sum Difference</i> .
p	Pixel da imagem omnidirecional.
P	Ponto do espaço real.
P'	Ponto na superfície da esfera unitária.
r_p	Distância radial de um pixel na imagem omnidirecional retificada, utilizando-se o método que leva em consideração a propriedade de centro único de projeção e a equação do espelho hiperbólico. ($pixels$)
r_1, r_2	Raio das circunferências da janela $C1$ e $C2$. (mm)
R	Resposta da equação de detecção de cantos para um pixel p .
R_{pixel}	Raio da imagem omnidirecional produzida pelo reflexo do espelho. (mm)
R_{topo}	Raio da base da hipérbole que define o perfil do espelho. (mm)

SVP	<i>Single View Point.</i>
T_{pixel}	Largura dos pixels que compõem o <i>CCD</i> da câmera. (<i>mm</i>)
U_{pn}, V_{pn}	Largura e Comprimento da imagem panorâmica cilíndrica. (<i>pixels</i>)
u_{pn}, v_{pn}	Coordenadas do ponto p presente na imagem panorâmica cilíndrica. (<i>pixels</i>)
x_1, x_2	Coordenadas dos pontos do perfil do espelho. (<i>mm</i>)
X	Abscissa da coordenada de localização do ponto analisado no ambiente. (<i>mm</i>)
Y	Ordenada da coordenada de localização do ponto analisado no ambiente. (<i>mm</i>)
W	Largura de janela quadrada em torno do ponto p . (<i>pixels</i>)
α	Ângulo de visão vertical do espelho. (<i>graus</i>)
ε	Usado para determinar a largura da janela circular.
θ	Distância angular entre o ponto p e o eixo x positivo. (<i>graus</i>)
φ	Ângulo de elevação. (<i>graus</i>)
ψ	Ângulo radial, ou de entrada dos raios ópticos dentro da câmera. (<i>graus</i>)
τ	Limiar para detecção de características.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de se fazer máquinas entenderem imagens e reconhecer padrões vem se tornando uma aplicação cada vez mais frequente. A visão computacional ganha espaço e se insere no cotidiano de formas diferentes. Sistemas de segurança que reconhecem os usuários através de imagens, sistemas de navegação autônoma e sistemas de soldagem de precisão em três dimensões (3D) são algumas das aplicações que envolvem a visão computacional.

Um sistema de visão computacional pode ser composto por diferentes formas de se capturar imagens. Em aplicações de tempo real, basicamente, é necessário o uso de uma câmera para que se possa captar imagens que servirão de fonte de informações para alimentar um determinado sistema.

Um problema inerente ao uso de câmera para captura de imagens é a limitação do campo de visão da mesma. Assim sendo, faz-se necessário o estudo de formas para contornar este problema, tornando possível o aumento do campo de visão, para que estas consigam melhorar seu desempenho e do sistema como um todo. O desenvolvimento de sistemas que utilizam imagens panorâmicas (imagens que capturam ou tentam capturar informações em 360° de um ambiente, também chamadas de imagens omnidirecionais) vem se tornando uma resposta a estas limitações.

Algumas técnicas são conhecidas para melhorar o campo de visão de uma câmera através da aquisição de imagens panorâmicas. Uma das técnicas consiste em fixar a câmera em um eixo giratório por um determinado período de tempo. Durante este período, a câmera realiza a captura de uma sequência de imagens. Estas imagens são então combinadas, de forma a gerar uma única imagem, que possui uma abrangência de 360° do ambiente em questão. Esta técnica, no entanto, além de ser computacionalmente cara, compromete o desempenho de um sistema que precisa capturar informações do ambiente em tempo real, como é o caso de aplicações em navegação para robôs autônomos, pois a rotação da câmera insere uma carga de tempo extra ao sistema.

Outra técnica utilizada pela comunidade internacional consiste em utilizar mais de uma câmera para a captura de imagens, e então, gerar a imagem panorâmica do ambiente. Os eixos ópticos pertencentes a cada câmera são dispostos em diferentes direções, formando

assim um aglomerado de imagens que quando processadas geram a imagem panorâmica. No entanto, além de ser computacionalmente cara, torna-se economicamente inviável dependendo dos requisitos do projeto em questão.

Podem-se também utilizar lentes com perfis diferentes. Uma lente bastante utilizada para o propósito de se aumentar o campo de visão de uma câmera é a lente “olho de peixe”. Todavia, o alto custo de comercialização desta pode tornar o seu uso inviável.

Em sistemas que precisam de aquisição de imagens panorâmicas em tempo real, com um custo computacional e orçamentário relativamente baixo, surge como opção o uso de sistemas omnidirecionais catadióptricos. Estes sistemas são compostos de elementos dióptricos, que consiste basicamente de um meio que é atravessado pela luz e não impede a continuidade de sua propagação (por exemplo, a lente da câmera), e elementos catóptricos, que refletem a luz (um espelho). Assim sendo, temos que um sistema omnidirecional catadióptrico (neste trabalho referenciado por sistema omnidirecional), é composto por um conjunto espelho/câmera, que permite a obtenção de imagens em um campo de visão de 360°.

Uma propriedade interessante deste tipo de sistema é a propriedade de centro único de projeção (*Single View Point – SVP*). Esta propriedade garante que apenas um único raio de luz que é refletido por um ponto no ambiente, seja projetado na superfície de projeção da câmera, o que é desejado quando se pensa em sistemas que necessitam de grande precisão. A propriedade de centro único de projeção é conseguida através da utilização de diferentes perfis de espelho, diferentes tipos de lentes e a configuração dos parâmetros entre eles. Para uma câmera que utiliza uma lente com projeção ortogonal, deve-se utilizar um espelho com perfil parabólico, que reflete a luz, paralela ao eixo óptico. Para uma câmera que trabalha com uma lente projetiva utiliza-se um espelho com perfil hiperbólico, pois este reflete a luz em direção a um ponto central, onde deve estar localizado o foco da câmera.

A utilização de sistemas omnidirecionais catadióptricos que possuem a propriedade de centro único de projeção se tornou alvo de estudo de diversos pesquisadores nos últimos anos, por permitir resultados satisfatórios em tarefas de extração de características de ambiente, que podem ser aplicados a diversos propósitos, entre elas a navegação de sistemas autônomos. Além disso, a propriedade de centro único de projeção permite a retificação de imagens omnidirecionais catadióptricas (neste trabalho referenciado por

imagens catadióptricas) em imagens panorâmicas ou imagens de perspectiva, e vice-versa com confiabilidade e integridade, o que a torna uma opção ainda mais interessante para aplicações de visão computacional.

Uma variação do sistema catadióptrico que pode facilitar o trabalho de reconstrução de ambientes consiste em utilizar um espelho de lobo duplo composto por um lobo interno e um lobo externo, estando o centro do espelho, alinhado ao eixo óptico da câmera, gerando uma única imagem com o reflexo de ambos os lobos. A diferença entre os reflexos destes é utilizada para se extrair informações do ambiente, e a busca por pontos que se correlacionam passa a ser realizada em uma reta radial que se inicia no centro da imagem, e se estende até a borda do lobo externo. Com estas características, diminui-se o custo computacional de realizar a estereoscopia e se ganha em desempenho do sistema, o que é desejado do ponto de vista de sistemas que precisam processar imagem em tempo real (como é o caso da navegação autônoma).

Este trabalho tem como objetivo a elaboração de um sistema computacional que permita a simulação de um sistema omnidirecional baseado em espelho hiperbólico de lobo duplo. Este sistema deverá permitir a manipulação de alguns parâmetros do sistema omnidirecional, para que se possa aferir a influência destes na reconstrução de ambientes. A simulação será realizada através da retificação de imagens panorâmicas cilíndricas em imagens omnidirecionais baseadas em espelho hiperbólico de lobo duplo, levando-se em consideração os parâmetros estipulados pelo usuário. A imagem resultante da simulação servirá de base para a realização da estereoscopia omnidirecional, permitindo assim a reconstrução dos objetos em uma cena simulada. Em seguida, uma comparação entre os pontos reconstruídos e os pontos conhecidos a priori seja realizada. Esta comparação irá permitir a avaliação do uso de imagens omnidirecionais simuladas computacionalmente, e também, a avaliação da influência dos parâmetros dos espelhos necessários a sua fabricação conforme uma determinada aplicação. Uma boa avaliação implica, na possibilidade de se manufaturar espelhos de forma a diminuir esforços de retrabalho, garantindo resultados satisfatórios na implantação de espelhos para aplicações em geral.

Inicialmente, no Capítulo 2 realiza-se uma breve revisão bibliográfica sobre aplicações de visão computacional de forma geral, o que inclui os diversos métodos de se conseguir imagens panorâmicas. Também são apresentadas algumas aplicações que utilizam sistemas omnidirecionais catadióptricos.

No Capítulo 3, discute-se o sistema de visão omnidirecional, sendo abordados tópicos importantes para a visão omnidirecional catadióptrica tais como: a propriedade do centro único de projeção, bem como as configurações de espelhos e câmeras que, quando utilizados em conjunto, gozam de tal propriedade; as relações necessárias entre o conjunto espelho hiperbólico e câmera de perspectiva (utilizados neste trabalho), para que o mesmo possuem a propriedade de centro único de projeção empregado na tarefa de navegação autônoma; e a calibração do sistema necessária para se mapear pontos do ambiente real em um plano de projeção omnidirecional. Além disso, neste capítulo, apresenta-se o processo de retificação de imagens, o que permite a obtenção de imagens panorâmicas partindo-se de imagens omnidirecionais com duas diferentes técnicas de retificação.

Capítulo 4 aborda a questão da estereoscopia em imagens omnidirecionais para espelhos de lobo duplo e suas etapas. Aborda-se questões pertinentes às etapas de extração de características, correspondência de pontos e triangulação respectivamente. Estas três etapas juntas constituem um algoritmo para visão estéreo.

No Capítulo 5, é proposta uma metodologia para validar a simulação computacional de imagens omnidirecionais catadióptricas, bem como, as restrições utilizadas para o trabalho. O sistema proposto para auxiliar o estudo é apresentado e as características para este sistema são discutidas, de forma a descrever as técnicas implementadas de retificação, filtragem espacial de imagens, estereoscopia omnidirecional e avaliação dos resultados.

No Capítulo 6 e 7, são apresentadas as análises dos resultados e conclusões referentes ao trabalho respectivamente.

2 APLICAÇÕES EM VISÃO OMNIDIRECIONAL

A utilização de sistemas de visão omnidirecionais catadióptricos tem se propagado ao longo do tempo. Esta opção vem se destacando devido ao fato de que o uso destes sistemas permite a aquisição de imagens em um campo de visão de 360°. Uma revisão a respeito de formas de se conseguir sistemas de visão omnidirecional pode ser verificada em Yagi, (1999).

Dentro da área de visão omnidirecional, diferentes pesquisadores vêm atuando para a solução de diferentes pontos. A Figura 2.1 exibe em forma de árvore a disposição de alguns trabalhos em diferentes campos de atuação dentro da visão omnidirecional.

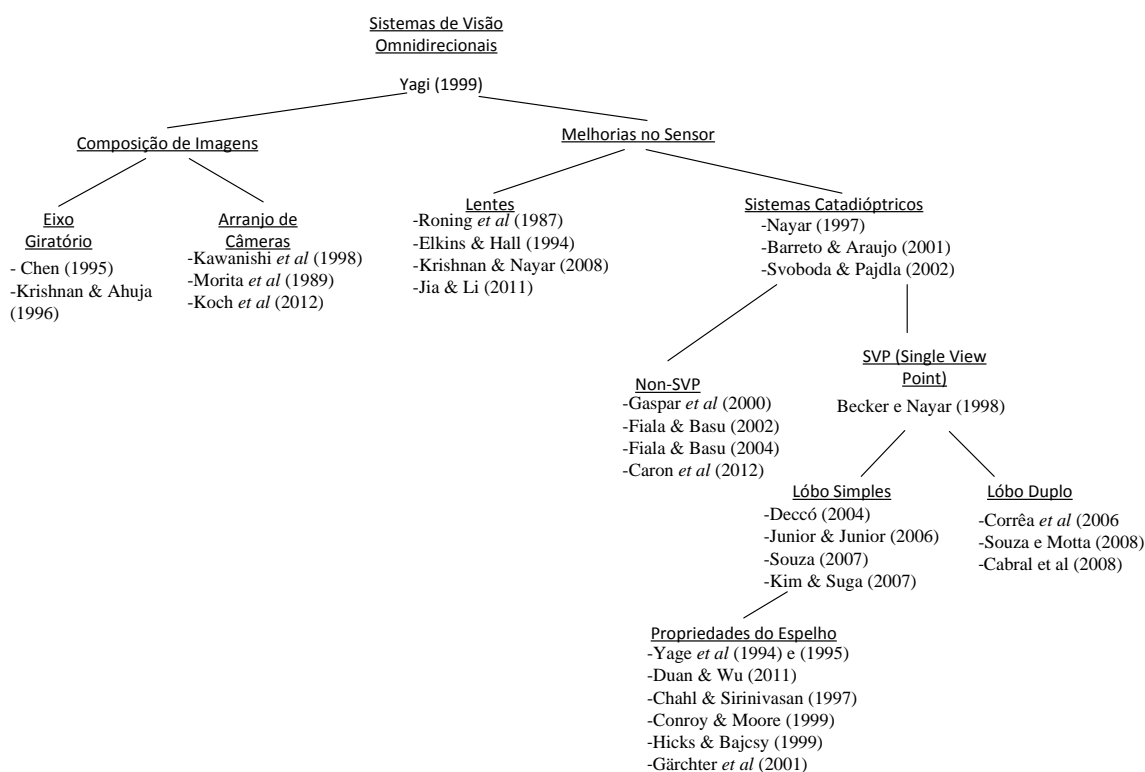


Figura 2.1 – Classificação de alguns trabalhos em visão omnidirecional.

As técnicas para se obter imagens panorâmicas envolvem o uso de diferentes formas de se combinarem câmeras, lentes e espelhos. Seja através da rotação de uma câmera, da utilização de muitas câmeras, da utilização de lentes ditas especiais (como por exemplo, a lente “olho de peixe”), ou através de uma composição feita entre uma câmera e um espelho. É possível realizar a aquisição de imagens omnidirecionais com fins de aplicações em sistemas de visão computacional. Todavia, como cada método possui vantagens e

desvantagens, a escolha de uma determinada técnica esbarra na aplicação que deseja-se produzir.

Uma forma de se obter este tipo de imagem consiste em acoplar a câmera utilizada pelo sistema de visão, em um eixo giratório (Chen, 1995 e Krishnan & Ahuja, 1996). Ao se acoplar a câmera em um eixo giratório, aplica-se um deslocamento angular constante, de forma que se torna possível a aquisição de imagens panorâmicas através da combinação das imagens de perspectiva capturadas pela câmera em um ciclo completo de rotação, sendo esta técnica amplamente utilizada nas aplicações que envolvem imagens panorâmicas. A Figura 2.1 exibe um exemplo de sistema de captura de imagens através da rotação de uma câmera. Apesar ser possível criar imagens com alta resolução, a desvantagem do uso desta técnica encontra-se no fato de que em ambientes dinâmicos, que demandam processamento em tempo real, a necessidade de se completar ciclos para iniciar uma nova captura de imagem faz com que esta restrição não seja obedecida (Grassi Jr, 2002).

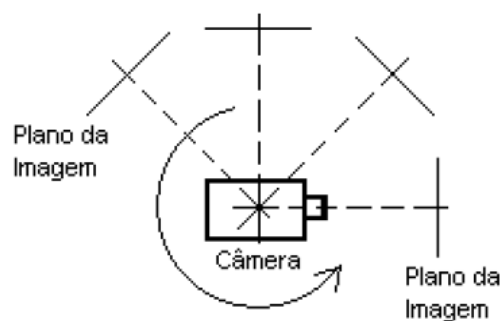


Figura 2.2 - Sistema rotacional de câmera para aquisição de imagem panorâmica. (Grassi Jr, (2002).

Outra técnica empregada na aquisição de imagens panorâmicas ou omnidirecionais e que também utiliza a ideia de composição entre duas ou mais imagens de perspectiva, implica na utilização de várias câmeras fixas, que apontam para diferentes direções (Kawanishi *et al*, 1998, Morita *et al*, 1989 e Koch *et al*, 2012). Apesar de ser possível adquirir imagens de alta resolução, assim esta técnica demanda um alto custo, tanto do ponto de vista econômico (devido à necessidade de se obterem múltiplas câmeras para o sistema), quanto do ponto de vista computacional. Além disso é necessário realizar a calibração de todas as câmeras envolvidas no sistema de captura (Yagi, 1999), e a montagem do arranjo pode tornar inviável o uso de tal sistema em aplicações de automação. A Figura 2.2 exibe um

exemplo de arranjo com múltiplas câmeras para se realizar a aquisição de imagens omnidirecionais.



Figura 2.3 - Arranjo com múltiplas câmeras para aquisição de imagens omnidirecionais (Yoda *et al*, 2006).

Mantendo-se na linha de sistemas para captura de imagens com campo de visão aprimorado, mas fugindo das técnicas que empregam a geração de imagens panorâmicas (ou omnidirecionais) através da composição de imagens de perspectiva, temos a opção de usar lentes especiais que melhoram a capacidade de captura das câmeras (Roning *et al*, 1987, Elkins & Hall, 1994, Krishnan & Nayar, 2008 e Jia & Li, 2011). O uso de uma lente “olho de peixe” permite o aumento no campo de visão, mas esta, além de ser uma solução cara (do ponto de vista financeiro), ainda possui uma resolução baixa na periferia da imagem e não possui a propriedade de centro único de projeção (Yagi, 1999).

Para o propósito de se adquirir imagens com campo de visão de 360° a técnica de visão omnidirecional catadióptrico vem ganhando a atenção de muitos pesquisadores. (Nayar, 1997, Barreto & Araujo, 2001, Svoboda & Pajdla, 2002, Fiala & Basu, 2004, Li & Li, 2011). Um sistema de visão omnidirecional catadióptrico baseia-se na utilização em conjunto de um espelho e uma câmera, para se atingir este propósito. Além de possuir uma implementação de menor complexidade (Deccó, 2004), este sistema não demanda alto custo computacional o que o torna uma opção viável para aplicações que exigem captura e processamento de imagens em tempo real (como é o caso da navegação autônoma). A Figura 2.3 exhibe um exemplo de sistema omnidirecional catadióptrico.



Figura 2.4 - Sistema de visão omnidirecional catadióptrico (Grassi Jr, 2002).

Os sistemas de visão omnidirecionais catadióptricos podem ter a propriedade de centro único de projeção ou não. A existência desta propriedade está diretamente ligada ao tipo de câmera e do espelho utilizado pelo sistema. Como se pode verificar em Fiala & Basu (2002), Fiala & Basu (2004) e Caron *et al* (2012) é utilizado um sistema catadióptrico que não possui tal propriedade. Nos trabalhos de Deccó (2004), Grassi Jr & Okamoto Jr (2006), Souza (2007) e Cabral *et al* (2008) alguns sistemas catadióptricos com a propriedade de centro único de projeção para navegação robótica são apresentados.

Em navegação robótica, é de interesse que o sistema de visão seja capaz de reconhecer características do ambiente em que se encontra, com fins de desviar de obstáculos ou então de seguir determinados objetos móveis. É possível utilizar sistemas de visão omnidirecionais para esta finalidade. Os sistemas catadióptricos que possuem a propriedade de centro único de projeção são altamente indicados para tal propósito, pois além de não serem de difícil implantação, possuem baixo custo computacional, uma boa resolução e gera imagens com campo de visão de 360°.

Com a possibilidade de se adquirirem imagens omnidirecionais com a propriedade de centro único de projeção, os sistemas omnidirecionais catadióptricos vêm ganhando espaço entre a comunidade internacional que atua com pesquisa em visão computacional, com destaque em aplicações que envolvem navegação autônoma (Kim & Suga, 2007, Deccó C.

C., 2004 e Grassi Jr, 2002). Todavia, para se conseguir essa propriedade em sistemas catadióptricos, é necessária a utilização de espelhos e câmeras específicos.

Há de se levar em consideração a resolução nas diferentes áreas das imagens geradas pelo reflexo do espelho utilizado no sistema, podendo esta resolução variar entre o centro e a borda do mesmo. Esta característica está associada à qualidade das imagens que serão geradas no sistema, influenciando todo o pós-processamento da aplicação.

O espelho cônico foi o primeiro espelho projetado para fins de visão omnidirecional catadióptrica. Em Yagi *et al* (1994) e Yagi *et al* (1995), um espelho cônico é utilizado em um sistema de visão omnidirecional com fins de navegação aplicados a robôs móveis, enquanto que, em Li & Li (2011) o mesmo perfil de espelho é utilizado junto a uma lente “olho de peixe”. Além disso, este espelho tem uma boa resolução na periferia e uma resolução inferior no centro. No entanto torna-se impossível gerar imagens de perspectivas através da imagem formada pela projeção do espelho cônico (Yagi, 1999).

Outra família de espelhos utilizada para construir um sistema omnidirecional catadióptrico é a família de espelhos convexos do qual fazem parte os espelhos esféricos (Fiala & Basu, 2004 e Liu & Tan, 2011), hiperbólicos (Cabral *et al* 2007, Souza, 2009 e outros) e parabólicos (Duan & Wu, 2011).

Em Chahl & Srinivasan (1997) é apresentada a descrição de uma família de superfícies para espelhos que possuem a propriedade de manter preservada a relação linear entre o ângulo de incidência da luz no espelho (dito ângulo de elevação (φ)) e o ângulo com o qual a luz é refletida em direção à câmera (dito ângulo radial (ψ)). Em toda a superfície do espelho, a relação entre a variação do ângulo de elevação ($\delta\varphi$) e a variação do ângulo radial ($\delta\psi$) é mantida constante. Assim, nesse espelho, é mantido um ganho angular vertical, $\beta = \delta\varphi/\delta\psi$, localmente constante. A Figura 2.5a) e 2.5b) exibem esta relação de ganho angular na superfície do espelho.

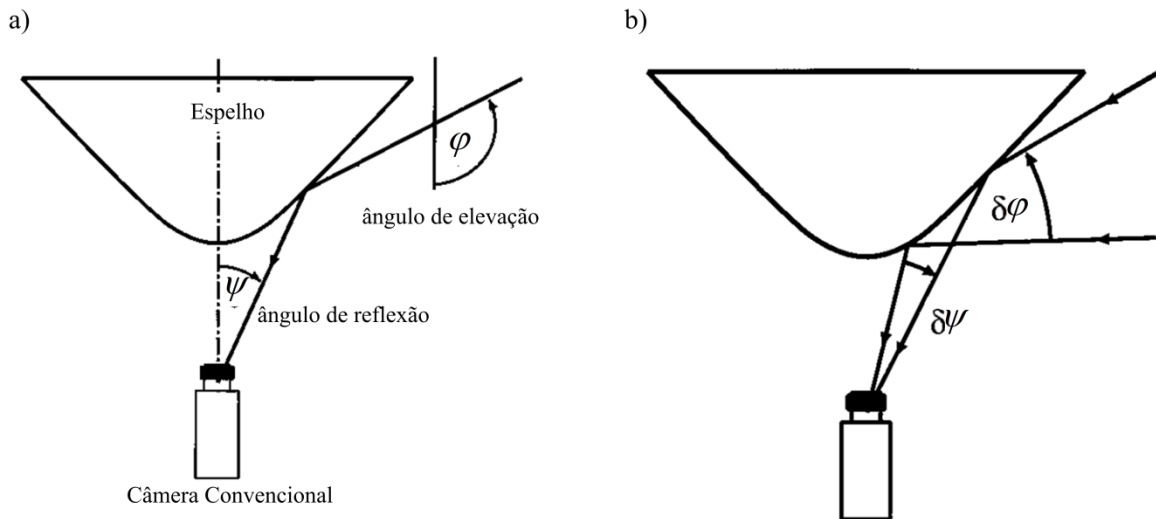


Figura 2.5 - Ganho angular vertical do espelho côncavo (Chahl & Srinivasan, 2004 – adaptado).

Conroy & Moore (1999) utilizam um par de espelhos simetricamente axiais que possuem a propriedade de manter constante a relação entre o ângulo de elevação (φ) (Figura 2.5a)) e a resolução na imagem. A resolução em uma imagem panorâmica gerada por um sistema catadióptrico tende a ser baixa no centro da imagem e maior na periferia. O trabalho de Conroy & Moore (1999) exhibe um perfil de espelho no qual a resolução de imagens não varia. Consequentemente, há uma relação constante entre a resolução de *pixels* e o ângulo de elevação. Dois espelhos com tais características, mas com pequenas variações em seus perfis, são usados para se gerar um sistema estéreo omnidirecional.

Hicks & Bajcsy (1999) desenvolveram uma formalização para uma família de superfícies que originam espelhos com a propriedade de mapear linearmente o ambiente no plano da imagem gerada pelo sistema, preservando assim a geometria do plano horizontal. Assim sendo, sempre que o sensor contendo tal espelho for colocado na posição vertical, as imagens resultantes da captura irão preservar a geometria do plano horizontal do ambiente. Isto implica, por exemplo, que um tabuleiro de xadrez teria sua informação geométrica preservada quando disposto na horizontal, porém o mesmo não aconteceria quando disposto na vertical (isso para os espelhos de Hicks & Bajcsy, (1999) – Figura 2.6). A imagem gerada por este tipo de espelho é conhecida como ‘*bird’s eye view*’. Semelhante propriedade é formalizada por Gächter *et al* (2001), porém a propriedade de mapeamento linear está relacionada com o plano vertical. Em Deccó *et al* (2001) o mapeamento ocorre tanto na vertical quanto na horizontal, e o espelho daquele trabalho, em particular, pode ser projetado para utilização em conjunto com câmeras convencionais ou então com uma câmera log-polar.

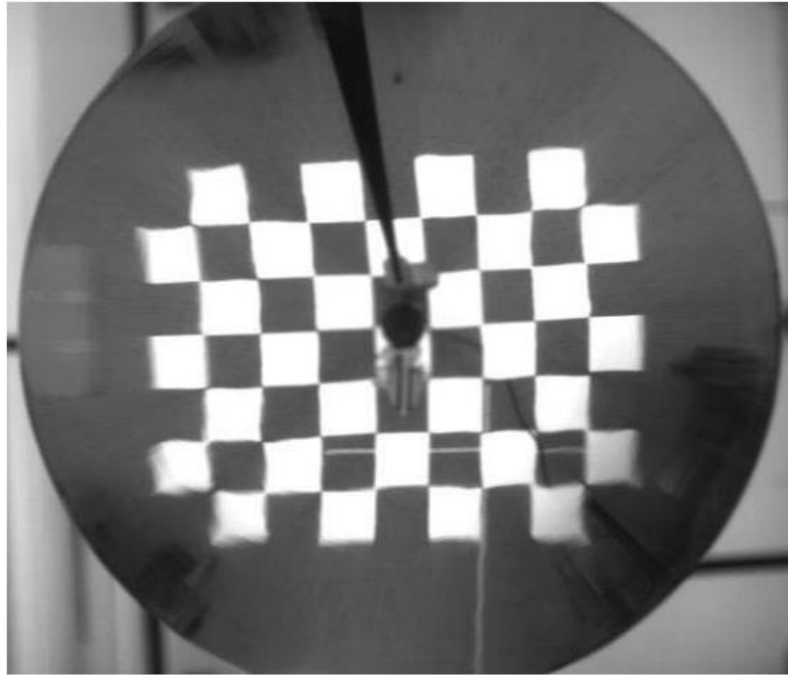


Figura 2.6 - Mapeamento linear do plano horizontal. (Hicks & Bajcsy, 1999);

Em Gaspar *et al* (2000), um espelho de perfil esférico é utilizado para se fazer o controle e navegação de um robô móvel através da geração de imagens do tipo *bird's eye view*, para que o mesmo se mantenha no centro de um corredor. Nestas imagens as linhas retas no plano horizontal se mantêm retas na imagem, o rastreamento destas é usada para guiar o robô móvel.

Em Fiala & Basu (2004) um sistema de visão que utiliza um espelho esférico de lobo duplo é simulado para se realizar a reconstrução de objetos em um ambiente 3D. Junto ao espelho, se desenvolve uma variação da transformada de Hough (utilizada na detecção de segmentos de retas), para se adaptar ao tipo de espelho utilizado.

No trabalho de Beker & Nayar (1998) são desenvolvidas as expressões que representam todo o conjunto de sistemas de visão omnidirecional catadióptrico que possuem a propriedade de centro único de projeção. O trabalho se desenvolve levando em consideração o estudo de três critérios para um conjunto espelho/câmera em um sensor omnidirecional: a forma do espelho, a resolução da câmera e as configurações do ponto focal da câmera.

Em Deccó (2004) e Grassi Jr & Okamoto Jr (2006) são implementados sistemas de visão catadióptricos que se utilizam de grades de evidência para geração de mapas dos ambientes. Todavia, este tipo de aplicação possui uma desvantagem referente à

necessidade de se aplicar um deslocamento inicial, para se realizar a aquisição do par de imagens estéreo necessário à estereoscopia. Em ambientes não controlados, este deslocamento necessário por uma trajetória desconhecida pode acarretar danos físicos ao sistema como um todo. Além disso, a correlação de pontos em par de imagens estéreo tradicionalmente é uma tarefa computacional árdua, e demanda um consumo maior de desempenho por parte do sistema de visão.

Este problema pode ser mitigado com o uso de um espelho omnidirecional catadióptrico de lobo duplo conforme se observa nos trabalhos de Corrêa *et al* (2006), Souza & Motta (2008), Cabral *et al* (2008). Com o uso deste tipo de espelho, cada lobo reflete a luz emitida do ambiente, tendo assim, duas imagens refletidas em apenas um único plano (no caso, o sensor óptico de uma câmera). Consegue-se então um par de imagens estereoscópicas ao mesmo tempo, ambas com pequenas disparidades entre si, o que permite realizar a estereoscopia. A propósito, nesta abordagem, a busca de pontos semelhantes nos reflexos dos diferentes lobos do espelho se resume à busca por pontos em uma reta radial, que vai do centro da imagem até a borda da imagem omnidirecional, o que reduz sensivelmente o custo da estereoscopia em um sistema de visão computacional.

Em Souza (2009), um sistema de visão omnidirecional catadióptrico é construído para simular o mapeamento de um ambiente. Uma imagem de grande resolução horizontal é utilizada, permitindo que a mesma seja dividida para simular o deslocamento de um robô móvel com um sistema omnidirecional baseado em espelho hiperbólico de lobo duplo embarcado. Através do deslocamento simulado, é construído um mapa do ambiente.

Com o levantamento de algumas aplicações, o próximo passo é apresentar a visão omnidirecional catadióptrica de forma substancial, o que será feito a seguir, no Capítulo 3.

3 VISÃO OMNIDIRECIONAL CATADIÓPTRICA

Um sistema de visão omnidirecional catadióptrico é composto basicamente por um espelho convexo, que possui seu centro alinhado ao eixo óptico da câmera que compõe o sistema, podendo o conjunto espelho/câmera ser fixado em algum ponto do ambiente, ou então, fixado em algum ponto de um robô móvel, sendo utilizado neste caso, para a navegação. O ambiente ao redor do espelho é refletido em direção ao centro óptico da câmera e projetado no CCD (*Charge - Coupled Device*), que por sua vez, transforma a energia luminosa captada em uma matriz de *pixels* (a imagem). A Figura 3.1 exibe um esquema associado ao sistema de visão omnidirecional catadióptrico.

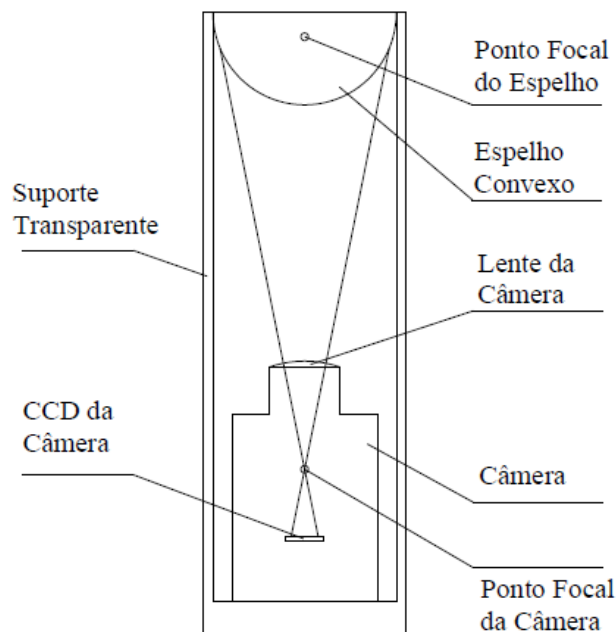


Figura 3.1 - Visão esquemática do sistema de visão omnidirecional catadióptrico.

Quando um sistema de visão omnidirecional é composto por um conjunto espelho câmera que goza da propriedade de centro único de projeção, este tende a gerar imagens livre de borramentos e distorções causadas por superposição de imagens, podendo esta distorção ser influenciada pela curvatura do perfil do mesmo ou até por um posicionamento incorreto do ponto de vista da distância entre o ponto focal da câmera e o ponto focal do próprio espelho (Souza, 2009).

3.1 CENTRO ÚNICO DE PROJEÇÃO

O centro único de projeção é uma característica desejável em sistemas de visão computacional, e também é utilizado para classificar estes (Yagi, 1999). Esta característica

permite a retificação da imagem omnidirecional catadióptrica para uma imagem panorâmica, ou até mesmo para uma imagem de perspectiva, que pode ser gerada em uma área de interesse delimitada na imagem original. Essas imagens de perspectiva são conseguidas através do mapeamento dos *pixels* da imagem omnidirecional em um plano perpendicular a um raio que passa pelo centro de projeção do sistema (Grassi Jr, 2002). Também através do mapeamento de pontos, é possível gerar uma imagem panorâmica, onde este mapeamento ocorre em um plano cilíndrico ao redor do espelho, sendo que, tais imagens são livres de distorção.

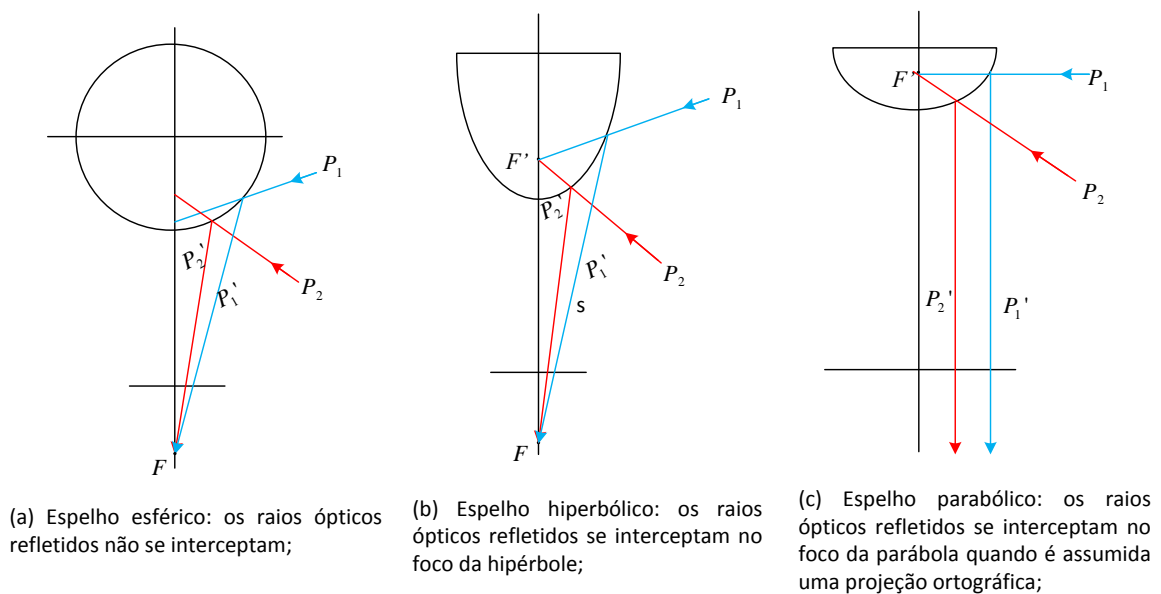


Figura 3.2 - Formas de espelhos convexos: a) não possui centro único de projeção (F'). b) e c) possuem tal propriedade (Grassi Jr, 2002 - adaptado).

