

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

**VISÃO ESTÉREO OMNIDIRECIONAL CATADIÓPTRICA
COM ESPELHO DE LOBO DUPLO APLICADO NA
GERAÇÃO DE GRADES DE EVIDÊNCIAS**

GIULIANO GONÇALVES DE SOUZA

ORIENTADOR: ARMANDO DE AZEVEDO CALDEIRA PIRES

TESE DE DOUTORADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PUBLICAÇÃO: ENM. TD-004 A/09

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO – 2009

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

**VISÃO ESTÉREO OMNIDIRECIONAL CATADIÓPTRICA COM
ESPELHO DE LOBO DUPLO APLICADO NA GERAÇÃO DE
GRADES DE EVIDÊNCIAS**

GIULIANO GONÇALVES DE SOUZA

**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
DOUTOR EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.**

APROVADA POR:

Prof. Armando de Azevedo Caldeira Pires, Dr (ENM-UnB)

Prof. Flamínio Levy Neto, Dr (ENM-UnB)

Prof. Alessandro Borges de Souza Oliveira, Dr (FGA-UnB)

Prof. Geovany Araújo Borges, Dr (ENE-UnB)

Prof. Marcelino Monteiro de Andrade, Dr (FGA- UnB)

BRASÍLIA/DF, 21 DE DEZEMBRO DE 2009

FICHA CATALOGRÁFICA

SOUZA, GIULIANO GONÇALVES DE

Visão Estéreo Omnidirecional Catadióptrica com Espelho de Lobo Duplo Aplicado na Geração de Grades de Evidências [Distrito Federal] 2009.

xvii, 131p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Doutor, Ciências Mecânicas, 2009).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Visão omnidirecional com espelho de lobo duplo

2. Visão estéreo

3. Grades de evidências

4. Robótica Móvel

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, G.G. (2009). Visão Estéreo Omnidirecional Catadióptrica com Espelho de Lobo Duplo Aplicado na Geração de Grades de Evidências. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM. TD-004 A/09, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 131p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Giuliano Gonçalves de Souza.

TÍTULO: Visão Estéreo Omnidirecional Catadióptrica com Espelho de Lobo Duplo Aplicado na Geração de Grades de Evidências.

GRAU: Doutor

ANO: 2009

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de doutorado 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 doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Giuliano Gonçalves de Souza

Quadra 104, Conjunto 08 n° 16, Residencial Oeste.

71.692-340 São Sebastião – DF – Brasil.

giuliano.robotic@gmail.com; giuliano_msc@yahoo.com.br

Essa obra é dedicada a todos os visionários que contribuíram para o desenvolvimento e bem estar da humanidade.

AGRADECIMENTOS

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização e divulgação deste trabalho.

À
Armando Caldeira Pires,
orientador do trabalho, pelo apoio e confiança depositada.

José Maurício S. T. Motta,
pela ajuda prestada.

Aos amigos, Anderson Chagas (Bucho), Diogo Ramalho e Jair Naves,
pelo apoio e amizade.

Minha família,
pelo carinho e apoio.

Minha Esposa Sheila Jesus de Matos Souza,
pelo amor e compreensão.

Toda a equipe de professores da Engenharia Mecânica e Mecatrônica da
UnB, pela ajuda e conhecimento compartilhado.

RESUMO

Com o aumento da capacidade dos computadores e o desenvolvimento de novas técnicas de processamento de imagem, a visão computacional se tornou uma estratégia promissora para a robótica móvel em mapeamento de ambientes. Uma variação tecnológica importante é o sistema de visão omnidirecional catadióptrico com espelho hiperbólico de lobo duplo, que consiste na instalação de um espelho convexo na frente de uma câmera, o qual possibilita a obtenção de uma imagem omnidirecional estérea, com centro único de projeção, sem que haja necessidade de locomoção do robô móvel para a caracterização espacial da posição do objeto.

No entanto, um sistema de visão omnidirecional catadióptrico é extremamente dependente da qualidade do espelho, da precisão na montagem e da resolução da imagem obtida. Esses fatores contribuem para gerar um alto erro inerente ao sensor, tornado o sistema adequado a utilização de grades de evidências.

O objetivo desse trabalho consiste em desenvolver um sistema de visão omnidirecional catadióptrico estéreo, com espelho hiperbólico de lobo duplo, associado a um algoritmo de caracterização de padrões baseado na geração de grades de evidências para determinação da posição dos objetos existentes no ambiente estudado.

A metodologia de pesquisa é baseada no processamento da imagem omnidirecional estérea com técnicas estereoscópicas específicas. Dessa forma, inicialmente são extraídas da imagem omnidirecional os pontos que determinam os contornos dos objetos existentes no ambiente, para posteriormente serem determinados os pares de pontos correspondentes e por fim, é realizada a triangulação entre os pares de pontos correspondentes, que determina a possível posição do ponto analisado. No entanto, o sistema omnidirecional estudado gera erros significativos no processo de mapeamento de ambientes, o que exigiu a utilização de um modelo probabilístico Gaussiano para a atualização da grade de evidências.

O conjunto de algoritmos foi testado através do mapeamento simulado de dois ambientes. O primeiro é um ambiente monocromático, com diferentes obstáculos de contorno bem definidos e sobre um fundo branco, o segundo é uma foto de alta resolução do solo

marciano, retirada pelo robô móvel Spirit, caracterizada por um espectro de 256 níveis de cinza e objetos de contorno irregulares. O resultado obtido é um mapa global bidimensional em forma de grade de evidências, que é atualizada a cada nova imagem omnidirecional extraída.

A avaliação comparativa entre as imagens originais e simuladas é efetuada através de análise visual. Os resultados demonstraram que o sistema computacional desenvolvido tem capacidade de gerar mapas com melhor definição para a caracterização do ambiente mais simples. Para o caso do ambiente mais complexo devem ser considerados num novo estudo os parâmetros associados à forma e a quantidade de obstáculos, bem como a variação cromática.

ABSTRACT

With the increase of computer capacities and the development of new image processing techniques computer vision has become a promising approach for environment mapping by mobile robots. An important emerging technology is the use of omnidirectional catadioptric vision systems with a hyperbolic double-lobed mirror, which consists on a convex mirror in front of a camera allowing the acquisition of a stereo omnidirectional image with a single centre of projection without the need to move a mobile robot to locate an object in 3D coordinates within the workspace.

However, the omnidirectional catadioptric vision system is extremely dependent on the precision that the geometry of the surface mirror are constructed, the assembly process and on the resolution of the acquired image. These characteristics work together to produce large geometrical errors by the sensor, making the system a good platform to use statistical evidences grids on the process of environment mapping with mobile robots.

The objective of this work consists in the development of an omnidirectional catadioptric stereo vision system with a hyperbolic double-lobed mirror, associated with an algorithm to characterize standards to generate evidence grids to estimate the position of objects within the environment studied.

The research methodology is based on omnidirectional stereo image processing by using specific stereoscopic techniques. Firstly, gradient images are calculated from the omnidirectional images to extract object features that are used to find correspondences between the images from the two mirror lobes. Secondly, a triangulation process is carried out to calculate the 3D position of objects within the environment. However, the vision system generates large amount of errors during the mapping process, requiring the use of probabilistic Gaussian models in the statistical evidence grids.

The algorithms developed were tested by simulating maps of two different environments. The first is a dichromatic environment, with several obstacles with well contrasted gray image with on a white ground. The second is a photo of high resolution of a Martian land, acquired by the mobile robot Spirit, consisting of 256 levels of gray and objects with

irregular contours. The result obtained is a bi-dimensional global map with evidence grids, which is updated as each new omnidirectional image is acquired.

The comparative evaluation between the original and the simulated images is done through visual analysis. The results showed that the computer system developed can generate maps with good definition to characterize simple environments. In the case of more complex environments new studies must have to be carried out to evaluate the effects of parameters associated to the shape and quantity of obstacles, as well as chromatic variations.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO PRINCIPAL	2
1.2	OBJETIVOS SECUNDÁRIOS	3
1.3	CONTRIBUIÇÃO DESTE TRABALHO	5
1.4	ESTRUTURA DA TESE	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	SISTEMA DE VISÃO OMNIDIRECIONAL CATADIÓPTRICO	6
2.1.1	<i>Centro único de projeção</i>	18
2.1.2	<i>Espelho hiperbólico</i>	21
2.1.3	<i>Calibração de sistema de visão omnidirecional catadióptrico</i>	24
2.1.4	<i>Vantagens e limitações do sistema de visão omnidirecional catadióptrico</i>	27
2.2	VISÃO ESTÉREO OMNIDIRECIONAL	30
2.2.1	<i>Extração de características de imagens</i>	32
2.2.2	<i>Correspondência entre características semelhantes</i>	32
2.2.3	<i>Triangulação entre características correspondentes</i>	33
2.2.4	<i>Vantagens e limitações do sistema de visão omnidirecional estéreo</i>	33
2.3	GRADES DE EVIDÊNCIAS	35
2.3.1	<i>Modelo do sensor</i>	42
2.3.2	<i>Atualização da grade de evidência</i>	50
3	METODOLOGIA	50
3.1	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA PROPOSTO	51
3.2	DEFINIÇÃO DA CÂMERA DE PROJEÇÃO PERSPECTIVA	53
3.3	PROJETO DO ESPELHO HIPERBÓLICO DE LOBO DUPLO	55
3.3.1	<i>Definição da superfície de reflexão do espelho</i>	56
3.3.2	<i>Acabamento superficial do espelho</i>	62
3.4	MAPEAMENTO DE AMBIENTE UTILIZANDO IMAGEM ESTÉREA OMNIDIRECIONAL	65
3.4.1	<i>Aquisição de imagem estérea omnidirecional</i>	66
3.4.2	<i>Extração de características da imagem por segmentação</i>	68
3.4.3	<i>Correspondência entre características semelhantes</i>	71
3.4.4	<i>Triangulação entre características correspondentes</i>	77
3.4.5	<i>Incerteza de medição do sistema de visão omnidirecional catadióptrico</i>	80
3.4.6	<i>Mapa de evidências</i>	101
3.5	MAPEAMENTO SIMULADO DE AMBIENTE	102

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	109
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	124
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – CORTE ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE VISÃO OMNIDIRECIONAL CATADIÓPTRICO.	6
FIGURA 2.2 - SISTEMA HÍBRIDO.	9
FIGURA 2.3 - SISTEMA HÍBRIDO: (A) IMAGEM OMNIDIRECIONAL; (B) IMAGEM CONVENCIONAL; (C) MAPA GERADO.	10
FIGURA 2.4 - ROBÔ MÓVEL COM SISTEMA OMNIDIRECIONAL EMBARCADO E ALVO A SER SEGUIDO.	12
FIGURA 2.5 - ESPELHO COM LOBO TRIPLO.	13
FIGURA 2.6 - ROBÔ PIONEER2-DX COM SISTEMA DE VISÃO EMBARCADO.	14
FIGURA 2.7 - SISTEMA DE VISÃO OMNIDIRECIONAL ESTÉREO.	16
FIGURA 2.8 - ESPELHO DE LOBO DUPLO COM FOCO DESLOCADO HORIZONTALMENTE.	16
FIGURA 2.9 - MAPEAMENTO COM ESPELHO DE LOBO DUPLO: (A) IMAGEM OMNIDIRECIONAL; (B) IMAGEM PANORÂMICA; (C) MAPA GERADO.	17
FIGURA 2.10 – SISTEMA DE VISÃO OMNIDIRECIONAL COMPOSTO PELA ASSOCIAÇÃO DE DUAS CÂMERA COM UM ESPELHO CÔNICO EMBARCADO EM UM ROBÔ MÓVEL.	18
FIGURA 2.11 - ESPELHO ESFÉRICO DE GAUSS.	18
FIGURA 2.12 - PERFIS DE ESPELHO: (A) PARABÓLICO; (B) E HIPERBÓLICO.	20
FIGURA 2.13 - IMAGEM ADQUIRIDA COM O ESPELHO ESFÉRICO RETIFICADA PELO MÉTODO DE TRANSFORMAÇÃO DIRETA DE COORDENADAS.	22
FIGURA 2.14 - IMAGEM ADQUIRIDA COM O ESPELHO HIPERBÓLICO RETIFICADA PELO MÉTODO DE TRANSFORMAÇÃO DIRETA DE COORDENADAS.	22
FIGURA 2.15 - IMAGEM ADQUIRIDA COM O ESPELHO HIPERBÓLICO RETIFICADA PELO MÉTODO DESENVOLVIDO QUE LEVA EM CONSIDERAÇÃO A EQUAÇÃO DO ESPELHO HIPERBÓLICO E A PROPRIEDADE DE CENTRO ÚNICO DE PROJEÇÃO.	23
FIGURA 2.16 - IMAGEM OMNIDIRECIONAL ESTÉREA: (A) IMAGEM OMNIDIRECIONAL CAPTURADA PELO SISTEMA DE LOBO DUPLO; (B) IMAGEM PANORÂMICA OBTIDA A PARTIR DA PROJEÇÃO LINEAR DA IMAGEM OMNIDIRECIONAL EM UM CILINDRO.	24
FIGURA 2.17 - MODELO GERAL DE PROJEÇÃO ESFÉRICA.	25
FIGURA 2.18 - GRADE DE CALIBRAÇÃO 3D.	27
FIGURA 2.19 - FLUXO ÓPTICO OBTIDO DURANTE UMA TRANSLAÇÃO.	35
FIGURA 1.20 - EXPLORAÇÃO ROBÓTICA : (A) ROBÔ SUBMARINO AUTÔNOMO DEPTHX; (B) MAPA DO LAGO ZACATÓN.	37
FIGURA 2.21 - AMBIENTE MAPEADO.	40
FIGURA 2.22 - MAPA GERADO: (A) SEM MODELO; (B) COM MODELO.	41
FIGURA 2.23 - MAPA IDEAL.	41
FIGURA 2.24 - MODELO DO SONAR.	43
FIGURA 2.25 - REGIÃO DE COBERTURA DO SONAR.	44