No espelho de perfil esférico, os raios ópticos provenientes de pontos no espaço (pontos do ambiente) refletidos no espelho, não convergem para um ponto comum conforme pode ser observado na Figura 3.3a). Esta convergência (para o ponto F') é o que caracteriza o centro único de projeção. No perfil esférico, os raios ópticos são refletidos para diferentes pontos, o que caracteriza a não existência de tal propriedade.

Um centro único de projeção pode ser conseguido através de duas configurações diferentes do conjunto espelho/câmera. Estas configurações são exibidas na Figura 3.3b) e Figura 3.3c). Estas Figuras representam o conjunto formado por um espelho com perfil hiperbólico e uma câmera de perspectiva, e um espelho de perfil parabólico associado a uma câmera de projeção ortográfica respectivamente. O espelho de perfil parabólico possui a propriedade de refletir a luz de forma paralela ao eixo óptico da câmera ortogonal, que

captura os raios de luz de forma paralela. Os raios capturados são ortogonais ao plano de projeção (o CCD da câmera). O espelho de perfil hiperbólico reflete a luz de forma que os raios provenientes do ambiente convergem para o ponto focal do espelho F' , sendo estes raios, refletidos em direção ao ponto focal F da câmera de perspectiva. A câmera de perspectiva captura a luz utilizando projeção cônica (que ocorre quando os raios que incidem sobre o objeto no espaço e o plano de projeção são concorrentes em um determinado ponto, veja Ribeiro & Menezes (2010)), tendo o ponto focal da câmera como a origem do sistema, e o CCD o plano de projeção. Esse esquema de projeção entre o espelho hiperbólico e a câmera de perspectiva garante a propriedade de centro único de projeção.

O espelho de perfil parabólico é utilizado por (Nayar, 1997). Nesse trabalho um sistema que gera imagens de perspectiva a partir de imagens omnidirecionais foi desenvolvido, e além disso, uma análise sobre a resolução das imagens geradas a partir de uma câmera virtual posicionada no centro único de projeção é descrita.

Em (Grassi Jr & Okamoto Jr, 2006) um espelho hiperbólico é utilizado para se gerar imagens panorâmicas e de perspectiva, a partir de uma imagem omnidirecional, através do processo de retificação. Em (Deccó, 2004) mapas de ambiente são construídos a partir de imagens omnidirecionais capturadas através do uso deste espelho, com uma câmera de perspectiva.

Segundo Souza (2009) as vantagens e desvantagens de se utilizar um sistema omnidirecional catadióptrico com centro único de projeção são:

- A inexistência de superposição de imagens, o que aumenta a nitidez e facilita o processamento, e permite a geração de imagens panorâmicas ou de perspectiva livres de distorção;
- variando-se os parâmetros do perfil do espelho, pode-se determinar qual região do ambiente será visualizada, aumentando assim as possibilidades de se empregar o sistema;
- o processo de fabricação tanto do espelho parabólico quanto do espelho hiperbólico se torna complexo, ao ponto de que, ambos devem apresentar um perfil bem

definido. De maneira geral, estes espelhos são fabricados por máquinas de grande precisão, aumentando assim seu custo de produção;

- como deve existir um alinhamento entre o centro do espelho e o centro da câmera, esta restrição torna a montagem do sistema complexa.

Neste trabalho, será realizada a simulação de imagens omnidirecionais partindo de imagens panorâmicas. Para que se possa aproveitar a propriedade de centro único de projeção, obtendo-se assim imagens livres de distorção, optou-se pela simulação de imagens em um espelho hiperbólico. Além disso, o espelho hiperbólico quando construído com lobo duplo, permite o uso de estereoscopia de forma simplificada em relação a sistemas com imagens que não usam espelhos convexos. Além disso, este espelho também possui uma boa distribuição de resolução (Grassi Jr, 2002). Todavia, para que se possa tirar o máximo proveito do processo de simulação dessas imagens, alguns parâmetros referentes ao conjunto espelho/câmera devem ser seguidos.

3.2 PARÂMETROS DO CONJUNTO ESPELHO/CÂMERA

Um espelho hiperbólico não é encontrado no mercado com as especificações necessárias para compor um sistema omnidirecional catadióptrico. Considerando que cada câmera possui diferentes conjuntos de parâmetros intrínsecos e extrínsecos, um espelho específico para cada câmera deve ser manufaturado. Assim sendo, para que o sistema possua um conjunto espelho/câmera adequado, que permita resultados satisfatórios em uma aplicação (que pode ser em navegação autônoma), um projeto do espelho é realizado partindo das equações que definem as relações entre os parâmetros da câmera (que normalmente já estão definidas) com parâmetros do espelho (distância, forma, excentricidade e etc.). Este projeto deve levar em consideração as equações necessárias para que o sistema goze da propriedade de centro único de projeção.

3.3 PROJETO DO ESPELHO HIPERBÓLICO

Uma hipérbole pode ser caracterizada por duas curvas espelhadas desconectadas (chamadas de braços ou ramos) formadas pela interseção de uma superfície cônica e um plano. Como resultado têm-se o conjunto de todos os pontos $Cn(x,y)$, cujas diferenças entre as distâncias $d1$ e $d2$ dos pontos focais $F1$ e $F2$ respectivamente, são mantidas constantes conforme observar-se na Figura 3.3.

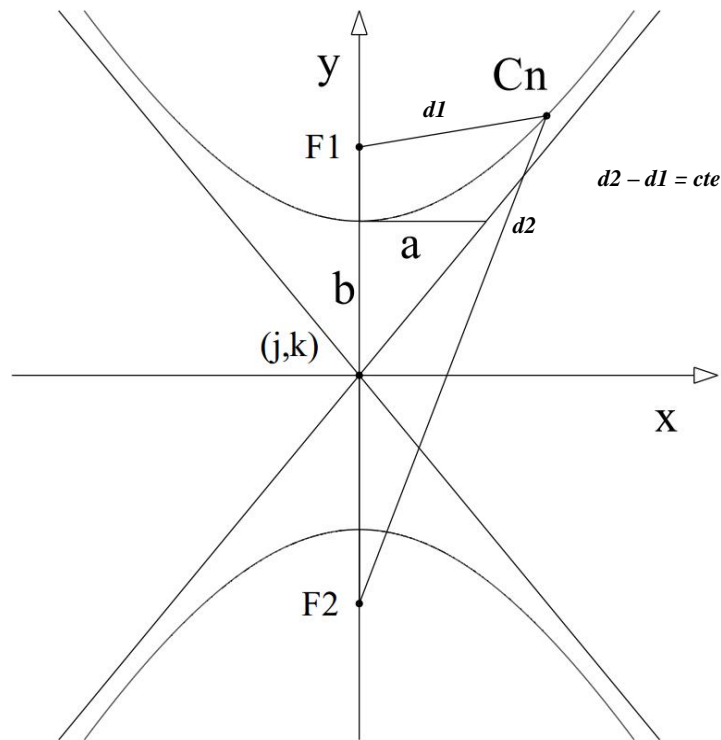


Figura 3.3 – Hipérbole (Souza & Motta, 2008).

A curva da hipérbole é definida segunda a Equação (3.1).

$$\frac{(y-k)^2}{a^2} - \frac{(x-j)^2}{b^2} = 1 \quad (3.1)$$

Além disso, a e b são os semi-eixos da hipérbole que possui o centro localizado no ponto (j,k) . Se transladarmos o centro da hipérbole para a origem do sistema de coordenadas cartesianas ($k=0, j=0$) a hipérbole será definida segundo a Equação (3.2):

$$\frac{y^2}{a^2} - \frac{x^2}{b^2} = 1 \quad (3.2)$$

Levando em consideração que o centro da hipérbole foi transladado para a origem do sistema de pontos cartesiano, ao posicionar uma câmera de forma que o ponto focal $F2$ coincide com o ponto focal da câmera, temos então a geometria associada a um sistema de visão omnidirecional catadióptrico (Figura 3.4).

As equações desenvolvidas por Svoboda *et al* (1997), bem como a metodologia apresentada por Souza & Motta (2008) serviram de base para se calcular a geometria e os parâmetros necessários para a superfície do espelho hiperbólico.

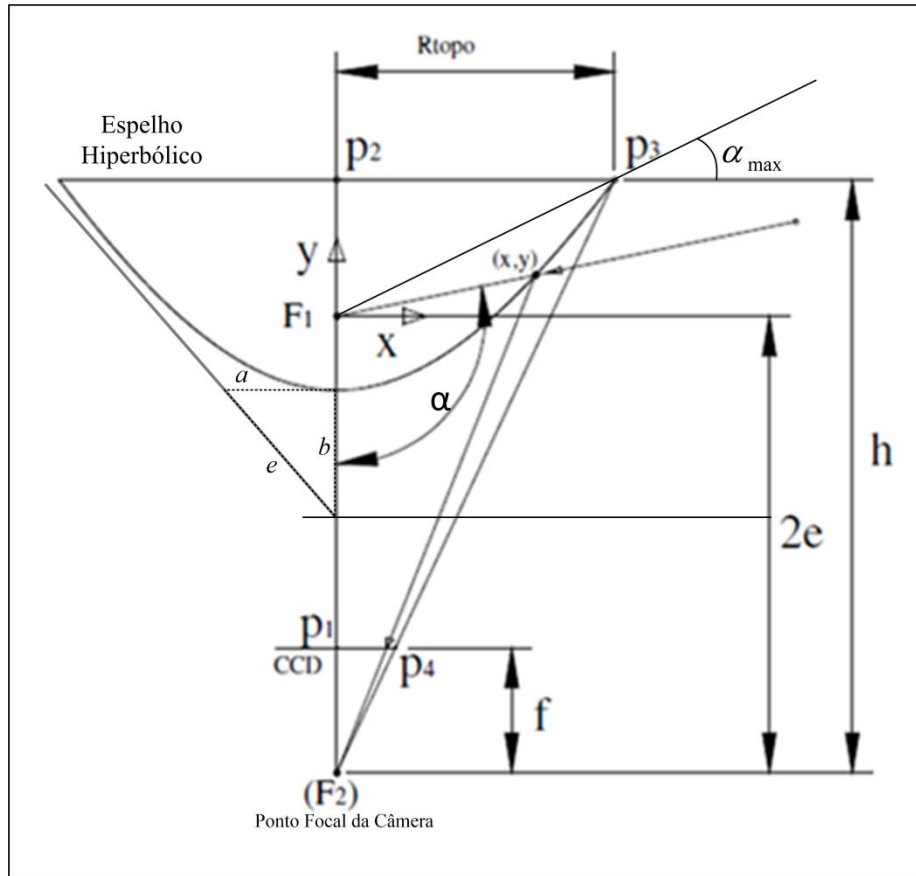


Figura 3.4 - Geometria do espelho hiperbólico associado a uma câmera de perspectiva)(Souza & Motta, 2008 - adaptado).

Na Figura 3.4 F_2 é o ponto focal da câmera, com f sendo o comprimento focal. Os parâmetros a e b são os semi-eixos horizontais e verticais respectivamente, respondendo pela excentricidade da superfície do espelho e (Equação (3.3)). O parâmetro α corresponde ao ângulo máximo de visualização do sistema (o maior ângulo de incidência de raios luminosos que serão refletidos pelo espelho em direção ao CCD da câmera). O parâmetro h corresponde à distância entre o foco F_2 (a origem do sistema) da câmera e o topo do espelho. Além disso, da Figura 3.5 têm-se que topo do espelho (p_3) corresponde ao ponto ($x_{topo} = R_{topo}, y_{topo} = h - 2e$), com R_{topo} o parâmetro que representa o raio da base do espelho. A relação que descreve a superfície do espelho em função dos parâmetros a, b e e é mostrada na Equação (3.4) enquanto que a equação do parâmetro α pode ser dada pela relação trigonométrica $F_1p_2p_3$ pertencente ao triângulo retângulo (Equação (3.5)).

$$e = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (3.3)$$

$$y = \sqrt{a^2 \cdot \left(1 + \frac{x^2}{b^2}\right)} - e \quad (3.4)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \arctg\left(\frac{h - 2e}{R_{topo}}\right) \quad (3.5)$$

A distância h é utilizada para calcular tanto o ângulo máximo de visão α , como os parâmetros a e b que são utilizados pela Equação (3.4) e Equação (3.5). O valor de h pode ser calculado através da semelhança entre os triângulos $F_2p_2p_3$ e $F_2p_1p_4$ conforme mostrado na Equação (3.6) em conjunto com os parâmetros da câmera utilizada, referentes ao tamanho do pixel (T_{pixel}) e do tamanho da maior circunferência que pode ser inscrita no CCD (R_{pixel}).

$$h = \frac{f \cdot R_{topo}}{T_{pixel} \cdot R_{pixel}} \quad (3.6)$$

Com o cálculo de h , ainda é necessário se calcular o valor dos semi-eixos a e b do espelho, e para tal, a relação $c=a/b$ deve ser definida. Essa relação influencia a curvatura do espelho, e para fins de cálculo dos parâmetros, ela é definida inicialmente na fase de projeto, pelo projetista do sistema. Após se estabelecer o valor de c , é possível se calcular o valor do semi-eixos b através da Equação (3.7), que é derivada da substituição dos valores do ponto da borda do espelho $(x, y) = (R_{topo}, y_{topo})$ e de manipulação algébrica da Equação (3.4).

$$b = h \cdot \sqrt{c^2 + 1} - c \cdot \sqrt{h^2 + R_{topo}^2} \quad (3.7)$$

Com a câmera prontamente escolhida, é possível se calcular então o parâmetro $a = cb$. Substituindo então os valores de a , b , h e e na Equação (3.4) temos para cada valor de x um valor de y associado, gerando um conjunto de pontos no plano cartesiano que descrevem a curvatura do espelho hiperbólico. No trabalho de Svoboda *et al* (1997) diferentes formas de espelho são exibidas, demonstrando a influência da relação entre os semi-eixos a e b e sobre a curvatura do espelho (Figura 3.5).

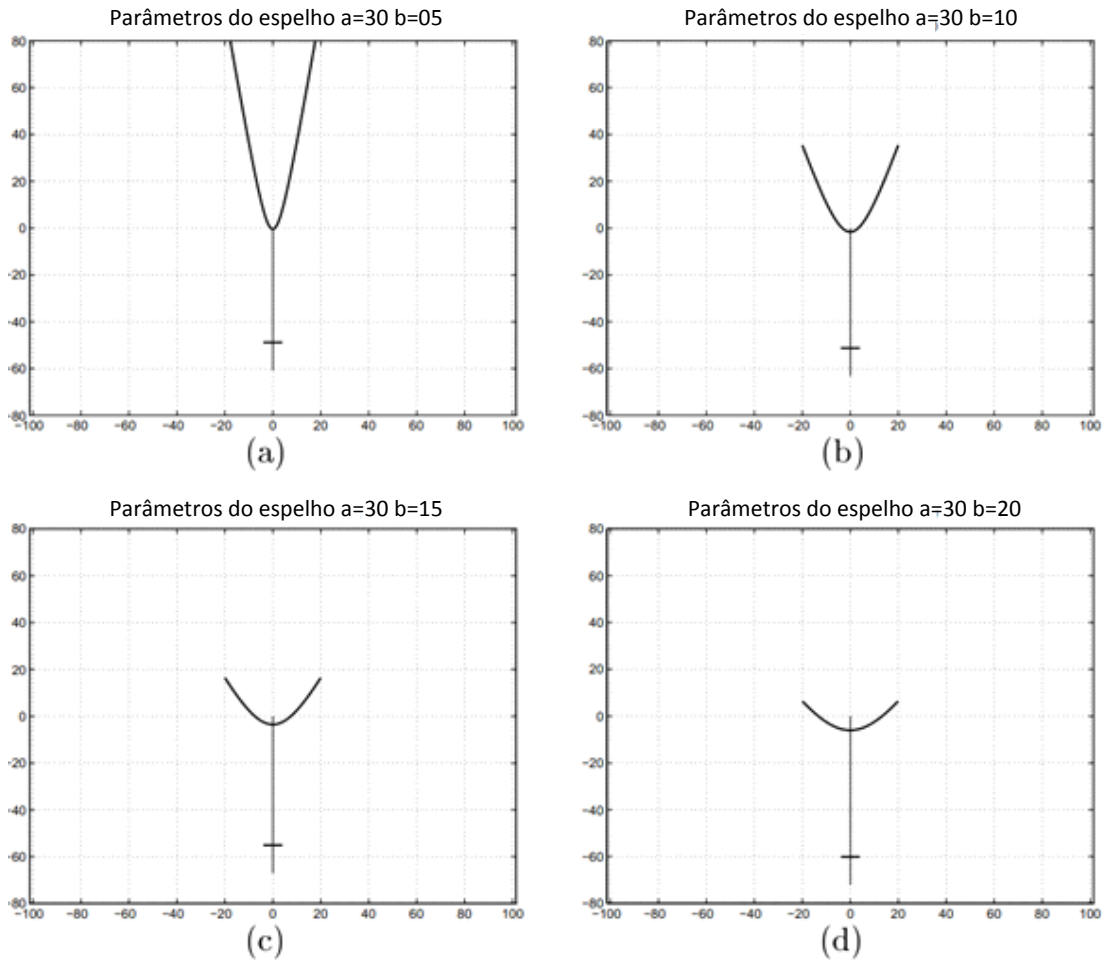


Figura 3.5 - Formas do espelho hiperbólico em função do parâmetro b , considerando o parâmetro $a=30$ (Svoboda *et al*, 1997 - adaptado) .

Com o espelho hiperbólico utilizado em conjunto a uma câmera de perspectiva, é possível então através do processo de mapeamento de *pixel* se gerar imagens panorâmicas ou de perspectiva livres de distorção. Este processo é denominado de retificação de imagens, sendo possível gerar imagens omnidirecionais tendo como origem uma imagem panorâmica ou um conjunto de imagens de perspectiva. Neste trabalho o uso de imagens de perspectiva foge ao contexto.

Na seção 3.4 discute-se o esquema de projeção esférico e o processo de calibração associado a este.

3.4 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE IMAGEM OMNIDIRECIONAL

Com o crescimento das aplicações que utilizam a visão computacional, sobretudo, no que diz respeito a aplicações que envolvem a navegação autônoma, cresce também a necessidade de garantir a robustez e desempenho dos sistemas utilizados. Quanto mais

robustas e precisas forem as informações obtidas pelo sistema de visão, aumentam-se as chances da tarefa de navegação ter sucesso.

A calibração colabora para o aumento da robustez do sistema, através da determinação da geometria do conjunto após sua montagem. As informações geradas pelo processo de calibração auxiliam o sistema a fornecer informações com um índice de confiança maior, do que um sistema não calibrado, pois este processo determina a equação de projeção dos pontos tridimensionais para o plano bidimensional da imagem Pereira *et al*, (2005).

Alguns trabalhos podem ser relacionados sobre calibração de sistemas omnidirecionais catadióptricos. Em Barreto & Araujo, (2001) utiliza-se a relação entre a projeção de três linhas e os parâmetros da cônica principal da imagem. As retas são mapeadas em três cônicas, gerando seis pontos de interseção. Estes seis pontos são utilizados para se estabelecer a cônica principal que representa a imagem.

Em Ying & Zha, (2005) é proposta uma abordagem para calibrar um sistema omnidirecional catadióptrico e detecção de linhas simultaneamente. Neste trabalho uma família de imagens de linhas é relacionada a certos parâmetros intrínsecos do sistema, fazendo um levantamento da quantidade mínima de retas necessárias em alguns casos de configuração do conjunto espelho/câmera.

Em Pereira *et al*, (2005) um modelo geral de calibração é apresentado para sistemas omnidirecionais catadióptricos. Utilizando um modelo de projeção esférica generalizado, o trabalho desacopla o método da equação gerada pelo perfil do espelho, podendo ser utilizado tanto para espelhos com perfis esféricos, parabólicos ou hiperbólicos, seguindo um modelo de projeção definido em Geyer & Daniilidis (2001) e Geyer & Daniilidis, (2000).

A tarefa de se calibrar um sistema de visão omnidirecional encontra na propriedade de centro único de projeção um facilitador, pois como já mencionado, esta propriedade permite aquisição de imagens livres de distorção, com uma geometria bem definida. A Figura 3.6 nos mostra o esquema de projeção esférico, responsável por fazer o mapeamento dos pontos do mundo real em uma imagem omnidirecional.

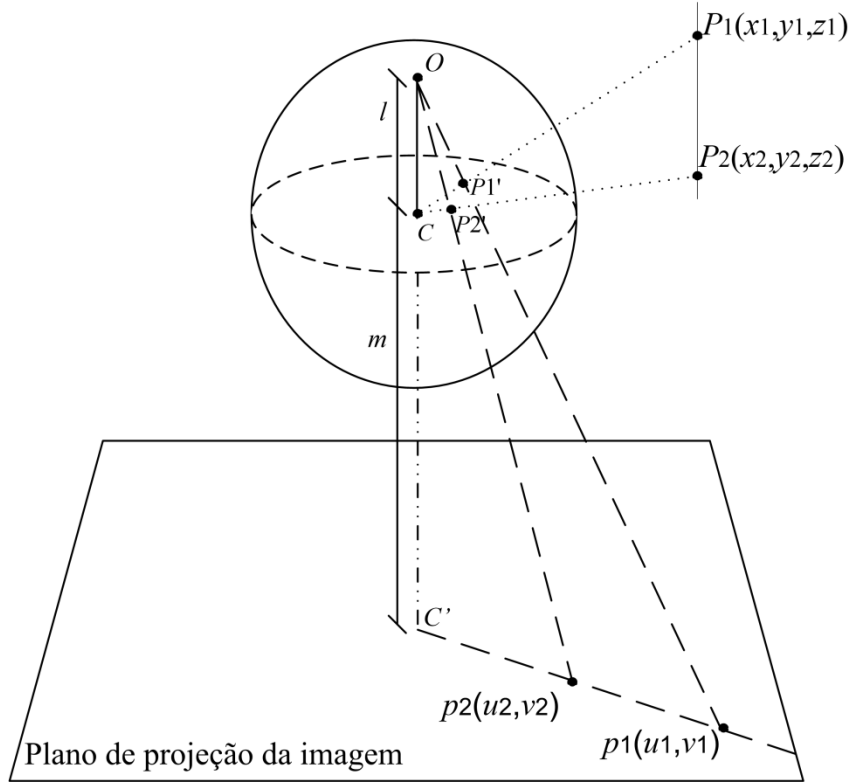


Figura 3.6 - Projeção esférica (Pereira *et al.*, 2005 – adaptado).

Conforme exibido na Figura 3.6, temos o parâmetro l que representa a distância entre o centro da esfera unitária C até o centro de projeção do sistema O , e o parâmetro m que representa a distância entre o centro da esfera unitária e o centro do plano de projeção respectivamente. Estes parâmetros somados ao centro da imagem C são parâmetros utilizados para se calibrar o sistema (Pereira *et al.*, 2006). O ponto P_1' representa a interseção entre a esfera unitária e a reta que representa o raio de luz P_1C , com $P_1 (X_1, Y_1, Z_1)$ e C coincidindo com o ponto focal de um espelho hiperbólico (Ying & Zha, 2005). O mesmo vale para o ponto P_2' em relação ao ponto $P_2 (X_2, Y_2, Z_2)$ no ambiente. Os pontos $p_1 (u_1, v_1)$ e $p_2 (u_2, v_2)$ representam a projeção dos pontos P_1 e P_2 no plano de projeção (imagem omnidirecional) sobre a óptica do centro de projeção O , através das retas OP_1' e OP_2' . A Equação (3.8) de Geyer e Daniilidis (2001) descreve o modelo de como, um ponto no ambiente 3D se obtém o ponto projetado no plano de projeção.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{l+m}{lR-Z} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Na Equação (3.8) R representa a distância entre o centro da esfera unitária C e o ponto no ambiente 3D (P_i), calculada pela Equação (3.9).

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (3.9)$$

Pereira *et al* (2006) encontram o centro da imagem, aproveitando a característica de que em sistemas omnidirecionais, as retas verticais são projetadas na imagem como retas radiais, assim, o centro é determinado no ponto onde estas retas se interceptam.

Os parâmetros l e m variam conforme se varia a forma do espelho utilizado, sendo estes estabelecidos em um processo de calibração do sistema omnidirecional catadióptrico. Estes são encontrados utilizando-se um conjunto de pontos 3D com coordenadas conhecidas no mundo real e no plano de projeção (imagem 2D). Em sistemas que possuam centro único de projeção, considerando a esfera unitária, têm-se que $0 \leq l \leq 1$. Além disso, para $l = 0$ (assumindo-se $m = 1$), têm-se uma projeção de perspectiva, para $0 < l < 1$ têm-se um espelho hiperbólico e para $l = 1$ (e $m = 0$), o sistema é composto por um espelho parabólico (projeção estereográfica - uma função matemática que projeta uma esfera em um plano, sendo o polo norte da esfera o centro de projeção) (Geyer & Daniilidis, 2001).

Com o intuito de se calibrar um sistema omnidirecional real, estes pontos podem ser obtidos com o auxílio de uma imagem composta por uma grade (ou *grid* – Figura 3.7) de pontos, onde as coordenadas são pré-conhecidas. O cálculo dos parâmetros l e m é realizado através da vinculação de pontos na imagem, que correspondem a pontos no ambiente.

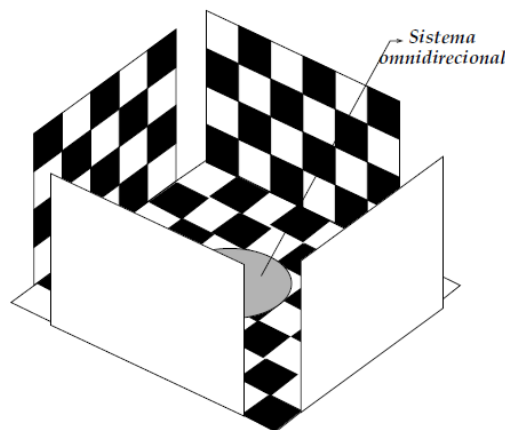


Figura 3.7 - Grade de calibração para um sistema omnidirecional (Pereira *et al*, 2005).

A calibração permite a aquisição de imagens de forma eficiente, e garante um sistema robusto. A próxima etapa do trabalho consiste em realizar o mapeamento entre imagens panorâmicas e omnidirecionais. Para este trabalho, foram utilizadas as técnicas de retificação descrita por (Grassi Jr, 2002).

3.5 RETIFICAÇÃO DE IMAGENS

O sistema de visão omnidirecional catadióptrico realiza o mapeamento de pontos no ambiente 3D, para pontos em um plano de projeção 2D. Este mapeamento é feito através da transformação das coordenadas 3D para coordenadas polares, que estão presentes no plano de projeção (a imagem omnidirecional). Entretanto, é possível que algumas aplicações exijam o remapeamento de coordenadas polares da imagem omnidirecional em coordenadas retangulares (que é o mapeamento utilizado no caso de imagens panorâmicas ou de perspectiva), ou então, que o oposto aconteça, sendo necessário o mapeamento de coordenadas retangulares em coordenadas polares.

O processo de se realizar o remapeamento de coordenadas em uma imagem omnidirecional para uma imagem panorâmica ou o contrário, é chamado de retificação. O benefício de se realizar este tipo de processo se encontra na possibilidade de se utilizar uma vasta gama de técnicas já consolidadas na área da visão computacional e do processamento de imagem aplicáveis a imagens panorâmicas e de perspectiva. Além disso, essas imagens geradas pela retificação da imagem omnidirecional são de fácil interpretação humana, no entanto, este trabalho se limita ao uso e implementação de retificação das imagens panorâmicas em imagens omnidirecionais, e a retificação no sentido contrário de imagens omnidirecionais em imagens panorâmicas. A Figura 3.8 exibe como funciona o processo de retificação de imagens omnidirecionais em imagem panorâmica.

Na Figura 3.8 têm-se que u e v são coordenadas polares da imagem omnidirecional enquanto que u_{pn} e v_{pn} são coordenadas de coluna e linha respectivamente, resultantes do processo de retificação .

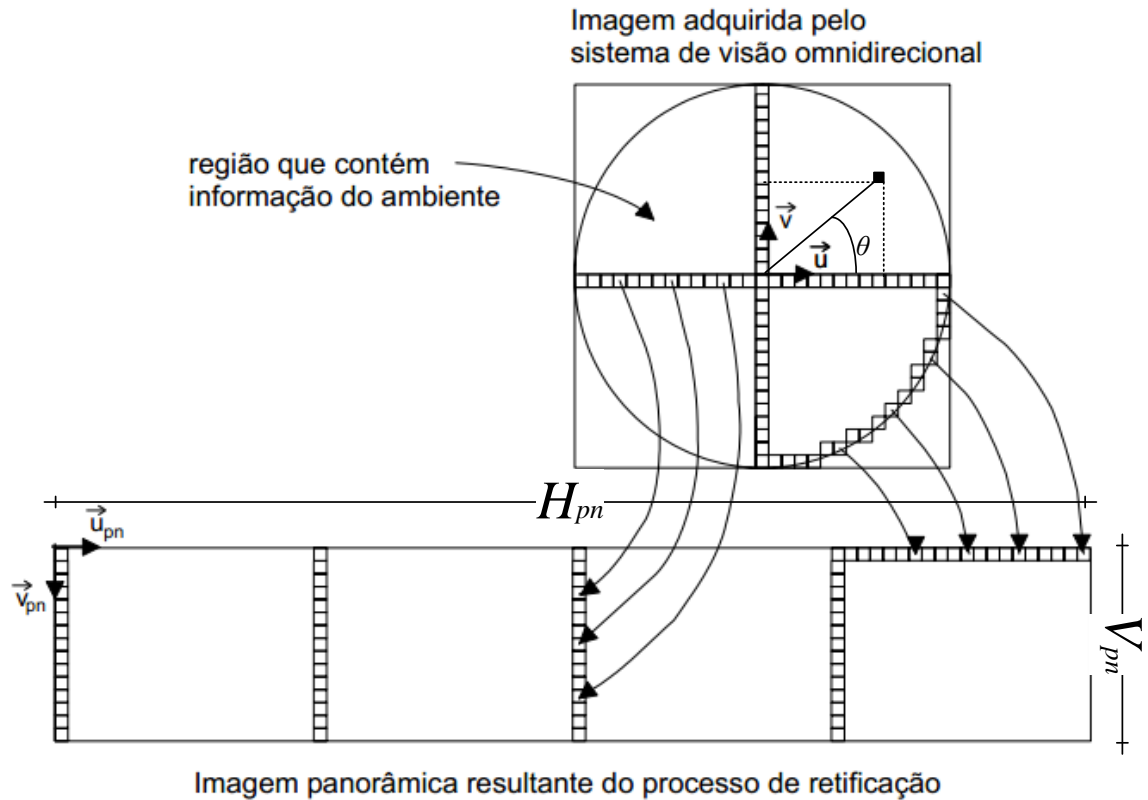


Figura 3.8 - Processo de retificação de imagens omnidirecionais (Junior, 2002 - adaptado).

No trabalho de Grassi Jr & Okamoto Jr (2006), os autores abordam dois métodos diferentes para se retificar imagens omnidirecionais. O primeiro consiste em um mapeamento direto das coordenadas retangulares da imagem panorâmica em coordenadas polares da imagem omnidirecional. A segunda técnica utiliza a propriedade do centro único do espelho, auxiliado pela própria equação do espelho, para realizar o remapeamento de pontos.

Os dois métodos são descritos a seguir. Na seção 3.5.1 um método para a retificação direta de coordenadas retangulares de imagens panorâmicas para coordenadas polares de imagens omnidirecionais é apresentado. Na seção 3.5.2 o método de retificação que utiliza a propriedade do centro único de projeção e a equação do espelho é apresentado.

3.5.1 RETIFICAÇÃO DIRETA

Para se obter uma imagem panorâmica a partir de uma imagem omnidirecional, é necessário se mapear o ângulo do azimute θ (formado pela distância angular entre o eixo $x=0$ e distância do pixel ao centro da imagem omnidirecional) é mapeado no eixo da coordenada horizontal da imagem panorâmica (Figura 3.8).

Considerando que o centro da imagem omnidirecional está alinhado com a origem de um plano cartesiano, isto é, que as coordenadas u , v do ponto central da imagem valem $u = 0$ e $v = 0$ respectivamente, e considerando que as resoluções vertical e horizontal da imagem panorâmica valem V_{pn} e H_{pn} respectivamente, temos que os *pixels* ao longo da dimensão radial da imagem omnidirecional são mapeados como *pixels* verticais na imagem panorâmica através das relações exibidas na Equação (3.10) e Equação (3.11).

$$u = \frac{v_{pn} \cdot R_{pixel}}{V_{pn}} \cos\left(\frac{2\pi \cdot u_{pn}}{H_{pn}}\right) \quad (3.10)$$

$$v = \frac{v_{pn} \cdot R_{pixel}}{V_{pn}} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi \cdot u_{pn}}{H_{pn}}\right) \quad (3.11)$$

As Equações (3.10) e (3.11) descrevem como transformar coordenadas cartesianas (presentes em uma imagem panorâmica cilíndrica) em coordenadas polares (presentes em uma imagem omnidirecional). O centro da imagem omnidirecional é tido como a origem da imagem (0,0), enquanto que a coordenada radial da borda da imagem omnidirecional equivale à R_{pixel} .

Há a possibilidade de um determinado *pixel* da imagem omnidirecional corresponder a mais de um *pixel* na imagem panorâmica. Assim sendo, pode ser necessário se fazer um mapeamento inverso (mapeando as coordenadas dos *pixels* da imagem panorâmica resultante em *pixels* de uma imagem omnidirecional). Caso o sistema tenha uma resolução fixa tanto para a imagem omnidirecional quanto para imagem panorâmica, é possível se criar uma *lookup table* que consiste em uma tabela que irá guardar a correspondência existente entre os *pixels* da imagem omnidirecional e os *pixels* da imagem panorâmica.