FIGURA 2.26 - FUNÇÃO DE OCUPAÇÃO PARA UM SENSOR MODELADO POR UMA DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA BIDIMENSIONAL.	45
FIGURA 2.27 - MAPA SENDO CONSTRUÍDO SEM CONSIDERAR OS EFEITOS DOS ERROS DE ODOMETRIA.	46
FIGURA 2.28 - MAPA CONSTRUÍDO COM A CORREÇÃO DOS ERROS SISTEMÁTICOS DE ODOMETRIA.	46
FIGURA 2.29 – PARÂMETROS DO MODELO BÁSICO DO SONAR.	47
FIGURA 2.30 - LOCALIZAÇÃO DA CÉLULA OBSERVADA.	48
FIGURA 2.31 - MODELO PROBABILÍSTICO DO SONAR.	49
FIGURA 3.1 - SISTEMA DE VISÃO OMNIDIRECIONAL CATADIÓPTRICO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	51
FIGURA 3.2 - PERFIL HIPERBÓLICO.	55
FIGURA 3.3 - HIPÉRBOLE.	56
FIGURA 3.4 - ESPELHO HIPERBÓLICO ASSOCIADO A UMA CÂMERA DE PROJEÇÃO PERSPECTIVA	57
FIGURA 3.5 - CIRCUNFERÊNCIA DE RAIOS R_{pixel} INSCRITO NO CCD DA CÂMERA	58
FIGURA 3.6 - VARIAÇÃO DOS PERFIS DOS ESPELHOS	60
FIGURA 3.7 - PERFIL DO ESPELHO DE LOBO DUPLO PROJETADO.	61
FIGURA 3.8 - ESPELHO HIPERBÓLICO DE LOBO DUPLO: (A) SÓLIDO GERADO A PARTIR DA REVOLUÇÃO DO PERFIL DO ESPELHO; (B) PERFIL DO ESPELHO CALCULADO.	62
FIGURA 3.9 - AMBIENTE SIMULADO.	64
FIGURA 3.10 - SIMULAÇÃO COM ESPELHO HIPERBÓLICO DE LOBO DUPLO, COM COORDENADAS REDUZIDAS.	64
FIGURA 3.11 - SIMULAÇÃO COM ESPELHO HIPERBÓLICO DE LOBO DUPLO.	65
FIGURA 3.12 - IMAGEM OMNIDIRECIONAL ESTÉREA, COM RESOLUÇÃO DE 1008 X 1008 PIXELS.	68
FIGURA 3.13 - VARIAÇÃO DE PIXEL: (A) VARIAÇÃO DO NÍVEL DE CINZA; (B) MUDANÇA NA FUNÇÃO; (C) DIFERENCIAÇÃO DE PRIMEIRA ORDEM.	69
FIGURA 3.14 - OPERADOR DE PREWITT.	70
FIGURA 3.15 - IMAGEM PROCESSADA: (A) REALCE DE BORDAS; (B) IMAGEM BINÁRIA.	71
FIGURA 3.16 - PONTOS CORRESPONDENTES.	72
FIGURA 3.17 - JANELAS DO SOMATÓRIO DOS QUADRADOS DAS DIFERENÇAS.	72
FIGURA 3.18 - MODELO RADIAL DA JANELA DO SOMATÓRIO DOS QUADRADOS DAS DIFERENÇAS.	73
FIGURA 3.19 - FLUXOGRAMA DE IDENTIFICAÇÃO DO PAR EQUIVALENTE.	75
FIGURA 3.20 - DETERMINAÇÃO DOS PONTOS EQUIVALENTES: (A) ÁREAS DE VARREDURA; (B) PONTOS EQUIVALENTES.	76
FIGURA 3.21 - SUPERPOSIÇÃO DE IMAGENS.	77
FIGURA 3.22 - COORDENADA DE UM PONTO DO AMBIENTE: (A) TRIANGULAÇÃO; (B) CCD DA CÂMERA.	77

FIGURA 3.23 – VETOR (X, θ) PARA CADA PONTO CALCULADO.	79
FIGURA 3.24 - MAPEAMENTO: (A) MAPA CALCULADO; (B) SUPERPOSIÇÃO DO MAPA IDEAL AO MAPA CALCULADO.	80
FIGURA 3.25 - AMBIENTE VIRTUAL DA PROJEÇÃO DE OBJETOS NA GRADE DE EVIDÊNCIAS.	81
FIGURA 3.26 – MODELO DE UM SONAR.	82
FIGURA 3.27 - MODELO PROBABILÍSTICO DE UM SONAR.	83
FIGURA 3.28 – DEFINIÇÃO DAS REGIÕES A E B DO SENSOR.	84
FIGURA 3.29 - IMAGEM CILÍNDRICA PROJETADA NO ESPELHO.	85
FIGURA 3.30 - FLUXOGRAMA QUE DEFINE A IMAGEM OMNIDIRECIONAL ESTÉREA, A PARTIR DA IMAGEM CILÍNDRICA	87
FIGURA 3.31 - CAMPO DE VISÃO DO SISTEMA OMNIDIRECIONAL EMBARCADO EM UM ROBÔ MÓVEL.	88
FIGURA 3.32 – FOTOS DO SOLO MARCIANO.	93
FIGURA 3.33 - POSIÇÃO VERTICAL DA IMAGEM.	94
FIGURA 3.34 – GRÁFICOS DE DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS COM VARIAÇÃO DO RAIO DE CURVATURA.	99
FIGURA 3.35 – GRÁFICOS DE LINEARIDADE DO ERRO TÍPICO DO SENSOR.	100
FIGURA 3.36 – GRÁFICOS DO MODELO GAUSSIANO DO SENSOR PARA VÁRIAS DISTÂNCIAS.	101
FIGURA 3.37 - MAPA LOCAL 1, 2, E 3 PROJETADOS NO MAPA GLOBAL.	102
FIGURA 3.38 – AMBIENTE 1.	103
FIGURA 3.39 – AMBIENTE 2.	104
FIGURA 3.40 – AQUISIÇÃO DA IMAGEM LOCAL.	104
FIGURA 3.41 – IMAGEM DO AMBIENTE. (A) IMAGEM LOCAL, (B) IMAGEM OMNIDIRECIONAL ESTÉREA.	105
FIGURA 3.42 – ÁREA DE VISUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE VISÃO, EMBARCADO EM UM ROBÔ MÓVEL.	106
FIGURA 3.43 – CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA EMBARCADO, UTILIZADO NA SIMULAÇÃO.	106
FIGURA 3.44 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA QUE GERA A IMAGEM OMNIDIRECIONAL ESTÉREA, A PARTIR DA IMAGEM DO AMBIENTE.	108
FIGURA 4.1 – GRÁFICOS DO MODELO GAUSSIANO DO SENSOR PARA VÁRIAS DISTÂNCIAS.	110
FIGURA 4.2 – IMAGEM DO AMBIENTE 1.	114
FIGURA 4.3 – IMAGEM DO AMBIENTE 2.	114
FIGURA 4.4 – 1ª ATUALIZAÇÃO DO MAPA GLOBAL 1	115
FIGURA 4.5 – 17ª ATUALIZAÇÃO DO MAPA GLOBAL 1	116
FIGURA 4.6 – 1ª ATUALIZAÇÃO DO MAPA GLOBAL 2	117
FIGURA 4.7 – 33ª ATUALIZAÇÃO DO MAPA GLOBAL 2	118

FIGURA 4.8 - COMPARAÇÃO ENTRE IMAGENS: (A) IMAGEM LOCAL, (B) IMAGEM OMNIDIRECIONAL, (C) MAPA LOCAL	120
FIGURA 4.9 – AMBIENTE 1.	122
FIGURA 4.10 – MAPA GLOBAL 1.	122
FIGURA 4.11 – AMBIENTE 2.	123
FIGURA 4.12 – MAPA GLOBAL 2.	123

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 - VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO SISTEMA PROPOSTO.	2
TABELA 3.1 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE VISÃO PROPOSTO.	52
TABELA 3.2 - PROPRIEDADES DA CÂMERA PROPOSTA PARA O SISTEMA OMNIDIRECIONAL	54
TABELA 3.3 - PARÂMETROS DO SISTEMA DE VISÃO PROJETADO.	61
TABELA 3.4 - PARÂMETROS DO SISTEMA DE VISÃO OMNIDIRECIONAL EMBARCADO EM UM ROBÔ MÓVEL.	89
TABELA 3.5 - VALORES ATRIBUÍDOS A X.	93
TABELA 3.6 - VALORES DA VARIÂNCIA E DO ERRO TÍPICO DO SENSOR.	99
TABELA 4.1 - PARÂMETROS DO SISTEMA DE VISÃO OMNIDIRECIONAL	110

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADES
e	Erro de medição do sensor	-
I_m	Incerteza de medição	-
R	Medidas de Raios	mm
β	Ângulo de varredura do sonar	graus
z	Distância entre o sensor e o objeto	mm
$d_{x,y}$	Distância entre o sensor e a célula estudada	mm
θ	Ângulo de orientação do sensor em relação ao eixo da abscissas	graus
$(r_{x,y}, \theta_{x,y})$	Coordenada polar da pilha estudada	(mm, graus)
$m_{x,y}$	Pilha estudada	-
σ_z^2	Variâncias de z	-
σ_θ^2	Variância de θ	-
σ_z	Incerteza de z	-
σ_θ	Incerteza de θ	-
Δl	Deslocamento linear	mm
η	Fator de erro típico do sensor	-
H	Existência de um obstáculo	-
\bar{H}	Ausência de um obstáculo	-
f	Distância focal da câmera	mm
h	Distância entre a borda do espelho e o ponto focal da câmera	mm
R_{topo}	Coordenada no eixo das abscissas do topo do espelho	mm
α	Ângulo máximo de visualização do sistema omnidirecional	graus
CCD	Charg Coupled Device	-

R_{pixel}	Raio da maior circunferência inscrita no CCD da câmera	mm
T_{pixel}	Dimensão de cada pixel do CCD da câmera	mm
I	Matriz da imagem	-
G_x	Gradientes da imagem na direção x	-
G_y	Gradientes da imagem na direção y	-
M_1 e M_2	Janelas do somatório das diferenças	-
R_{min}	Raio mínimo de visualização	mm
c	Excentricidade da hipérbole	-
c_1	Excentricidade da hipérbole que define o perfil do espelho 1	-
c_2	Excentricidade da hipérbole que define o perfil do espelho 2	-
t_0	Referencial de corte de binarização	-
X	Abscissa da coordenada de localização do ponto analisando do ambiente	mm
Y	Ordenada da coordenada de localização do ponto analisando do ambiente	mm
x_1, x_2	Coordenada dos pontos do perfil do espelho	mm
l	Distância do centro da esfera até o centro de projeção	mm
m	Distância do centro da esfera até o plano da imagem	
r_1	Raio da circunferência 1	mm
r_2	Raio da circunferência 2	mm
a, b	Catetos do triângulo retângulo	mm

1 INTRODUÇÃO

A navegação de robôs móveis em ambientes desconhecidos é geralmente uma tarefa complexa. Inicialmente, o sistema sensorial embarcado no robô tem que localizar os objetos existentes no ambiente e gerar um mapa que possibilite a sua autolocalização e a identificação de possíveis obstáculos. A partir do mapa obtido o sistema de navegação do robô tem que escolher qual a melhor trajetória a ser percorrida durante a execução de uma determinada tarefa.

Para gerar um mapa de um ambiente, o robô móvel pode utilizar diversos tipos de sensores, tais como os transdutores ultra-sônicos, os infravermelhos e as câmeras. Os sensores sônicos e os infravermelhos identificam apenas a distância do obstáculo mais próximo, enquanto que as câmeras possibilitam a localização de todos os objetos existentes em seu campo de visão. Para reconstruir um ambiente em duas ou três dimensões a partir de imagens planas, pode ser utilizado a estereoscopia. Esse método utiliza um par de imagens estéreas, retiradas do ambiente a ser mapeado, e, com a realização de um processamento dessas imagens, o sistema identifica a possível localização de objetos (Jain et al, 1995).

O sistema de visão omnidirecional catadióptrico utiliza uma câmera associada a um espelho convexo para extrair uma imagem de 360° do ambiente observado, possibilitando a aquisição de um par de imagens omnidirecionais estéreas. Se o sistema for instalado na parte superior de um robô móvel, é possível extrair dados suficientes para a localização de objetos existentes ao seu redor, tal como os trabalhos de Grassi-jr, 2002, Deccó, 2004 e Scaramuzza, 2008.

Neste trabalho será realizado um estudo direcionado a um sistema de visão omnidirecional catadióptrico, com espelho hiperbólico de lobo duplo, e as possibilidades de utilização desse sistema no processo de mapeamento de ambientes. O teste de validação do sistema será realizado a partir do mapeamento simulado de um ambiente, gerando assim, uma grade de evidencias, onde o sistema é embarcado em um robô móvel.

Outro fator importante desenvolvido nesse trabalho é a utilização de um modelo que utiliza grades de evidência para o armazenamento de dados extraídos do ambiente. O mapa de evidências descreve qual a probabilidade de existência de um obstáculo em uma determinada região do ambiente mapeado. A probabilidade armazenada nas células da grade é atualizada a cada nova imagem extraída dessa região. Quanto mais atualizações existirem, mais preciso se torna o mapa de evidências.

1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O principal objetivo do trabalho consiste em utilizar um sistema de visão omnidirecional catadióptrico estéreo, com espelho hiperbólico de lobo duplo, para gerar um mapa de evidências que possibilite a navegação de robôs móveis em um ambiente desconhecido, ou seja, o trabalho reúne as principais características da visão omnidirecional catadióptrica, da visão estérea e da grade de evidências para possibilitar o mapeamento de ambientes desconhecidos, motivando assim o seu estudo. A escolha desses elementos podem ser melhor compreendidos observando a Tab. (1.1), que descreve as principais características do sistema em estudo.

Tabela 1.1 - Vantagens e limitações do sistema proposto.

Elementos do Trabalho	Vantagens	Limitações	Referências
Visão omnidirecional catadióptrica.	Possibilita a visualização de 360° ao redor do robô.	Estão relacionadas com a qualidade do espelho e com a precisão na montagem do sistema.	Gluckman e Nyar, 1998 Ishiguro et al, 1998 Deccó, 2004 Scaramuzza, 2008 Kawanishi et al, 2009 Taha et al, 2010 Matsumoto et al, 2004

Espelho com lobo duplo.	Possibilita a aquisição de um par de imagens estéreas sem a necessidade de deslocamento do robô.	Está relacionada com as dificuldades existentes no projeto do perfil do espelho e na sua fabricação.	Cabral et al, 2004 Cabral et al, 2007 Souza e Motta, 2007
Visão estereoscópica.	Possibilita a determinação da geometria do ambiente a partir de um par de imagens planas.	Os principais problemas estão relacionados com a identificação dos pontos correspondentes pertencentes ao par de imagens estéreas que representam um mesmo ponto do ambiente.	Adorni et al, 2001 Deccó, 2004 Cabral et al, 2007 Souza e Motta, 2007 Jain et al, 1995
Grades de evidências.	Armazenam dados probabilísticos a respeito da posição de objetos existentes no ambiente, reduzindo os erros de mapeamentos causados pelo sistema.	O processo de obtenção da grade de evidência tem um auto custo computacional.	Elfes, 1987 Moravec, 1996 Martin e Moravec, 1996 Grassi-jr, 2002 Souza, 2003 Santana Souza, 2008

1.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

Para atingir o objetivo principal é necessário resolver alguns problemas específicos e inerentes à realização do mapeamento de ambientes desconhecidos a partir de imagens omnidirecionais estéreas, adquiridas por um sistema de visão omnidirecional catadióptrico com espelho hiperbólico de lobo duplo, associado a grades de evidências. O mapeamento é direcionado a ambientes não estruturados e limitado a objetos existentes no campo de visão do sistema, que será definido posteriormente. Neste contexto, os objetivos secundários são:

- Definir o sistema de visão omnidirecional: Essa etapa tem como objetivo desenvolver um sistema de visão omnidirecional que possa ser embarcado em um robô móvel de médio porte, semelhante ao robô Nomad XR4000 (NOMADIC

TECHNOLOGIES, 1999), de maneira que as imagens omnidirecionais estéreas capturadas, tenham resolução suficiente para possibilitar a localização de obstáculos no ambiente a ser navegado pelo robô;

- Definir o perfil do espelho: Como o espelho a ser projetado tem lobo duplo é necessário considerar o campo de visão de cada lobo, de maneira que essas regiões tenham uma grande área de intersecção, possibilitando assim, a geração de uma imagem omnidirecional estérea do ambiente observado, sem a necessidade de locomoção do robô;
- Identificar o contorno dos objetos: Durante o processamento da imagem omnidirecional estérea é necessário identificar as características de interesse na imagem. Para esse trabalho serão utilizados os pontos que determinam os contornos dos objetos, o que torna necessário a utilização de técnicas de realce de bordas;
- Determinar os pontos de correspondências: Essa é a etapa crítica do processamento da imagem omnidirecional estérea e por esse motivo será desenvolvido nesse trabalho uma técnica específica para identificar um par de pontos equivalentes em uma imagem omnidirecional estérea concêntrica, onde as imagens geradas pela reflexão dos dois lobos do espelho estão em escalas diferentes, porém, os pontos equivalentes sempre estão localizados na mesma reta radial com origem no centro da imagem;
- Definir a distância radial entre o centro de projeção da imagem e o ponto de interesse observado no ambiente: A determinação da coordenada polar do ponto que pertence ao ambiente é basicamente o principal objetivo desse trabalho, pois a partir dessa informação é possível construir um mapa navegável, porém o sensor omnidirecional utilizado gera dados imprecisos;
- Definir o modelo probabilístico do sistema de visão omnidirecional a se utilizado na geração da grade de evidências: Como o sistema de visão proposto gera dados incertos optou-se por utilizar grades de evidências para representar o ambiente mapeado e para criar uma grade confiável será desenvolvido um modelo probabilístico Gaussiano que defina a variância do sensor utilizado, de maneira a reduzir os erros de posicionamento dos objetos existentes no ambiente;

- Atualizar o mapa global: Para cada imagem omnidirecional estérea extraída do ambiente será gerado um novo mapa local, que posteriormente será incorporado a um mapa global. Para realizar a navegação do ambiente o robô utiliza o mapa global que é atualizado a cada instante.

1.3 CONTRIBUIÇÃO DESTE TRABALHO

A principal contribuição desta tese é desenvolver uma metodologia que utiliza um sistema de visão omnidirecional catadióptrico com espelho de lobo duplo, associado a técnicas de processamento de imagens estérea na geração de grades de evidências, de maneira a possibilitar a navegação de robôs móveis com o sistema embarcado. Em se tratando de produção científica, serão produzidos 2 artigos. O primeiro descreve o projeto do sistema omnidirecional e o segundo demonstra o mapeamento simulado que foi realizado para validação do trabalho.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

No Capítulo 2 serão mostradas as principais características e os principais trabalhos desenvolvidos em sistema de visão omnidirecional catadióptrico, em técnicas de processamento de imagem omnidirecional estérea e na geração de grade de evidências, a partir de dados fornecidos por sensores insertos.

No Capítulo 3 serão descritos, todas as ações desenvolvidas no trabalho, tais como, o projeto do sistema omnidirecional catadióptrico proposto e o mapeamento simulado de ambientes, tornando possível a sua reprodução.

No Capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos durante o trabalho e a descrição analítica dos dados levantados, por uma exposição sobre o que foi observado e desenvolvido nesta pesquisa.

Finalmente, no Capítulo 5 serão descritos os resultados obtidos, as possíveis contribuições, vantagens ou desvantagens deste trabalho. Também serão citados alguns pontos que poderiam ser abordados em trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho é subdividida em 3 tópicos: Sistema de Visão Omnidirecional Catadióptrico, Visão Estéreo Omnidirecional e Grades de Evidências. O estudo destes tópicos possibilita a determinação das técnicas a serem utilizadas para o mapeamento de ambientes desconhecidos.

2.1 SISTEMA DE VISÃO OMNIDIRECIONAL CATADIÓPTRICO

Um sistema de visão omnidirecional catadióptrico consiste na instalação de um espelho convexo na frente de uma câmera, possibilitando a aquisição de imagens de um ambiente com um ângulo de visão de 360°, ao redor do eixo focal da câmera. Com isso se tem representado, em uma única imagem, todo o ambiente ao seu redor. Esse sistema pode ser montado com a utilização de uma câmera, que terá o seu campo de visão direcionado a um espelho convexo, que reflete o ambiente ao seu redor Fig. (2.1). A imagem refletida é projetada no CCD (charge- coupled -device) da câmera, que por sua vez transforma energia luminosa em imagem digital.

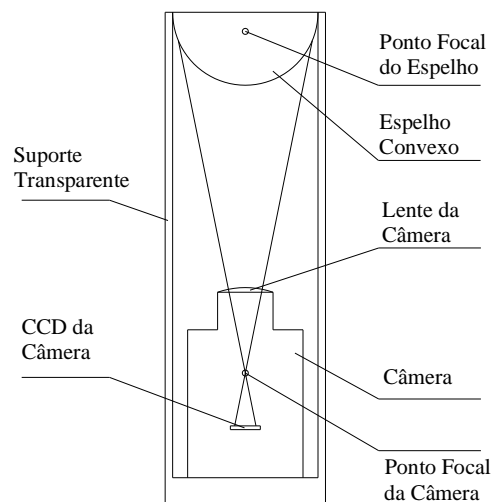


Figura 2.1 – Corte esquemático do sistema de visão omnidirecional catadióptrico.

O sistema omnidirecional catadióptrico apresenta uma grande variação de modelos (Cabral et al, 2007, Souza e Motta, 2007, Deccó, 2004, Scaramuzza, 2008), especificamente no que

diz respeito ao perfil do espelho, ao modelo da câmera e ao tipo de lente utilizada. Dependendo do conjunto escolhido a imagem gerada pode apresentar maior ou menor distorção. Essa distorção influencia diretamente na possibilidade da utilização da imagem em um sistema de mapeamento de ambientes, a ser utilizado por um robô móvel.

A câmera a ser empregada em um sistema omnidirecional catadióptrico pode ser de projeção ortográfica ou perspectiva, ter o CCD retangular ou circular com variação no número de pixel e pode ainda ter uma grande variação na distância focal e no tipo de lente utilizada. Para qualquer tipo de câmera escolhida é possível definir os parâmetros intrínsecos da câmera, o que facilita o processamento da imagem.

A construção do espelho é a parte crítica no desenvolvimento do sistema omnidirecional catadióptrico. Este raramente é encontrado comercialmente, em que todos os parâmetros já estejam especificados, e o que se faz normalmente é desenvolver um projeto, tanto para a determinação do perfil escolhido como para o processo de fabricação.

O perfil do espelho pode variar dependendo da aplicação e da tecnologia disponível para a sua fabricação. Dentre os diversos perfis possíveis de serem utilizados são citados o espelho esférico (Vassallo, 2004, Grassi-Jr et al, 2001), o espelho cônico (Yagi, 1999), o espelho projetado por Hicks e Bajesy (1999), que possui um perfil com propriedades que preservam na imagem a geometria de um plano perpendicular ao eixo de simetria do espelho, o espelho parabólico (Nayar, 1997) e o espelho hiperbólico (Bunschoten, 2003, Corrêa, 2004).

O espelho também pode ser projetado com a associação de perfis diferentes, tal como um espelho com lobo triplo, em que cada perfil é responsável pela visualização de uma região diferente do ambiente (Gaspar *et al*, 2002), o espelho criado com a associação de um espelho plano com um espelho convexo (Lima et al, 2001) e o espelho desenvolvido por Sturze e Srinivasan (2005) que possibilita a obtenção de uma imagem omnidirecional estéreo da parte frontal do sistema. Para um sistema omnidirecional catadióptrico a parte frontal é normalmente uma região cega, pois o espelho está posicionado na frente da câmera.

Independente do perfil escolhido, o espelho que será utilizado deve apresentar uma superfície espelhada com boa qualidade, tanto na fidelidade ao perfil quanto no acabamento superficial. Um dos métodos que pode ser utilizado para testar a funcionalidade do projeto do espelho é a simulação computacional (Souza e Motta, 2007). A simulação computacional da obtenção de imagens omnidirecionais, a partir de um espelho convexo, pode determinar se o perfil escolhido é adequado para sua aplicação e qual deve ser o acabamento da superfície do espelho para que a reflexão do ambiente proporcione a obtenção de imagens claras e sem distorções.

A ampla visão do sistema omnidirecional catadióptrico possibilita a sua aplicação em diversas áreas, tais como a reconstrução de ambientes em 3D (Kawanishi et al, 2009), a navegação de robôs móveis (Taha et al, 2010 e Matsumoto et al, 2004), o controle de veículos operados remotamente e a vigilância de ambientes (Ishiguro,1998). A navegação de robôs móveis com a utilização de um sistema de visão omnidirecional catadióptrico permite um alto grau de autonomia ao conjunto e por isso tem sido foco de diversas pesquisas (Moravec, 1996, Svoboda et al., 1997, Nayar, 1997, Winters, 2001, Deccó, 2004 e Cabral et al, 2007). As limitações do sistema estão relacionadas com a definição da imagem obtida, a qual depende do perfil escolhido para o espelho e da qualidade do acabamento superficial.