3.5.2 RETIFICAÇÃO COM O CENTRO ÚNICO DE PROJEÇÃO E EQUAÇÃO DO ESPELHO

O uso da retificação direta implica na transformação linear de coordenadas da imagem omnidirecional em coordenadas da imagem panorâmica cilíndrica. Entretanto, em alguns casos, o processo de retificação direta pode gerar alguma distorção na direção radial (alterando a forma dos objetos capturados), ocasionado pelo mapeamento polar não linear do ambiente. Este mapeamento não linear está ligado à forma do espelho e a diferentes resoluções presentes em diferentes regiões do mesmo. Assim sendo, é comum que tal distorção seja propagada na imagem resultante pela retificação direta.

O uso da propriedade de centro único de projeção junto à equação do espelho hiperbólico auxiliando o processo de retificação aparece então, como uma alternativa ao uso da retificação direta. Ao se utilizar esta técnica, a visualização de todo ambiente é virtualmente feita do centro de projeção, sendo possível mapear as coordenadas polares da imagem original no plano de projeção cilíndrico (Figura 3.9).

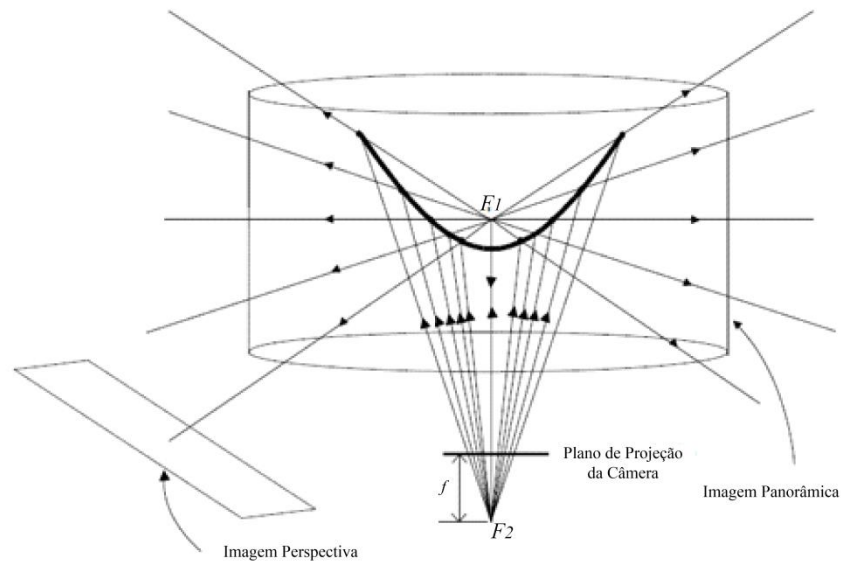


Figura 3.9- Plano de projeção cilíndrico e o centro único de projeção (Grassi Jr, 2002 - adaptado).

As figuras a seguir mostram uma imagem omnidirecional adquirida por um sistema montado no topo de um robô móvel que utiliza um espelho hiperbólico de lobo simples (Figura 3.10), que foi retificada utilizando-se a forma direta (Figura 3.11), e pela forma proposta por (Grassi Jr, 2002), utilizando-se a equação do espelho e a propriedade de centro único de projeção.

Conforme podemos observar a distorção na direção radial existente na imagem omnidirecional foi mantida pela retificação direta, porém foi parcialmente suprimida pela retificação proposta no trabalho em questão. Esta distorção ocorre, pois o processo de retificação direta não leva em consideração o perfil específico do espelho, de forma que como os espelhos da família convexa possuem como propriedade uma resolução maior na extremidade e menor no centro, esta característica é propagada para a imagem retificada.



Figura 3.10 - Imagem omnidirecional (Grassi Jr, 2002).



Figura 3.11 - Imagem panorâmica cilíndrica originada a partir da retificação direta da imagem omnidirecional (Grassi Jr, 2002).



Figura 3.12 - Imagem panorâmica cilíndrica originada a partir da retificação proposta por Grassi Jr (2002) que leva em consideração a equação do espelho e o centro único de projeção (Grassi Jr, 2002).

Na retificação, utilizando-se a geometria do espelho (ou a equação que o descreve) junto à propriedade de centro único de projeção, as coordenadas polares dos pontos ao longo da direção radial da imagem omnidirecional são mapeadas em pontos de uma coluna da imagem panorâmica cilíndrica conforme esquematizado na Figura 3.13.

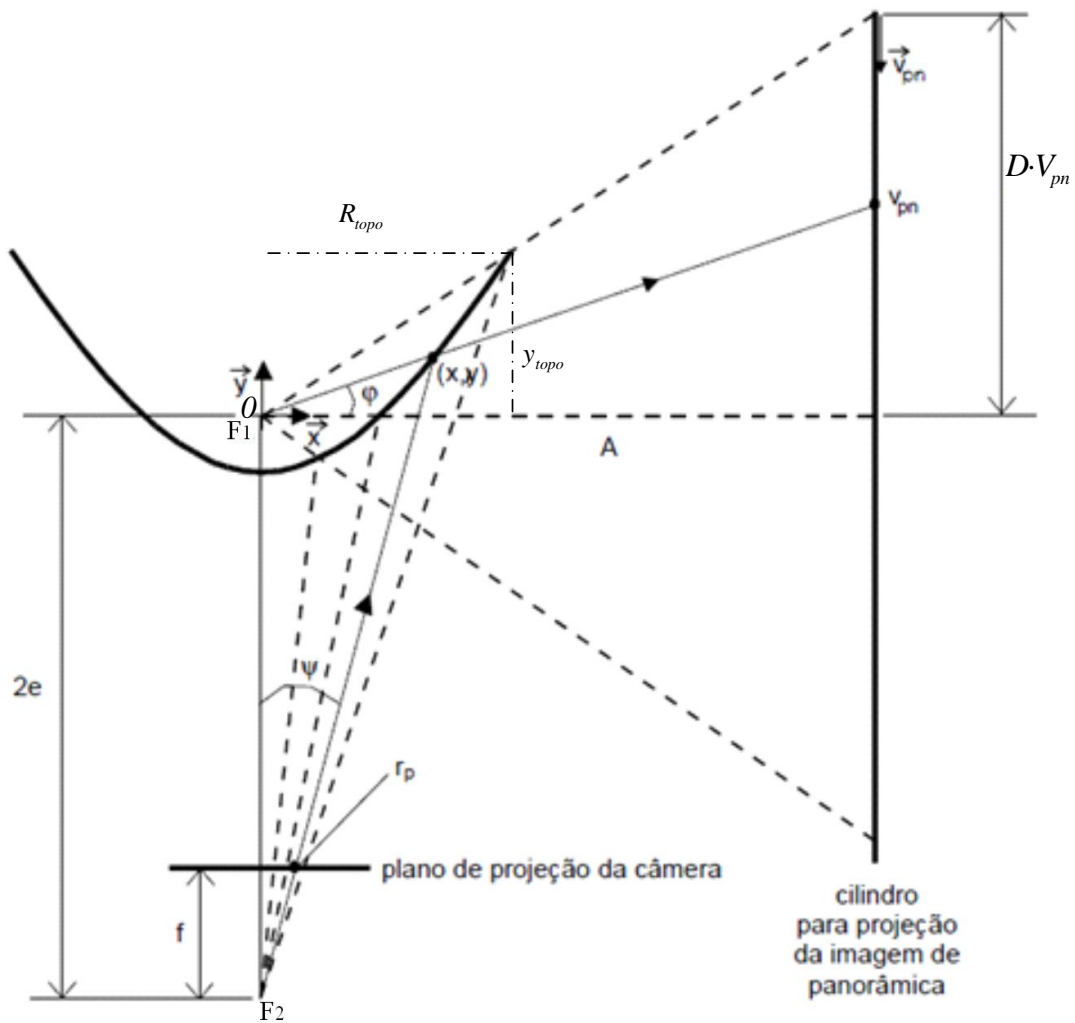


Figura 3.13 - Retificação utilizando a geometria do espelho junto à propriedade de centro único de projeção (Grassi Jr, 2002 - adaptado) .

Considerando que já são conhecidos parâmetros como e , R_{pixel} , R_{topo} , y_{topo} , a Figura 3.13 apresenta um esquema de mapeamento de imagens omnidirecionais em imagens panorâmicas onde v_{pn} representa o valor da coordenada vertical do ponto na imagem e (x, y) representam as coordenadas do ponto pertencente ao espelho em relação ao sistema apresentado na Figura 3.4, com a origem do sistema coincidindo com o ponto focal $F1$. Além disso, para $v_{pn} = 0$, temos as coordenadas dos pontos que estão no topo do espelho, isto é, (R_{topo}, y_{topo}) . O parâmetro D influencia a distância do centro de projeção ao plano cilíndrico (A) e é definido pelo usuário no sistema proposto. Além disso, este parâmetro é utilizado para definir a distância vertical entre o ponto correspondente à borda externa do espelho ($x = R_{topo}$, mapeado no pixel $v_{pn} = 0$) até a linha formada pelo mapeamento dos

pontos do espelho que correspondem a $y = 0$. O parâmetro r_p representa a distância radial do *pixel* na imagem omnidirecional (plano de projeção da câmera) e o centro da imagem.

As equações que associam os *pixels* da imagem omnidirecional à imagem panorâmica cilíndrica, baseadas no esquema apresentado na Figura 3.13 são as Equações (3.12) e (3.13).

$$u = r_p \cos\left(\frac{2\pi \cdot u_{pn}}{H_{pn}}\right) \quad (3.12)$$

$$v = r_p \text{sen}\left(\frac{2\pi \cdot u_{pn}}{H_{pn}}\right) \quad (3.13)$$

O valor de r_p é calculado através de relações trigonométricas que são observadas e extraídas a partir da Figura 3.13. Conforme se pode analisar da figura, é possível encontrar a relação que expressa o valor do parâmetro A e a constante K (que descreve a relação entre a medida de f em milímetros e a sua equivalência em pixels) através da semelhança entre triângulos (Equação (3.14) e Equação (3.15)).

$$\tan \varphi_{\max} = \frac{y_{\text{topo}}}{R_{\text{topo}}} = \frac{D \cdot V_{pn}}{A} \Rightarrow A = \frac{D \cdot V_{pn} \cdot R_{\text{topo}}}{y_{\text{topo}}} \quad (3.14)$$

$$\tan \psi = \frac{R_{\text{pixel}}}{f \cdot K} = \frac{R_{\text{topo}}}{h} \Rightarrow K = \frac{R_{\text{pixel}} \cdot h}{f \cdot R_{\text{topo}}} \quad (3.15)$$

A variável A define a distância entre o centro de projeção e o plano projetivo. Além disso, é possível se extrair as relações trigonométricas exibidas pelas Equações (3.16) e (3.17).

$$\tan \varphi = \frac{y}{x} = \frac{D \cdot V_{pn} - v_{pn}}{A} \Rightarrow y = \frac{(D \cdot V_{pn} - v_{pn})x}{A} \quad (3.16)$$

$$\tan \psi = \frac{x}{2e + y} = \frac{r_p}{f \cdot K} \quad (3.17)$$

Substituindo-se a Equação (3.16) na Equação (3.17) obtêm-se:

$$\frac{A \cdot x}{A \cdot 2e + x(D \cdot V_{pn} - v_{pn})} = \frac{r_p}{f \cdot K} \Rightarrow r_p = \frac{f \cdot A \cdot x \cdot K}{A \cdot 2e + x(D \cdot V_{pn} - v_{pn})} \quad (3.18)$$

Além disso, substituindo-se a Equação (3.14) e também a Equação (3.15) na Equação (3.18) obtêm-se:

$$r_p = \frac{x \cdot D \cdot V_{pn} \cdot R_{pixel} \cdot h}{(D \cdot V_{pn} - v_{pn}) \cdot x \cdot y_{topo} + D \cdot V_{pn} \cdot 2e \cdot R_{topo}} \quad (3.19)$$

Na Equação (3.19), os parâmetros necessários para se calcular o valor de r_p , são conhecidos D , h , e , R_{pixel} , R_{topo} , y_{topo} , V_{pn} e v_{pn} . Porém é necessário encontrar o valor para x . Substituindo então a Equação (3.14) na Equação (3.16), têm-se:

$$y = \frac{(D \cdot V_{pn} - v_{pn}) \cdot x \cdot y_{topo}}{D \cdot V_{pn} \cdot R_{topo}} \quad (3.20)$$

A Equação (3.20) representa uma reta que passa pelo ponto focal FI do espelho e também pelo ponto v_{pn} . Sem perda de generalidade, ao se igualar as Equações (3.20) e (3.4) obtêm-se um polinômio de segunda ordem conforme Equação (3.21) para um dado v_{pn} .

$$x^2 \left(-\frac{a^2}{b^2} + \frac{(D \cdot V_{pn} - v_{pn})^2 \cdot y_{topo}^2}{(D \cdot V_{pn} \cdot R_{topo})^2} \right) + x \left(2e \frac{(D \cdot V_{pn} - v_{pn}) \cdot y_{topo}}{D \cdot V_{pn} \cdot R_{topo}} \right) + e^2 - a^2 = 0 \quad (3.21)$$

Este polinômio é resolvido computacionalmente através do método numérico de Newton, o que aumenta o custo computacional da tarefa em relação à retificação direta. O valor de x encontrado através da Equação (3.21) é então utilizado para se calcular r_p (Equação (3.19)), que por sua vez, é utilizado para se calcular os valores da coordenada do pixel da imagem original (imagem omnidirecional), no plano de projeção cilíndrico (imagem panorâmica) utilizando-se as Equação (3.12) e (3.13).

O processo de retificação de imagem permite gerar uma imagem omnidirecional partindo-se de uma imagem panorâmica, ou o oposto, permitindo-se gerar uma imagem panorâmica, partindo-se de uma imagem omnidirecional.

Ao se utilizar um espelho de lobo duplo, os processos apresentados neste capítulo devem ser realizados para cada lobo pertencente ao espelho. Tanto o lobo interno quanto o lobo externo devem ter seus parâmetros calculados e projetados de forma a priorizar a robustez e eficiência na aquisição e retificação de imagens. No sentido de se estudar a característica de um sistema omnidirecional catadióptrico que utiliza um espelho de lobo duplo, no capítulo 4 será apresentada a estereoscopia omnidirecional para espelhos de lobo duplo.

4 ESTEREOSCOPIA OMNIDIRECIONAL UTILIZANDO ESPELHOS DE LOBO DUPLO

A estereoscopia é uma técnica que permite atribuir informações de distância e da estrutura 3D de objetos que compõe o ambiente. Esta por sua vez, pode ser passiva ou ativa e a escolha do método depende da aplicação e do ambiente a ser estudado (Coelho, 2002). O uso de visão estérea pode ser observado sendo constantemente utilizada em aplicações de robótica móvel através da navegação autônoma, ou então, no ramo do entretenimento através da geração de conteúdo 3D para cinema, TV e computadores. Com a inserção de sistemas omnidirecionais catadióptricos, verificaram-se novas possibilidades de se extraírem estas informações em imagens de ambientes em 360°, de forma que esta tarefa se torne menos árdua para um sistema de visão.

No caso da estereoscopia ativa (também conhecida por técnica da luz estruturada), baseia-se na projeção controlada de uma fonte de luz sobre uma cena e na captação da luz refletida pela cena por um sensor (câmera ou sensor linear) (Coelho, 2002). Além disso, em ambientes que possuem a iluminação controlada, esta técnica possui resultados melhores quando comparado à estereoscopia passiva, haja vista que a luz controlada projetada gera pontos que são detectados facilmente na imagem. Entretanto, em ambientes com iluminação que não pode ser controlada, como um espaço real aberto, esta técnica se torna menos eficiente quando comparada com a estereoscopia passiva.

A estereoscopia passiva baseia-se na utilização de duas imagens da mesma cena, capturadas de diferentes posições, cuja diferença entre pontos nas imagens que representa a projeção de um ponto comum no ambiente real (diferença esta chamada de disparidade) é utilizada para se calcular a sua distância em relação ao sistema de visão. Este deslocamento pode ser tanto horizontal, vertical, rotacional ou com múltiplos pontos (Souza, 2009). Este deslocamento é responsável pela disparidade entre a projeção de pontos do mundo real nas imagens e são de difícil percepção aos olhos humanos. Através do conhecimento prévio dos parâmetros que compõem o sistema, e com o auxílio de algoritmos computacionais, é possível calcular as coordenadas de um ponto do ambiente real que está projetado em dois planos de imagens diferentes. Esta técnica é utilizada pelo olho humano para estimar a noção de distância de objetos em um ambiente.

Considerando aspectos da visão omnidirecional, é possível trabalhar com a estereoscopia passiva de duas formas diferentes. Estas formas estão diretamente associadas à quantidade de lobos do espelho utilizado (com esta quantidade variando entre 1 único ou 2 lobos). O uso de um espelho com lobo simples (Deccó 2004, Grassi Jr & Okamoto Jr 2006) requer um deslocamento horizontal do sistema de captura de imagens (que pode estar acoplado a um robô móvel por exemplo), para gerar a disparidade necessária com fins de se realizar o cálculo de distância de pontos no ambiente, e a correspondência de pontos consiste em uma varredura nas curvas epipolares. Outra opção pode ser a utilização de um espelho com dois lobos (Souza, 2009, Cabral, *et al*, 2008) o que permite a geração de duas vistas diferentes do ambiente em uma mesma imagem. Esta técnica por sua vez, dispensa deslocamentos horizontais para a geração de imagens díspares, e permite que a tarefa de correlação de pontos se transforme em uma busca em uma linha radial composta entre o centro e a borda da imagem formada pelo lobo externo do espelho.

Em (Cabral *et al*, 2008) um sistema omnidirecional catadióptrico baseado em um espelho hiperbólico de lobo duplo é apresentado para a tarefa de navegação robótica. Os pontos focais F_I e F_E (dos espelhos internos e externos respectivamente) possuem uma diferença angular, provocado pelo deslocamento na direção horizontal (Figura 4.1) do ponto focal F_E do espelho externo em relação ao ponto focal F_I do espelho interno. O intuito deste deslocamento é permitir que ambos os espelhos possuam o mesmo campo de visão, tendo valores de ϕ_{min} e ϕ_{max} semelhantes. Além disso, o deslocamento Δz_{IE} garante que o sistema terá duas imagens do mesmo ambiente, visto de pontos diferentes.

Em (Souza, 2009) um sistema com espelho hiperbólico de lobo duplo é desenvolvido para mapear o ambiente, através da criação de grades de evidência por meio da estereoscopia omnidirecional. Neste trabalho o eixo óptico da câmera está alinhado ao foco tanto do lobo interno quanto do lobo externo do espelho. São extraídas características das imagens e a correspondência de pontos é realizada, para que em seguida a triangulação seja calculada com o intuito de se gerar a grade de evidência¹ ou grade de ocupação.

¹ Técnica de mapeamento que utiliza uma grade composta por células. Estas células por sua vez recebem a probabilidade das mesmas estarem ocupadas ou vazias. Esta técnica é capaz de permitir a observação da imprecisão probabilística das distâncias obtidas entre os objetos de um ambiente e um sistema de visão (Corrêa, 2004)

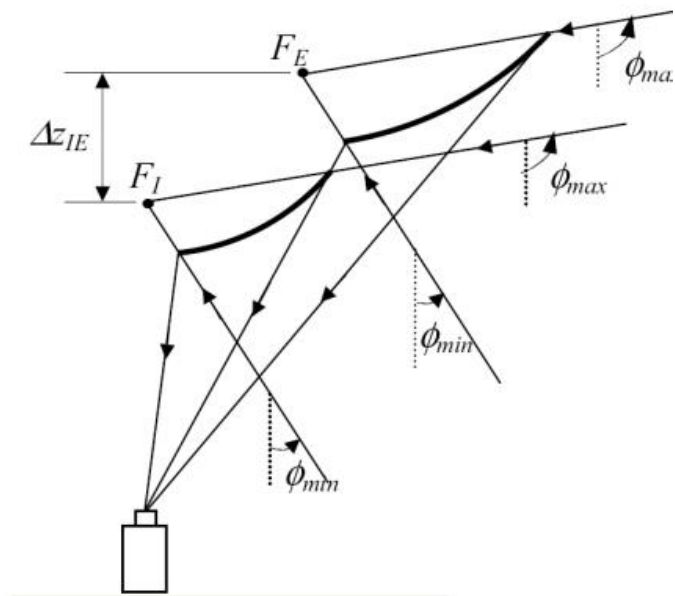


Figura 4.1 – Espelho de lobo duplo com deslocamento horizontal de um dos seus pontos focais (Cabral *et al*, 2008)

Neste trabalho, utiliza-se a técnica de estereoscopia passiva junto à metodologia desenvolvida em (Souza, 2009), que permite realizar a triangulação de ponto em sistema omnidirecional baseado em espelho hiperbólico de lobo duplo.

Um algoritmo para visão estéreo possui três etapas. Estas etapas são realizadas em sequência e juntas permitem extrair as coordenadas 3D de um objeto em relação ao sistema de captura de imagens. As etapas consistem na extração de característica responsável por evidenciar elementos da imagem que são de interesse, seguida da correspondência de pontos que busca em uma imagem do par estéreo as características evidenciadas e localizadas na outra imagem do par, e a triangulação dos pontos correspondentes de forma a se obter a distância destes em relação ao sistema.

4.1 EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS

A etapa de extração de características baseia-se no processamento de imagem necessário para evidenciar as informações de que o sistema necessita para realizar determinada tarefa. Uma característica pode ser um ponto, uma reta, uma forma, o contorno dos objetos, os cantos etc. (Ballard & Brown, 1982). Nesta etapa, um processo comum realizado é a binarização de imagens, com o intuito de facilitar a detecção das características desejadas. Há de se observar que parte dos algoritmos que envolvem técnicas de extração de características requer a binarização de imagens (Corke, 2011), e por esse motivo, a mesma

foi utilizada neste trabalho. Neste processo, inicialmente ocorre uma transformação de imagens coloridas (que possuem tons amostrados no padrão RGB *Red, Green and Blue*) em imagens com tons de cinza. A Equação (4.1) exhibe o cálculo realizado para transformar um pixel $p_{ij}(R, G, B)$ ‘colorido’ em um pixel p em tons de cinza, no qual a intensidade varia entre 0 e 255, com 0 sendo o valor para a cor preta e 255 o valor para a cor branca em um sistema de cor aditivo (que é o adotado neste trabalho) (Gomes & Velho, 2003).

$$p = [0,2989 \quad 0,587 \quad 0,114] \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}}_{p_{ij}} \Rightarrow p = 0,299R + 0,587G + 0,114B \quad (4.1)$$

Na Equação (4.1) os valores quantizados para o teor de vermelho (R), verde (G) e azul (B) também variam entre 0 e 255, no qual este valor corresponde a uma escala de cor definida por uma base formada por 2^n bits, onde neste caso n vale 8 (com $2^8 = 256$).

Também é possível que seja necessário eliminar algum ruído que pode afetar o resultado do processamento da imagem. Do ponto de vista da visão computacional, ruído se refere a qualquer entidade ou característica em imagem que não seja interessante para o propósito do cálculo principal (Trucco & Verri, 1998). Este ruído pode ser acrescentado à imagem em várias etapas do processo de aquisição. É possível que algum elemento do CCD esteja com defeito, que a codificação ou a compressão da informação adquirida pelo sistema sofra alguma interferência, ou que o processo para salvar a imagem adquirida na memória do dispositivo altere o valor original obtido pelo sensor utilizado. Seja qual for a origem do ruído, é necessário realizar uma filtragem que permita eliminá-lo ou atenuar o efeito do mesmo sobre a imagem. A filtragem espacial consiste em técnicas que alteram os níveis de cinza das imagens para evidenciar as características interessantes de objetos em uma determinada aplicação.

Outra etapa comum na extração de características da imagem é a detecção de contornos. Esta etapa consiste em verificar as discontinuidades locais na intensidade dos níveis de cinza presentes na imagem ou na discontinuidade em seus gradientes. Esta etapa permite que a detecção de contorno em imagens seja implementada, através de filtros operadores que são aplicados na imagem através da operação matemática de convolução. Sobel, Roberts e Prewitt são exemplos de alguns operadores empregados na detecção de contorno (Ballard & Brown, 1982).

A extração de característica é o primeiro passo em um algoritmo de visão estéreo. Após o processamento necessário do par de imagens nesta etapa, o próximo passo consiste na correspondência de pontos que estão em ambas imagens.

4.2 CORRESPONDÊNCIA DE PONTOS

A etapa de correspondência de pontos tem como objetivo fazer a associação entre pontos do par de imagens estéreo. Com as características evidenciadas em uma imagem, faz-se uma varredura na imagem que compõe o par estéreo com fins de localizar os pontos que possuem características semelhantes. Este processo de busca normalmente é computacionalmente caro e demanda um alto processamento.

Em imagens de perspectiva ou imagens panorâmicas, esta varredura é feita em uma área delimitada pela reta epipolar. No entanto, em imagem omnidirecional, esta busca fica limitada a um espaço unidimensional, como curvas epipolares em espelhos de lobo único (Svoboda & Pajdla, 2002), ou a linhas radiais em espelhos de lobo duplo (Souza & Motta, 2008). Esta diminuição da área de busca propicia a diminuição no esforço computacional para se concluir a tarefa em questão.

No caso do espelho de lobo único, a busca fica limitada à região da curva epipolar gerada pela detecção de pontos que pertencem às características desejadas. Cada ponto da primeira imagem gera uma curva epipolar na segunda imagem, reduzindo assim a busca bidimensional (na imagem inteira) em uma busca unidimensional (a curva epipolar).

O espelho de lobo duplo tem a capacidade de reduzir esta tarefa a uma busca unidimensional em uma linha radial, onde as características presentes na imagem proveniente do lobo interno pertencem a uma reta, que passa pelo pixel central da imagem, e se estende até a borda da imagem gerada pelo reflexo do lobo externo. Um canto detectado no lobo interno ($C1$) pertence a uma linha radial, estando também nesta linha, o seu pixel correspondente ($C2$) no lobo exterior (Figura 4.2).

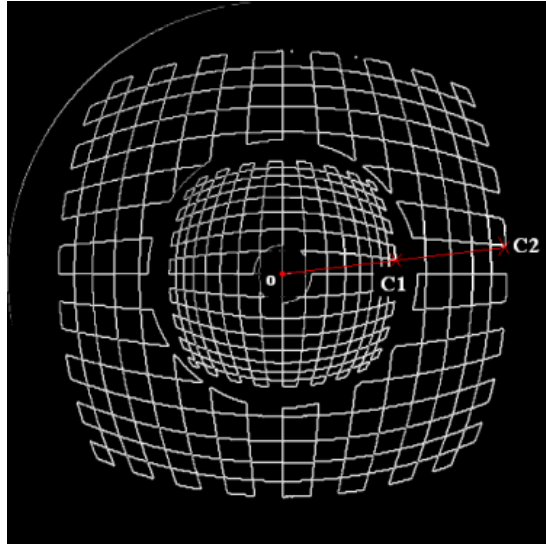


Figura 4.2 – Correspondência de pontos ($C1$ e $C2$) em um sistema omnidirecional em espelho de lobo duplo, usando a busca em uma linha radial (em vermelho) (Souza, 2009).

Esta propriedade reduz a complexidade computacional de se realizar a correspondência de pontos para a estereoscopia. A etapa seguinte é a triangulação, que permite o cálculo da distância dos objetos em relação ao sistema de aquisição de imagens.

4.3 TRIANGULAÇÃO

A etapa de triangulação permite, junto ao processo de calibração dos parâmetros geométricos da câmera, o cálculo da distância de objetos para o sistema de visão, percorrendo o caminho inverso ao da luz. Através do uso de semelhança de triângulos, pode-se calcular a distância da característica utilizada pelo sistema ao seu ponto focal. Em um sistema omnidirecional, ao se identificarem através da correspondência as características desejadas, é possível calcular dois vetores, ambos com origem no ponto focal do seu respectivo lobo no espelho e a outra extremidade, no local em que a luz proveniente do ponto no ambiente 3D é refletida em direção ao plano de projeção (imagem omnidirecional). Considerando-se estes dois vetores, os prolongamentos de ambos se interceptam no ponto de origem das imagens geradas. A triangulação então é realizada para se calcular a distância do objeto associado a uma característica. Este processo em visão estéreo torna possível a reconstrução de ambientes tanto em três quanto em duas dimensões sendo o mesmo é ilustrado na Figura 4.3

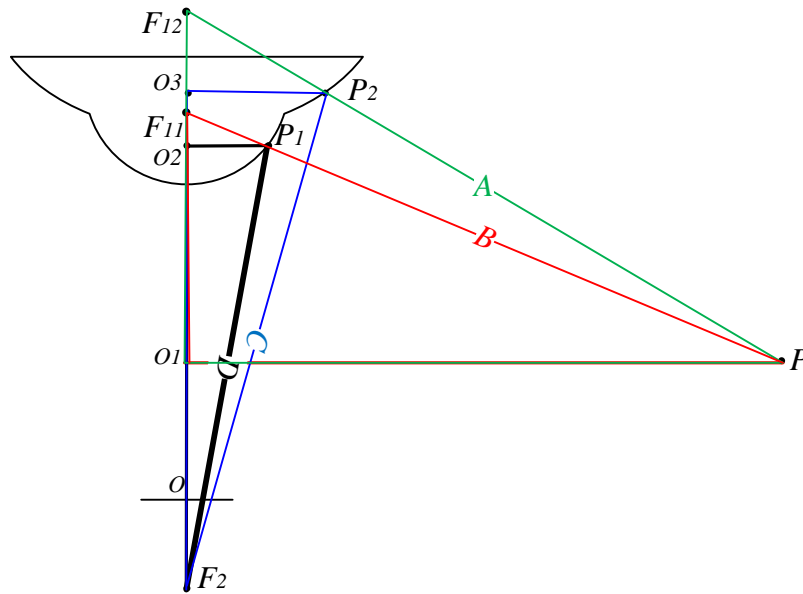


Figura 4.3 - Representação do processo de triangulação para um sistema de visão estéreo omnidirecional.

A Figura 4.3 ilustra o processo de triangulação em um algoritmo de visão estéreo, com um sistema omnidirecional catadióptrico de lobo duplo. Considerando o ponto P no ambiente, é utilizada a semelhança entre os triângulos $A (F_{12}, O_1, P)$, $B (F_{11}, O_1, P)$, $C (F_2, O_3, P_2)$ e $D(F_2, O_2, P_1)$ para calcular as coordenadas de $P (x_p, y_p, z_p)$. Este processo será explicado com detalhes na seção 5.2.3.

A estereoscopia utilizando visão omnidirecional baseada em espelho de lobo duplo reduz a tarefa de correspondência de pontos a uma busca unidimensional em uma linha radial que passa sobre os pontos de centro da imagem e a borda dos lobos interno e externo respectivamente. Como a imagem omnidirecional carrega muita informação sobre o ambiente, o seu uso torna-se indicado a aplicações que precisam realizar interação em tempo real com o ambiente, como é o caso da navegação de robôs móveis e do rastreamento de objetos. No caso de espelho de lobo único, é necessário um deslocamento físico do sistema para realizar a aquisição do par de imagens. Este deslocamento em ambientes desconhecidos pode gerar choques que atrapalhem o desempenho do sistema ou danifiquem o hardware do robô móvel (no caso da navegação).

Neste trabalho a metodologia utilizada para realizar a estereoscopia omnidirecional foi baseada em (Souza, 2009) e é apresentada no Capítulo 5 a seguir.

5 METODOLOGIA

Este trabalho visa analisar a simulação de imagens omnidirecionais catadióptricas baseadas em espelho de lobo duplo, partindo de imagens panorâmicas cilíndricas. Através das disparidades presentes nos reflexos dos lobos interno e externo do espelho que compõem a imagem, um algoritmo estéreo é utilizado para realizar a estereoscopia. Os pontos dos cantos detectados na imagem são utilizados para se realizar a análise dos resultados obtidos. Essa por sua vez, terá o objetivo de criticar a atuação dos parâmetros usados para a construção do espelho, com a intenção de se investigar qual destes tem maior ou menor influência na produção da imagem omnidirecional catadióptrica.

O uso de imagens simuladas diminui o custo computacional de um algoritmo estéreo aplicado a uma imagem panorâmica (permitindo usufruir da busca unidimensional em linha radial), e também, ajudaria no processo de fabricação de um espelho real, pois permitiria verificar o comportamento do mesmo para diferentes parâmetros em fase de projeto. Além disso, a simulação permite verificar a relação entre as dimensões do espelho e a precisão dimensional presente nos cálculos estereoscópicos. Todavia, neste trabalho, um sistema omnidirecional real não foi implantado. Assim sendo, algumas restrições serão utilizadas para viabilizar o processo de simulação, baseado no sistema omnidirecional esquematizado na Figura 5.1:

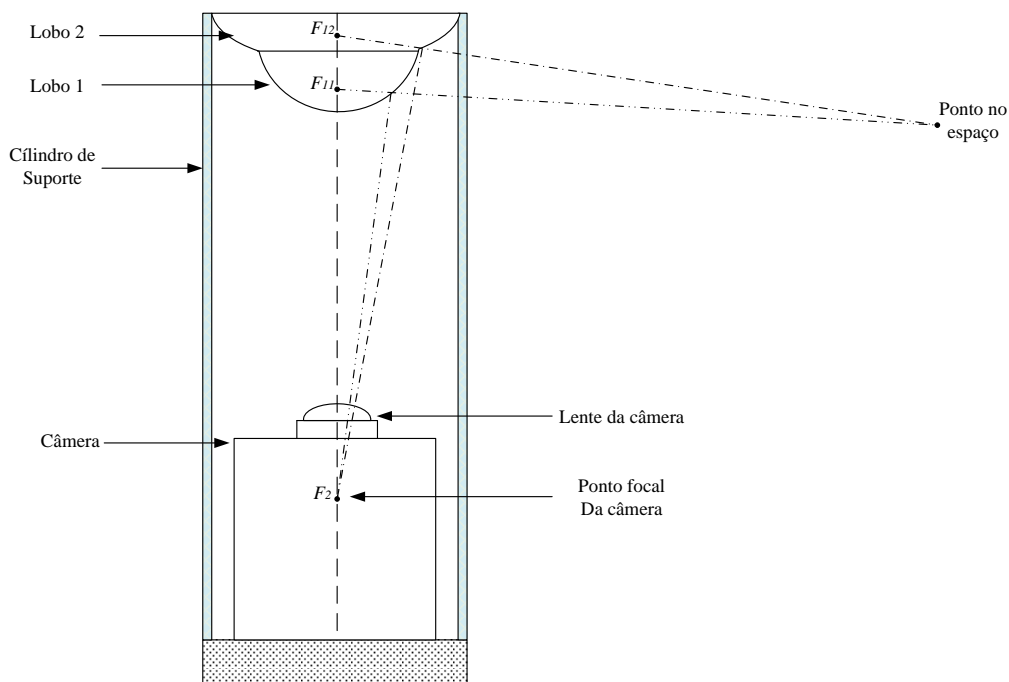


Figura 5.1 - Esquema de sistema omnidirecional baseado em espelho de lobo duplo.

- 1) Os erros provocados por parâmetros intrínsecos à câmera ou a hardware defeituoso não existem;
- 2) As imagens panorâmicas utilizadas como entrada no sistema possuem variadas dimensões vertical e horizontal.

Pela restrição 1) tem-se que as distorções das imagens geradas por quaisquer erros, incluindo o processo de captura (seja um erro no CCD ou inscrição na memória) são desconsiderados em caráter simulatório. Já a restrição 2 permite o uso com imagens panorâmicas de dimensões $m \times n$, aumentando assim, a possibilidade de aplicações para se testar o sistema.

Para este trabalho, a metodologia utilizada, se assemelha à metodologia proposta em (Souza, 2009), com algumas adaptações que permitem a realização da análise necessária das imagens. Esta metodologia faz uso das vantagens do espelho hiperbólico de lobo duplo e do sistema de visão omnidirecional. O sistema utilizado é apresentado a seguir.

5.1 SISTEMA OMNIDIRECIONAL PROPOSTO

O sistema proposto neste trabalho baseia-se na utilização de imagens panorâmicas, que são retificadas para imagens omnidirecionais, com o intuito de se gerar a simulação da captura realizada pelo espelho omnidirecional hiperbólico de lobo duplo. Esta imagem simulada, após processamento, deve ser capaz de tornar viável a reconstrução de objetos que compõem um ambiente. As imagens geradas através da simulação do espelho de lobo duplo são concêntricas e estéreas, sendo possível adquirir informações do ambiente 3D observado.

Com o espelho de lobo duplo, descarta-se a necessidade de deslocamento do sistema para a aquisição de uma segunda imagem, formando assim, o par estéreo. Este deslocamento quando realizado em condições dinâmicas, pode acarretar perda de informação dos ambientes, e também, dos objetos que o compõem. Considerando um objeto móvel, que se desloca de forma linear ou não no ambiente, o deslocamento realizado pelo sistema omnidirecional adiciona uma incerteza sobre a posição final do objeto. Este deslocamento não se faz necessário em um sistema baseado em espelho de lobo duplo, pois a imagem adquirida gera mais informações sobre o ambiente do que em um sistema convencional (seja ele catadióptrico ou não). Entretanto, a maior quantidade de informação torna o sistema mais suscetível a erros.

Estes erros podem ser diminuídos através de um projeto de sistema omnidirecional robusto, e de uma calibração que permita realizar o mapeamento do ambiente com eficiência e robustez. Esta eficiência e robustez estão ligadas ao conjunto espelho/câmera associados ao sistema. Assim sendo, há de se especificar corretamente os parâmetros necessários. Além disso, com o caráter simulatório deste trabalho, torna-se de interesse a possibilidade de se alterar tais parâmetros, com fins de investigação da influência dos mesmos nas tarefas de retificação e reconstrução propostas.

Considerando o esquema exibido pela Figura 3.4 e as equações desenvolvida na seção 3.3 (Equação (3.3) à Equação (3.7)), o sistema desenvolvido permite a manipulação por parte do usuário dos parâmetros f e T_{pixel} (referentes à câmera), e os parâmetros referentes a cada lobo do espelho R_{topo} , R_{pixel} e, a/b e D (com R_{pixel1} para o lobo interno e R_{pixel2} para o lobo externo, por exemplo – Figura 5.2).

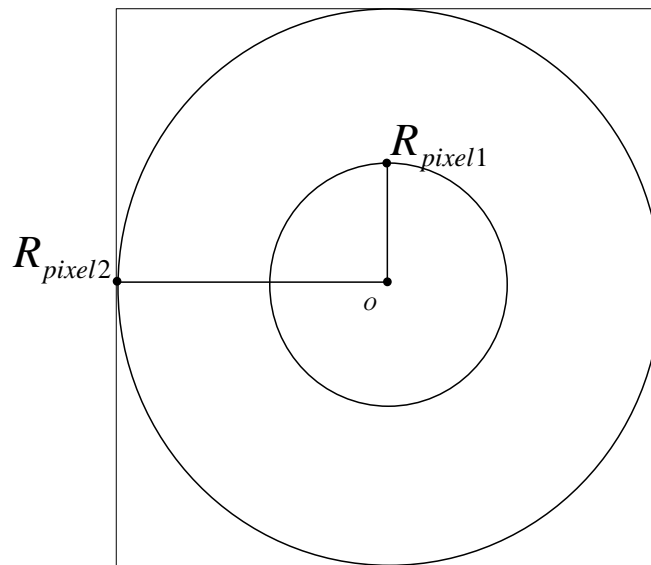


Figura 5.2 – R_{pixel1} e R_{pixel2}

O modelo de câmera utilizado considera um CCD quadrado, com tamanho variável (sendo determinado por $R_{pixel2} \cdot 2$), sendo que esta variação também é permitida ao parâmetro referente ao tamanho dos pixels do CCD (T_{pixel}).

O sistema em questão, desenvolvido para este trabalho, também permite que alguns parâmetros que influenciam a forma do perfil de cada um dos lobos do espelho sejam

definidos pelo usuário com o mesmo intuito de se analisar a influência destes parâmetros na eficiência e na robustez do sistema. No caso dos parâmetros que influenciam o espelho (também segundo as Equações (3.3) à (3.7)) o sistema permite que o usuário configure os parâmetros R_{topo} que define o valor do raio da base do espelho, $c = a/b$ que influencia a curvatura do perfil do espelho e o parâmetro D , distância entre o cilindro de projeção e o ponto focal F (para cada um dos lobos do espelho, no caso da retificação que utiliza a propriedade de centro único de projeção).

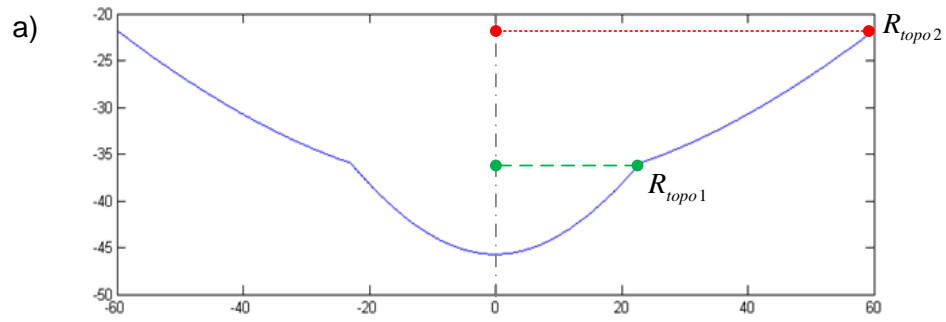
A Figura 5.3 exibe diferentes configurações do espelho de lobo duplo, quando se altera o valor de alguns parâmetros. As especificações dos parâmetros presentes em cada um dos espelhos exibidos encontram-se listados na Tabela (5.1).

Tabela 5.1 - Parâmetros dos espelhos presentes na Figura 5.3.

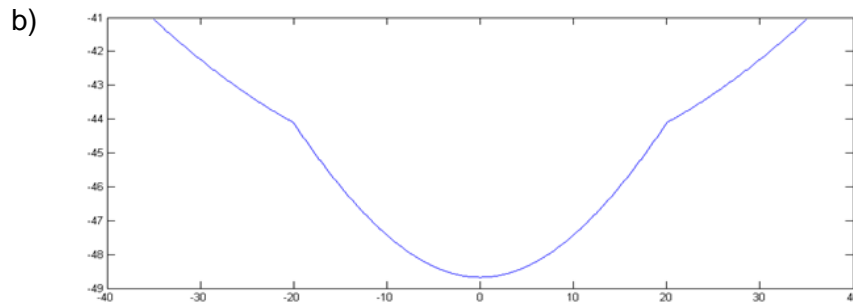
Espelho	$f(mm)$	$R_{topo1}(mm)$	$R_{topo2}(mm)$	$R_{pixel1}(pixels)$	$R_{pixel2}(pixels)$	c1	c2
a)	16	23	60	307	504	1,5	0,9
b)	16	20	35	307	504	2	0,9
c)	12	23	60	307	504	1,5	0,9
d)	12	25	47	233	504	2	0,7

Os gráficos foram gerados através de um script criado em MatLab®, que utiliza as equações Equação (3.3), Equação (3.4), Equação (3.5), Equação (3.6), e Equação (3.7), com o valor de x sendo acrescido de 0,01 mm . Quando um sistema exige uma maior exatidão na descrição do lobo dos espelhos, basta que o acréscimo da coordenada x seja diminuído (ex: acréscimo de 0,0001 mm). Considerando então a Figura 5.3 a), temos que a equação que representaria o seu perfil é descrita conforme Equação (5.1).

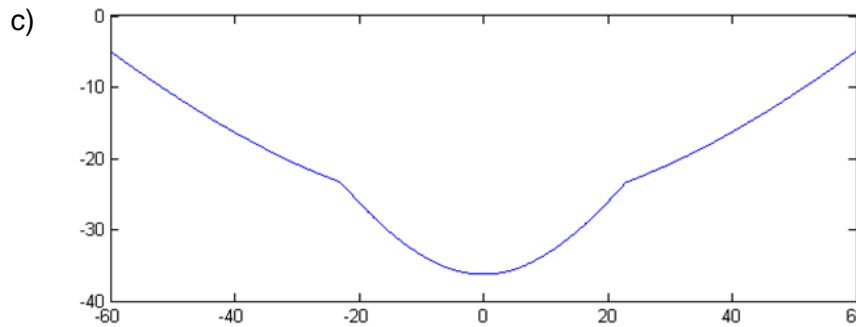
$$y(x) = \begin{cases} \sqrt{78,075^2 \cdot \left(1 + \frac{x^2}{86,75^2}\right)} + 116,71 \text{ p/ } 23 < x \leq 60 \text{ e } -60 \leq x < -23 \\ \sqrt{56,054^2 \cdot \left(1 + \frac{x^2}{37,369^2}\right)} + 67,368 \text{ p/ } -23 \leq x \leq 23 \end{cases} \quad (5.1)$$



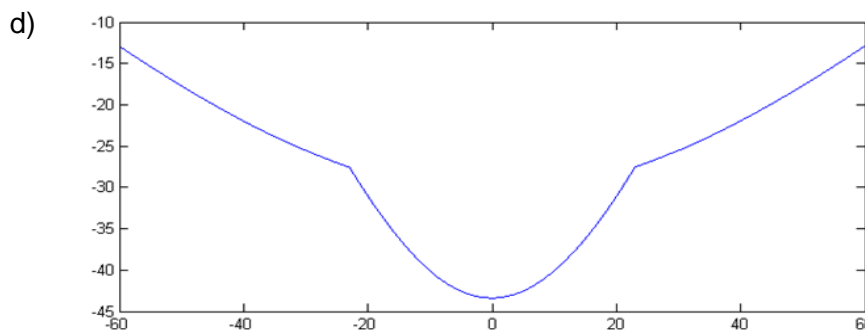
$f=16mm, R_{topo1}=23mm, R_{topo2}=60mm, R_{pixel1}=307\text{ pixels}, R_{pixel2}=504\text{ pixels},$
 $c1 = 1,5 \text{ e } c2 = 0,9;$



$f=16mm, R_{topo1}=20mm, R_{topo2}=35mm, R_{pixel1}=307\text{ pixels}, R_{pixel2}=504\text{ pixels},$
 $c1 = 2 \text{ e } c2 = 0,9;$



$f=12mm, R_{topo1}=23mm, R_{topo2}=60mm, R_{pixel1}=307\text{ pixels}, R_{pixel2}=504\text{ pixels},$
 $c1 = 1,5 \text{ e } c2 = 0,9;$



$f=12mm, R_{topo1}=25mm, R_{topo2}=47mm, R_{pixel1}=233\text{ pixels}, R_{pixel2}=504\text{ pixels},$
 $c1 = 2 \text{ e } c2 = 0,7;$

Figura 5.3 - Diferentes configurações de espelho hiperbólico de lobo duplo, conseguidos através das variações dos parâmetros do conjunto espelho/câmera.

As próximas seções deste capítulo são decorrentes da necessidade de se apresentarem as técnicas utilizadas para realizar o processamento e estereoscopia nas imagens omnidirecionais.

5.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

Com a utilização de um par de imagens estéreo, é possível calcular a coordenadas dos objetos do sistema de visão. O conhecimento do ambiente permitiria realizar uma tarefa de navegação autônoma, de forma segura, ou então, realizar uma tarefa como rastreamento, e/ou mapeamento de objetos de forma eficaz (possibilitando que o sistema atue de maneira a evitar choques com objetos indesejados, ou então, encurtando o caminho percorrido pelo robe móvel). Torna-se então desejável que um sistema computacional atue de forma a possibilitar a realização destas tarefas de forma robusta.

Um sistema omnidirecional com espelho de lobo duplo torna-se uma ferramenta interessante à medida que reduz a complexidade computacional de realizar estereoscopia em um par de imagens estéreo. Tal sistema deve ser dotado da capacidade de realizar os cálculos das coordenadas dos objetos de forma a produzir o menor erro possível, considerando que, apesar do sistema omnidirecional baseado em lobo duplo carregar muita informação a respeito do ambiente, esta característica também o torna suscetível a erros. Há de se considerar que a inserção de informação de todo um ambiente (360°) em uma área de alguns centímetros ou até mesmo alguns milímetros implica num esforço de compressão intenso.

O sistema aqui proposto foi batizado OmniViz e tem o propósito de ser intuitivo e permitir a interação do usuário para manipular os parâmetros do conjunto espelho/câmera. Através desta liberdade, o usuário consegue gerar a partir de imagens panorâmicas de diferentes fontes e dimensões, a simulação das mesmas em um espelho hiperbólico de lobo duplo. Além disso, esta simulação ocorre através do processo de retificação de imagens, permitindo que a alteração dos parâmetros do sistema forneça diferentes resultados (perfis do espelho). A alteração deste parâmetro torna possível através da apresentação de uma interface gráfica do usuário (*Graphic User Interface* – GUI) conforme Figura 5.4.

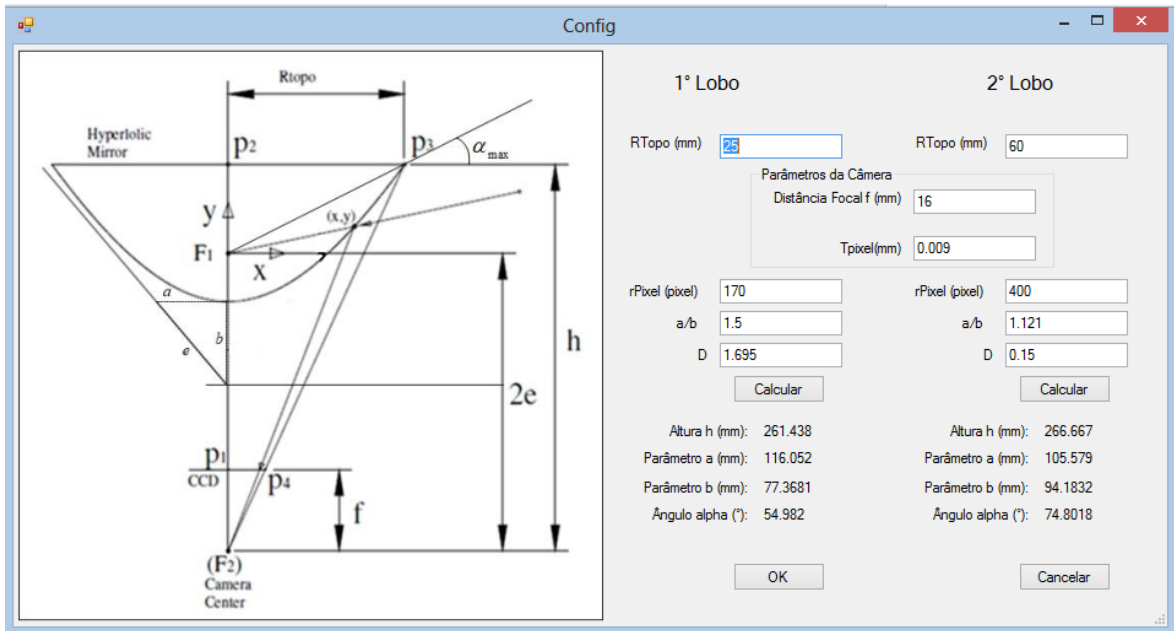


Figura 5.4 - Tela de configuração de parâmetros do sistema implementado OmniViz.

Na Figura 5.4 podemos observar a possibilidade de se definir alguns parâmetros do sistema, para que sejam calculados os parâmetros do espelho. Esta etapa de definição de parâmetros é a primeira necessária à utilização do OmniViz. A metodologia aplicada às demais etapas do sistema são apresentadas nas seções a seguir, deste capítulo.

Para validar os métodos apresentados, os mesmos serão aplicados sobre a Figura 5.5. Validar, aqui, consiste em se retificar a imagem panorâmica de um determinado ambiente para uma imagem simulada de um espelho hiperbólico de lobo duplo e, a partir da imagem simulada, conseguir calcular a distância de pontos dos objetos presentes no ambiente, em relação ao sistema de visão.

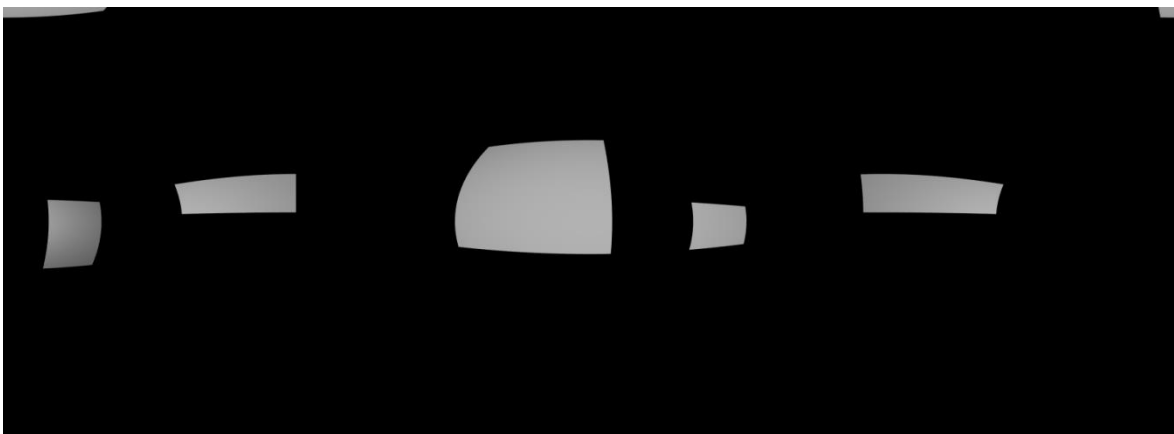


Figura 5.5 – Imagem panorâmica gerada pelos software PovRay® com dimensão de 1600 x 1200 pixels.

A imagem panorâmica apresentada na Figura 5.5 possui uma resolução de 1600x1200 *pixels* e apresenta um ambiente composto por cinco superfícies retangulares dispostas aleatoriamente, gerada através do software PovRay®². Este ambiente será utilizado para validar a metodologia aplicada. A Figura 5.6 exibe uma visão de perspectiva da cena mostrada na Figura 5.5. Foram adicionados padrões quadriculados de diferentes cores no piso e nas paredes, para facilitar a identificação dos objetos aos olhos humanos.

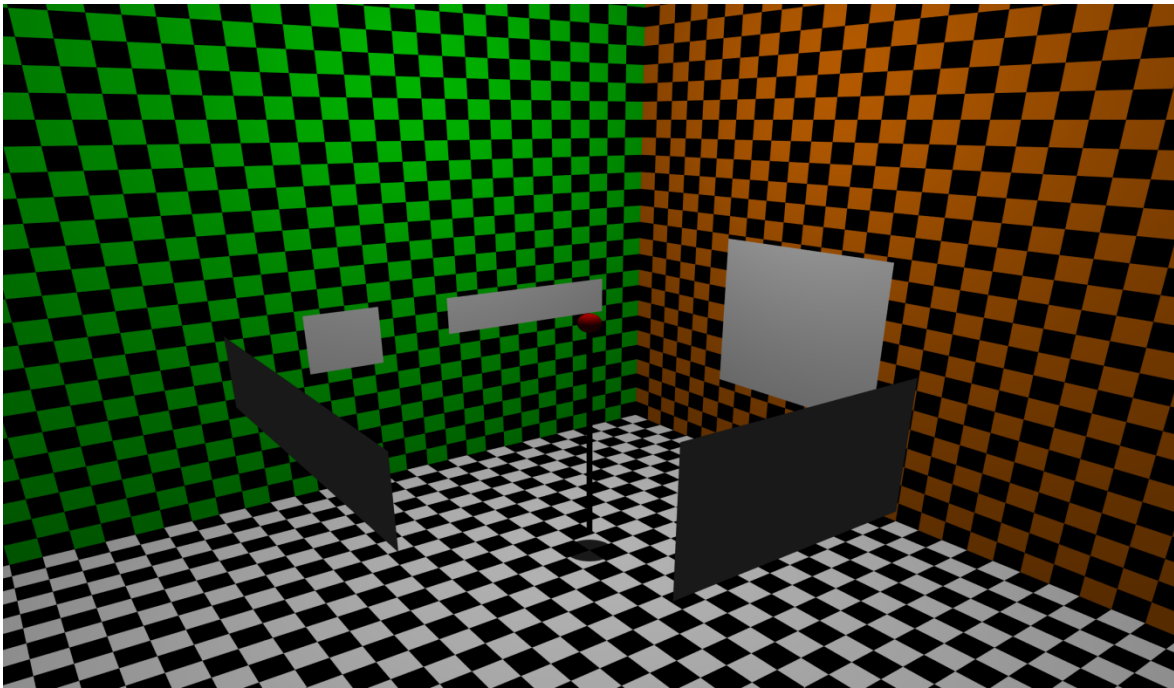


Figura 5.6 - Posicionamento dos objetos na cena utilizada para validação da metodologia. Objetos retangulares (em cinza) rodeando o ponto focal do sistema (Em vermelho).

5.2.1 DEFINIÇÃO DA RETIFICAÇÃO DE IMAGENS PANORÂMICAS EM OMNIDIRECIONAIS

Após a definição dos parâmetros que compõem o conjunto espelho câmera, é necessário definir um método para retificar as imagens panorâmicas cilíndricas, que alimentam o sistema, em imagens omnidirecionais. Como apresentado na seção 3.5, duas diferentes propostas para a retificação são possíveis. Tanto a técnica que envolve a retificação direta de coordenadas retangulares em coordenadas polares, quanto à técnica que usa o perfil do espelho e o centro único de projeção têm o intuito de fazer o mapeamento dos pontos na imagem panorâmica em pontos na imagem omnidirecional. O processo de retificação é

² PovRay consiste em uma ferramenta de *Ray-Tracing* (traços de luz) para a renderização de imagens, que permite entre outras ações, simular ambientes visualizados por diferentes tipos de câmera. Esta ferramenta é *open-source* e está disponibilizada para aquisição através do link www.povray.org.

realizado para cada lobo pertencente ao espelho hiperbólico. Além disso, na técnica que utiliza a equação do espelho para realizar a retificação, cada lobo tem os parâmetros utilizados de forma a gerar imagens com diferenças acentuadas em relação à técnica de retificação direta.

A Figura 5.7 demonstra o resultado da aplicação da técnica de retificação direta na Figura 5.5. No caso desta imagem, as equações utilizadas para realizar o mapeamento foram as Equações (3.10) e (3.11), com os parâmetros conforme apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Parâmetros utilizados para retificação da Figura 5.5.

$f(mm)$	$R_{topo1}(mm)$	$R_{topo2}(mm)$	$R_{pixel1}(pixels)$	$R_{pixel2}(pixels)$	c1	c2
16	23	60	307	504	1,5	0,9

Estes parâmetros geram um espelho com perfil cuja seção lateral é exibida na Figura 5.8. Os mesmos foram escolhidos por gerarem resultados satisfatórios ao longo de todo o processo realizado durante o desenvolvimento deste trabalho, para se conseguir imagens que permitam a extração de características necessárias para se aferir resultados.

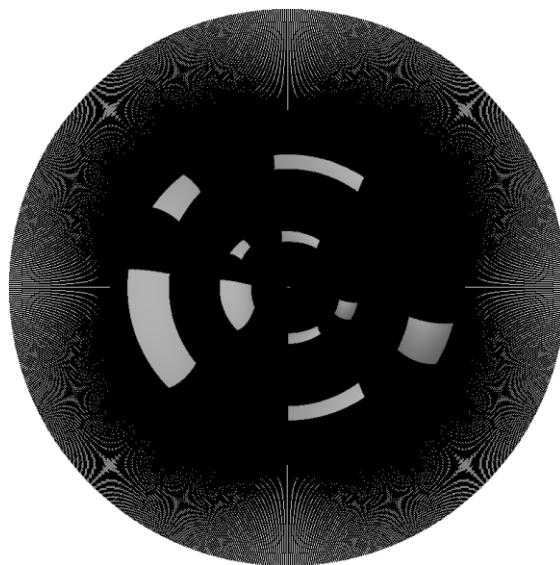
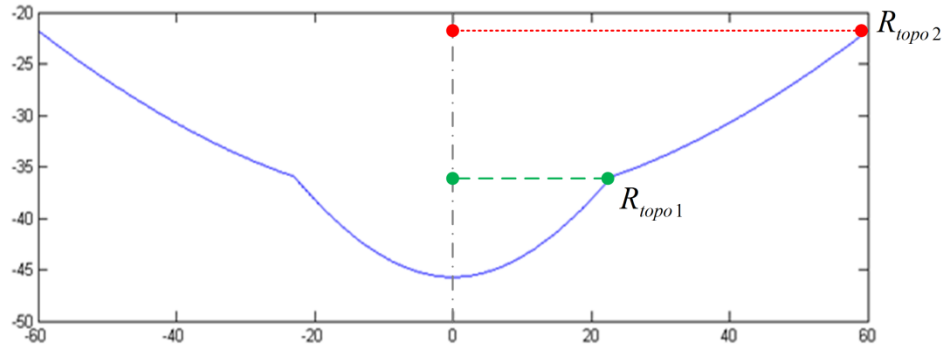


Figura 5.7 –Resultado do processo de retificação direta aplicado à Figura 5.5.



$$f=16mm, R_{topo1}=23mm, R_{topo2}=60mm, R_{pixel1}=307\text{ pixels}, R_{pixel2}=504\text{ pixels}, \\ c1=1,5 \text{ e } c2=0,9;$$

Figura 5.8 - Perfil do espelho simulado.

A Figura 5.9 exibe o resultado da implementação da técnica que utiliza a propriedade do centro único de projeção associado à equação do espelho hiperbólico. Como é possível notar, as disparidades encontradas nos lobos simulados do espelho ficam evidenciadas quando comparadas ao resultado produzido através da retificação direta (Figura 5.7). Os parâmetros do conjunto espelho/câmera são semelhantes (Tabela 5.2), com a diferença na configuração do parâmetro D (Equação (3.19)) que influencia na distância da superfície de projeção cilíndrica em relação ao sistema de visão (Figura 3.9 e Figura 3.13) e não está presente na retificação direta. Os valores associados aos parâmetros foram $D_1=1,695$ e $D_2=0,15$ referentes ao lobo interno e externo respectivamente, sendo estes valores definidos empiricamente.

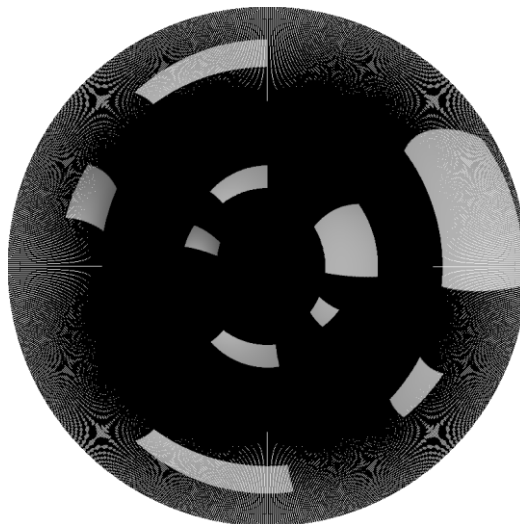


Figura 5.9- Resultado do processo de retificação utilizando a propriedade de centro único de projeção associado à equação do espelho, aplicado à Figura 5.5.

Conforme observado, o processo de retificação gera ruído na imagem provocado pelo processo de quantização gerado pelo mapeamento das coordenadas cartesianas da imagem panorâmica para coordenadas polares da imagem omnidirecional. Este ruído pode ser minimizado usando-se imagens com altas resoluções ou então utilizando-se filtros para suprimi-lo. A apresentação dos filtros utilizados neste trabalho é realizada na seção a seguir.

5.2.2 FILTRAGEM DE IMAGENS

Um sistema de visão computacional pode gerar ruídos que prejudicam a qualidade de imagem a ser analisada. Um ruído é caracterizado como sendo qualquer característica indesejada presente em uma imagem que se está analisando (Trucco & Verri, 1998). Para tentar contornar possíveis ruídos presentes, a implementação de filtros é realizada. Estes por sua vez evidenciam características de interesse e minimizam características não interessantes a determinado propósito. O filtro altera os tons de cinza presentes na imagem atuando (entre outras formas) nas discontinuidades de grupos de pixels, de forma a reforçar características interessantes para a aplicação em questão.

Pode-se realizar filtragem tanto no domínio espacial, quanto no domínio da frequência. Entretanto, dado o fato de que a filtragem no domínio da frequência altera o formato original da imagem, este trabalho utiliza apenas filtragem no domínio espacial, que altera apenas o valor dos tons de cinza, mas não altera a forma dos objetos em sua essência.

Como é possível visualizar nas Figuras 5.7 e 5.9, o processo de retificação gera ruídos na região externa da imagem. Este ruído é provocado pela baixa resolução horizontal em relação ao tamanho da imagem gerada pelo sistema simulado, o que faz com que alguns pixels não sejam preenchidos durante a retificação. Considerando um valor pré-fixado em pixels para o raio da imagem omnidirecional, quanto maior a resolução horizontal nas imagens panorâmicas, menor será a probabilidade de se gerar imagens com ruídos durante o processo de retificação.

Para diminuir os ruídos presentes em uma imagem, um filtro linear com máscara gaussiana pode ser utilizado. A filtragem linear implica na utilização de uma matriz constante, denominada de máscara (ou *kernel*). No caso da máscara gaussiana, quando aplicada a

imagens bidimensionais, pode ser separada em máscaras unidimensionais verticais e horizontais, sendo utilizado de forma eficiente como filtro passa-baixa³.

Considerando uma imagem I de dimensão $m \times n$, para se aplicar uma filtragem gaussiana, inicialmente define-se a largura da janela do filtro w , devendo ser um valor ímpar preferencialmente maior do que ou igual a 5. Um valor inferior, forneceria uma queda de energia no pixel. Em seguida utiliza-se a relação apresentada na Equação (5.2) para se calcular o desvio padrão σ aproximado (Trucco & Verri, 1998).

$$\sigma = \frac{w}{5} \quad (5.2)$$

O passo seguinte implica na construção da máscara gaussiana G de tamanho $w \times w$ utilizando-se a Equação (5.3) para a construção do núcleo, e convolução da mesma com a imagem (Equação (5.4)).

$$G_{[hk]} = e^{-\frac{h^2+k^2}{2\sigma^2}} \quad (5.3)$$

$$Im(x, y) = \sum_{i=-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \sum_{j=-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} I(i, j) * G(x-i, y-j) \quad (5.4)$$

Na Equação (5.3) h e k representam índices da máscara gaussiana e ambos variam seus valores entre 0 e $w-1$. Na Equação (5.4), $Im(x,y)$ representa a imagem filtrada com núcleo gaussiano. Para uma melhor eficiência nos cálculos, o núcleo gaussiano pode ser normalizado. Esta normalização é realizada através da divisão de cada componente da máscara G pelo seu somatório (Equação (5.5) e Equação (5.6))

$$f_{norm} = \sum_{h=1}^w \sum_{k=1}^w G(h, k) \quad (5.5)$$

$$G'_{[h,k]} = \frac{G_{[h,k]}}{f_{norm}} \quad (5.6)$$

³ Do ponto de vista do processamento de imagens, um filtro passa-baixa tende a suavizar a imagem atenuando altas frequências, o que no geral corresponde a transições abruptas na imagem.

Na Equação (5.5), f_{norm} é o fator de normalização utilizado na Equação(5.6) para gerar a máscara gaussiana normalizada (G'). A Figura 5.10 ilustra o resultado da aplicação da máscara gaussiana à Figura 5.6. A aplicação do filtro é realizada através da convolução matemática entre os pixels da imagem e a máscara gaussiana.

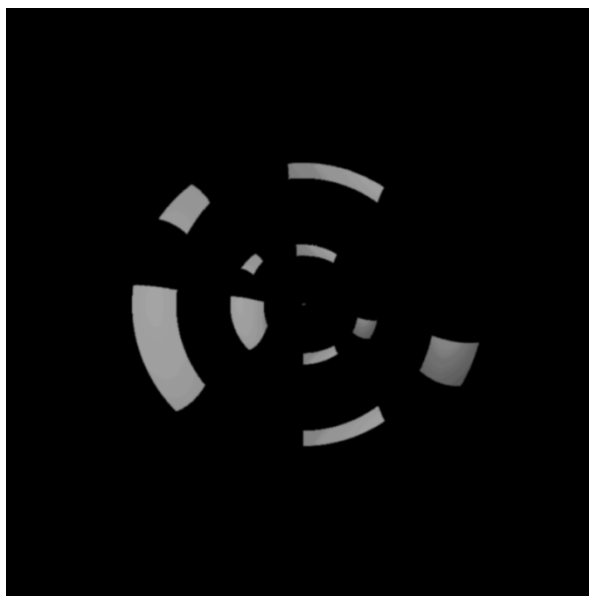


Figura 5.10 - Resultado do processo de filtragem gaussiana em relação a Figura 5.6, utilizando-se uma máscara com janela $w=5$

Com a diminuição da influência dos ruídos sobre a imagem gerada, é possível então pensar na aplicação de um algoritmo de visão estéreo sobre imagem para calcular os pontos correspondentes e características (no caso deste trabalho cantos dos objetos) do ambiente apresentado.

5.2.3 ESTEREOSCOPIA OMNIDIRECIONAL IMPLANTADA

O algoritmo de visão estéreo se divide em três etapas: extração de características, correspondência de pontos e triangulação. Quando realizadas em sequência, permitem calcular as coordenadas dos objetos presentes no ambiente para o sistema. As distâncias dos objetos calculadas ao longo da aplicação deste algoritmo, aliadas a um sistema corretamente calibrado, permitem que um robô móvel possa realizar tarefas de navegação autônoma ou rastreamento de objetos com eficiência. O processo de se calcular a distância de objetos de um ambiente em relação ao sistema de visão é denominado mapeamento. A geração de mapas auxilia a tarefa de navegação, pois são nestes mapas que o ambiente e as características de seus objetos estão dispostos.

Considerando um par de imagens estéreo, as etapas da estereoscopia se utilizam de um conjunto de técnicas que tem por objetivo calcular características presentes no ambiente representado pela imagem. Estas características serão utilizadas em uma determinada aplicação. Realizar a correspondência de pontos presentes no par de imagens para que, em seguida, através das disparidades destas, seja possível se mapear estas características. As três etapas mencionadas aplicadas no algoritmo de visão estéreo do sistema omnidirecional com espelho hiperbólico de lobo duplo são descritas a seguir.