Winters (2001) apresentou uma metodologia para a navegação de robôs móveis, baseada em visão computacional com sistema omnidirecional catadióptrico. Uma das principais observações é que o sistema de navegação deve englobar aspectos característicos do sensor e a escolha adequada da representação espacial do ambiente, associados com a autolocalização e com um sistema de controle local. O método desenvolvido tem como base a representação adequada do ambiente, fundamental para uma boa navegação. O trabalho desenvolvido aborda o problema da autonomia, em que a visão é o sensor principal para a navegação de robôs móveis em ambientes estruturados. A visão proporciona alta densidade de informações sobre o meio ambiente, que é utilizado com sucesso por muitos sistemas biológicos, para resolver um grande número de diferentes tarefas.

No trabalho desenvolvido por Winters (2001) foram utilizados dois projetos para o sistema omnidirecional catadióptrico, um que utiliza uma câmera convencional, associada a um

espelho esférico e outro que utiliza uma câmera log-polar, associada a um espelho, que tem como principal característica manter constante a resolução vertical da imagem. Nenhum desses sistemas tem centro único de projeção e necessitam de calibração para que sejam reduzidos os borramentos causados pela superposição de imagens.

Uma contribuição importante no trabalho de Winters (2001) foi a definição de uma representação adequada do ambiente como um elemento-chave, que possibilita a navegação de robôs móveis. Foi considerado que a ênfase deve ser colocada no ambiente adequado, em vez de uma representação muito precisa e confiável do meio ambiente. O principal fator a ser considerado é que o robô utilizado foi projetado para percorrer longas distâncias dentro do ambiente, além de o método escolhido ser de baixo custo computacional, tornando possível a navegação em tempo real.

Adorni et al (2001) utilizaram em seu trabalho um sistema híbrido para desempenhar funções de navegação. O sistema é composto por uma câmera padrão de projeção perspectiva e um sistema de visão omnidirecional catadióptrico Fig. (2.2). A fusão dos dados dos dois sensores tem como objetivo reduzir as limitações desses sensores e aumentar o leque de possibilidades de utilização.



Figura 2.2 - Sistema híbrido (Adorni et al, 2001).

O estudo de Adorni et al (2001) descreve o dispositivo com o qual o sistema de visão se baseia e a sua utilização como um sistema estéreo para a detecção de obstáculos Fig. (2.3, c) em um ambiente semi-estruturado. O sistema estéreo é formado pela intersecção da imagem capturada pela câmera convencional Fig. (2.3, b), direcionada para frente do robô,

com uma imagem de 360° do ambiente Fig. (2.3, a), gerada pelo sistema omnidirecional catadióptrico instalado na parte superior do robô.

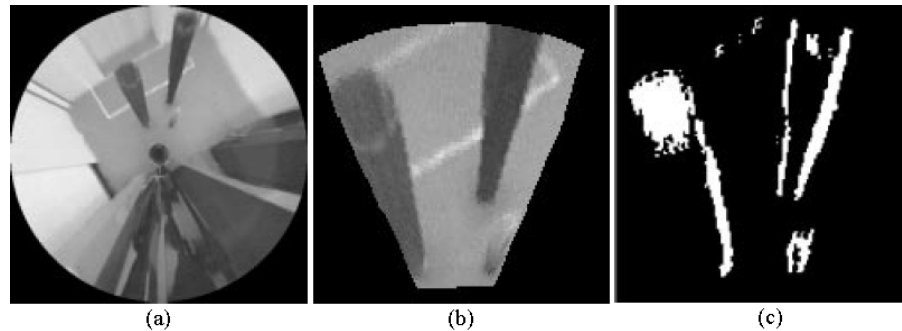


Figura 2.3 - Sistema híbrido: (a) imagem omnidirecional; (b) imagem convencional; (c) mapa gerado (Adorni et al, 2001).

Com o aumento da velocidade de processamento dos computadores e com a redução do custo é cada vez mais comum, a utilização da visão computacional para a navegação de robôs moveis em tempo real. Em muitos casos, robôs autônomos utilizam a fusão de dados provenientes de diversos tipos de sensores, tais como, os trabalhos desenvolvidos por Scaramuzza (2008) e Yaguchi et al (2009), que utilizam um sistema de visão omnidirecional associado a um scanner laser para reconstruir um ambiente em 3D e o trabalho desenvolvido por Maeda and Shimizuhira (2007) que utilizaram a fusão de dados de três sistemas de visão omnidirecionais catadióptricos, para realizar navegação autônoma de um robô móvel . No entanto, trabalhar com dados originados de sensores diferentes torna o processamento mais complexo, necessitando assim, da aplicação de técnicas de fusão de sensores.

O sistema de visão omnidirecional é vantajoso quando trabalha com a determinação da velocidade de um objeto alvo (Adorni et al, 2001), pois tem uma ampla visão do ambiente, mantendo assim o objeto focalizado por mais tempo do que uma câmera convencional. Entretanto, o sistema omnidirecional têm como uma de suas limitações a baixa precisão da localização do objeto. Por estas razões, em vários casos (Schroeter et al, 2005, Wilhelm et al 2002), a visão omnidirecional foi integrada a diferentes tipos de sensores, para tornar a detecção e a localização de obstáculos mais precisa e robusta.

A detecção de obstáculos é uma das principais tarefas exigidas na navegação de robôs autônomos. No trabalho de Adorni et al (2001) foi utilizado um sistema estéreo para a localização de possíveis obstáculos. O sistema omnidirecional que compõe o sistema híbrido torna mais complicado o processamento das informações obtidas. No entanto, a sua utilização aumenta as informações referentes ao ambiente, possibilitando o mapeamento da região de intersecção das imagens omnidirecional e convencional. O autor sugeriu que o sistema descrito seja utilizado em ambientes dinâmicos, possibilitando o rastreamento de objetos móveis.

Grassi-Jr (2002) realizou um estudo em um sistema de visão omnidirecional catadióptrico, desenvolvido pelo Grupo de Percepção Avançada do Laboratório de Automação e Sistemas do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da EPUSP. Foram realizadas duas implementações, uma com a associação de uma câmera de projeção perspectiva com um espelho esférico, que foi construído a partir da cromagem da superfície interna de uma cúpula semiesférica de vidro e a outra com a associação de uma câmera de projeção perspectiva com um espelho hiperbólico de lobo simples, que foi construído através da usinagem de um cilindro de alumínio em uma torno CNC convencional e posterior usinagem em um torno de ultraprecisão, a fim de conferir à peça um acabamento espelhado.

Nesse trabalho (Grassi-Jr, 2002), o espelho hiperbólico tem diâmetro máximo de 40 mm, resultando em um sistema omnidirecional compacto, o que possibilita a sua utilização em um robô móvel de médio porte. Um espelho esférico também foi construído para que a imagem obtida por esse sistema pudesse ser comparada com as do sistema hiperbólico. As imagens adquiridas com o uso do espelho hiperbólico mostraram ter uma boa distribuição da resolução, se comparadas com as imagens adquiridas com um espelho esférico. A melhor qualidade da imagem adquirida pelo sistema que contém o espelho com perfil hiperbólico é garantido pela propriedade do centro único de projeção e pela técnica de processamento utilizada, que leva em consideração o perfil do espelho projetado. Os algoritmos implementados permitem a obtenção de imagens panorâmicas e perspectivas em tempo real.

O sistema de visão omnidirecional catadióptrico com espelho hiperbólico foi embarcado em um robô móvel Fig. (2.4) e aplicado em uma tarefa de rastreamento de objetos. Essa

tarefa é realizada com a realimentação em tempo real de informações visuais do alvo obtidas pelo sistema de visão.

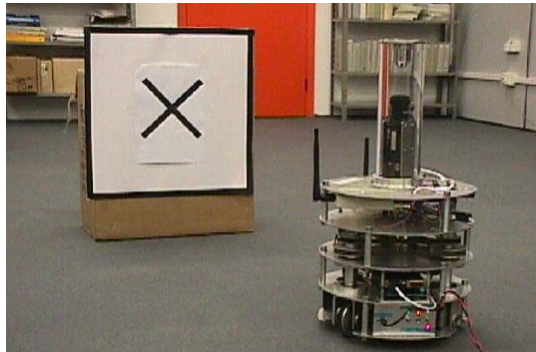


Figura 2.4 - Robô móvel com sistema omnidirecional embarcado e alvo a ser seguido (Grassi-Jr, 2002).

Utilizando o sistema desenvolvido, foi proposta uma solução de controle servo visual que possibilita um robô móvel rastrear um alvo com padrões conhecidos, dentro de um ambiente fechado. O sistema de controle do Robô utiliza informações visuais extraídas de imagens capturadas pelo sistema omnidirecional catadióptrico embarcado. As imagens capturadas realimentam em tempo real a malha de controle do robô, possibilitando o rastreamento. Para obter as informações visuais do alvo, foi escolhido um método de rastreamento visual que utiliza uma região definida como referência e faz o rastreamento baseado na minimização do erro calculado pela soma do quadrado da diferença, ou SSD (Sum of Square Differences), entre a região de referência definida e a imagem atual. O método de rastreamento retorna as transformações sofridas pela região de referência tornando possível determinar se houve rotação, translação ou mudança no fator de escala da região de referência considerada como alvo. Esse método de rastreamento considera o alvo como uma superfície plana e rígida em que os vértices dessa superfície são considerados como referências para a determinação da direção em que o alvo se move, sem a necessidade da determinação da posição do objeto alvo com relação ao ambiente ao qual está se locomovendo.

Gaspar et al (2002) apresentam uma metodologia geral para o projeto de espelhos que compõem um sistema de visão omnidirecional catadióptrico, considerando as propriedades de projeções lineares, ou seja, as constantes de resolução da câmera. A escolha das

propriedades que devem ser preservadas pelo sistema catadióptrico é relacionada com a sua aplicação específica, tais como o monitoramento visual e a navegação. Foram consideradas as constantes verticais, as constantes horizontais e a resolução angular.

Com uma resolução vertical constante é possível produzir imagens, onde objetos a uma distância fixa a partir do eixo óptico da câmera terão sempre o mesmo tamanho da imagem, independente das suas coordenadas verticais. Como um exemplo prático dessa visualização geometria é citado a varredura de sinais ou texto sobre a superfície de objetos com um mínimo de distorção.

Com uma resolução horizontal constante é garantido que linhas radiais são mapeadas linearmente na imagem, facilitando a medição de distâncias e ângulos a partir da imagem, tornando o algoritmo de navegação mais simples.

Para realizar o estudo (Gaspar et al, 2002), foi utilizado um espelho com lobo triplo Fig. (2.5). O perfil superior representado por M_3 e visualizado no CCD da câmera na região R_3 , que é utilizado para obter uma imagem com resolução vertical constante ao longo da linha L_2 e os perfis representados por M_1 e M_2 e visualizados no CCD da câmera pelas regiões R_1 e R_2 respectivamente, que são utilizados para obterem uma imagem com resolução horizontal constante ao longo da linha L_1 . O autor relata em sua conclusão que obteve bons resultados em seus ensaios laboratoriais e sugere que o espelho fabricado seja utilizado em robôs de monitoramento e navegação.

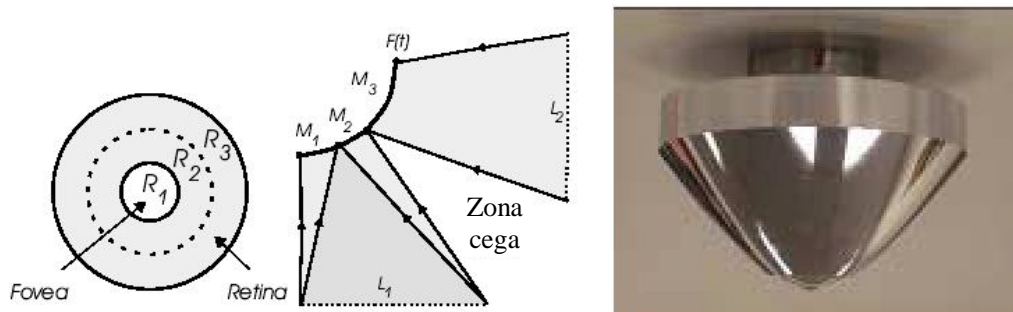


Figura 2.5 - Espelho com lobo triplo (Gaspar et al, 2002).

Vassallo (2004) propôs uma abordagem para a adaptação e aprendizagem de tarefas em robótica, com a utilização de um robô tipo Pioneer2-DX Fig. (2.6), que está equipado com dois sistemas de visão. Uma câmera perspectiva convencional colorida Sony aponta para frente do robô e um sistema de visão omnidirecional catadióptrico, formado por um espelho esférico e uma câmera de projeção perspectiva monocromática. O sistema omnidirecional catadióptrico está acoplado e alinhado com o centro de rotação do robô e é responsável pela aquisição de imagens omnidirecionais do ambiente ao seu redor.



Figura 2.6 - Robô Pioneer2-DX com sistema de visão embarcado (Vassallo, 2004).

A aprendizagem do robô ocorre através de uma hierarquia de ações onde a auto-observação, que define sua posição e orientação e a imitação da trajetória de objetos móveis, baseadas em representações sensoriomotoras, permitem ao robô conhecer sua capacidade sensorial e motora e aprender, gradativamente, ações cada vez mais complexas (Vassallo, 2004). Uma aplicação em robótica móvel foi implementada com o intuito de testar e ilustrar a abordagem proposta.