5.2.3.1 Extração de características

Uma característica corresponde a uma informação presente na imagem, podendo ser utilizada para extrair dados úteis a diversos propósitos. Por sua vez, uma vasta gama de técnicas pode ser utilizada para evidenciar tais características desejadas, suprimindo características indesejadas (ruído), sendo uma delas a filtragem linear discutida anteriormente.

Ao se projetar um sistema de visão omnidirecional uma pergunta que precisa ser feita é: qual o propósito do sistema a ser desenvolvido? A resposta a esta pergunta está diretamente vinculada à escolha do tipo de características que serão consideradas no sistema. Estas por sua vez, podem ser pontos, linhas, formas, contornos, quinas e até regiões, e sua escolha e utilização objetiva que tal propósito seja atingido.

Neste trabalho, dado o caráter simulatório de reconstrução de imagens, as características escolhidas são bordas (contornos) e cantos (vértices) em objetos presentes na imagem. Esta escolha permite calcular informações pertinentes o suficiente para possibilitar a reconstrução de imagens panorâmicas e avaliar o posicionamento dos objetos na mesma. Assim sendo, o primeiro passo na extração das características consiste em aplicar uma técnica de reconhecimento de bordas dos objetos, sendo que para este propósito escolheu-se o uso do operador de Sobel (Ballard & Brown, 1982).

A técnica de detecção de bordas atua em cima dos tons de cinza presentes na imagem, considerando que os pixels que se encontram presentes nas bordas dos objetos possuem uma variação acentuada em suas vizinhanças. Esta variação pode então ser detectada pela derivada do sinal do pixel com determinado tom de cinza.

Os operadores de Sobel utilizados são compostos por duas matrizes 3x3, que têm como objetivo gerar uma aproximação da primeira derivada dos pixels, ou em outras palavras, o

gradiente de intensidade destes. Estes são aplicados em conjunto com a operação de convolução com uma imagem I $m \times n$, gerando duas matrizes G_x (aproximação da derivada horizontal dos pontos da imagem) e G_y (aproximação da derivada vertical dos pontos da imagem). Como resultados da aplicação destes operadores, obtém-se uma matriz G (Equação (5.6)) com a magnitude dos pixels de I , e uma matriz Θ (Equação (5.7)) com a direção do gradiente dos pixels presentes. Ambos G e Θ com a mesma dimensão $m \times n$. Além disso, nas duas equações têm-se que com $i < m$ e $j < n$. Os operadores horizontal e vertical de Sobel são apresentados na Figura 5.11.

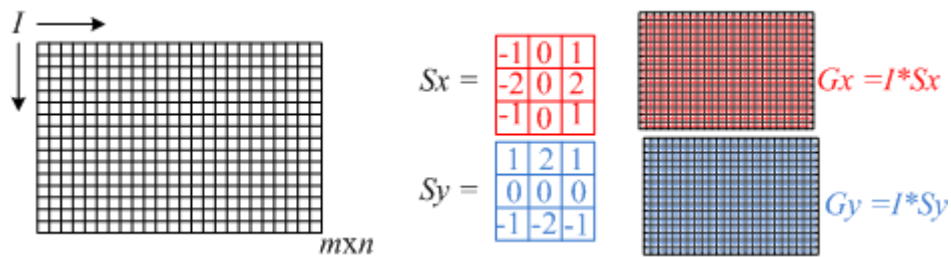


Figura 5.11 Operadores de Sobel.

$$G[ij] = \sqrt{G_x[ij]^2 + G_y[ij]^2} \quad (5.6)$$

$$\Theta[ij] = \arctg\left(\frac{G_x[ij]}{G_y[ij]}\right) \quad (5.7)$$

Na Figura 5.11, S_x e S_y representam os operadores utilizados para calcular os gradientes dos pixels no sentido horizontal e vertical respectivamente. Cada operador é utilizado junto à operação de convolução na imagem I denotada pelo símbolo ‘*’, tendo como resultado G_x e G_y ambos $m \times n$,

Apesar da matriz G ser composta pelo resultado do cálculo das bordas dos objetos, esta pode conter algum resultado degenerado a respeito de pontos que podem não ser bordas. Um algoritmo de purificação de pontos espúrios pode ser utilizado ou então, um valor de limiar pode ser implantado com o intuito de evidenciar os pixels detectados pertencentes às bordas. Esta etapa da detecção de contorno é conhecida como binarização, e tem como objetivo transformar o valor dos pixels presentes na imagem em apenas 0 ou 1 (no caso de imagens de intensidade 0 ou 255). O algoritmo de supressão de não-máximos (*Non-Max Supression* - (Corke, 2011)) que utiliza as informações contidas nas matrizes G e Θ surge como opção no primeiro caso, ou então se utiliza um limiar τ para realizar o reforço das bordas conforme Equação (5.8).

$$\begin{cases} G_b[ij] = 255 & \text{se } G[ij] \geq \tau \\ G_b[ij] = 0 & \text{se } G[ij] < \tau \end{cases} \quad (5.8)$$

onde G_b corresponde à imagem gerada pela binarização dos pixels presentes em G .

Neste trabalho, optou-se por se implementar o sistema de forma que o usuário defina o valor de τ . A Figura 5.12 a seguir exhibe o resultado da detecção de contornos e binarização de imagens resultante da aplicação das técnicas que utilizam as Equação (5.6) e Equação (5.7), para um valor de $\tau = 105$ escolhido empiricamente, na Figura 5.7.

Uma característica interessante a ser extraída da imagem omnidirecional, para auxiliar no processo de aferir resultados, é quina ou canto. Esta por sua vez pode ser interpretada como a interseção de diferentes linhas do contorno de objetos pertencentes a uma imagem. Esta interseção é caracterizada por um gradiente bidimensional de valor alto, sendo possível detectá-lo.

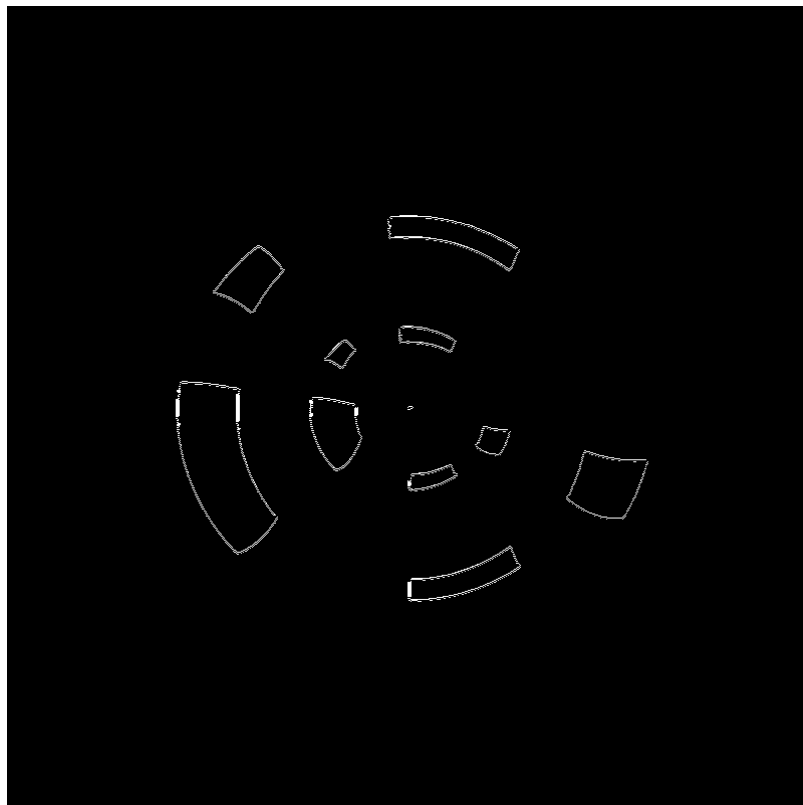


Figura 5.12 - Detecção de contornos e binarização de imagem aplicados à Figura 5.6, com valor de $\tau = 105$.

Neste trabalho a metodologia para a extração de cantos das imagens se baseia na metodologia proposta por Harris & Stephens (1988), na qual, após a extração dos

componentes do gradiente tanto na vertical (G_y) quanto na horizontal (G_x), para cada pixel p cria-se uma matriz R conforme Equação (5.9).

$$R = \begin{bmatrix} A & Q \\ Q & B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum G_x^2 & \sum (G_x G_y) \\ \sum (G_x G_y) & \sum G_y^2 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Este somatório é definido sobre o pixel p , em uma vizinhança de tamanho w , e a matriz R caracteriza a estrutura dos níveis de cinza da imagem. Considerando R uma matriz simétrica ela pode ser então diagonalizada através de uma rotação dos eixos de coordenadas, resultando em uma matriz com os autovalores de R conforme Equação (5.10) a seguir.

$$C = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Conforme análise exibida por Harris e Stephens, caso λ_1 e λ_2 sejam aproximadamente iguais a zero, a matriz C representa um pixel não interessante. Caso $\lambda_1 > 0$ e $\lambda_2 = 0$ (tomando sempre λ_2 como o menor autovalor entre os λ 's) tem-se que a matriz C representa um pixel que está no contorno da imagem. Por fim, caso $\lambda_1 \geq \lambda_2 > 0$, a matriz C representa um pixel que faz parte de um canto. Assumindo um limiar τ , tem-se que uma matriz C representa uma característica desejada (no caso o canto) quando $\lambda_1 \geq \lambda_2 > \tau$.

Uma opção ao cálculo de autovalores da matriz C é o uso do determinante ($\lambda_1 \lambda_2$) e do traço da matriz em questão ($\lambda_1 + \lambda_2$). Considerando a matriz C na Equação (5.9), o determinante (Equação (5.11)) e o traço da matriz (Equação (5.12)) são dados por:

$$Det(C) = (AB - Q^2) = (\sum G_x^2 \sum G_y^2 - \sum (G_x G_y)) = (\lambda_1 \lambda_2) \quad (5.11)$$

$$Trc(C) = (A + B) = (\sum G_x^2 + \sum G_y^2) = (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (5.12)$$

Com base no determinante e no traço da matriz C , é possível calcular a resposta R do pixel p (Equação (5.13)). Caso $R > \tau$, p é considerado então um canto da imagem omnidirecional.

$$R = Det(C) / Trc(C) \quad (5.13)$$

Neste trabalho, optou-se por implementar os passos que envolvem o uso das Equações (5.11), (5.12) e (5.13), para se calcular cantos. A Figura 5.13 exibe a saída da detecção de cantos aplicada à Figura 5.8.

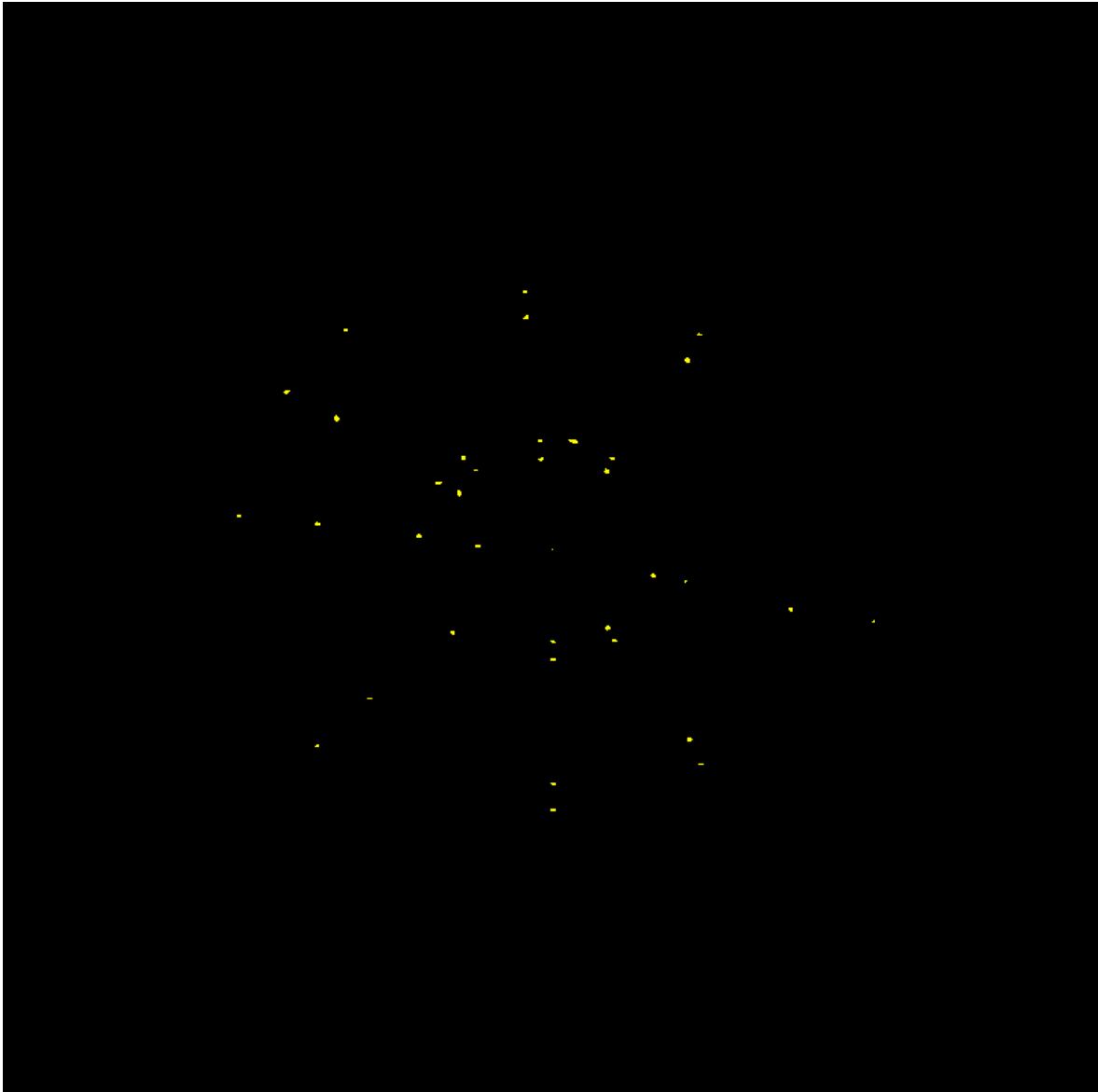


Figura 5.13 - Resultado da técnica de detecção de cantos aplicada ao sistema OmniViz ($\tau=100000$)

Com as bordas acentuadas e cantos detectados, o próximo passo no algoritmo de visão estéreo consiste em realizar a correspondência de pontos, que no caso de sistemas omnidirecionais baseados em espelhos de lobo duplo, é uma tarefa com complexidade computacional inferior a de sistemas que utilizam outros esquemas de visão. A correspondência de pontos é discutida na seção 5.2.3.2 a seguir.

5.2.3.2 Correspondência de pontos

A etapa de correspondência de pontos em um algoritmo estéreo foca no cálculo de pontos que correspondem a uma mesma característica em um par de imagens díspares. Em sistemas de visão computacional que não utilizam sistemas catadióptricos, esta busca normalmente é realizada em um espaço bidimensional (considerando um ponto em uma das imagens do par estéreo, varre-se a outra imagem em busca do ponto semelhante). Este processo por sua vez, por ser realizado para cada ponto evidenciado após a etapa de extração de características, se mostra computacionalmente caro. Os sistemas omnidirecionais baseados em espelho de lobo duplo reduzem a busca a uma linha radial. Considerando as diferenças entre as imagens produzidas pelos lobos do espelho, uma característica encontrada em um pixel pertencente ao reflexo de um lobo do espelho estará presente no prolongamento da linha radial entre o centro da imagem e a borda do lobo externo, que passa pela característica investigada (Corrêa *et al.*, 2006). O problema então fica limitado a encontrar um ponto c_2 no prolongamento da linha radial que passa pelo centro da imagem e o ponto c_1 . Além disso, esta busca está associada ao tamanho da área do CCD da câmera que armazena a imagem produzida pelo reflexo do lobo externo do espelho.

Neste trabalho, o método utilizado para realizar a correspondência de pontos foi o do menor somatório dos quadrados das diferenças (*Sum of Squared Differences – SSD*). Para tal, considerando os pontos c_1 e c_2 investigados, definem-se suas respectivas janelas W_1 e W_2 (formadas pelos pixels presentes na vizinhança destes), e determina-se o somatório das diferenças destas. Os pontos que geram a menor diferença são ditos pontos correspondentes.

Uma peculiaridade na etapa de correspondência de pontos em sistemas que utilizam o espelho de lobo duplo está associada à escala com o qual cada espelho gera imagens do ambiente em que se encontra. Quando um sistema que necessita de deslocamento para gerar um par de imagens estéreo é implantado, pode-se utilizar uma janela quadrada centrada em um pixel c_n (Figura 5.14), referente a uma determinada característica representada em um pixel. Na segunda imagem, será calculado o ponto correspondente mediante a uma vizinhança definida por uma janela quadrada. Entretanto, em uma imagem adquirida pelo espelho hiperbólico de lobo duplo, a escala dos objetos gerados no lobo interno é menor do que a escala gerada pelos objetos do lobo externo. Esta diferença faz

com que a janela quadrada torne-se ineficaz, visto que, em imagens com pixels homogêneos, são grandes as chances de pontos terem vizinhos semelhantes. Esta homogeneidade é provocada pela alta resolução no centro da imagem gerada pelo espelho hiperbólico.

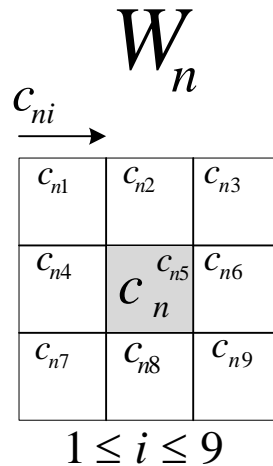


Figura 5.14 - Janela quadrada para realizar o somatório dos quadrados da diferenças.

Como opção a esta limitação, Souza, (2007) propõe um novo modelo de janela para se realizar o cálculo do SSD. A janela consiste em uma vizinhança circular centrada no ponto c_n , em que os pixels vizinhos são definidos por uma distância angular incremental ε ($0 \leq \varepsilon \leq 2\pi$) dada em radianos. Considerando um pixel c_1 presente no reflexo do primeiro lobo, e um pixel c_2 que pretende-se verificar a correspondência a c_1 no reflexo do segundo lobo, têm-se na Figura 5.15 uma esquematização das janelas circulares utilizadas para realizar o cálculo do SSD.

Na Figura 5.15 $n = 2\pi/\varepsilon$ é o tamanho da janela. Uma ressalva deve ser feita sobre o método proposto por Souza, (2007) . Quanto menor o valor de ε , maior será o tempo computacional gasto com a etapa de correspondência, pois maior será a quantidade de vizinhos que serão utilizados no cálculo do SSD (maior será o valor de n). O SSD por sua vez é obtido através da Equação (5.13)

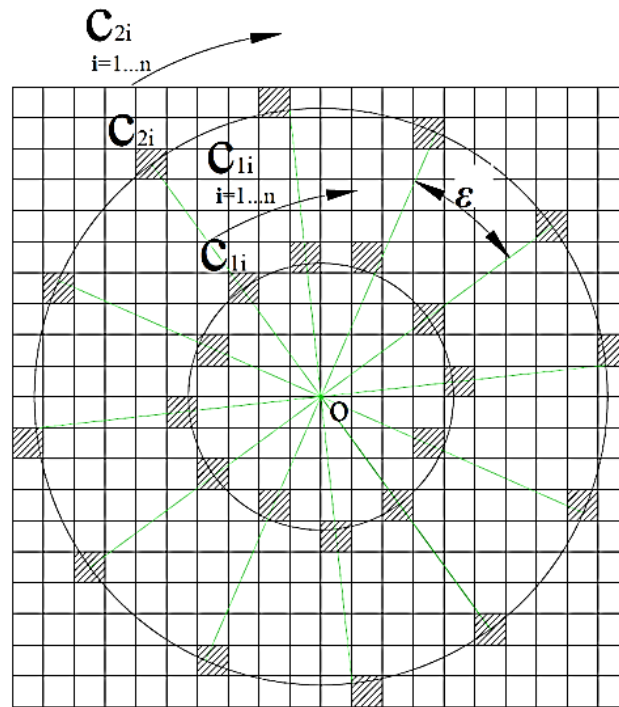


Figura 5.15 - Modelo radial da janela do somatório dos quadrados das diferenças (Souza, 2009).

$$SSD = \sum_{i=n}^1 (c_{1i} - c_{2i})^2 \quad (5.13)$$

Esta etapa foi implantada junto ao sistema e suportou a correspondência de pontos. A Figura 5.16 exibe um exemplo de par de pontos correspondentes detectados.

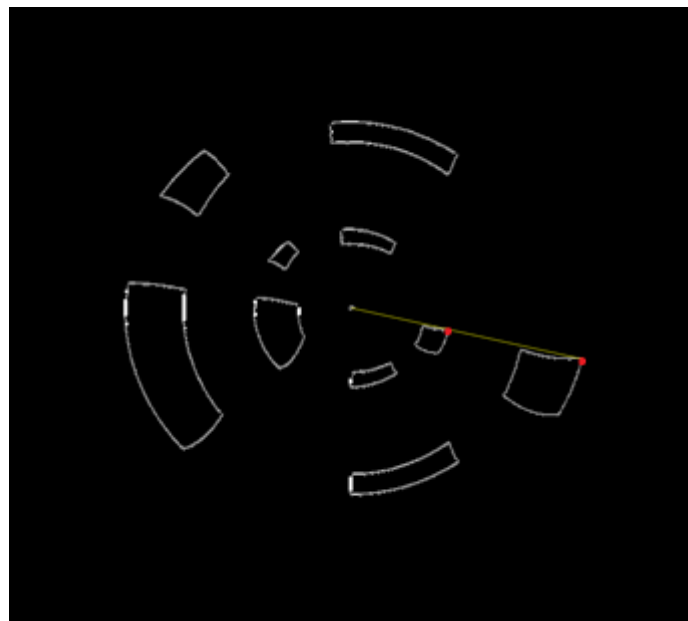


Figura 5.16 – Exemplo de par de pontos correspondentes detectados (assinalados em vermelho).

Com a correspondência de pontos realizada sobre a uma imagem omnidirecional baseada em espelho hiperbólico de lobo duplo, a próxima etapa consiste em fazer a triangulação de pontos correspondentes para se realizar o cálculo dos cantos dos objetos pertencentes ao ambiente em relação ao sistema. A descrição desta etapa é feita na seção a seguir.

5.2.3.3 Triangulação

A etapa de triangulação em um algoritmo de visão estéreo envolve o cálculo da distância entre as características dos objetos presentes na cena e no sistema de visão. Considerando um par de pontos correspondentes c_1 (no reflexo do lobo interno do espelho) e c_2 (no reflexo do lobo externo do espelho) conforme exibido na Figura 5.17b), uma coordenada $P(X, Y)$ é calculada Figura 5.17a), sendo esta a representação da distância entre o sistema e um ponto no ambiente.

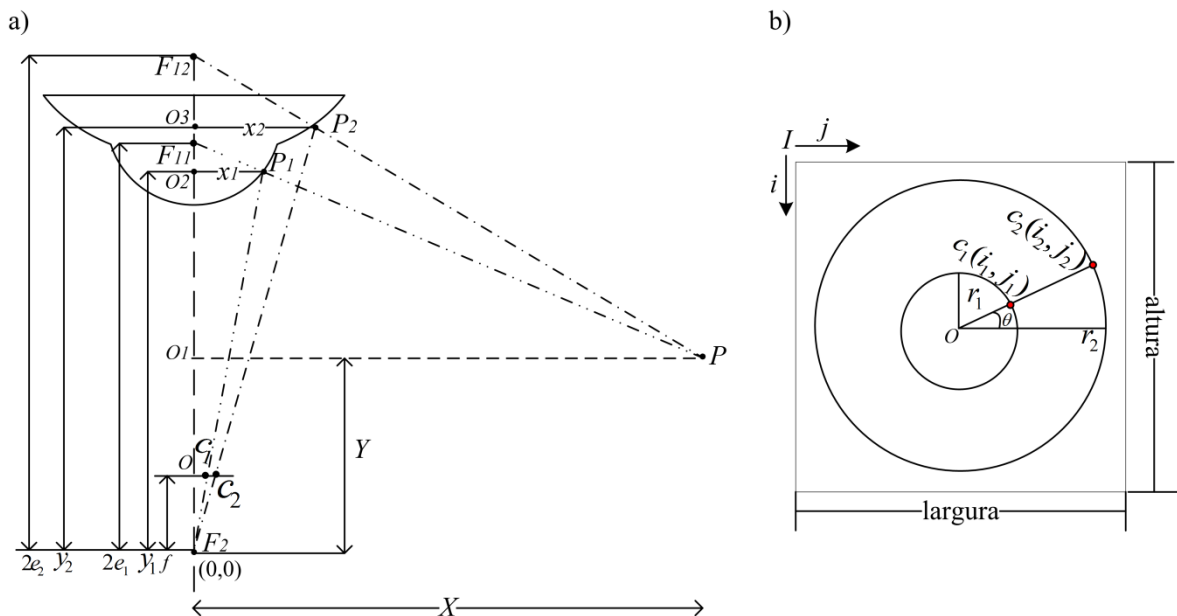


Figura 5.17 - Esquema geométrico para mapeamento: a) Triangulação de informações, b) CCD da câmera (Souza, 2009; adaptado) . -

A Figura 5.17 a) nos permite extrair as relações necessárias para se calcular o valor das coordenadas do ponto P . Estas por sua vez, são baseadas em equações trigonométricas que são usadas para se descrever o caminho inverso ao feito pela luz no sistema. Da Figura 5.17 b) é possível extrair as equações baseadas na relação de triângulos que possibilitam os cálculos dos raios r_1 e r_2 , que passam pelos pontos c_1 e c_2 respectivamente (Equação (5.14) e Equação (5.15)).

$$r_1 = Oc_1 = \sqrt{\left(\frac{\text{altura}}{2} - i_1\right)^2 + \left(j_1 - \frac{\text{largura}}{2}\right)^2} \quad (5.14)$$

$$r_2 = Oc_2 = \sqrt{\left(\frac{\text{altura}}{2} - i_2\right)^2 + \left(j_2 - \frac{\text{largura}}{2}\right)^2} \quad (5.15)$$

Da mesma forma, pode-se utilizar a relação de triângulos para se calcular a relação entre x_1 e y_1 Equação (5.16) e a relação entre x_2 e y_2 , Equação (5.17). Da semelhança entre os triângulos $F_2O_1c_1$ e $F_2O_2P_1$ e também dos triângulos $F_2O_1c_2$ e $F_2O_3P_2$ obtém-se:

$$\frac{y_1}{f} = \frac{x_1}{r_1} \quad (5.16)$$

$$\frac{y_2}{f} = \frac{x_2}{r_2} \quad (5.17)$$

Com as relações destes elementos estabelecidas é possível utilizar a Equação (3.4) em conjunto tanto com a Equação (5.14) e Equação (5.15) de forma que se torna possível após manipulação algébrica, calcular o valor de x_1 com a Equação (5.18) e y_1 com a Eq.(5.19), e também, obter os valores de x_2 através da Equação (5.20) e de y_2 através da Equação (5.21). Isto se torna viável quando o cálculo é feito utilizando-se os parâmetros dos lobos interno e externo do espelho. Além disso, o resultado produz as coordenadas dos pontos $P_1(x_1, y_1)$ e $P_2(x_2, y_2)$.

$$x_1 = \frac{\left(fe_1b_1 + a_1\sqrt{f^2b_1^2 + r_1^2e_1^2 - a_1^2r_1^2}\right) \cdot r_1b_1}{f^2b_1^2 - a_1^2r_1^2} \quad (5.18)$$

$$y_1 = \frac{x_1f}{r_1} \quad (5.19)$$

$$x_2 = \frac{\left(fe_2b_2 + a_2\sqrt{f^2b_2^2 + r_2^2e_2^2 - a_2^2r_2^2}\right) \cdot r_2b_2}{f^2b_2^2 - a_2^2r_2^2} \quad (5.20)$$

$$y_2 = \frac{x_2f}{r_2} \quad (5.21)$$

Outra relação que pode ser extraída pela semelhança de triângulos envolve as coordenadas do ponto $P(X,Y)$. Com a semelhança entre os triângulos $F_{11}PO_1$ e $F_{11}P_1O_2$, e também,

entre os triângulos $F_{12}PO_1$ e $F_{21}P_2O_3$, é possível extrair as equações responsáveis por relacionar o ponto P aos pontos $P_1(x_1, y_1)$ e $P_2(x_2, y_2)$ através das Equação (5.22) e (5.23) a seguir:

$$\frac{X}{x_1} = \frac{2e_1 - Y}{2e_1 - y_1} \quad (5.22)$$

$$\frac{X}{x_2} = \frac{2e_2 - Y}{2e_2 - y_2} \quad (5.23)$$

Combinando-se a Equação (5.22) e a Equação (5.23) define-se as equações aplicadas ao cálculo e mapeamento das coordenadas X (Equação (5.24)) que representa a distância horizontal e Y (Equação (5.25)) que representa a distância vertical entre o sistema omnidirecional e os pontos representados por pixels presentes na imagem omnidirecional.

$$X = \frac{2x_1x_2(e_2 - e_1)}{x_1(2e_1 - y_2) - x_2(2e_1 - y_1)} \quad (5.24)$$

$$Y = 2e_2 - \frac{X(2e_2 - y_2)}{x_2} \quad (5.25)$$

De uma forma geral, os passos apresentados até aqui possibilitam que, para um par de pontos de características correspondentes, obtenham-se as coordenadas do ponto $P(X,Y)$, referentes à distância deste ponto em relação ao sistema.

Com as coordenadas X e Y somadas à distância angular θ (semelhante ao do par de pontos utilizados) entre o ponto e o eixo $(+x, 0)$, é possível determinar a distância entre o sistema e o ponto P , caracterizado por $P(X, \theta)$. Com um conjunto de pontos $P_n(X_n, \theta_n)$ com $n < \infty$ do ambiente, um mapa pode ser elaborado para se realizar tarefas tal qual a navegação autônoma ou rastreamento.

A estereoscopia implantada no sistema OmniViz segue os passos exibidos no fluxograma apresentado na Figura 5.18 a seguir.

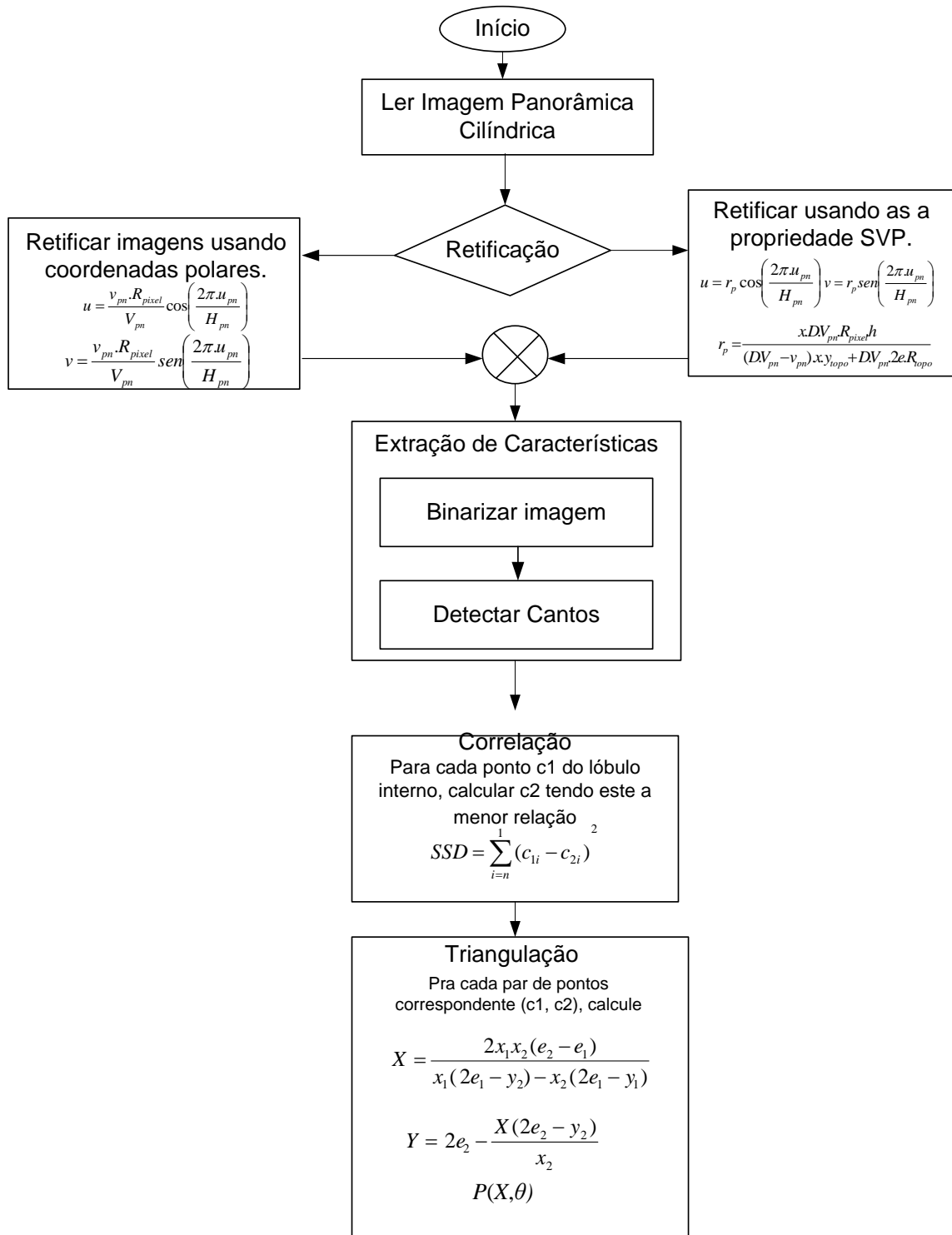


Figura 5.18 - Fluxograma do sistema OmniViz, para a triangulação de pontos correspondentes.

Para a apuração dos resultados obtidos com a imagem simulada, uma metodologia para se verificar a margem de erro da extração de informações sobre pontos do ambiente pelo sistema OmniViz foi desenvolvida.

5.2.4 PROCESSO DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS ADQUIRIDOS

Para se verificar a influência dos parâmetros do espelho na constituição da imagem omnidirecional catadióptrica, um processo de avaliação baseado na distância Euclidiana entre o ponto do espaço refletido pelos lobos do espelho na imagem omnidirecional e as coordenadas calculadas pelo sistema proposto foi desenvolvido.

Considerando um ponto no espaço com sua representação na imagem sendo descrita por $p_n(X_n, \theta_n)$, é possível se calcular as coordenadas x e z (Figura 5.19) para compará-las com as coordenadas do ponto $P(x, y, z)$ real no espaço. As coordenadas são encontradas utilizando-se a Equação (5.26) e a Equação (5.27)

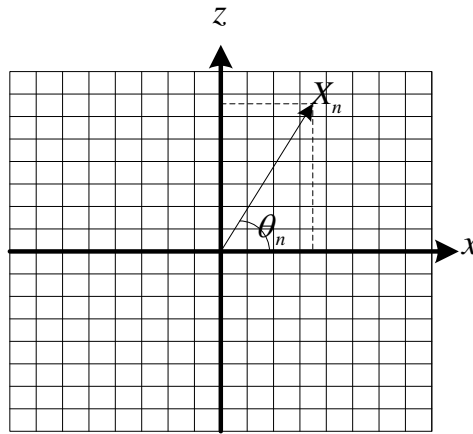


Figura 5.19 - Mapeando coordenadas dos pontos calculados.

$$x_n = X_n \cdot \cos(\theta_n) \quad (5.25)$$

$$z_n = X_n \cdot \sin(\theta_n) \quad (5.26)$$

Tendo em mãos as coordenadas de $p_n(x_n, z_n)$ e de $P(x, y, z)$ é possível se medir o erro associado ao ponto do mapa. Para tal tarefa, é utilizada a distância Euclidiana d (Equação (5.27)) entre as coordenadas do ponto p_n calculado pelo sistema OmniViz e as coordenadas do ponto P_n conhecidas a priori no ambiente.

$$d_{(p_n, P_n)} = \sqrt{(x - x_{P_n})^2 + (z - z_{P_n})^2} \quad (5.27)$$

A Equação (5.27) permite observar a variação do cálculo, conforme se variam os parâmetros de entrada para simular os espelhos, e conseqüentemente o sensor

omnidirecional. Esta medida é utilizada neste trabalho para aferir a exatidão dos resultados obtidos e validar o processo implementado. Também é possível observar que a coordenada y referente à variação de altura ponto P não foi utilizada para aferições neste trabalho, pois conforme a relação de experimentos proposta no capítulo 6 a seguir, nenhum deslocamento vertical foi realizado nos objetos que compõem o ambiente utilizado para validação dos resultados.

A distância Euclidiana também é utilizada para se medir as distâncias entre os pontos que compõem um mesmo objeto. Esta distância, que equivale à aresta de um cubo, por exemplo, também serve como indicador da influência associada aos parâmetros do espelho. A diferença entre o valor da distância calculada entre os cantos dos objetos pelo sistema apresentado, e o valor conhecido em um ambiente simulado, ou em um ambiente real é utilizada para se aferir a eficiência do sistema em realizar cálculos que permitam a reconstrução do ambiente trabalhado, ou da cena simulada.

6 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

Os resultados discutidos neste capítulo descrevem os dados levantados segundo o que foi apresentado neste trabalho de pesquisa. Estes resultados estão apoiados em uma metodologia desenvolvida que utiliza modelos matemáticos para validar toda a teoria discutida até o momento. São gráficos elaborados ao longo do desenvolvimento do trabalho e das quatro rodadas de experimentos realizadas para se verificar a eficiência da metodologia e do sistema elaborado.

Para se aferir os resultados do sistema proposto (o OmniViz), foi criado um ambiente de testes através do uso da ferramenta PovRay®. Este ambiente foi montado de forma a permitir que se avalie a eficiência do OmniViz em calcular as coordenadas das distâncias dos objetos em relação ao sistema simulado de captura de imagens, conforme os parâmetros dos espelhos são alterados.

O ambiente gerado é composto por dois cubos, sendo que para este trabalho, os pontos inseridos na ferramenta de renderização PovRay® estão sendo considerados de forma 1:10 *cm*, ou seja, o vértice de um objeto no PovRay posicionado no ponto (15 8,5 8,5), está posicionado no ponto (150*cm* 85*cm* 85*cm*) tendo como referência o ambiente simulado. A Tabela 6.1 exibe o posicionamento dos elementos que estão compondo a cena exibida na Figura 6.1, com $V_i (x_i, y_i, z_i)$ sendo o vértice do cubo mais próximo ao sistema omnidirecional e $V_f (x_f, y_f, z_f)$ o vértice mais distante, e P a posição do ponto focal da câmera (representado na figura pelo ponto vermelho) localizado no centro do ambiente.

Tabela 6.1 - Posicionamentos dos objetos presente no ambiente.

Elemento	Tamanho do Lado	Vértices no PovRay	Vértices no Ambiente
Cubo 1 (amarelo)	30 <i>cm</i>	$V_i=(15\ 8,5\ 8,5)$	$V_i=(150\ 85\ 85)$
		$V_f=(18\ 11,5\ 11,5)$	$V_f=(180\ 115\ 115)$
Cubo 2 (cinza)	50 <i>cm</i>	$V_i=(15\ 7,5\ 7,5)$	$V_i=(150\ 85\ 85)$
		$V_f=(18\ 12,5\ 12,5)$	$V_f=(180\ 115\ 115)$
Ponto Focal da Câmera (vermelho)	n/a	$P=(10\ 10\ 10)$	$P=(100\ 100\ 100)$

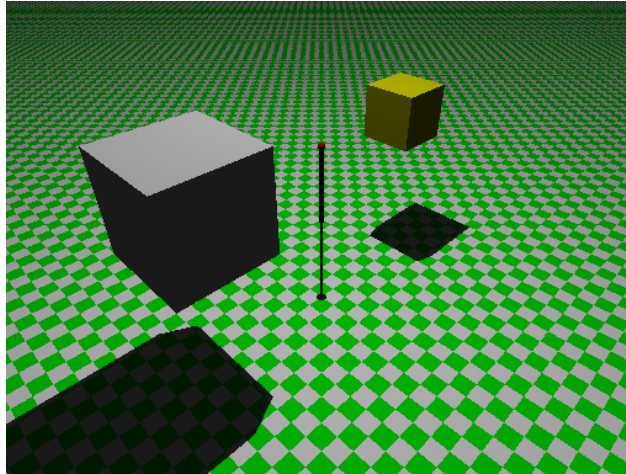


Figura 6.1 - Ambiente experimental simulado para aferição dos resultados. Além dos cubos que compõem a cena, o ponto vermelho representa a posição do ponto focal da câmera.

A Figura 6.1 representa o ambiente simulado que, por sua vez, é composto pelos dois cubos, sendo um cinza (maior, com 50 cm de lado) e um amarelo (menor, com 30 cm de lado). O processo de aferição implantado neste trabalho irá envolver diferentes distâncias entre os cubos e o ponto focal. Esta distância irá variar entre 50 cm e 200 cm, havendo o incremento de 50 cm por rodada de experimentos, totalizando quatro rodadas. A cada rodada uma nova imagem panorâmica cilíndrica contendo o novo posicionamento dos objetos será gerada, e também, serão realizadas alterações nos parâmetros que constituem o sistema omnidirecional baseado em espelho hiperbólico de lobo duplo. O intuito é verificar as influências destes parâmetros sobre os resultados do espelho simulado utilizado na reconstrução das informações do ambiente, considerando objetos de tamanhos e distâncias diferentes.

A cada rodada de experimentos, os parâmetros configuráveis do espelho irão se alterar conforme Tabela 6.2 abaixo:

Tabela 6.2 - Alteração dos parâmetros durante os experimentos

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Médio	Valor Máximo	Incremento
$R_{topo1} (mm)$	15	37,5	60	5
$R_{topo2} (mm)$	45	67,5	90	5
$R_{pixel1} (pixels)$	130	180	220	10
$R_{pixel2} (pixels)$	300	425	550	25
$c1=a/b$	0,5	1,4	2,3	0.2
$c2=a2/b2$	0,5	1,4	2,3	0.2

Para os experimentos, o *grid* que representa o chão foi retirado da imagem, permitindo que o sistema foque na estereoscopia e na correlação de pontos dos objetos presentes na cena. Os valores médios foram aplicados quando os parâmetros não estavam em foco, isto é, quando se estava checando a influência do parâmetro *cI*, os outros parâmetros receberam o valor correspondente à coluna ‘Valor Médio’ da Tabela 6.2. Além disso, como este trabalho foca em medir a influência dos parâmetros do sistema omnidirecional na reconstrução de cenas, os parâmetros referentes à câmera simulada nos experimentos realizados foram fixados em $f = 16 \text{ mm}$ e $T_{\text{pixel}} = 0,009 \text{ mm}$.

A primeira imagem panorâmica gerada para primeira rodada de experimentos é exibida na Figura 6.2 a seguir.

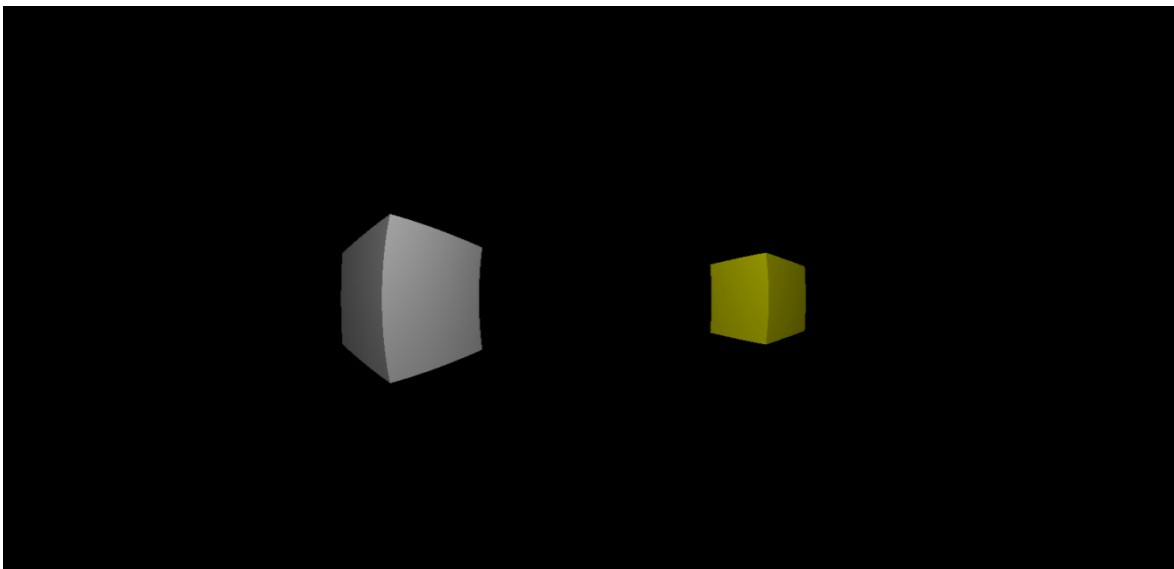


Figura 6.2 - Imagem panorâmica cilíndrica com resolução de 2400x1400 *pixels* utilizada na primeira rodada de experimentos.

A Figura 6.2, que representa a visão panorâmica cilíndrica do ambiente simulado, assim como todas as demais imagens panorâmicas utilizadas nos diferentes experimentos, possui uma resolução de 2400 x 1400 *pixels*.

A Figura 6.3 exibe as visões tanto do ambiente (Figura 6.3 a), b) e c)) simulado quanto das imagens panorâmicas geradas (Figura 6.3 d), e) e f)), levando-se em consideração as diferentes distâncias de 100 *cm*, 150 *cm* e 200 *cm* respectivamente dos objetos em relação ao ponto focal da câmera respectivamente. Nestas imagens panorâmicas o “chão” também foi retirado.

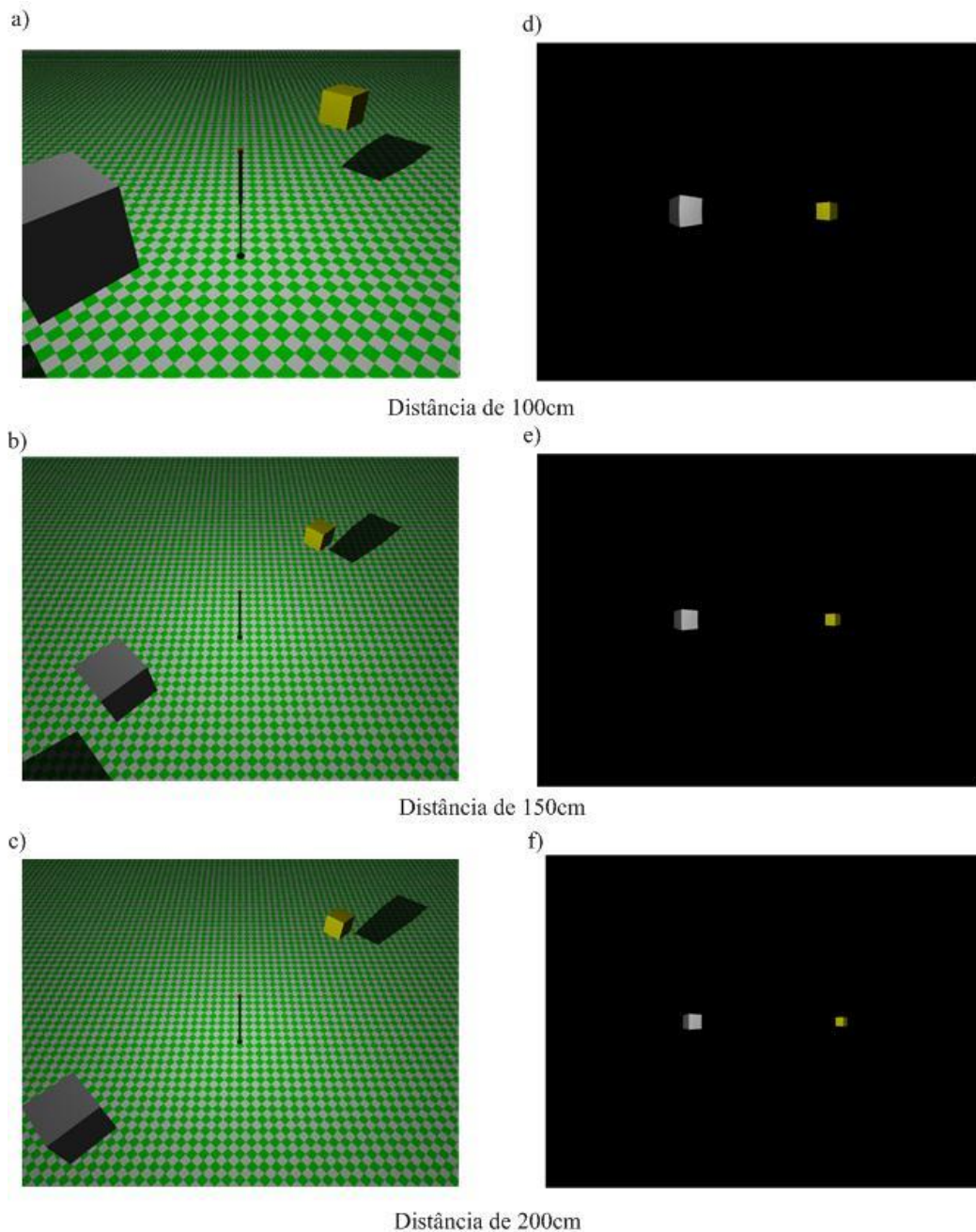


Figura 6.3 - Imagens realizadas no ambiente simulado com distâncias de: a) 100 *cm*, b) 150 *cm* e c) 200 *cm*, dos objetos em relação ao ponto focal da câmera. Estas, por sua vez geram as imagens panorâmicas para as distâncias de: d) 100 *cm*, e) 150 *cm* e f) 200 *cm*.

Em cada rodada de experimentos, o OmniViz irá realizar a simulação da imagem omnidirecional, a descoberta de cantos, bem como o cálculo da distância dos cantos detectados em relação ao ponto focal do sistema. Considerando a limitação do campo de visão da câmera, os cantos “escondidos” dos objetos, ou seja, os cantos que a câmera não consegue enxergar, não serão trabalhados. O resultado será utilizado para comparar a posição conhecida dos objetos com os pontos calculados pelo sistema. Como também é conhecido o tamanho dos lados dos cubos, será possível verificar a eficiência do OmniViz

em gerar dados que permitam a reconstrução dos objetos, através do cálculo da distância dos seus cantos.

As retificações foram padronizadas, sendo que para a retificação que utiliza a propriedade de centro único de projeção, o parâmetro D , foi fixado em 0,15 para o lobo externo e 0,0145 para o lobo interno. Estes valores foram levantados mediante experimentos e testes realizados com o sistema proposto. Para cada um dos dois métodos, foram realizadas as quatro rodadas de experimentos.

A binarização implantada no sistema para detecção de bordas permite a alteração por parte do usuário dos limiares superior e inferior. Para a padronização dos resultados, o limiar inferior foi fixado em 75 e o superior em 100. Estes valores se mostraram satisfatórios durante as experiências conduzidas. O valor do limiar para o cálculo dos cantos dos objetos foi fixado em 19000. Este valor foi constatado de forma empírica ao longo dos experimentos, de forma a gerar resultados satisfatórios e a padronizar a detecção de cantos.

A etapa de correlação utiliza a busca de pontos semelhantes através de uma linha reta que passa pela origem e se prolonga até a borda da imagem omnidirecional (R_{pixel2}), sendo a inclinação desta linha reta definida pelo vetor que representa a distância entre o centro da imagem e o ponto que está se investigando. Para cada iteração do algoritmo de correlação, uma janela circular conforme especificada na seção 5.2.3.2 é utilizada para se definir qual o ponto presente na imagem gerada pelo lobo externo é correspondente ao ponto que está sendo investigado no lobo interno.

Após o processo de estereoscopia omnidirecional, os resultados foram analisados com o uso da ferramenta MatLab®. Nesta ferramenta uma rotina baseada nos algoritmos apresentados no trabalho em questão foi desenvolvida para tratar os dados. Tal rotina utiliza os pontos obtidos pelo OmniViz, e calcula a distância euclidiana entre o valor calculado do ponto, e o valor de conhecimento a priori no ambiente simulado, sendo a média destas distâncias um indicador utilizado para a análise da eficiência do sistema. Uma segunda rotina calcula a distância entre cantos que representam vértices dos objetos supracitados, sendo que estes são comparados aos lados conhecidos dos objetos pertencentes ao ambiente simulado. A média do erro associado à reconstrução das arestas está ligado à forma como um sistema preserva a geometria de um objeto, e por isso é utilizado neste sistema como o segundo indicador de eficiência utilizado. Quanto maior

esta diferença, maior será o erro associado àquele indicador e à alteração daquele parâmetro.

Os vértices visíveis para a câmera estão listados conforme Figura 6.4 e os seus respectivos valores (x, y, z) no ambiente simulado na ferramenta PovRay®, para a primeira etapa, estão estipulados na Tabela 6.3. Como são conhecidos os incrementos em cada rodada de experimentos na direção do eixo x, torna-se simples calcular o novo posicionamento dos cantos dos objetos.

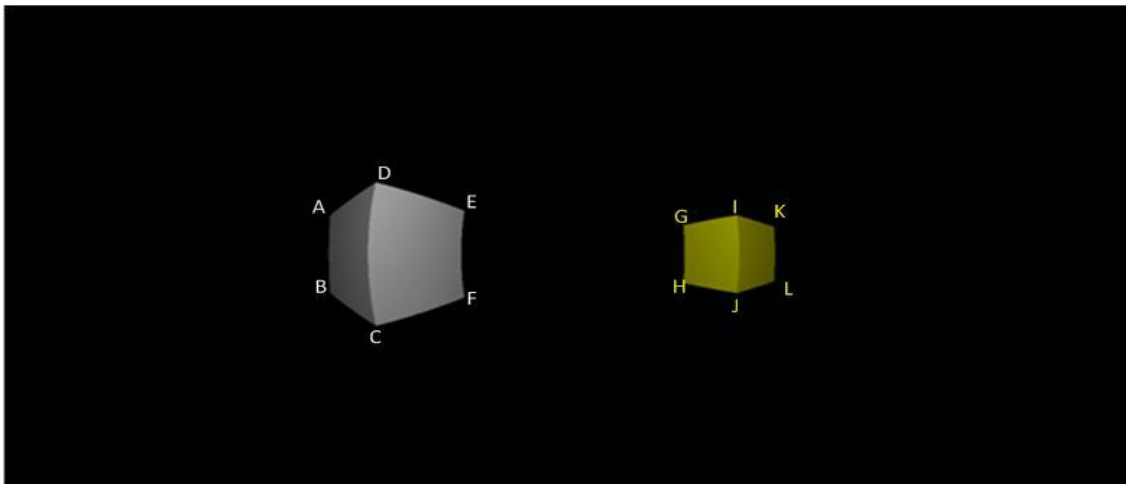


Figura 6.4 - Cantos dos objetos visíveis pela câmera.

Tabela 6.3 - Valores dos cantos dos objetos no ambiente gerado pela ferramenta PovRay®.

1ª Etapa de experimentos			
Canto	x	y	z
A	0	12,5	7,5
B	0	7,5	7,5
C	5	7,5	7,5
D	5	12,5	7,5
E	5	12,5	12,5
F	5	7,5	12,5
G	15	11,5	11,5
H	15	8,5	11,5
I	15	11,5	8,5
J	15	8,5	8,5
K	18	11,5	8,5
L	18	8,5	8,5

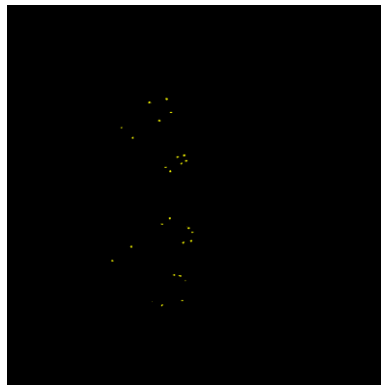
Os resultados apresentados a seguir decorrem da primeira rodada de experimentos realizados. Nela foi utilizada a imagem panorâmica cilíndrica conforme apresentada na Figura 6.2. A Figura 6.5 exibe a configuração dos parâmetros usados (Figura 6.5 a)) para se gerar a imagem omnidirecional (Figura 6.5 b)), onde os cantos dos objetos são exibidos na Figura 6.5 c).

1° Lobo		2° Lobo	
RTopo (mm)	20	RTopo (mm)	67.5
Parâmetros da Câmera			
Distância Focal f (mm)		16	
Tpixel(mm)		0.009	
rPixel (pixel)	180	rPixel (pixel)	425
a/b	1.4	a/b	1.4
D	1.695	D	0.15
Calcular		Calcular	
Altura h (mm):	197.531	Altura h (mm):	282.353
Parâmetro a (mm):	86.643	Parâmetro a (mm):	111.084
Parâmetro b (mm):	61.8879	Parâmetro b (mm):	79.3455
Ângulo alpha (°):	52.3661	Ângulo alpha (°):	97.8702
OK		Cancelar	

a) Parâmetros do espelho



b) Imagem Omnidirecional da 1ª rodada.



c) Imagem Omnidirecional da 1ª rodada.

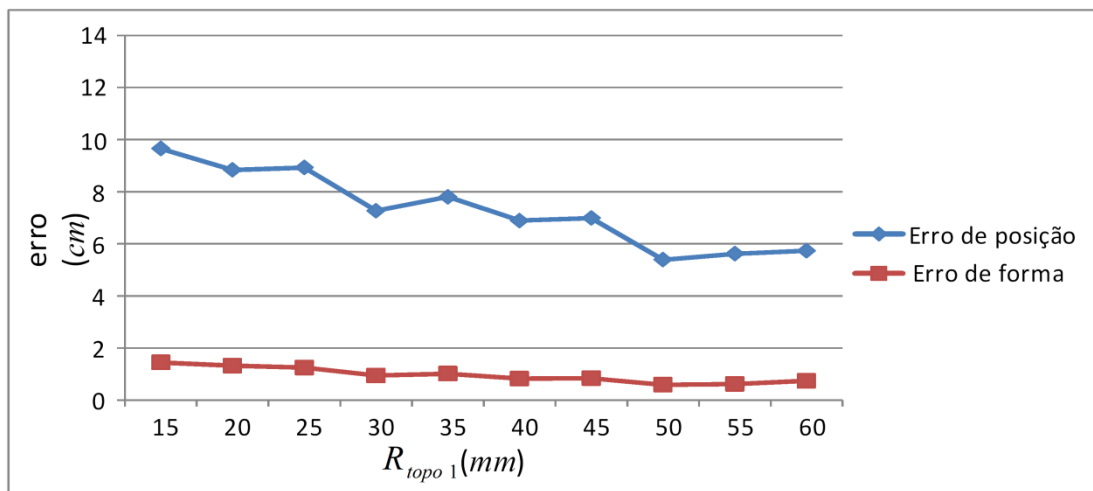
Figura 6.5 - 1ª Rodada de experimentos.

Na primeira rodada de experimentos, com os objetos a uma distância de 50 cm do sistema de captura, foi testada a influência de cada parâmetro do espelho sobre a reconstrução dos objetos. Ao fim do teste de cada parâmetro geraram-se dois gráficos referentes ao seu desempenho, permitindo a análise da influência do mesmo sobre o processo de cálculo da posição dos cantos dos objetos (erro calculado como a média da distância euclidiana entre o ponto calculado e o valor conhecido a priori – erro médio de posicionamento de canto ou simplesmente erro de posição), e a verificação da capacidade do espelho preservar a forma

dos objetos (através do erro médio do cálculo do das arestas dos objetos visíveis ao sistema ou simplesmente erro médio de forma).

A Figura 6.6 exhibe os gráficos referentes tanto ao erro de posição (em azul) quanto ao erro de forma (em vermelho) para os parâmetros R_{topo} de ambos os lobos (Figura 6.6a) para R_{topo1} e Figura 6.6b) para R_{topo2}) durante a variação dos valores dos parâmetros na primeira rodada de experimentos conforme Tabela 6.2.

a)



b)

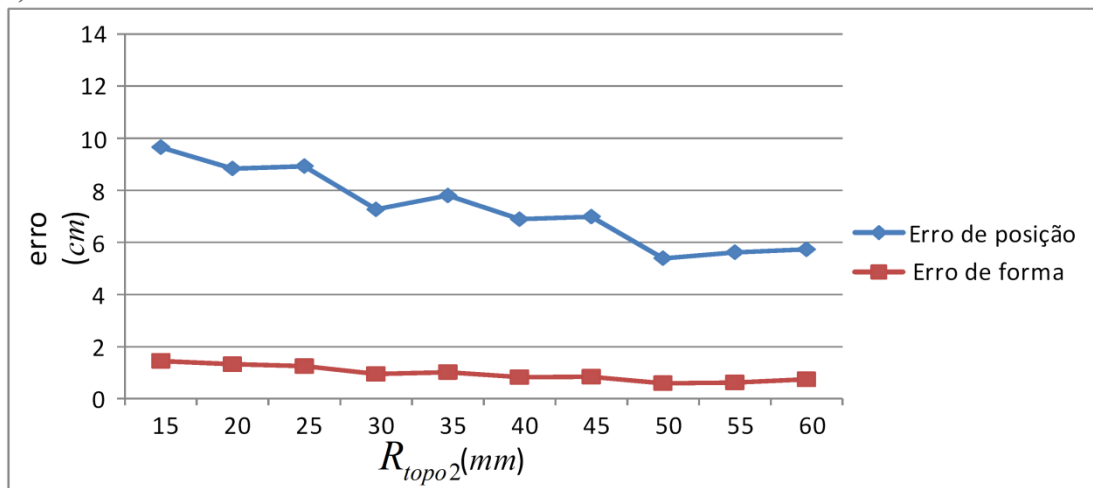
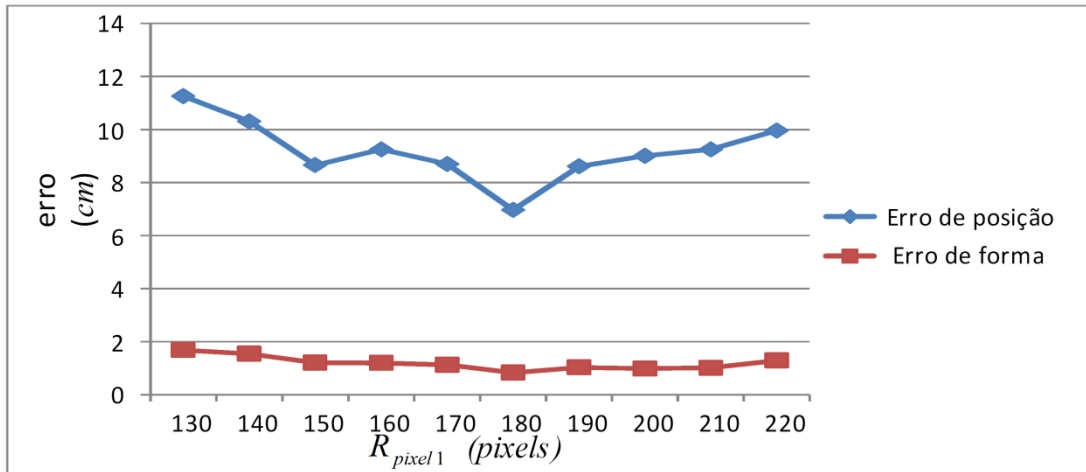


Figura 6.6 – a) Resultados dos erros gerados na 1ª rodada de experimentos para R_{topo1} e b) Resultados dos erros gerados na 1ª rodada de experimentos para R_{topo2} .

A Figura 6.7 exhibe os gráficos referentes tanto ao erro de posição (em azul) quanto ao erro de forma (em vermelho) para os parâmetros R_{pixel} de ambos os lobos (Figura 6.7a) para

R_{pixel1} e Figura 6.7b) para R_{pixel2}) durante a variação dos valores dos parâmetros na primeira rodada de experimentos, também conforme Tabela 6.2.

a)



b)

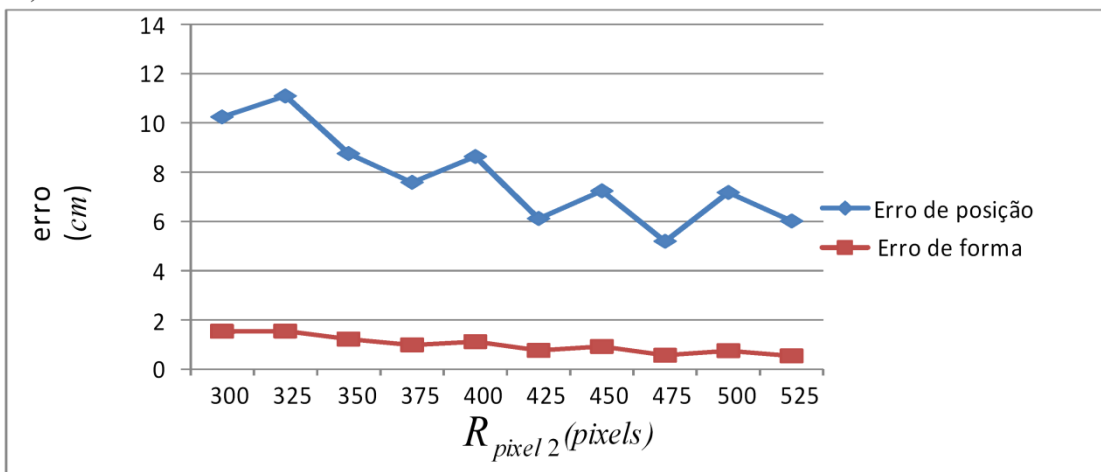
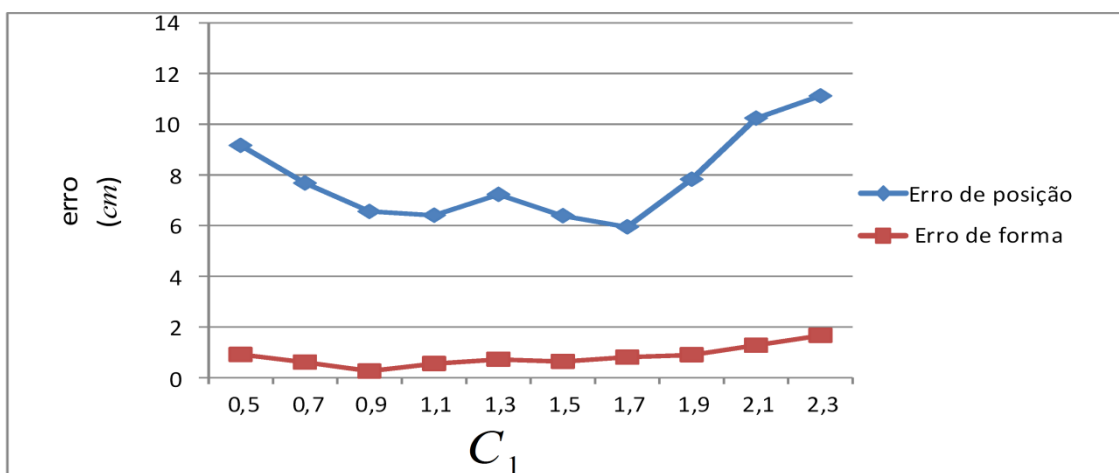


Figura 6.7 - a) Resultados dos erros gerados na 1ª rodada de experimentos para R_{pixel1} e b) Resultados dos erros gerados na 1ª rodada de experimentos para R_{pixel2} .

A Figura 6.8 exibe os gráficos referentes de erro de posição e erro de forma (em vermelho) para os parâmetros C_1 (Figura 6.8a)) e C_2 (Figura 6.8b)) durante a variação dos valores dos parâmetros na primeira rodada de experimentos, também conforme Tabela 6.2.

a)



b)

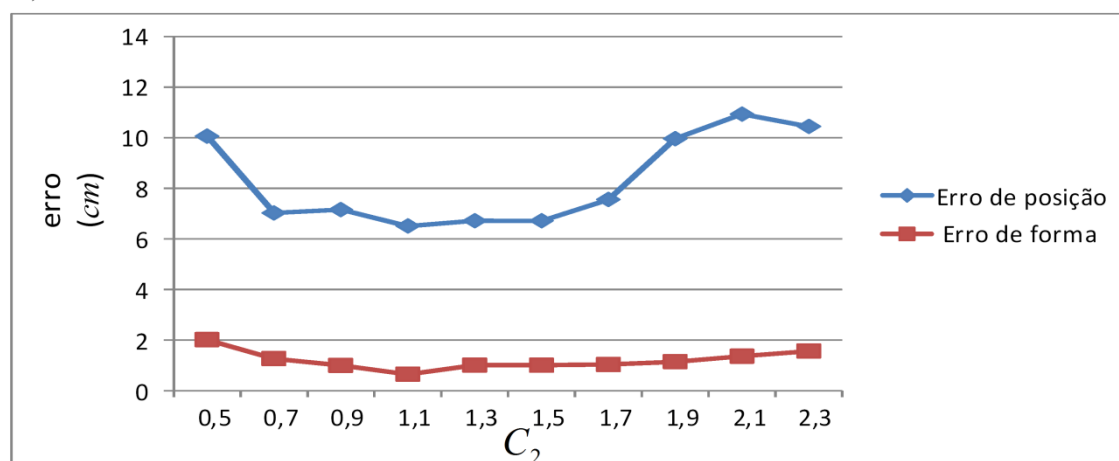


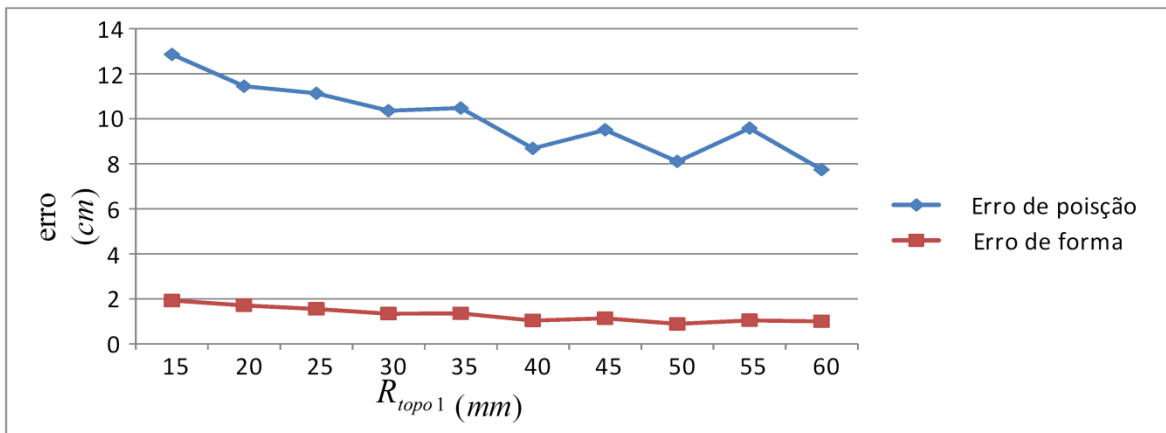
Figura 6.8 – a) Resultados dos erros gerados na 1ª rodada de experimentos para C_1 e b) Resultados dos erros gerados na 1ª rodada de experimentos para C_2 .