Inicialmente, no trabalho da autora Vassallo (2004) foi realizada uma etapa de autoconhecimento, onde o robô explorou sua capacidade motora e sensorial. Posteriormente, foi efetuado um mapeamento sensoriomotor que relacionou sua percepção com seus movimentos, permitindo o reconhecimento de movimentos que foram representados diretamente de forma motora. Depois, o mapeamento sensoriomotor foi

utilizado juntamente com a imitação, para se aprender um vocabulário básico de ações. Assim, enquanto observava e imitava outros indivíduos, o robô se tornou capaz de aprender, executar e reconhecer ações elementares com algum objetivo e significado. Finalmente, numa terceira etapa, o robô pôde aprender ações mais complexas e sofisticadas voltadas principalmente para a realização de tarefas. Essas novas ações foram formadas por sequências ou combinações de ações básicas aprendidas anteriormente.

Para a implementação foi utilizado um robô móvel, dotado de dois sistemas de visão, um perspectivo e outro omnidirecional. Um mapeamento visuomotor relaciona as velocidades linear e angular do robô e o fluxo óptico nas imagens omnidirecionais. Esse mapeamento foi implementado através da estimativa de automovimento, tanto de forma analítica quanto através do uso de redes neurais. Através de imitação, realizada com o rastreamento de um retângulo colorido usando-se a câmera perspectiva, o robô aprendeu um vocabulário motor básico, o qual foi utilizado para o aprendizado e realização de tarefas e ações mais complexas como mapeamento e navegação topológica. Imagens omnidirecionais foram associadas ao mapa gerado, enquanto palavras motoras foram utilizadas para definirem os arcos de trajetórias, necessários para locomoção do robô, dando ao mapa uma representação motora adaptada ao robô utilizado.

Cabral et al (2007) apresentaram uma nova abordagem para a obtenção de imagem panorâmica a partir de imagem gerada por um sistema de visão omnidirecional, projetado a partir da associação de uma câmera de projeção perspectiva com um espelho de perfil hiperbólico de lobo duplo, fabricado em alumínio polido Fig. (2.7).



Figura 2.7 - Sistema de visão omnidirecional estéreo (Cabral et al, 2007).

O perfil foi projetado para que o campo de visão de um espelho seja igual ao do outro espelho. Para se ter o mesmo campo de visão os autores (Cabral et al, 2007) deslocaram horizontalmente o ponto focal F_E em relação ao ponto focal F_I , a fim de obter os ângulos de visão ϕ_{max} e ϕ_{min} iguais em ambos os espelhos Fig. (2.8) e o deslocamento vertical Δz_{IE} , garante a aquisição do par de imagens estéreas, pois ter-se-ão duas imagens do mesmo ambiente visto de posições diferentes (Ponto focal F_I e Ponto focal F_E).

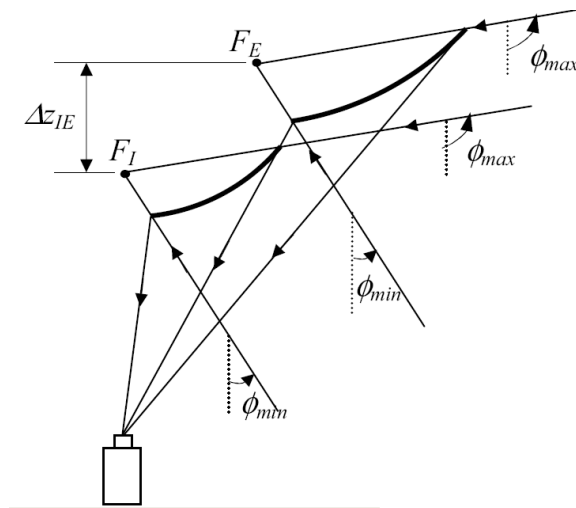


Figura 2.8 - Espelho de lobo duplo com foco deslocado horizontalmente (Cabral et al, 2007).

O sistema desenvolvido gera uma imagem omnidirecional estérea Fig. (2.9, a), que posteriormente é transformada em uma imagem panorâmica Fig. (2.9, b), que serve como elemento para a determinação do mapa do ambiente Fig. (2.9, c), através da utilização de técnicas de visão estereoscópica.

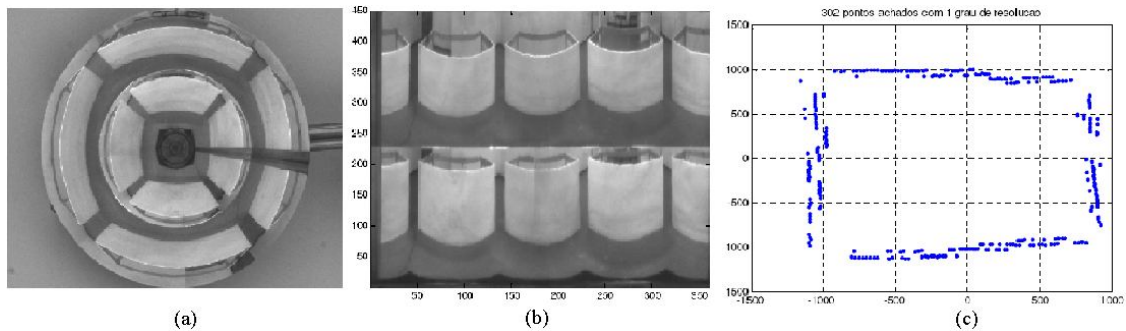


Figura 2.9 - Mapeamento com espelho de lobo duplo: (a) imagem omnidirecional; (b) imagem panorâmica; (c) mapa gerado (Cabral et al, 2007).

Lin e Bajcsy (2003) utilizaram um sistema de visão omnidirecional catadióptrico composto por duas câmeras de alta resolução associadas a um espelho cônico, embarcado em um robô móvel Fig. (2.10). Uma câmera é instalada na frente do espelho e a outra é instalada perpendicularmente à linha de projeção da primeira câmera. A câmera instalada na frente do espelho captura a imagem refletida diretamente pelo espelho cônico e a segunda câmera captura a imagem refletida pelo espelho cônico e posteriormente por um filtro refletivo. Esse sistema tem a vantagem de gerar uma imagem omnidirecional estérea com a utilização de um espelho cônico simples, mas tem a desvantagem de utilizar duas câmeras, o que torna o sistema pouco compacto e com maior custo.

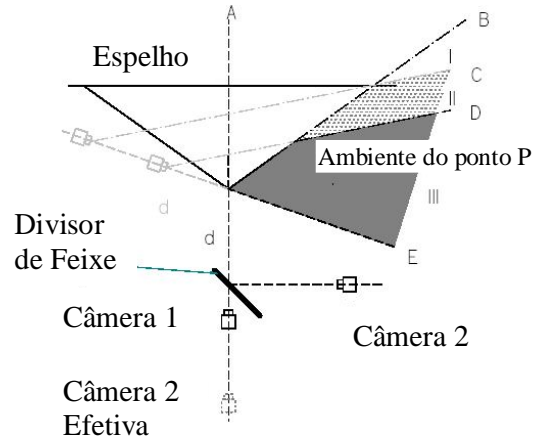


Figura 2.10 – Sistema de visão omnidirecional composto pela associação de duas câmeras com um espelho cônico embarcado em um robô móvel (Lin e Bajcsy, 2003).

2.1.1 Centro único de projeção

Para se obter uma imagem nítida em um espelho esférico de raio R Fig. (2.11), é preciso que o raio de luz F originado do ponto P incida na superfície S do espelho, paralelamente ou pouco inclinados em relação ao eixo principal K , ou seja, o ângulo de incidência i tem que ser pequeno. Assim, para se ter nitidez na imagem, o ângulo de abertura j do espelho tem que ser inferior a 10 graus, pois a partir desse ângulo ocorre superposição de imagens. Essas observações foram descritas por *Johann Carl Friedrich Gauss* e caracterizam o espelho esférico de Gauss (Halliday, D.; Resnick R.; Walker J., 1995).

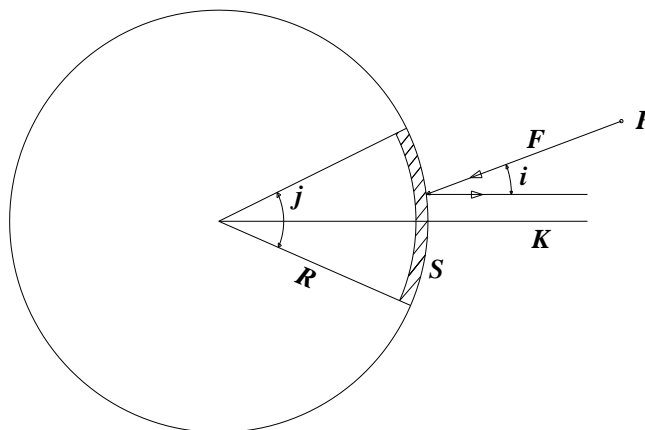


Figura 2.11 - Espelho esférico de Gauss.

Quando o ângulo de abertura do espelho começa a crescer os raios deixam de passar pelo ponto focal, gerando assim vários pontos de projeção, tornando a imagem borrada (superposição de imagens). Quando um sistema de visão omnidirecional catadióptrico tem centro único de projeção, fica garantido que cada ponto do espaço tridimensional apresente uma única projeção no CCD da câmera, propiciando uma imagem livre de distorções e borramentos.

Uma das maneiras de se obter o centro único de projeção em um sistema omnidirecional catadióptrico é a utilização de um espelho com perfil parabólico S_p associado a uma câmera de projeção ortográfica Fig. (2.12, a) (Nayar, 1997, Winters, 2001). Os feixes de luz originados pelos pontos a_1 e b_1 são refletidos pela superfície do espelho S_p , nos pontos a_2 e b_2 em direção ao CCD da câmera, originando os pontos a_3 e b_3 respectivamente. Como o perfil do espelho é parabólico, os raios refletidos a_2a_3 e b_2b_3 serão paralelos, havendo então a necessidade de uma câmera que tenha essa característica de aquisição de imagens, que no caso citado será a de projeção ortográfica.

Outra maneira de se obter o centro único de projeção é a associação de um espelho com perfil hiperbólico S_h , com uma câmera de projeção perspectiva Fig. (2.12, b) (Deccó, 2004, Grassi-Jr, 2002, Geyer and Daniilidis, 2000). Os feixes de luz originados pelos pontos a_1 e b_1 são refletidos pela superfície do espelho S_h , nos pontos a_2 e b_2 em direção ao CCD da câmera, originando os pontos a_3 e b_3 respectivamente. Como o perfil do espelho é hiperbólico os raios refletidos a_2a_3 e b_2b_3 são direcionados ao ponto focal F_2 , que deve coincidir com o ponto focal da câmera de projeção perspectiva.

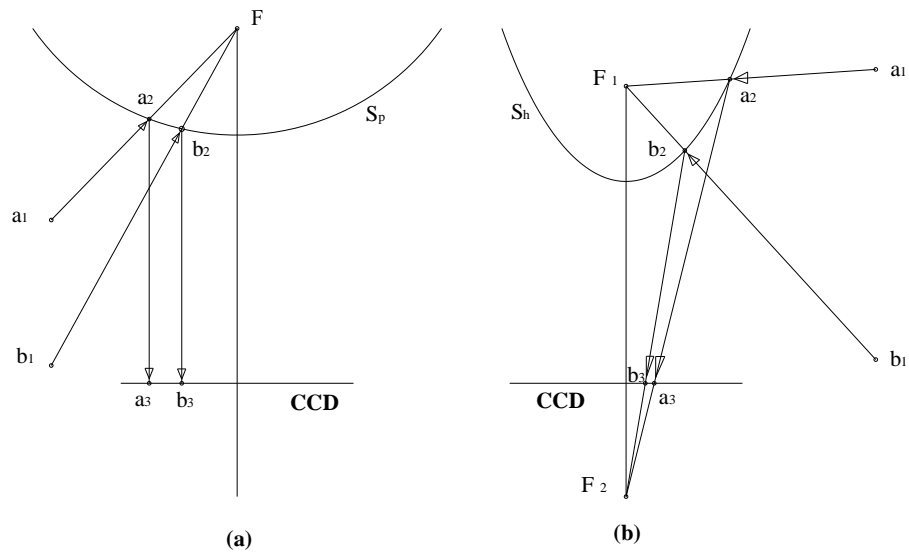


Figura 2.12 - Perfis de espelho: (a) parabólico; (b) e hiperbólico.

Em visão omnidirecional a existência de um sistema que tem centro único de projeção apresenta como principais vantagens e desvantagens:

- A inexistência de superposição de imagens no CCD da câmera. Fato que aumenta a nitidez e facilita no processamento da imagem;
- com a variação dos parâmetros do perfil do espelho é possível determinar qual a região do ambiente que deve ser visualizada, aumentando as possibilidades de utilização do sistema;
- o espelho hiperbólico e o parabólico devem apresentar um perfil bem definido, aumentando assim a dificuldade do processo de fabricação. Normalmente esses espelhos são fabricados com a utilização de máquinas de grande precisão, o que aumenta o custo de produção;
- a montagem do sistema se torna mais difícil, pois é necessário que o eixo de simetria da câmera coincida com o eixo de simetria do espelho.