Os resultados obtidos na primeira leva de experimentos, exibidos nas Figuras 6.6, 6.7 e 6.8 permitem observar que, de uma forma geral, para objetos próximos, que os erros dos cantos encontram-se entre 8 cm e 10 cm por canto, enquanto que os erros de formas varia entre 1 cm e 2 cm por aresta. Também é observado que, entre os erros de posição e erros de forma, há uma relação de proporcionalidade tanto nas tendências de queda quanto nas tendências alta. De maneira geral, o pior resultado obtido é exibido nos experimentos referentes ao parâmetro R_{topo2} quando para este é atribuído o valor mínimo (45 mm). O melhor resultado está associado ao uso da atribuição de um valor relativamente alto para o parâmetro R_{pixel2} (475 pixels). Cabe ressaltar que ambos os parâmetros estão associados ao uso e projeção do lobo do espelho hiperbólico. Em Souza e Motta (2008) uma relação entre R_{pixel} , h e R_{topo} com o intuito de se elaborar um sistema de captura mais compacto

possível para uma determinada aplicação é proposto. No entanto, como este trabalho foca na verificação das influências dos parâmetros do sistema omnidirecional, optou-se por dar liberdade ao usuário para que o mesmo explore diferentes configurações do sistema.

O mesmo trabalho foi feito para a segunda rodada de experimentos (com uma distância de 100 cm dos objetos em relação ao sistema omnidirecional), sendo que os gráficos resultantes são exibidos nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11 a seguir.

a)



b)

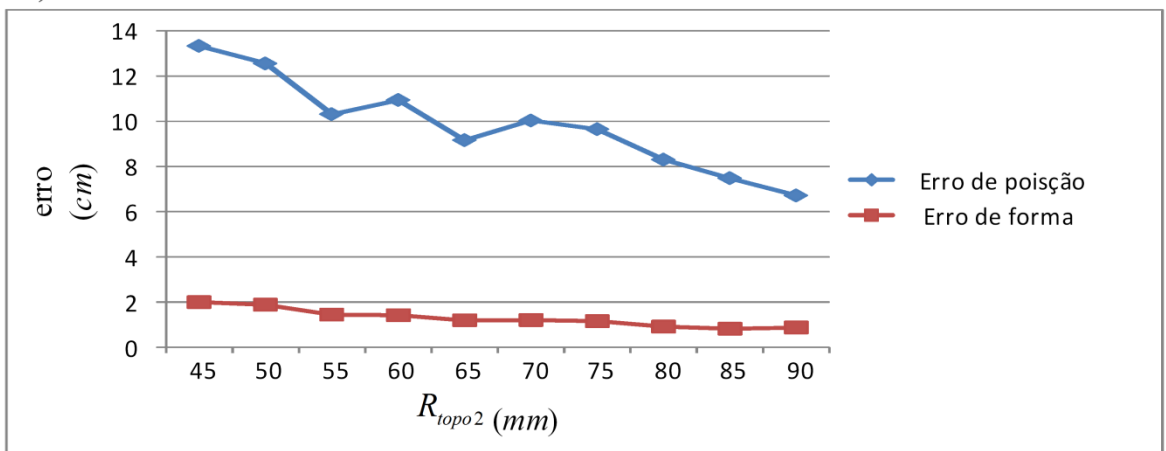
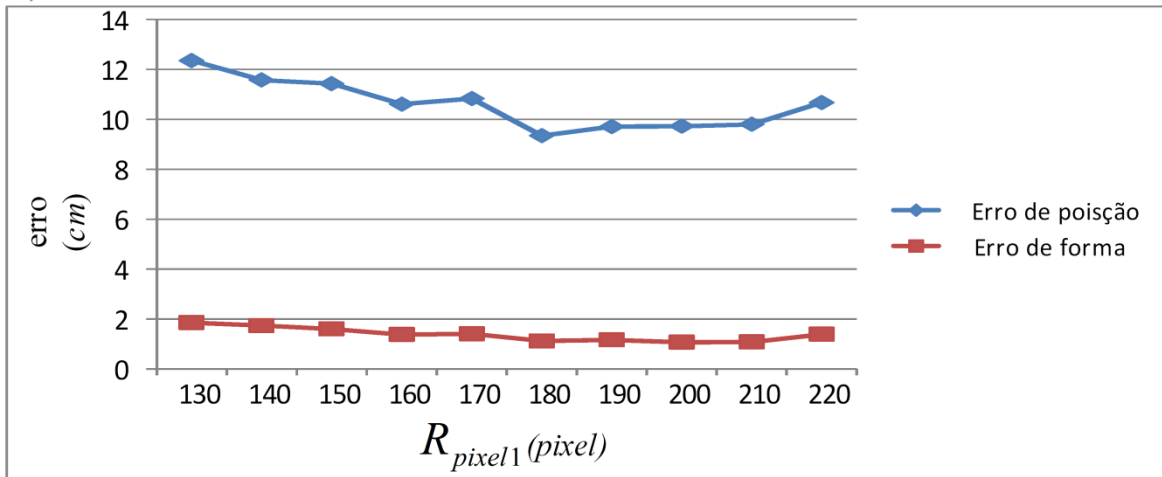


Figura 6.9 – a) Resultados dos erros gerados na 2ª rodada de experimentos para R_{topo1} e b) Resultados dos erros gerados na 2ª rodada de experimentos para R_{topo2} .

a)



b)

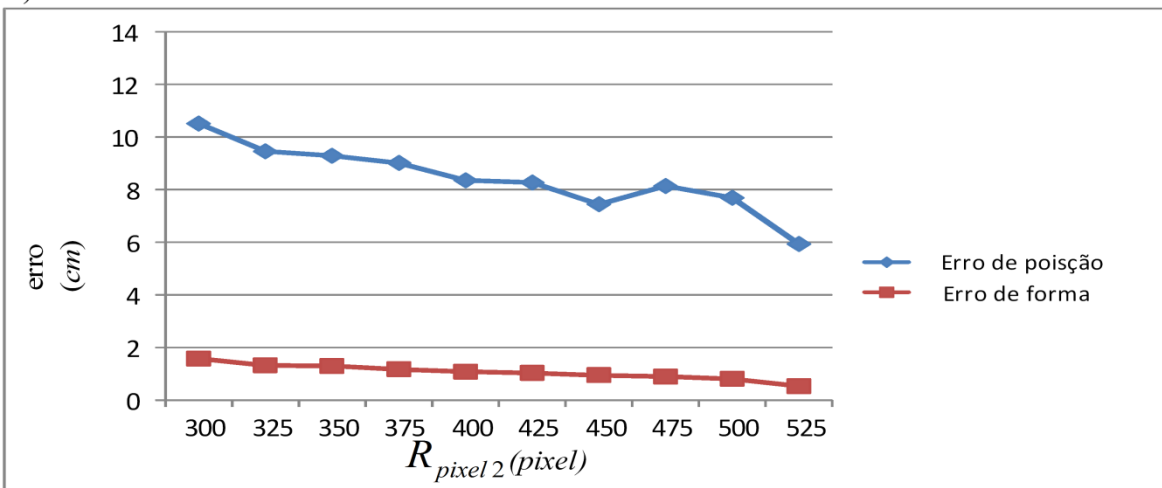


Figura 6.10 – a) Resultados dos erros gerados na 2ª rodada de experimentos para R_{pixel1} e b) Resultados dos erros gerados na 2ª rodada de experimentos para R_{pixel2} .

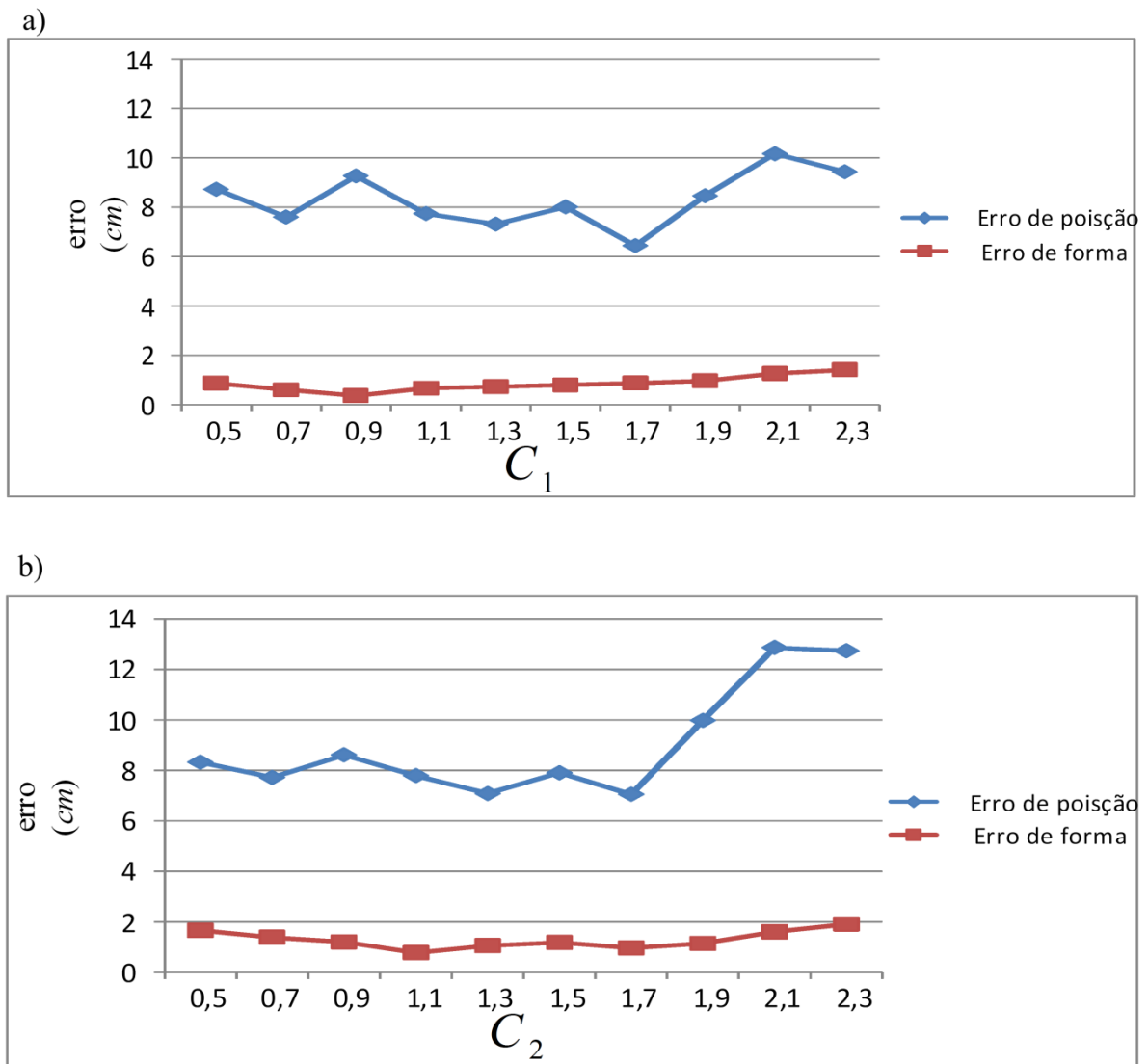


Figura 6.11 - Resultados dos erros gerados na 2ª rodada de experimentos para C_1 e b) Resultados dos erros gerados na 2ª rodada de experimentos para C_2 .

Após a segunda rodada de experimentos que tem os resultados expostos nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11, ainda é possível observar uma mesma relação de proporcionalidade entre as tendências tanto para a queda quanto para subida no erro de posição e no erro de forma. De maneira geral os erros possuem um valor um pouco maior, quando comparados como o resultado do 1º experimento, variando entre 10,5 cm e 8,2 cm para o erro de posição e 1,3 e 2 cm para erros de forma. O melhor resultado foi obtido junto ao uso do valor máximo do parâmetro $R_{\text{pixel}2}$ (525 pixels). O pior resultado foi obtido junto a elevados valores do parâmetro C_2 (2,1 e 2,3). Além disso, é possível verificar que nos parâmetros que refletem a curvatura dos lobos do espelho (C_1 e C_2), o experimento indica que há uma relação entre a acentuação da hipérbole que define o perfil do lobo e o aumento nos valores acumulados pelos indicadores utilizados. Esta relação existe por que ao se aumentar o valor destes

parâmetros as imagens formadas pelo reflexo do espelho acabam com uma alta densidade de informação nas proximidades de sua fronteira, e uma baixa densidade de informações na região central.

A terceira rodada de experimentos (com os dois objetos posicionados a uma distância de 150 cm do sistema omnidirecional), tem seus resultados exibidos nas Figuras 6.12, 6.13 e 6.14.

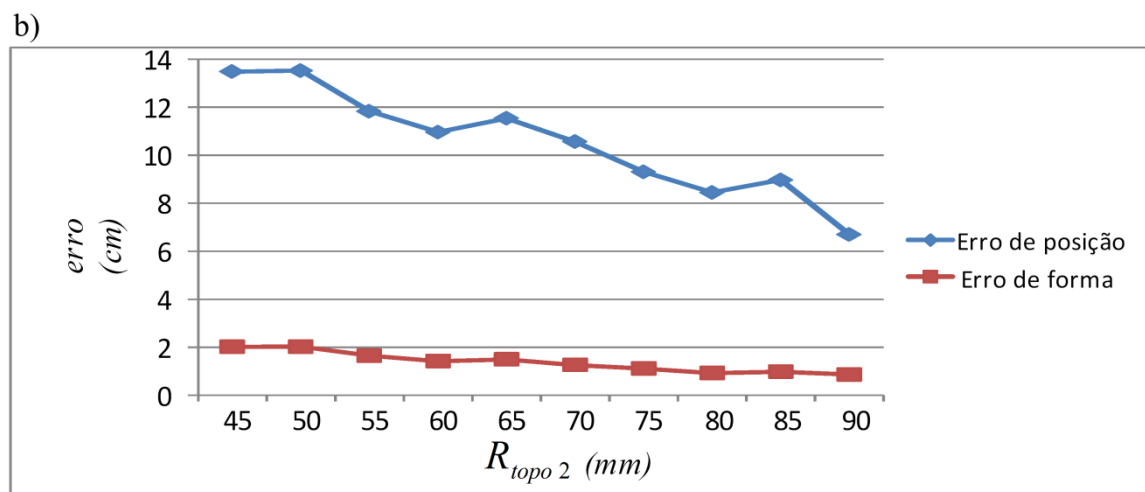
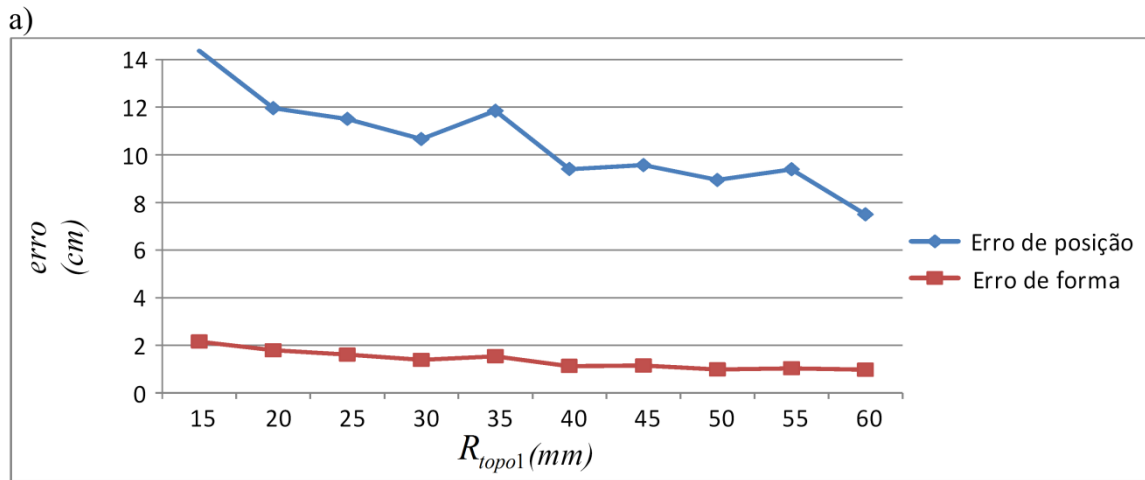
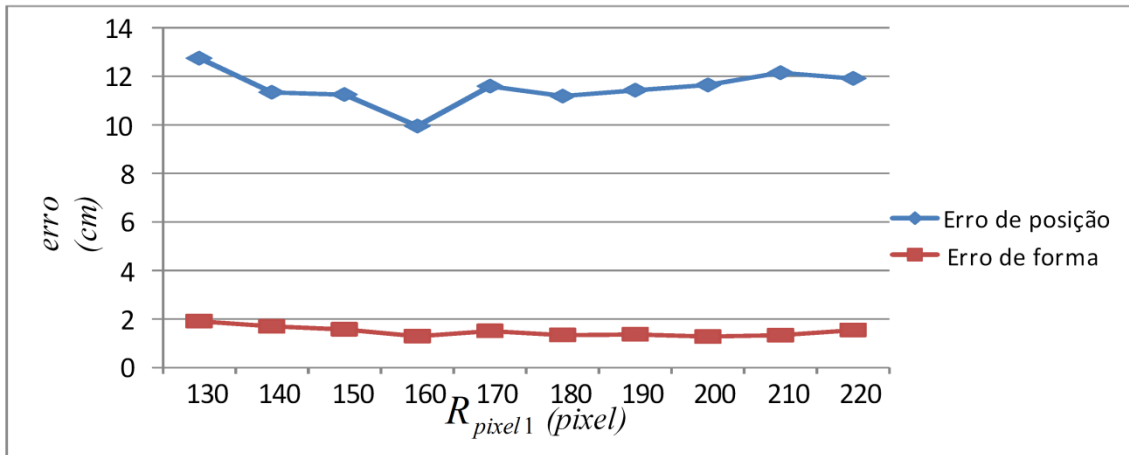


Figura 6.12 – a) Resultados dos erros gerados na 3ª rodada de experimentos para R_{topo1} e b) Resultados dos erros gerados na 3ª rodada de experimentos para R_{topo2} .

a)



b)

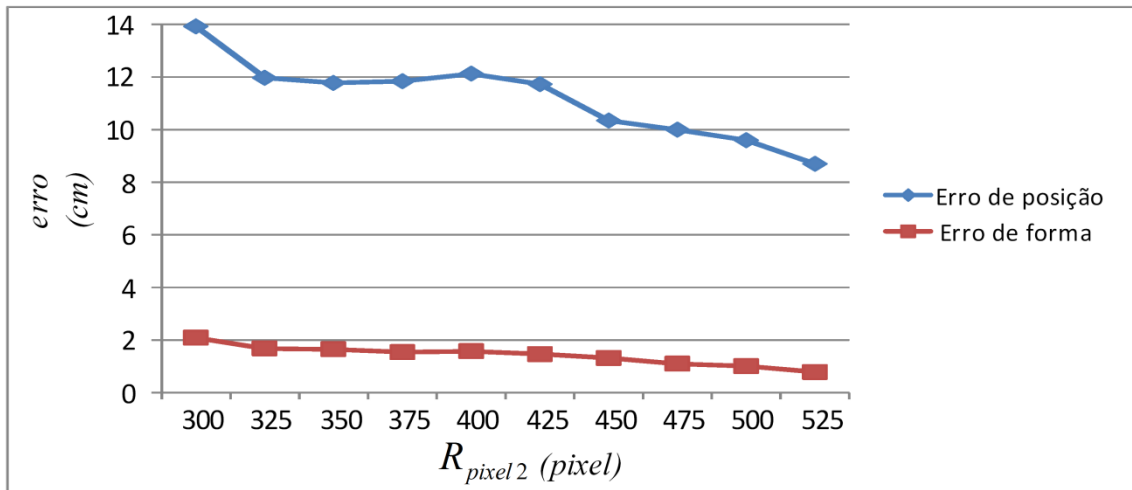


Figura 6.13 – a) Resultados dos erros gerados na 3ª rodada de experimentos para R_{pixel1} e b) Resultados dos erros gerados na 3ª rodada de experimentos para R_{pixel2} .

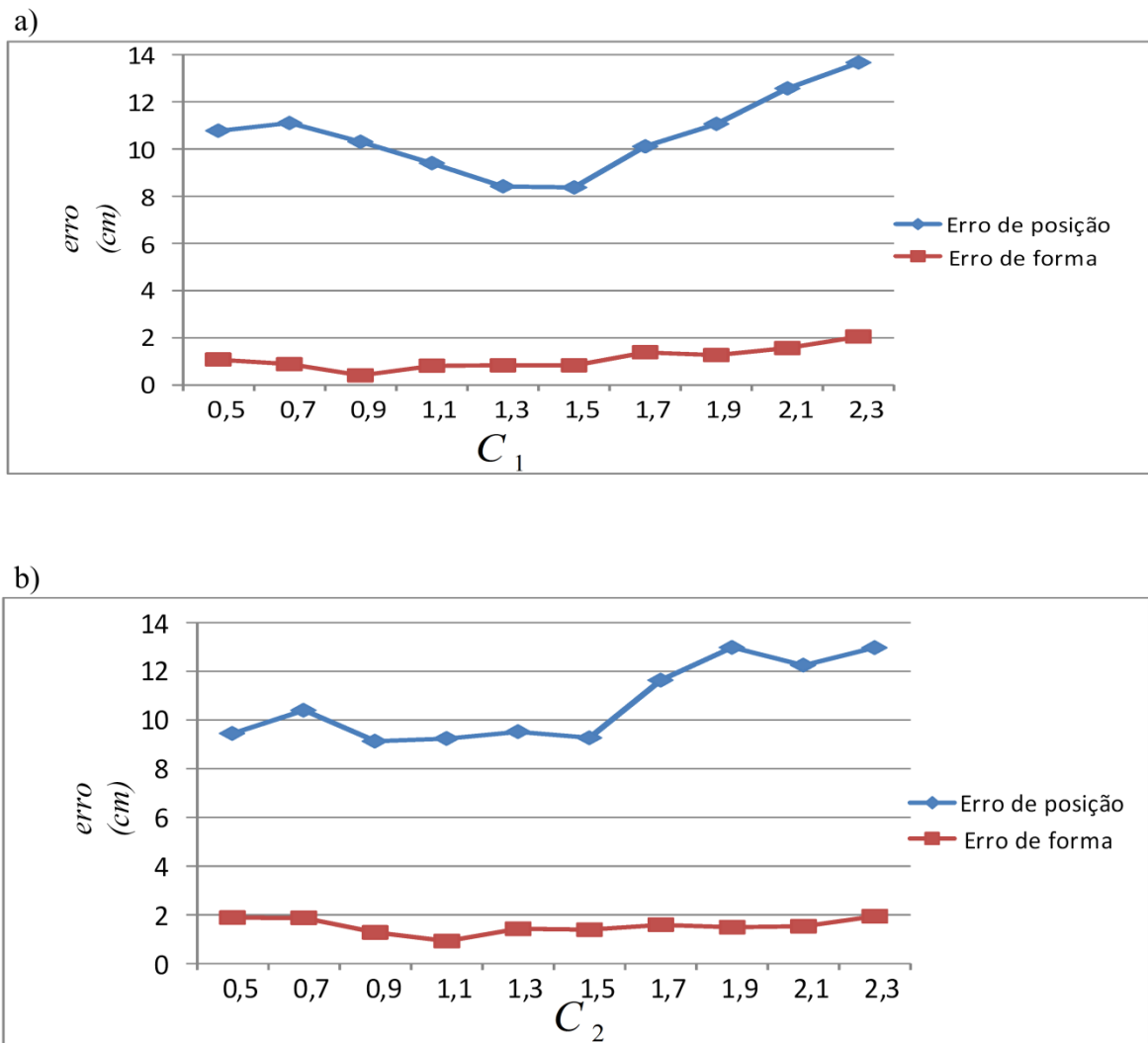


Figura 6.14 – a) Resultados dos erros gerados na 3ª rodada de experimentos para C_1 e b) Resultados dos erros gerados na 3ª rodada de experimentos para C_2 .

Na terceira rodada de experimentos (Exibida nas Figura 6.12, 6.13 e 6.14) cresce a faixa de valores dos erros dos cantos (entre 9,3 *cm* e 11,3 *cm*), e numa menor intensidade os valores dos erros de forma acompanham tal crescimento (2,2 *cm* e 1,5 *cm*), fortalecendo esta relação de proporcionalidade existente entre ambas. O melhor valor é atingido junto ao parâmetro C_2 (0,9), enquanto que o pior resultado é obtido com o valor mínimo de R_{topo2} (15 *mm*). Novamente nota-se uma forte influência da acentuação das hipérbolas que compõem os perfis dos lobos do espelho.

A quarta e última rodada de experimentos tem os resultados publicados nas Figuras 6.15, 6.16 e 6.17. Esta rodada de experimentos foi realizada com os objetos a uma distância de 200 *cm* do sistema omnidirecional.

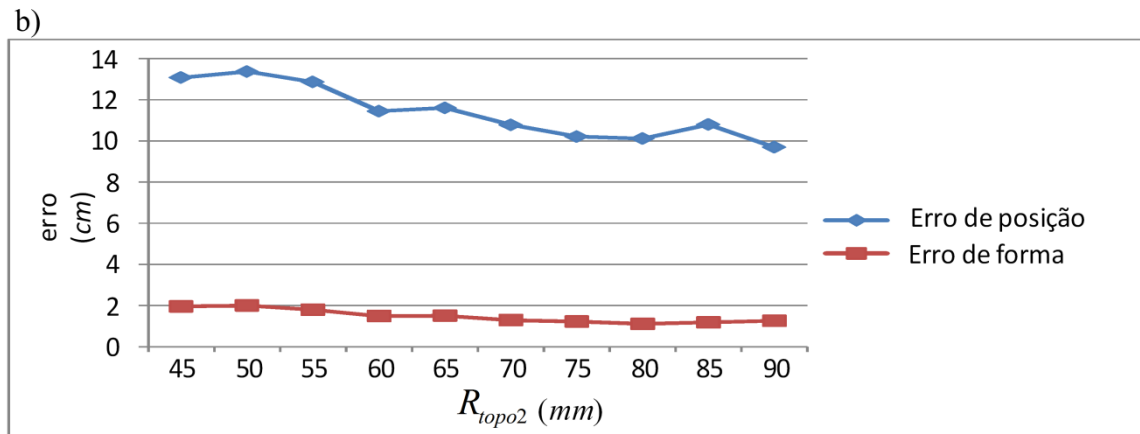
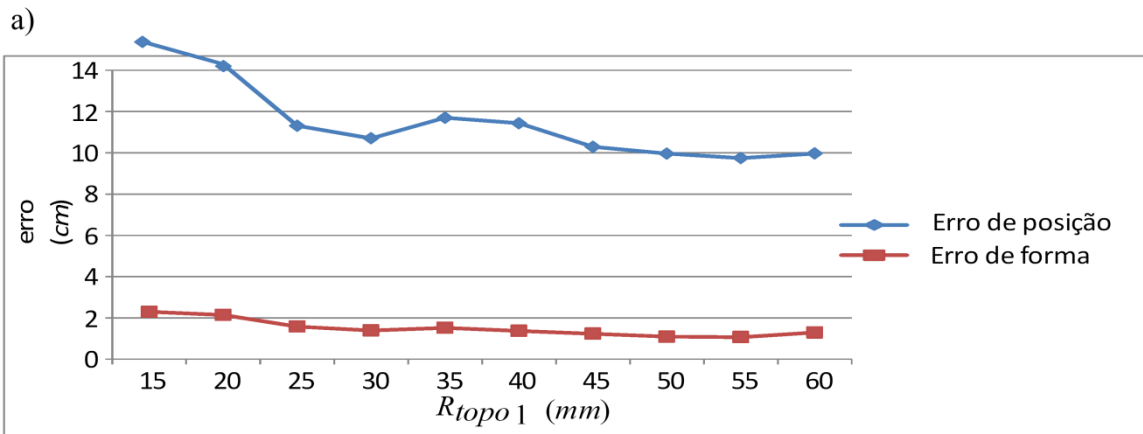


Figura 6.15 – a) Resultados dos erros gerados na 4ª rodada de experimentos para R_{topo1} e b) Resultados dos erros gerados na 4ª rodada de experimentos para R_{topo2} .

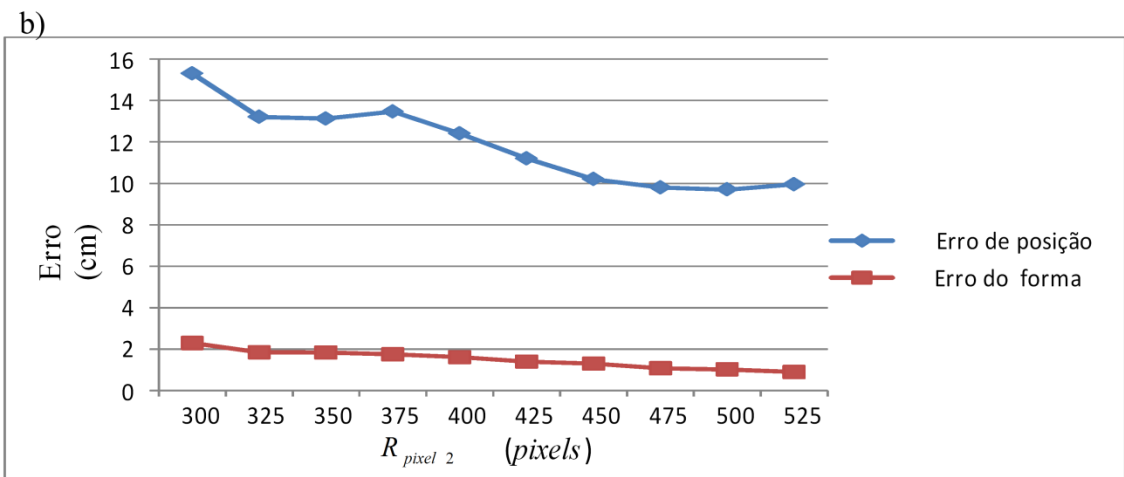
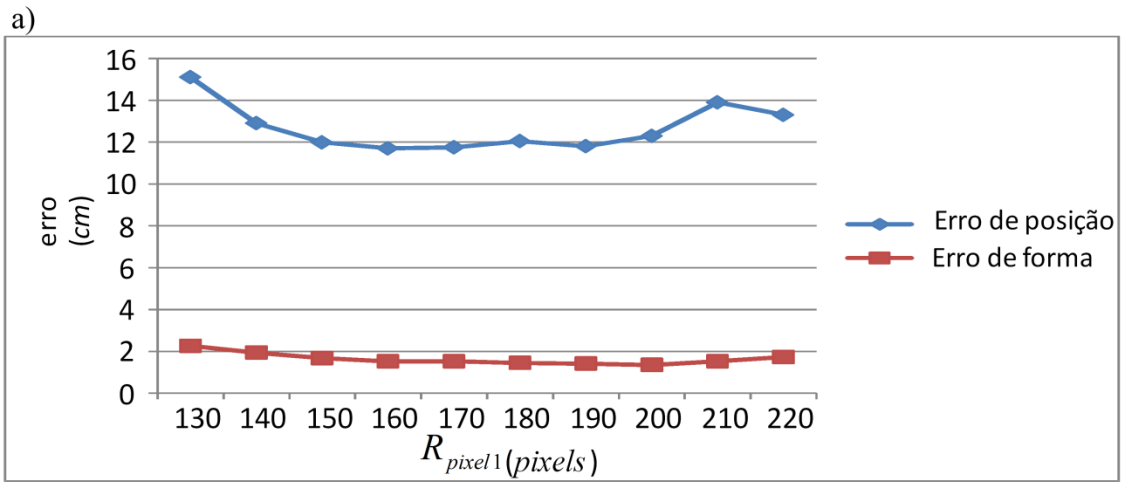


Figura 6.16 - a) Resultados dos erros gerados na 4ª rodada de experimentos para R_{pixel1} e b) Resultados dos erros gerados na 4ª rodada de experimentos para R_{pixel2} .

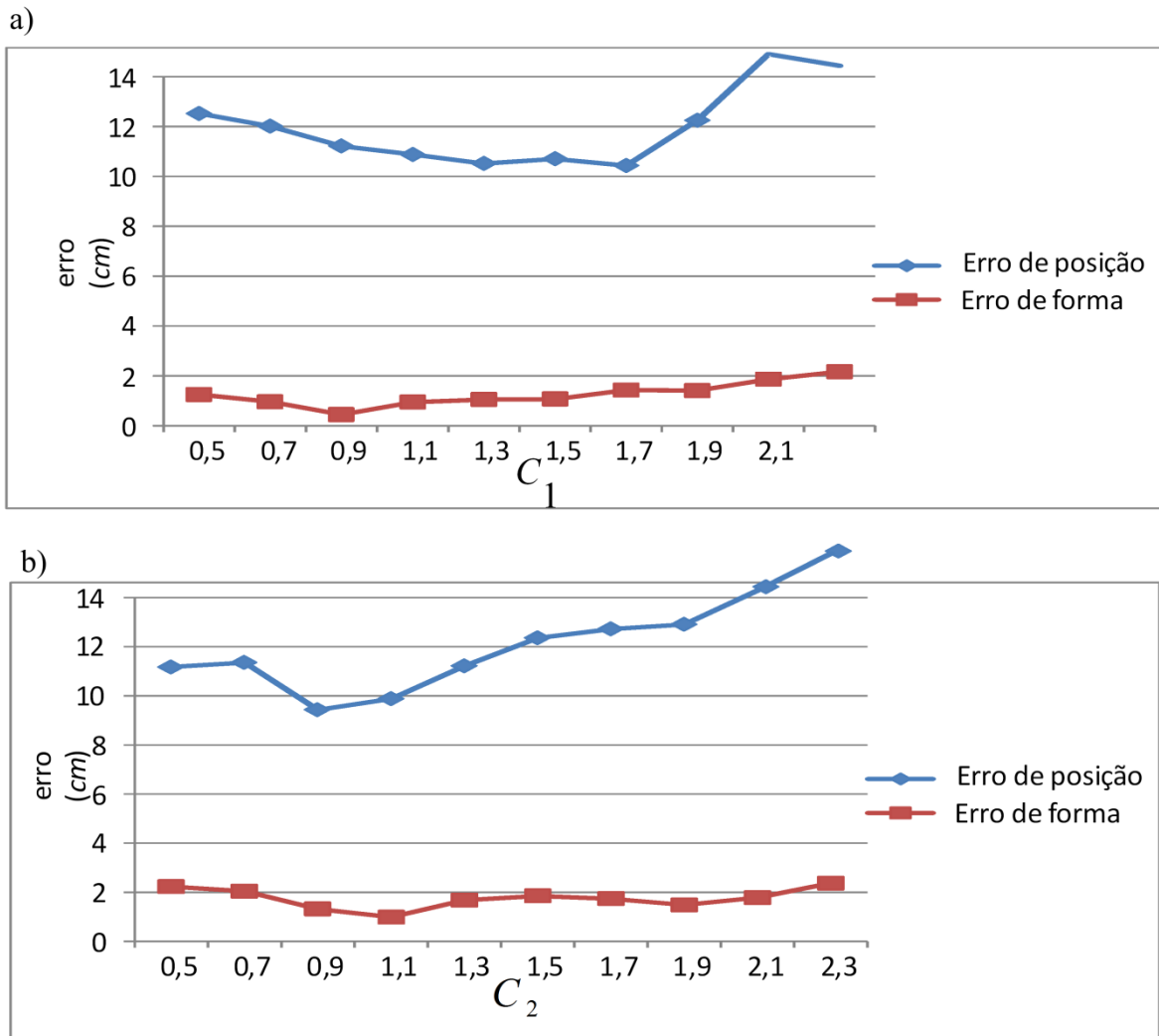


Figura 6.17 – a) Resultados dos erros gerados na 3ª rodada de experimentos para a) C_1 e b) Resultados dos erros gerados na 3ª rodada de experimentos para C_2

Na quarta e última rodada de experimentos (Figuras 6.15, 6.16 e 6.17), os valores dos erros associados aos indicadores utilizados aumentam de forma considerável quando comparados aos indicadores das duas primeiras rodadas, sendo estes erros prejudiciais à reconstrução dos objetos. De forma geral a faixa de erros se eleva ficando entre 10,4 cm e 12,1 cm. O melhor resultado é obtido junto à variação do parâmetro C_2 (0,9). Já os piores resultados (que nos experimentos extrapolam o valor de 14 cm por ponto) são obtidos em todos os parâmetros com exceção de R_{topo2} . Este erro na reconstrução equivale a uma alteração dos cantos dos objetos, que pode afetar a realização, por exemplo, a tarefa de navegação autônoma de um robô móvel, tanto no mapeamento de objetos no ambiente, quanto na definição da geometria de tais objetos (para cenários com um erro de formas também elevado).

Os resultados levantados pelos experimentos realizados mostram que os erros calculados refletem uma tendência semelhante respondendo às alterações dos parâmetros investigados que fazem parte do projeto do espelho hiperbólico de lobo duplo. Esta tendência implica na capacidade do sistema de manter características geométricas dos objetos por ele observados durante a reconstrução dos mesmos. Entretanto, a alteração da distância dos objetos da cena aparece como uma restrição durante o projeto do espelho, conforme levantado por Cabral *et al* (2008). Além disso, a variação dos erros associados ao tamanho dos objetos utilizados nos experimentos se mostrou mínima, sendo descartada neste trabalho.

Um fator que pode diminuir a eficiência do sistema, aumentando assim os erros apontados pelos indicadores consiste na utilização de imagens com baixa resolução de pixels (principalmente no que diz respeito à resolução vertical da imagem omnidirecional V_{pn} , que serão mapeados em linhas radiais nas imagens omnidirecionais). Este fator está diretamente ligado ao parâmetro R_{pixel2} , que define o tamanho da imagem omnidirecional simulada pelo OmniViz, na qual, quanto maior o valor atribuído a este parâmetro, maior deverá ser a resolução da imagem. Uma relação utilizada neste trabalho entre o valor do parâmetro R_{pixel2} e a resolução da imagem panorâmica V_{pn} , que mostrou resultados satisfatórios é exibida na Equação 6.1.

$$R_{pixel2} \leq \frac{V_{pn}}{3} \quad (6.1)$$

Ao se utilizar um valor de R_{pixel2} que não satisfaça a relação apresentada pela Equação (6.1), as imagens omnidirecionais simuladas são acrescidas de ruído (Figura 6.18), que precisa ser atenuado utilizando técnicas de processamento de imagens. O uso da relação acima diminui o custo computacional do sistema proposto, reduzindo, em uma etapa, o processo de extração de características.

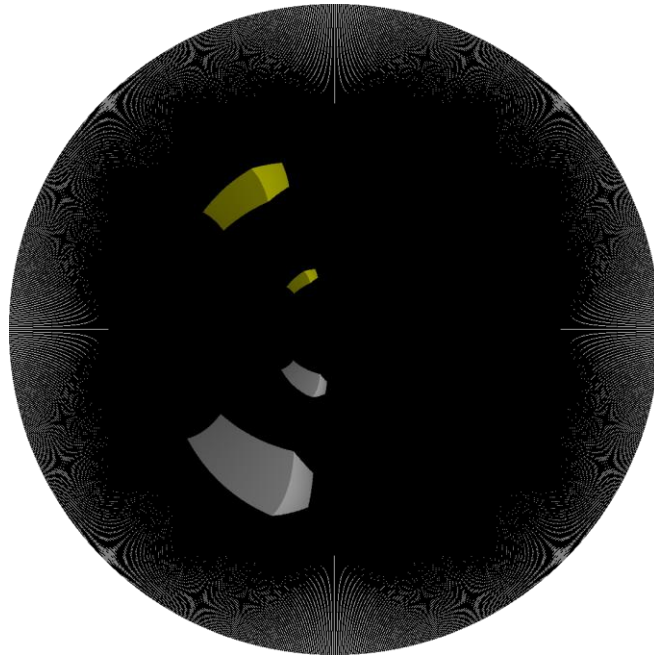


Figura 6.18 - Retificação de imagem panorâmica de 2400 x 1400 pixels, em uma imagem omnidirecional de 1100x1100 pixels ($R_{pixel 2} \leq \frac{V^{pn}}{3}$).

A Figura 6.19 exibe dois gráficos referentes à influência dos parâmetros sobre o erros, em função das rodadas de experimentos realizadas. Tanto na Figura 6.19 a) (que representa o erro de posição) quanto na Figura 6.19 b) (que representa erro de forma), fica evidenciado a relevância da distância dos objetos durante o processo de reconstrução dos mesmos. Ambas as imagens permitem verificar que o erro, de forma geral, associado à quarta rodada aumenta (para os dois indicadores utilizados) conforme a distância dos objetos para o sistema omnidirecional cresce. O eixo vertical da Figura 6.19 b) foi alterado para facilitar a observação dos erros forma.

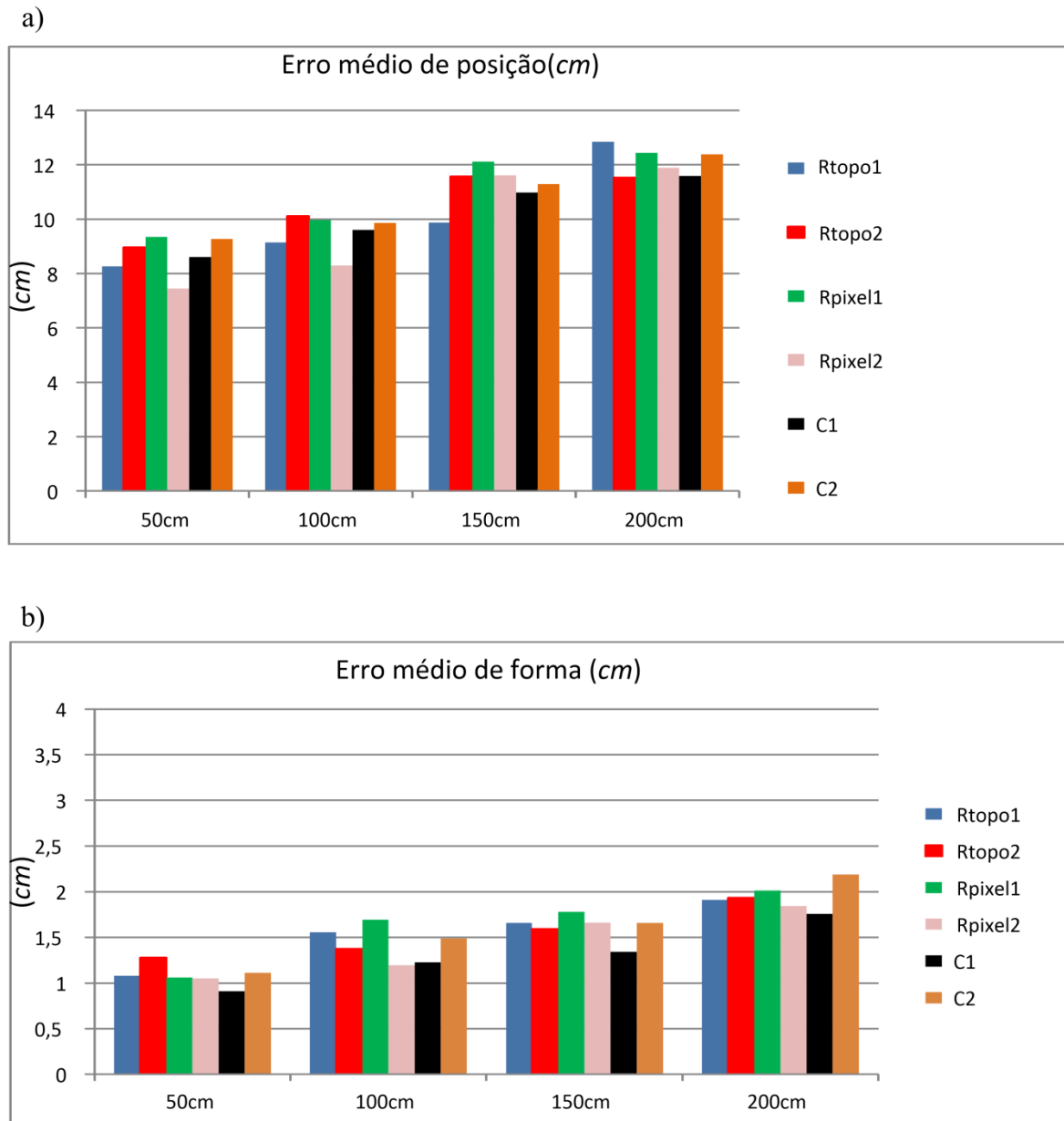


Figura 6.19 - Relação dos indicadores de erro por parâmetro em função das rodadas de experimentos realizadas a) Relação para Erro de Posição e b) Relação pra Erro de Forma.

A análise dos resultados exibidos pela Figura 6.19 a) e Figura 6.19 b) permite observar que os parâmetros do espelho possuem uma influência mais forte sobre os indicadores utilizados para medir os erros, do que os parâmetros da câmera. Ou seja, os parâmetros R_{topo2} , R_{pixel1} e C_2 possuem influência maior sobre a reconstrução dos cantos do ambiente, quando comparados com os parâmetros R_{topo1} , R_{pixel2} e C_1 . Quando se analisa a reconstrução das arestas dos objetos, o parâmetro R_{pixel1} também se mostra significativamente influente nos erros, junto ao parâmetro R_{topo2} . Os demais parâmetros possuem uma variação na influência dos erros ao longo das diferentes distâncias

observadas, sendo que, o parâmetro C_1 registra a menor influência nos erros, em consequência de sua variação.

Durante a variação dos parâmetros R_{topo1} e R_{topo2} no que tange os indicadores dos erros investigados, observou-se que nas quatro rodadas de experimentos, o aumento da base da hipérbole que configura o perfil dos lobos, implica na diminuição dos erros. Isso acontece por que se têm uma mais informação do ambiente sendo refletida para o CCD da câmera. Observa-se uma variação maior entre os erros referentes à variação de R_{topo1} , quando comparado com R_{topo2} em todas as rodadas de experimento realizadas.

As variações dos parâmetros R_{pixel1} e R_{pixel2} , no que diz respeito aos erros investigados, permitem observar que enquanto R_{pixel2} (associado ao lobo externo) tende a um melhor desempenho conforme cresce seu valor, R_{pixel1} tende a gerar melhores resultados recebendo valores medianos (entre 160 a 190 pixels). Observa-se que a partir do momento em que a área da imagem omnidirecional ocupada pelo lobo interno ultrapassa valores aproximados dos 50% em relação à R_{pixel2} , a eficiência do sistema no mapeamento reconstrução de ambientes também diminui. Como o parâmetro R_{pixel2} está ligado ao tamanho não apenas da área refletida pelo lobo externo do espelho hiperbólico, mas também ao tamanho da imagem omnidirecional simulada, o aumento deste implica numa melhor eficiência do sistema. Todavia, o valor de tal parâmetro deve obedecer a relação exibida pela Equação 6.1. Observa-se maior influência da distância sobre o parâmetro R_{pixel1} , em relação aos erros produzidos por R_{pixel2} , tendo o primeiro produzido resultados, durante a variação de seus valores, menos eficientes (com maior índice de erros) que o segundo. Além disso, a variação do parâmetro R_{pixel2} se mostrou a menos influente sobre a eficiência do sistema em comparação com os outros parâmetros testados, gerando os menores erros tanto para cantos, quanto para forma.

As variações dos parâmetros C_1 e C_2 permitiram observar que ambos têm a tendência de gerar resultados menos eficientes com o uso de valores localizados nas extremidades da faixa utilizada, isto é, para valor perto do máximo e mínimo utilizado (0,5 e 2,3 respectivamente), a reconstrução dos cantos e das arestas dos objetos na cena acontece com um maior índice de erro, quando comparados a valores medianos (0,9 a 1,7). Estes parâmetros influenciam na curvatura dos lobos do espelho, e permitem observar que um espelho com uma curvatura muito acentuada, de forma geral, gera uma quantidade maior

de erros. Entretanto cabe observar que ao longo da realização deste trabalho observou-se que o parâmetro C_1 referente à curvatura do lobo interno deve ser maior do que C_2 . Uma proporção que gerou bons resultados ao longo da execução do trabalho foi: $C_1 \geq 1,5 \cdot C_2$.

Ao se observar as quatro rodadas de experimentos realizada nesse trabalho é possível fazer algumas observações sobre o conjunto ótimo dos valores dos parâmetros utilizados em um sistema omnidirecional baseado em espelho hiperbólico de lobo duplo:

- R_{topo1} : Para este parâmetro, observa-se que o aumento do seu valor diminui o erro de posição e o erro de forma dos objetos, aumentando assim a eficiência do sistema no mapeamento e reconstrução de ambientes.
- R_{topo2} : Este parâmetro, assim como R_{topo1} , também gera resultados eficientes conforme seu valor é acrescido. No entanto, conforme foi verificado de forma prática que há uma relação entre R_{pixel1} e R_{pixel2} , uma relação entre R_{topo1} e R_{topo2} também pode ser verificada. Esta, por sua vez, é apresentada em Souza e Motta (2008).
- R_{pixel1} : É observado que para este parâmetro, os melhores resultados gerados pelos experimentos deste trabalho estão na faixa de 150-200 *pixels*.
- R_{pixel2} : Os erros associados a este parâmetro diminuem conforme aumenta-se o seu valor. No entanto a relação apresentada pela Equação 6.1 deve ser respeitada.
- C_1 : O parâmetro C_1 gera resultados mais eficientes quando utilizados valores na faixa de 0,9 a 1,7. Valores utilizados fora desta faixa geram um maior índice de erros.
- C_2 : O parâmetro C_2 , tal qual C_1 , gera resultados melhores com valores medianos, tendo um menor índice de erro os valores que na faixa entre 0,7 e 1,3.

A Figura 20 exibe a média dos erros em cada rodada de experimentos realizadas tanto para os erros de posição (Figura 6.20a)), quanto para os erros de forma (Figura 6.20 b)). A Tabela 6.4 exibe uma taxa de erro em relação a distância.

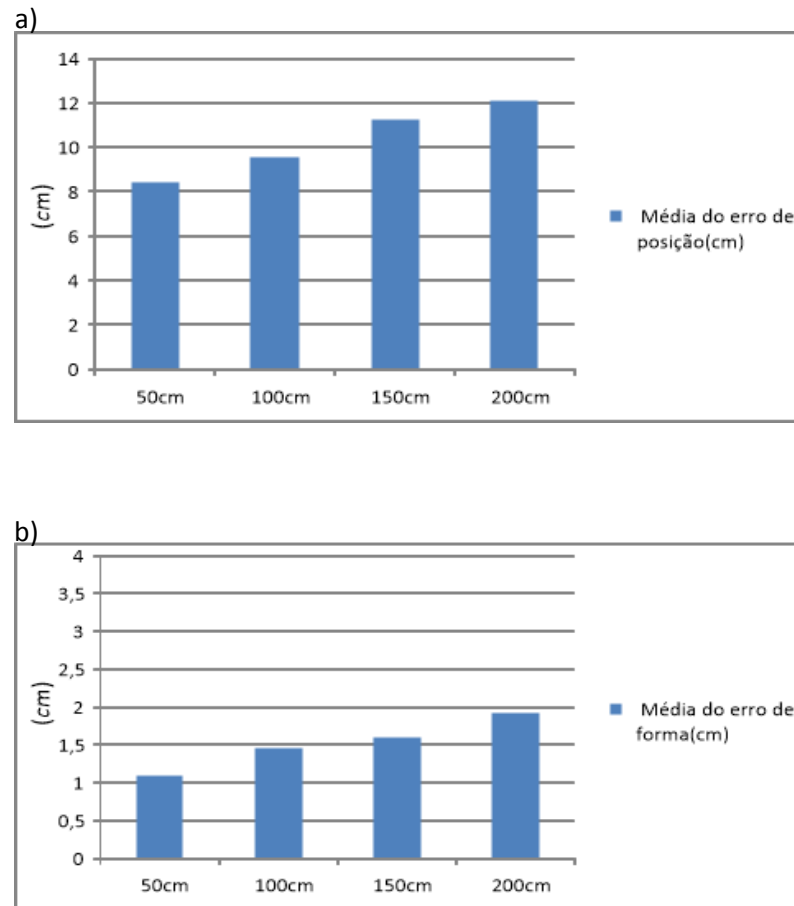


Figura 6.20 - Média dos erros nas 4 rodadas de experimentos a) Média do erro de posição e b) Média do erro de forma em cada rodada de experimentos.

Tabela 6.4 - Exposição da relação entre de erro por distâncias encontrado tanto na média de erros de posição quanto na média de erros de forma.

<i>Erro/Distância (mm)</i>	<i>500 mm</i>	<i>1000 mm</i>	<i>1500 mm</i>	<i>2000 (mm)</i>
<i>Erro de posição</i>	80:500 (0,16)	90:1000 (0,09)	110:1500 (0,073)	120:2000(0,06)
<i>Erro de forma</i>	10:500 (0,02)	14:1000(0,014)	16:1500(0,01)	19:2000(0,0095)

O índice de erro de posição apresentado na Figura 6.20 ressalta que o sistema simulado apresenta uma exatidão limitada. Porém o índice de erro de forma mostra que a reconstrução de objetos pelo sistema mantém a geometria dos mesmos, o que indica que o mesmo se torna interessante para teste e simulação de aplicações que envolvem a tarefa de reconhecimento. Ainda, o índice de erro de posição está associado ao fato de que, em um

espelho hiperbólico, a compressão da cena em uma área relativamente pequena acarreta a perda de informação, o que limita o uso do sistema omnidirecional em determinadas aplicações de visão computacional que exigem uma maior exatidão do sistema.

Uma alternativa para suprimir os erros obtidos nos experimentos acima envolve o uso de câmeras com o tamanho dos pixels (T_{pixel}) pequenos ($0,005\text{ mm}$, *por exemplo*) e grandes resoluções. Esta por sua vez permite uma grande aquisição de informações do ambiente refletido pelo espelho, fazendo com que um determinado objeto de interesse ao sistema, ocupe mais pixels do CCD. Um aumento do comprimento focal da câmera f também colabora para diminuição de erros, de forma a permitir também que a cena refletida pelo espelho seja capturada pelo CCD de forma mais eficiente, pois o aumento de f implica num ângulo de cobertura menor da câmera, possibilitando a aproximação da mesma junto ao espelho, essa aproximação permite que um objeto refletido pelo espelho, ocupe mais pixels na imagem. Câmeras especiais com pequenos valores para T_{pixel} , que permitem e o aumento considerável do valor do comprimento focal f , possuem grande resolução tanto vertical quanto horizontal. No entanto estas normalmente são caras e inflacionam o custo do projeto do sensor omnidirecional.

7 CONCLUSÕES

Considerando o interesse de deixar os dispositivos robóticos cada vez mais autônomos, independentes e inteligentes, a visão computacional é cada vez mais utilizada para mapeamento de ambientes e reconhecimento de objetos. Um sistema de visão computacional catadióptrico tem a capacidade de realizar a tarefa de navegação e mapeamento de forma eficiente, e com um custo computacional menor, quando comparadas a outras estratégias.

Neste trabalho, foi desenvolvido um sistema computacional baseado em uma metodologia que permite a simulação de imagens omnidirecionais partindo de imagens panorâmicas cilíndricas, o que permite verificar a influência dos parâmetros geométricos para a construção de um sistema omnidirecional catadióptrico baseado em espelho hiperbólicos de lobo duplo. O sistema proposto permite a manipulação desses parâmetros, com o intuito de se verificar a sua influência na reconstrução de ambientes, e também, de se simular a precisão de medição de um espelho hiperbólico de lobo duplo projetado.

Ao se utilizar um espelho hiperbólico de lobo duplo, foi possível simular a geração de imagens omnidirecionais estéreo, que gozam da propriedade de centro único de projeção. Esta propriedade torna mais eficientes e rápidos os cálculos exigidos para se realizar o processo de espectroscopia, quando comparados a outras estratégias para se obter sistema omnidirecionais. Ademais, como o par de imagens estéreo é adquirido instantaneamente, os sistemas baseados em espelhos de lobo duplo eliminam a necessidade de deslocamento para a realização de estereoscopia.

O sistema atua através da localização dos cantos dos objetos que compõem o ambiente (no caso deste trabalho, dois cubos). Através dos cantos descobertos, o sistema realiza a correspondência de pontos, utilizando um esquema de janela circular para investigar os pontos correspondentes nas imagens resultantes dos dois lobos. Para cada par de cantos correspondentes detectados o sistema realiza a triangulação específica para um sistema omnidirecional baseado em espelho hiperbólico de lobo duplo.

A metodologia do sistema se mostra eficiente para ambientes simples (Figura 5.6) conforme exibido ao longo da seção, possibilitando a detecção de cantos correspondentes e realizando a correlação para o cálculo do posicionamento do mesmo. Para ambientes

complexos é necessário um novo estudo com investigação de outras abordagens para viabilizar a pesquisa.

Quatro rodadas de experimentos foram propostas para validar o uso do sistema implantado. Esta validação implicou na elaboração de um segundo ambiente utilizando a ferramenta de renderização PovRay®. Em cada rodada de experimentos, eram realizadas variações nos parâmetros do sistema omnidirecional. A cada alteração dos parâmetros, os indicadores de erro de posição e do erro de forma entre os diferentes pontos visíveis pelo sistema eram calculados. Ao longo das rodadas de experimentos, os objetos contidos no ambiente eram deslocados e os parâmetros novamente testados.

Durante a realização deste trabalho, foi possível verificar que de maneira geral, os parâmetros R_{pixel1} , R_{topo2} e C_1 possuem uma influência maior sobre a reconstrução das informações do ambiente, quando comparados com os parâmetros R_{pixel2} , R_{topo1} e C_2 . Outra constatação foi à influência da distância dos objetos nos indicadores de erro utilizados, tendo uma relação direta entre o aumento da distância dos objetos em relação ao sistema omnidirecional e o aumento dos indicadores de erros.

Dada estas constatações, pode-se chegar à conclusão de algumas restrições sobre o conjunto de parâmetros ótimos para um sistema omnidirecional baseado em espelho hiperbólico de lobo duplo. Entretanto, uma análise mais profunda, utilizando-se alguns métodos probabilísticos mais sofisticados (como por exemplo, projeto fatorial de experimento), é necessária para se descobrir o conjunto ótimo de parâmetros para diferentes aplicações.

A metodologia investigada em conjunto com o sistema implantado permitiu uma análise satisfatória das influências dos parâmetros do sistema omnidirecional, na reconstrução de informações de um ambiente simples. Esta análise pode ser estendida para ambientes de maior complexidade, sendo necessária uma nova abordagem que implique a possibilidade de investigar outros parâmetros do sistema omnidirecional catadióptrico.

O sistema computacional desenvolvido neste trabalho pode ser utilizado durante o processo de fabricação do espelho para o sistema omnidirecional. Durante a fase de projeto do espelho hiperbólico de lobo duplo, o sistema pode ser usado não apenas para calcular o valor dos parâmetros fixos do sistema catadióptrico, mas também para simular o seu uso no processo de reconstrução e mapeamento de ambientes.

Considerando os resultados obtidos, serão sugeridos alguns temas para dar continuidade ao trabalho:

- Deve-se realizar a fabricação de um sistema omnidirecional baseado nos parâmetros levantados pelo OmniViz, e uma comparação entre os resultados obtidos pelo sistema simulado e pelo sistema fabricado deve ser realizada;
- A preparação do sistema para poder trabalhar com imagens panorâmicas de alta resolução provenientes do mundo real;
- Um estudo para se adicionar ao OmniViz um sistema de inteligência artificial, capaz de reconhecer os objetos interessantes a uma determinada aplicação, reconstruídos pela metodologia supracitada;
- Um estudo através de métodos probabilísticos para se determinar de fato, os melhores parâmetros do sistema omnidirecional baseado em espelho hiperbólico de lobo duplo para algumas aplicações específicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ballard, D. H., & Brown, C. M. (1982). "Computer Vision". Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Prantice-Hall.
- Barreto, J. P., & Araujo, H. (2001). "Issue on the Geometry of Central Catadioptric Image Formation". Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001) Vol. 2, (pp. II - 422-427). Kawai, Havai.
- Beker, S., & Nayar, S. k. (1998). "A Theory of Catadioptric Image Formation". International Conference on Computer Vision, (pp. 213-220). Bombay, India.
- Cabral, E. L., Oliveira, P. R., & Souza-Jr, J. C. (2008). "An Omnidirectional Stereo System Vision". ACBM Symposium Series in Mechatronics, 643-652.
- Caron, G., Mouaddib, E. M., & Marchand, E. (2012). "3D Model Based Tracking For Omnidirectional Vision: A New Spherical Approach". Robotics and Autonomous Systems, 60(8), 1056-1068.
- Chahl, J., & Srinivasan, M. V. (1997). "Reflective Surfaces for Panoramic Imaging. Applied Optics", 36(31), pp. 8275-8285.
- Chen, S. E. (1995). "QuickTime VR - An Image Based Approach to Virtual Environment Navegation". Computer Graphics: Proceeding to SIGGRAPH 1995, (pp. 29-38).
- Coelho, M. (2002). "Desenvolvimento de um Sistema de Levantamento de Forma3D usando Visão por computador". Relatório Técnico, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Cidade do Porto, Portugal.
- Conroy, T., & Moore, J. B. (1999). "Resolution Invariant Surfaces for Panoramic Vision" Systems. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'99) (pp. 392-397). Kerkyra, Grécia: IEEE Computer Press.
- Corke, P. (2011). "Robotics, Vision & Control". New York: Springer.
- Corrêa, F. R. (2004). "Grades de Evidência com Visão Estéreo Omnidirecional para Navegação de Robôs Móveis". Dissertação de Mestrado, UsP, São Paulo.

- Corrêa, F. R., Guizilini, V. C., & Okmoto-Jr., J. (2006). "Omndircetional Stereovision system with tow-lobe Hyperbolic Mirror for robot navegation". ABCM Symposium Series in Mechatronics, Vol. 2, pp. 653-660.
- Deccó, C. C. (2004). "Construçã de Mapas de Ambiente para Navegação de Robôs Móveis com Visão Omnidirecional Estéreo". Tese (Doutorado). São Paulo, SP, Brasil.
- Duan, H., & Wu, Y. (2011). "Paracatadioptric Camera Calibration Using Sphere Images". 18 th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), (pp. 641 - 644). Brussels.
- Elkins, R. T., & Hall, E. L. (1994). "Three-dimensional Line Following Using Omnidirectional Vision". Proc. SPIE Intelligent Robots And Computer Vision XII: 3D Vision, Product Inspection and Active Vision Vol. 2354, 130-144.
- Fiala, M., & Basu, A. (2002). "Hough Transform for Feature Detection in Panoramic Images". Pattern Recognitoion Letters Vol.23, 1863-1874.
- Fiala, M., & Basu, A. (2004). "Panoramic Stereo Reconstruction Using non-SVP Optics". Computer Vision Image Undertanding, 363-397.
- Gächter, S., Pajdla, T., & Mičušík. (2001). "Mirror Design for an Omnidirectional Camera with a Space Variant Imager". Workshop on Omnidirectional Vision Applied to Robotic Orientation and Nondestructive Testing (NDT). Budapest, Hungary.
- Gaspar, J., Winters, N., & Santos-Jr, V. (2000). "Vision-Based Navegation and Environment Representations with an Omni-directional Camera". IEEE Transactions on Robotics and Autoamtion, 2, pp. 890-898.
- Geyer, C., & Daniilidis, K. (2001). "Catadioptric Projective Geometry". International Journal of Computer Vision Vol.45, No 3., 223-243.
- Geyer, G., & Daniilidis, K. (2000). "A Unifying Theory for Central Panoramic Systems and Practical Implications". European Conferenco on Computer Vision (ECCV), (pp. 445-461).
- Gomes, J., & Velho, L. (2003). "Fundamentos de Computação Gráfica". Rio de Janeiro: Associação Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada.

- Grassi Jr, V. (2002). "Sistema de Visão Omnidirecional Aplicado no Controle de Robôs Móveis". Dissertação (Mestrado). São Paulo, SP.
- Grassi Jr, V., & Okamoto Jr, J. (2006). "Development of an Omnidirectional Vision System". Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering Vol. 28, No.1, 658-68.
- Harris, C., & Stephens, M. (1988). "A Combined Corner and Edge Detector". Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference, pp. 147 -151.
- Hicks, A., & Bajcsy, R. (1999). "Reflective Surfaces as Computational Sensors". WorkShop on Perception for Mobile Agents at CVPR'99. Collins, Colorado, USA: Computer Press.
- Jia, H., & Li, S. (2011). "Scene Analysis Based on Horse Vision System". Conference on Machine Vision Application, (pp. 267-270). Nara, Japão.
- Kawanishi, T., Yamazawa, K., Iwasa, H., Takemura, H., & Yokoya, N. (1998). "Generation Of High-Resolution Stereo Panoramic Images By Omnidirectional Imaging Sensor Using Hexagonal Pyramidal Murrors". Proc. international Conference of Pattern Recognition, 485-489.
- Kim, J., & Suga, Y. (2007). "An Omnidirectional Vision-Based Moving Obstacle Detection in Mobile Robot". International Journal of Control, Automation and Systems Vol. 5, No 6, 663673.
- Krishnan, A., & Ahuja, N. (Junho de 1996). "Panoramic Image Acquisition". Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR-96), pp. 379-384.
- Krishnan, G., & Nayar, S. K. (2008). "Cata-Fisheye Camera For Panoramic Imaginig". Proceedings of IEEE Workshop on Application of Computer Vision (pp. 1-8). New York: IEEE.
- Li, W., & Li, Y. F. (2011). "Single-Camera Panoramic Stereo Imaging System With A Fisheye Lens And Convex Mirror". Optics Express, 5855-5867.

- Liu, R., & Tan, J. (2011). "3D Information Retrieval In Mobile Robot Vision Based On Spherical Compound Eye". IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), (pp. 1895 - 1900). Shenyang, China: IEEE.
- Morita, T., Yasukawa, Y., Inamoto, Y., Uchiyana, T., & Kawakami, S. (1989). "Measurement In Three Dimensions By Motion Stereo And Spherical Mapping". Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, 422-434.
- Nayar, S. K. (1997). "Catadioptric Omnidirectional Camera". IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, (pp. 482-488).
- Pereira, F. G., Gava, C., Vassallo, R., & Filho, M. S. (2005). "Calibração de Sistemas Catadióptricos e Detecção da Pose de Robôs Móveis por Seguimentação de Imagens Omnidirecionais". VI SBAI/ II IEEE LARS. São Luis, Brasil.
- Ribeiro, M. M., & Menezes, M. A. (2010). "Uma Breve Introdução à Computação Gráfica". Rio de Janeiro: Ciência moderna.
- Roning, J. J., Cao, Z. L., & Hall, E. L. (1987). "Dynamic Omnidirectional Vision for Mobile Robots". J. Robotic Systems Vol. 3, No 1, 57-63.
- Souza, G. G. (2007). "Simulation and Design of an Omnidirectional Catadioptric Stereo Vision System With a Hyperbolic Double Lobe Mirror For Environment Mapping From Mobile Robots". 19th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM). Brasilia.
- Souza, G. G. (2009). "Visão Estéreo Omnidirecional Catadióptrica com Espelho de Lóbulo Duplo Aplicado na Geração de Grades de Evidência". Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, 131. Brasília, Df, Brasil: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília.
- Souza, G. G., & Motta, J. M. (2008). "Simulation of an Omnidirectional Catadioptric Vision System With Hyperbolic Double Lobed Mirror for Robot Navegation". ABCM Symposium Series in Mechatronics, (pp. 613-622).
- Svoboda, T., & Pajdla, T. (2002). "Epipolar Geometry for Central Catadioptric Cameras". International Journal of Computer Vision Vol.49, No.1, 23-37.

- Svoboda, T., Pajdla, T., & Hilavac, V. (1997). "Central Panoramic Cameras: Geometry and Design". Czech Technical University, Faculty of Electrical Engineering, Center for Machine Perception, Praga, Czech Technical University.
- Szeliski, R. (2010). "Computer Vision". New York: Springer.
- Trucco, E., & Verri, A. (1998). "Introductory Techniques for 3-D Computer Vision". Prentice Hall, 343 pags.
- Yagi, Y. (1999). "Omnidirectional Sensing and Its Applications". IEICE Transactions on Information and Systems (pp. 568-579). VE82-D, N° 3.
- Yagi, Y., Kawato, S., & Tsuji, S. (1994). "Real-Time Omnidirectional Image Sensor(COPIS) for Vision-Guided Navegation". IEEE Transactions on Robotics and Automation, 10(1), pp. 11-22.
- Yagi, Y., Nishizawa, Y., & Yachida, M. (1995). "Map-Based Navegation for Mobile Robot with Omnidirectional Image Sensor COPIS". IEEE Transactions on Robot and Automation, 11(ed.5).
- Ying, X., & Zha, H. (2005). "Simultaneously Calibration Catadioptric Camera and Detecting Line Features using Hough Transform". Intelligent Robots and Systems (IROS 2005), (pp. 412-417). Center Edmont.
- Yoda, I., J. B. (2006). "No touch and Unconstraint Head Gesture Interface for Electric Wheelchair by Stereo camera" . Proc. of Inter. Conf. Automatic Face and Gestures FG2006, pp. 50-54.