Realizando um estudo das possibilidades de fabricação do sistema omnidirecional estéreo, tais como, os diferentes tipos de perfis do espelho e o tipo de câmera utilizada, dos programas utilizados para o processamento da imagem estérea e da sua utilização prática, que pode ser mapeamento, navegação ou vigilância de ambientes é possível definir qual sistema deve ser implementado, ficando assim ao critério do pesquisador.

2.1.2 Espelho hiperbólico

O espelho de perfil hiperbólico tem sido utilizado por diversos autores (Baker and Nayar, 1999, Deccó, 2004 e Winters, 2001) para a montagem de um sistema de visão omnidirecional catadióptrico. A principal vantagem desse perfil é a existência de apenas um centro de projeção de imagem. Quando um sistema de visão omnidirecional apresenta centro único de projeção, fica garantido que cada ponto do espaço tridimensional obtenha uma única projeção no CCD da câmera, gerando assim imagens sem superposição.

Um sistema de visão omnidirecional catadióptrico com espelho hiperbólico pode ser utilizado em diversas aplicações associados à robótica móvel. Para um melhor entendimento da utilização desse sistema foram listados alguns trabalhos que utilizam espelho hiperbólico.

Grassi-Jr et al (2001) desenvolveu dois sistemas de visão omnidirecional catadióptricos, compostos por uma câmera de projeção perspectiva montada em frente a um espelho convexo. O primeiro sistema é composto por um espelho esférico de 70 mm de diâmetro e o segundo é composto por um espelho com perfil hiperbólico.

Para testar os sistemas desenvolvidos foram implementados dois métodos de retificação da imagem adquirida pelo sistema de visão omnidirecional. Esses métodos transformam a imagem adquirida pelo sistema em uma imagem panorâmica, facilitando a interpretação da imagem por seres humanos.

Observando os resultados apresentados e comparando a imagem adquirida com o espelho esférico, retificada pelo método de transformação direta de coordenadas Fig. (2.13), com a imagem adquirida com o espelho hiperbólico, retificada pelo método de transformação direta de coordenadas Fig. (2.14) e pelo método desenvolvido, que leva em consideração a

equação do espelho hiperbólico e a propriedade de centro único de projeção Fig. (2.15), comprova-se que ao se usar, no processo de retificação, a equação da superfície do espelho, juntamente com a propriedade de centro único de projeção do espelho hiperbólico, é possível obter uma imagem livre de certas distorções. Fato que é percebido com a observação da Fig. (2.15), na qual houve uma maior preservação da proporção dos objetos existentes no ambiente observado.



Figura 2.13 - Imagem adquirida com o espelho esférico retificada pelo método de transformação direta de coordenadas (Grassi-Jr et al, 2001).



Figura 2.14 - Imagem adquirida com o espelho hiperbólico retificada pelo método de transformação direta de coordenadas (Grassi-Jr , 2001).



Figura 2.15 - Imagem adquirida com o espelho hiperbólico retificada pelo método desenvolvido que leva em consideração a equação do espelho hiperbólico e a propriedade de centro único de projeção (Grassi-Jr et al , 2001).

O autor Cabral et all (2004) apresentou em seu artigo um sistema de visão omnidirecional catadióptrico estéreo, que utiliza um espelho com perfil hiperbólico de lobo duplo, associado a uma câmera de projeção perspectiva, com o seu eixo ótico alinhado com o centro do espelho. O espelho com perfil de lobo duplo possibilita a aquisição de um par de imagens estéreas do espaço à sua volta sem a necessidade de locomoção do sistema.

O perfil hiperbólico desenvolvido tem centro único de projeção, o que facilita na reconstrução tridimensional do ambiente e o fato de o espelho ser duplo proporciona em uma única imagem duas visões diferentes de um mesmo ambiente Fig. (2.16, a), uma na seção interna e outra na seção externa da imagem, definindo assim um par de imagens estéreas concêntricas, o que caracteriza uma imagem com coordenadas polares não lineares. Dependendo da aplicação, é necessário transformar a imagem obtida através do sistema de visão omnidirecional em uma imagem panorâmica. Este processo de transformação é denominado retificação da imagem e através dele se obtém imagens de fácil interpretação pelo homem (Cabral et all, 2004), ou imagens que podem ser trabalhadas por algoritmos de processamento de imagem de projeção perspectiva. Para obter uma imagem panorâmica Fig (2.16, b), foi utilizada uma projeção linear dos píxeis, em um cilindro concêntrico com a imagem omnidirecional.

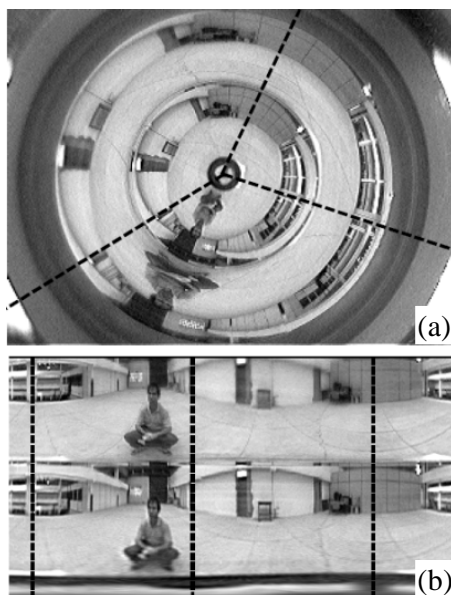


Figura 2.16 - Imagem omnidirecional estérea: (a) Imagem omnidirecional capturada pelo sistema de lobo duplo; (b) Imagem panorâmica obtida a partir da projeção linear da imagem omnidirecional em um cilindro (Cabral et all, 2004).

2.1.3 Calibração de sistema de visão omnidirecional catadióptrico

Para que um sistema de visão omnidirecional catadióptrico possa ser utilizado como sensor para a navegação de robôs móveis é necessário que sejam extraídas informações do ambiente onde se deseja navegar. Quanto mais preciso forem as informações obtidas, maiores serão as chances de a navegação ter sucesso. Para melhorar a qualidade dos dados obtidos pelo sistema omnidirecional é necessário montar o conjunto com grande precisão dimensional e dentro das especificações prévias. Esse método geralmente não é aplicável na maioria dos casos práticos (Benevenuti, 2001), pois são muitas as variáveis e em sua maioria de difícil determinação. Outro grande problema é a alteração da configuração original do sistema durante a sua utilização, pois pode ocorrer variação na temperatura do espelho, causada por modificações na temperatura do ambiente, bem como a presença de vibrações e impactos imprevistos pelo sistema. Esses fatores colaboram para que o conjunto se torne sensível às variações do ambiente, necessitando assim de uma calibração, ou seja, determinar a geometria do conjunto após a montagem. O principal objetivo da calibração de um sistema omnidirecional catadióptrico é definir a equação de projeção de pontos tridimensionais para o plano da imagem (Pereira et all, 2005), considerando-se a

equação do perfil do espelho e as características da câmera utilizada. Diversos autores utilizaram técnicas diferentes para a realização da calibração do sistema omnidirecional (Ramalingam, 2005, Pereira et all, 2005).

Pereira et all (2005) apresentaram um artigo que descreve um método geral de calibração de sistemas de visão omnidirecionais catadióptricos. O método proposto utiliza um modelo geral de projeção esférica, o que o torna um método independente da equação do perfil do espelho utilizado, permitindo a sua aplicação em diversos sistemas com espelhos de perfis diferentes, tais como o hiperbólico, o parabólico, o elíptico e o plano.

Para facilitar a calibração é necessário que o sistema tenha centro único de projeção, obtendo assim uma imagem geometricamente correta. Para se representar vários sistemas com centro único de projeção independentemente do espelho utilizado, o autor utilizou um modelo geral de projeção, que foi definido em Geyer e Daniilidis (2000) e Geyer e Daniilidis (2001). O modelo geral de projeção utilizado é dependente dos parâmetros l e m , sendo que l representa a distância do centro C da esfera até o centro de projeção O e m representa a distância do centro C da esfera até o plano da imagem B Fig. (2.17). Com a variação desses parâmetros é possível ajustar o modelo a diferentes tipos de perfis do espelho.

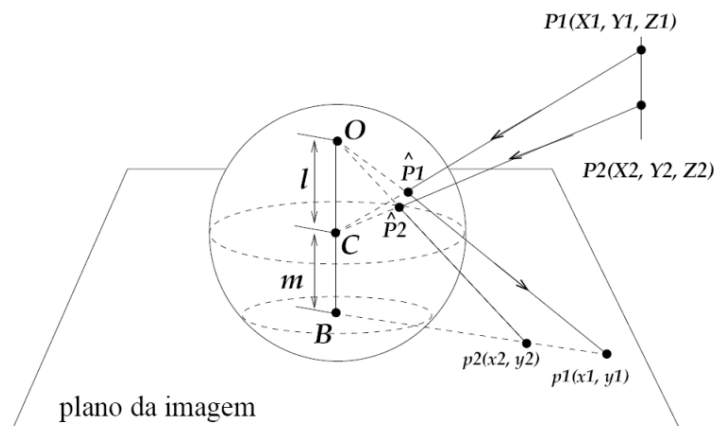


Figura 2.17 - Modelo geral de projeção esférica (Pereira et all, 2005).

O modelo geral de projeção utiliza o ponto \hat{P}_1 gerado pela intersecção da reta P_1C com uma esfera unitária para determinar a reta $O\hat{P}_1$, que prolongada até o plano de projeção B

da imagem, determina o ponto p_I , que representa o ponto P_I do ambiente, ou seja, o ponto 3D do ambiente $P(X, Y, Z)$ é representado pelo ponto $p(x, y)$ em 2D no plano da imagem. Os pontos $P(X, Y, Z)$ e $p(x, y)$ estão relacionados pela Eq. (2.1).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{l + m}{lR - Z} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Sendo que R é a distância entre o centro C da esfera e o ponto P do ambiente e pode ser obtido pela Eq. (2.2).

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (2.2)$$

O sistema de visão omnidirecional catadióptrico utilizado pelo autor (Pereira et al, 2006) é composto pela associação de uma câmera de projeção perspectiva colorida Gradiente modelo SC-80 com um espelho hiperbólico de lobo simples. Para calibrar esse sistema utilizando o modelo geral de projeção é necessário determinar os valores dos parâmetros l e m , bem como o centro da imagem omnidirecional. A calibração é feita através da minimização do modelo geral a partir da correspondência entre pontos $P(X, Y, Z)$ do ambiente e $p(x, y)$ da imagem. Os pontos de referências dos ambientes foram gerados com a utilização de uma grade 3D com quadrados de 20 cm de lado, pintados em preto e branco. O sistema de visão omnidirecional foi então posicionado no centro da grade de calibração Fig. (2.18). A partir da estrutura 3D e da imagem omnidirecional obtida, foram coletados vários pontos $P(X, Y, Z)$ do ambiente com seus respectivos correspondentes $p(x, y)$ da imagem. Os pontos coletados são utilizados na estimativa dos parâmetros de calibração.

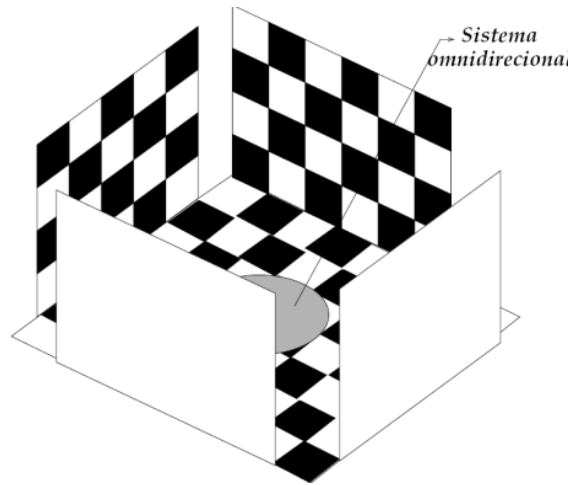


Figura 2.18 - Grade de calibração 3D (Pereira et all, 2006).

O centro da imagem omnidirecional foi definido pelo cruzamento das linhas radiais da imagem 2D, que são originadas pela projeção das linhas verticais do espaço 3D e os parâmetros l e m foram estimados usando-se um algoritmo não-linear baseado em mínimos quadrados. Com a definição do centro da imagem e dos parâmetros l e m o perfil do espelho fica ajustado ao modelo de projeção geral esférico e calibrado para utilização.

2.1.4 Vantagens e limitações do sistema de visão omnidirecional catadióptrico

O sistema de visão omnidirecional catadióptrico tem uma grande variação de modelos, seja no tipo de câmera utilizada, seja no perfil do espelho ou nos acessórios que ajudam na fixação do espelho na frente da câmera. Com tantas variações é presumível que o sistema adquira as vantagens e limitações de cada item que o compõe e desenvolva características próprias do conjunto.

Para desenvolver um trabalho em mapeamento de ambientes é necessário conhecer as principais características do sensor que será utilizado. Com um conhecimento prévio das características do sensor é possível realizar um processamento de dados de maneira a obter vantagens de suas características apropriadas e minimizar os efeitos das suas limitações. As principais vantagens e limitações de um sistema de visão omnidirecional catadióptrico são:

- A possibilidade da visualização de 360° do ambiente observado, com a utilização de apenas uma câmera. A navegação de robôs móveis com a utilização de um sistema omnidirecional permite um alto grau de autonomia ao conjunto, pois as imagens obtidas possuem alta densidade de informações a respeito do ambiente observado, por esse motivo, a visão omnidirecional tem sido foco de diversas pesquisas (Nayar, 1997, Ishiguro et al, 1998, Winters, 2001, Deccó, 2004, Svoboda *et al.*, 1997);
- certamente o sistema requer um processamento adicional da imagem caso se deseje obter uma imagem panorâmica a partir da imagem omnidirecional (Bunschoten, 2003, Corrêa, 2004, Zhu et all, 2000). A imagem panorâmica facilita a visualização e a interpretação do ambiente, mas para se obter uma imagem panorâmica a partir de uma imagem omnidirecional é necessário retificar a imagem com o auxílio de um software. Essa retificação pode ser baseada em transformação direta de coordenadas polares para coordenadas retangulares ou pelo método de projeção da imagem em um cilindro virtual localizado ao redor do sistema omnidirecional que a gerou. A projeção é realizada percorrendo-se o caminho inverso ao da luz e deve considerar a equação que define o perfil do espelho;
- uma limitação bastante expressiva está relacionada com a definição da imagem obtida, a qual depende da resolução da câmera, do perfil escolhido e do acabamento superficial do espelho. O método de fabricação do espelho é de fundamental importância para um bom acabamento superficial. O espelho pode ser fabricado a partir do torneamento de um cilindro de alumínio em um torno CNC e posteriormente polido ou cromado, a fim que sua superfície adquira um acabamento espelhado. O polimento ou a deposição de material na superfície do espelho pode interferir no perfil projetado necessitando de uma calibração posterior. Outra maneira de obter uma superfície polida é a utilização de um torno de ultraprecisão com um incremento mínimo de 0,0001mm (Grassi-Jr , 2002). Esse método de espelhamento mantém o perfil projetado, mas aumenta o custo de fabricação do espelho. O autor Ishiguro, (1998) realizou um estudo que ajudou a desenvolver um sistema omnidirecional de baixo custo e de pequeno porte;

- uma imagem formada por um sistema omnidirecional catadióptrico, normalmente contém mais informações do meio observado do que a imagem gerada por uma câmera convencional. A alta densidade de informações contidas na imagem e sua ampla visualização tornam o sistema mais versátil e ideal para o mapeamento, reconstrução tridimensional de ambientes ou identificação de objetos em um ambiente desconhecido (Marchand and Chaumette, 2007), no entanto aumenta o custo computacional e a sensibilidade a erros;
- para fixar o espelho na frente da câmera, podem ser utilizados dois métodos. O primeiro fixa o espelho através de uma haste de pequena espessura que conecta a base da câmera à parte superior do espelho (Gaspar, 2003 e Cabral et al 2007). A haste de fixação cria uma região de sombra na imagem perdendo parte da visualização do ambiente. O segundo método fixa o espelho através de um tubo transparente (Vassallo et al, 2002 e Gong, 2008), que pode ser de vidro, acrílico ou policarbonato. A principal limitação desse método está relacionada com a refração da luz durante a passagem pela parede do tubo. A refração do feixe de luz causa uma deformação na imagem obtida e essa limitação pode ser corrigida com uma calibração adequada;
- o sistema omnidirecional catadióptrico é muito sensível a erros, por isso requer uma grande precisão dimensional no perfil do espelho, o autor Grassi-Jr, (2002) utilizou uma resolução de 0,0001 mm para obter uma boa imagem, fato que aumenta o custo do sistema, pois para se obter essa resolução, é necessário utilizar um torno de ultraprecisão. A sua sensibilidade é explicada pela necessidade de reflexão do feixe de luz originada do objeto em direção à câmera e pela grande área do ambiente que é representada em uma pequena área do elemento sensível da câmera, ou seja, uma pequena variação de posição na imagem pode causar uma grande variação de posição no ambiente;
- um robô móvel que mapeie um ambiente, com a utilização de um sistema de visão omnidirecional estéreo com espelho de lobo simples, necessita de locomoção para capturar o par de imagens estéreas (Bunschoten, 2003 e Svoboda et al, 1997). Como normalmente o sistema de localização do robô cria erros acumulativos de

posicionamento e de orientação, o programa de processamento das imagens trabalha com dados imprecisos, causando assim erros no mapa gerado.

2.2 VISÃO ESTÉREO OMNIDIRECIONAL

Os principais elementos necessários para a navegação robótica autônoma são a identificação do ambiente a ser navegado e a autolocalização do robô nesse ambiente. Uma das maneiras de se extrair informações da geometria de um ambiente desconhecido é a utilização da visão estérea. A estereoscopia pode ser passiva ou ativa e a escolha do método depende da aplicação e do ambiente a ser estudado (Coelho, 2002).

A estereoscopia passiva utiliza técnicas que analisam o problema da reconstrução da informação tridimensional de objetos a partir de um par de imagens que representam o mesmo local, capturadas de posições diferentes (Coelho, 2002). Para se obter um par de imagens estereoscópicas o deslocamento pode ser horizontal (Kin e Chung, 2003), vertical (Koyasu, 2002), rotacional (Svoboda e Pajdla, 2001) ou com múltiplos pontos (Zhu, 2001). O deslocamento espacial gera pequenas diferenças entre as imagens, chamadas de disparidades, quase imperceptíveis quando observadas separadamente. Com a utilização de um algoritmo e o conhecimento prévio dos parâmetros necessários, é possível “transformar” as diferenças entre as imagens em coordenadas tridimensionais, ou seja, determinar a localização de um ponto 3D no espaço, através da projeção desse ponto em dois planos de imagens. Essa técnica baseia-se na forma como se processa o sistema visual humano para obtenção da informação tridimensional do ambiente.

A estereoscopia ativa é uma técnica que utiliza luz estruturada, baseada na projeção controlada de um feixe de luz sobre a cena e na aquisição da luz refletida e capturada por um sensor, que pode ser uma câmera ou um sensor linear (Coelho, 2002). Em ambientes em que a iluminação pode ser controlada, a estereoscopia ativa retorna melhores resultados do que a estereoscopia passiva, dado que a luz projetada sobre o ambiente gera pontos luminosos que podem ser identificados com relativa facilidade durante o processamento da imagem. No entanto, em ambientes abertos ou não controlados essa técnica pode ser prejudicada pela grande quantidade de iluminação existente. Nesses casos é preferencial o método da estereoscopia passiva (Coelho, 2002).

Nesse trabalho será adotado a estereoscopia passiva como método de processamento de imagem omnidirecional catadióptrica, que para simplificação daqui por diante será citado apenas como estereoscopia.

A aplicação da estereoscopia no processamento de um par de imagens omnidirecionais estéreas é um método que possibilita o reconhecimento de ambientes estáticos ou dinâmicos, o reconhecimento e rastreamento de objetos ou a geração de um mapa de um ambiente desconhecido, que pode ser utilizado para navegação robótica. Por causa da sua grande aplicabilidade a estereoscopia omnidirecional tem sido utilizado em diversos trabalhos. Dentre eles serão citados, Gluckman et all, (1997), Zhu, (2001), Adorni, (2001), Decco, (2004) e Bunschoten, (2003).

Decco (2004) trabalhou no mapeamento de ambientes estruturados, utilizando um sistema de visão omnidirecional catadióptrico, composto por uma câmera de projeção ortográfica com CCD tipo log-polar, com os pixels dispostos em um arranjo circular, associado a um espelho de perfil hiperbólico de lobo simples. O conjunto é montado sobre um robô móvel, dotado com um sistema de posicionamento que utiliza encoder e motor de passo.

Para gerar um mapa local do ambiente, o sistema dispõe de um programa que utiliza estereoscopia como método de obtenção de imagem de profundidade a partir de um par de imagens planas de intensidades. Esse par de imagens representa o mesmo ambiente visto de ângulos diferentes, obtido com um pequeno deslocamento do robô. Com a fusão de diversos mapas locais é realizada a construção de um mapa global, que contém informações de posições dos vértices de todos os objetos visualizados no decorrer da navegação do robô. Nos resultados apresentados foram gerados mapas globais construídos com os pontos que apareceram em pelo menos três atualizações. Pontos com menos de três atualizações foram considerados como espúrios e não foram incluídos no mapa global.

Sturm (2002) e Adorni et all (2001) utilizaram uma associação entre um sistema de visão omnidirecional com uma câmera convencional. Com essa associação, o autor resolveu uma limitação do sistema omnidirecional estéreo, que consiste na formação de uma região não mapeada do campo de visão. Essa limitação é provocada por uma característica do próprio sistema estéreo, que utiliza a disparidade entre duas imagens estéreas para identificar a presença de obstáculos no ambiente observado. Portanto, é necessário definir a geometria

dos dois sensores de tal maneira que a disparidade não seja nula, o que provocaria uma região em que não seria possível a identificação dos objetos. Com a associação dos dois sensores a disparidade se torna constante para qualquer posição dos objetos no ambiente e resolve o problema, porém reduz o campo de visão do sistema ao campo de visão da câmera convencional.

Independente do tipo de aplicação um sistema de visão omnidirecional estéreo é dotado de diversas vantagens e desvantagens, que bem estudadas podem oferecer a um robô móvel uma grande capacidade de mapeamento e navegação em diversos tipos de ambientes. Um algoritmo estéreo deve trabalhar basicamente com a extração de características do ambiente a correspondências entre características equivalentes, e posteriormente com a triangulação entre características correspondentes (Jain et al, 1995).

2.2.1 Extração de características de imagens

Uma característica é um elemento do ambiente que está projetado na imagem e a sua posição deve ser definida para que seja possível a reconstrução tridimensional do ambiente. As características podem ser pontos (França et al, 2005), tais como os vértices de uma caixa, retas (Bartoli e Sturm, 2003, Bartoli e Sturm, 2004), tais como as arestas de uma mesa e planos (Cobzas e Sturm, 2005) que podem ser representados por áreas com extremidades definidas. A escolha das características adequadas para cada situação é uma etapa importante do trabalho e para que haja um bom resultado deve ser considerado o tipo de ambiente estudado e o tipo de sistema de visão utilizado.

Para localizar uma característica em uma imagem extraída de um ambiente, devem ser utilizadas técnicas específicas de processamento de imagens. A escolha da técnica a ser utilizada depende da qualidade da imagem obtida, da característica do ambiente a ser extraída e do custo computacional que se deseja utilizar.

2.2.2 Correspondência entre características semelhantes

Se um objeto pertencente ao ambiente estudado for visualizado nas duas imagens do par estéreo, um conjunto de pontos pertencentes a este objeto tem projeções em ambos os

planos de imagem, ou seja, se o ponto P do ambiente observado por um sistema estéreo tem duas projeções p_1 e p_2 , pertencentes a dois planos distintos (Jain et al, 1995). Os pontos p_1 e p_2 são ditos pontos correspondentes e formam o par (p_1, p_2) .

A correspondência entre características em um par de imagens estéreas consiste em identificar os pares de características semelhantes existentes nas duas imagens, determinando assim o par (p_1, p_2) . Para isso é preciso definir uma característica p_1 na primeira imagem e utilizar um algoritmo de varredura que encontre na segunda imagem o elemento equivalente p_2 . Essa etapa do trabalho em regra é responsável por grande parte do processamento utilizado na visão estérea. Bons procedimentos associados a boas técnicas devem reduzir o custo computacional e diminuir os erros. O principal erro gerado nessa fase é a determinação de pares errados que correspondam ao ponto de origem pertencente ao ambiente. Esse erro causa uma falsa localização do ponto observado.

2.2.3 Triangulação entre características correspondentes

Com o conhecimento prévio dos parâmetros necessários e com a utilização do par de características análogas é possível por semelhança de triângulos, identificar a distância entre a característica escolhida e o ponto focal do espelho. O processo de triangulação deve percorrer o caminho inverso ao da luz que gera a imagem. Com o par de características semelhantes identificados pode-se calcular dois vetores que tenham origem no ponto focal do espelho e a outra extremidade na superfície do espelho onde o ponto do ambiente é refletido. Na intersecção entre o prolongamento desses dois vetores está o ponto de origem das imagens geradas. Por triangulação é calculado a distância a que o objeto de origem se encontra. Com a determinação da localização das características do ambiente estudado é possível recriá-lo em duas ou três dimensões. A escolha entre 2D e 3D vai depender do tipo de aplicação ao qual o pesquisador pretende dar para o seu sistema (Jain et al, 1995).

2.2.4 Vantagens e limitações do sistema de visão omnidirecional estéreo

A imagem gerada por um sistema omnidirecional catadióptrico normalmente carrega muita informação a respeito do ambiente observado. As informações contidas no par de imagens estereoscópicas omnidirecionais criam grandes vantagens para esse sistema, se comparado com imagens estereoscópicas geradas por um sistema de visão convencional (uma ou duas

câmeras). Entretanto, a estereoscopia omnidirecional é dependente de muitos elementos, tais como a câmera, o espelho, o suporte do espelho e o programa de processamento de imagem. Essa dependência cria algumas limitações para a utilização do sistema omnidirecional estéreo. Dentre as diversas vantagens e limitações existentes, serão citadas neste trabalho:

- Um sistema omnidirecional estéreo possibilita a determinação das distâncias dos objetos existentes ao seu redor (Corrêa, 2004). Quando se conhece a localização dos objetos existentes em um ambiente é possível realizar a reconstrução em 2D (Cabral et al, 2007) ou 3D (Bartoli and Sturm, 2004, Fairfield et al, 2006), desse ambiente, o que possibilita a navegação de robôs móveis e o rastreamento de objetos;
- em visão estérea, uma das etapas mais difíceis e com maior custo computacional é a correspondência entre características semelhantes. Nessa etapa é preciso varrer boa parte da segunda imagem em busca das características que correspondam ao mesmo elemento contido na primeira imagem (Jain et al, 1995). As linhas verticais existentes no ambiente são representadas por linhas radiais em uma imagem omnidirecional e isso limita a busca pelo par de pontos correspondentes a apenas uma linha radial, reduzindo o tempo de processamento;
- se o sistema omnidirecional for construído com a associação de apenas uma câmera com um espelho de lobo simples é necessário que o sistema se locomova para outra posição, a fim de capturar a segunda imagem do par estéreo (Bunschoten, 2003). Como ainda não se tem o mapa do ambiente, essa locomoção pode causar choques com objetos existentes no ambiente e impossibilitar o mapeamento de ambientes dinâmicos, devido às perdas de informações causadas pelo deslocamento simultâneo do sistema e do objeto, além do que, é preciso medir a translação do sistema no ambiente. A medição da translação é mais um problema que deve ser considerado, pois os erros agregados a essa medição tornam o sistema pouco robusto (Bunschoten, 2003);

- quando um sistema omnidirecional estéreo necessita se locomover para a obtenção do par de imagens estéreas, existe a formação de uma região não visível do espaço mapeado, na direção do movimento (Corrêa, 2004). O fluxo óptico resultante para um movimento de translação (Vassallo, 2004) é utilizado para gerar um campo de movimento hemisférico Fig. (2.19). Observando esse fluxo óptico, nota-se que os vetores são menores quando os vértices de suas origens se aproximam da linha que contém o vetor de movimento, o qual é definido pela soma vetorial dos dois vetores centrais. Quando os vetores do fluxo óptico tiverem um nóculo muito pequeno se torna impossível o cálculo da distância entre o ponto focal do espelho e o ponto gerador do fluxo. Isso explica a existência da região não visível do espaço, na direção do movimento. Apesar dessa limitação, o fluxo óptico, obtido a partir de uma seqüência de imagens, pode permitir a identificação de obstáculos e a tomada de decisões para evitar possíveis colisões de um robô móvel com obstáculos existentes no ambiente navegado (Vassallo et al, 2005).

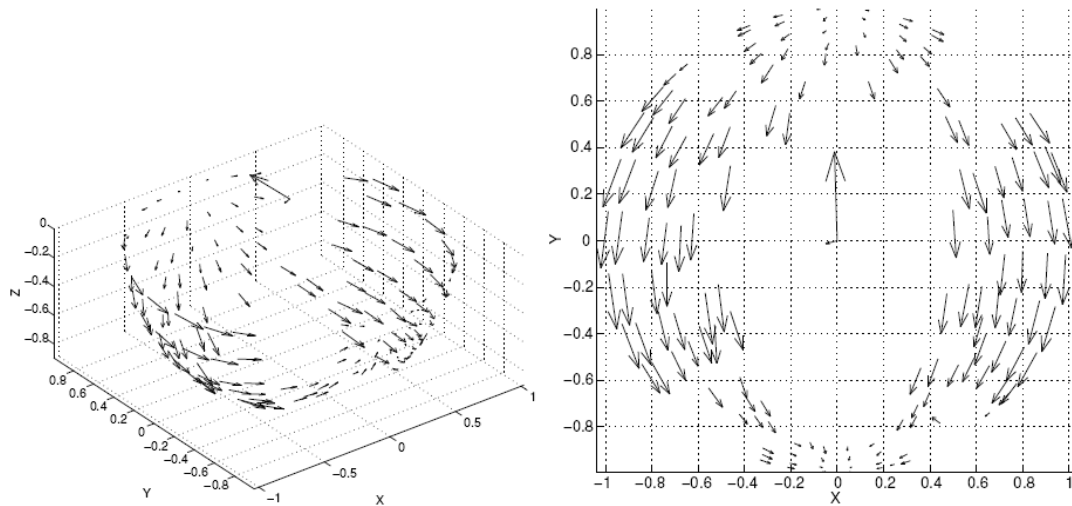


Figura 2.19 - Fluxo óptico obtido durante uma translação (Vassallo, 2004).

2.3 GRADES DE EVIDÊNCIAS

O mapeamento de ambientes desconhecidos tem como finalidade a aquisição de um modelo espacial do ambiente a ser navegado pelo robô a partir de informações sensoriais,

os quais estão sujeitos a erros. Normalmente são utilizadas para representar o ambiente estudado, o mapa topológica, o métrico e o híbrido, que une as principais características das duas anteriores (Santana Souza, 2008).

O mapa topológico é representado como um grafo, onde os nós correspondem a lugares significativos e as arestas contêm informações de navegação entre os nós (Siegwart e Nourbakhsh, 2004). O mapa topológico tem baixo custo computacional, permitem um planejamento eficiente e não necessita da localização exata do robô, mas apenas o conhecimento do nó no qual ele se encontra. Por outro lado, este tipo de representação apresenta sérias dificuldades quanto ao problema da correspondência (Nourbakhsh, 2004), que na visão omnidirecional é bastante acentuada.

O mapeamento métrico produz uma definição geométrica do ambiente no qual o robô está inserido (Siegwart e Nourbakhsh, 2004). Nesta abordagem o ambiente é apresentado de maneira detalhada incluindo os objetos que o compõe. Além disso, os mapas métricos são fáceis de serem construídos e mantidos, e são mais adequados para tratar o problema da correspondência.

Os mapas métricos podem ser representados por mapas de características ou por grades de ocupação (Pedrosa, 2006). Os mapas de características armazenam informações geométricas de formas encontradas nos ambientes (Siegwart e Nourbakhsh, 2004), como círculos, retângulos, retas, entre outras. Tais características são encontradas principalmente em ambientes internos e estruturados. A grade de evidência é um processo estocástico de estados discretos, que é definido sobre um espaço segmentado, podendo ser representada por uma matriz de probabilidades, definindo um ambiente de forma discreta em 2D (Martin e Moravec, 1996) ou 3D (Moravec, 1996). Cada célula da matriz representa uma determinada área do ambiente e armazena a probabilidade da existência de um objeto nessa região. A grade de evidências é mais adequada para mapeamento de ambientes grandes, não estruturados e com objetos de formas diversas, por isso tem sido utilizada em trabalhos de difícil execução, tal como a exploração executada pelo robô submarino autônomo DEPTHX Fig. (2.20, a) dotado de 54 sonares, que foram utilizados para mapear as paredes do lago Zacatón no México Fig. (2.20, b), com 110 m de diâmetro e 350 m de profundidade (Fairfield et al, 2006).

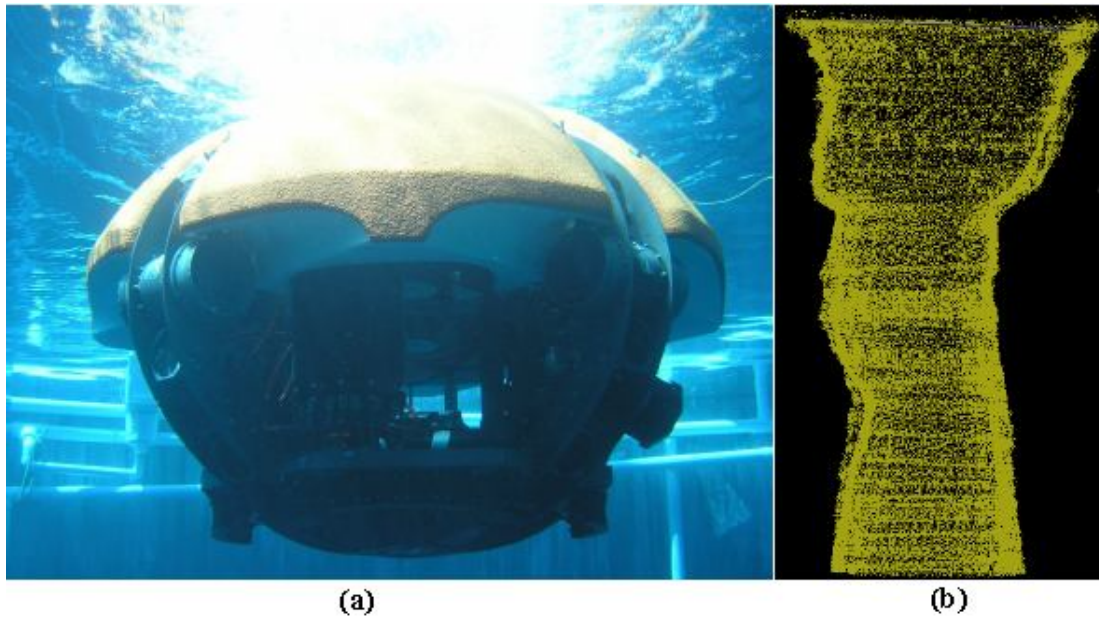


Figura 2.20 - Exploração robótica : (a) robô submarino autônomo DEPTHX; (b) mapa do lago Zacatón.

A grade de evidência foi proposta por Elfes (1987) como forma de tratamento de sinais originados de sensores ultrassônicos utilizados para navegação autônoma de robôs móveis. Os sensores ultrassônicos são normalmente incertos e sua área de varredura é limitada a um cone. O resultado desse sensor fornece a provável distância a qual o objeto refletor se encontra, e como a sua varredura é cônica, o objeto pode estar em qualquer lugar da área do cone de varredura, limitada pelo erro típico do sensor.

A limitação da grande incerteza dos sensores sônicos é amenizada pela aplicação das técnicas de grades de evidências associadas a um modelo específico do sensor. Os sensores omnidirecionais catadióptricos também são dotados de grande incerteza quando utilizados no mapeamento de ambientes, por esse motivo as técnicas de grade de evidências são aplicáveis também nesses casos, com boa resposta a esse tipo de sensor (Correa, 2004).

O mapeamento de um ambiente realizado a partir de um par de imagens omnidirecionais catadióptricas estéreas estão sujeitas a uma série de fatores que podem gerar erros de localização de obstáculos. Os erros podem aparecer durante a aquisição das imagens, durante o tratamento do par estéreo e na representação do mapa. Qualquer que seja o tipo

ou a causa do erro, provavelmente terá influência no resultado final, que é a representação do ambiente estudado em forma de um mapa que possibilite a navegação robótica. Os erros inseridos durante o processo de mapeamento podem ser provocados por diversos fatores, dentre eles serão citados:

- Os erros de forma do perfil do espelho, que podem ser gerados por truncamentos ou arredondamentos das coordenadas dos pontos que compõem o perfil. Esse erro é criado durante a adaptação da precisão dos pontos calculados às limitações das máquinas de usinagem que serão utilizadas para a fabricação do espelho. Outro fator que pode provocar erro de forma no perfil é a obtenção da superfície espelhada, que pode ser adquirida por um processo de polimento, por deposição de cromo ou níquel na superfície ou pela usinagem de ultraprecisão (Grassi-Jr, 2002). Os erros de forma são prejudiciais ao sistema, pois se durante o processamento da imagem forem utilizadas as equações que produziram os pontos que definem o perfil do espelho, haverá uma diferença entre a imagem capturada pela câmera e a imagem esperada pelo programa responsável pelo tratamento do sinal. Essa diferença provavelmente provocará uma variação entre o mapa calculado e o mapa ideal do ambiente;
- erros na superfície espelhada, que podem ser provocados por pequenas imperfeições geradas durante o processo de polimento da superfície ou por substâncias que possam embaçar o espelho, tais como óleos, suor, e vapor de água. Alguns desses fatores podem ser facilmente evitados, ao se tomarem precauções básicas, tais como evitar o contato da superfície espelhada com qualquer substância que possa provocar a diminuição do brilho;
- erros de montagem do conjunto, que são provocados por uma série de pequenas imprecisões das peças que compõem o sistema e pela diferença de posicionamento entre o eixo focal da câmera e o eixo focal do espelho;
- erros de processamento, que são gerados por arredondamentos ou truncamentos dos resultados obtidos durante o processamento da imagem e representação do mapa.

- Erro de convergência no método de mapeamento, baseado em estereoscopia. Esse erro é causado principalmente pelos falsos pontos equivalentes gerados durante o processamento do par de imagens estereoscópicas.

Analisando os argumentos apresentados, é de se esperar que um sistema de visão omnidirecional catadióptrico seja tipicamente ruidoso e as informações que fornece são freqüentemente incertas. Uma importante etapa da construção do mapa é a determinação das incertezas geradas por esses sensores, e para isso pode ser utilizada a probabilidade e a estatística.

A grade de evidência pode ser utilizada para representar o ambiente a ser navegado, onde cada célula armazena a probabilidade da existência de um objeto na área que ela representa do ambiente. Essa probabilidade pode ser utilizada em favor da navegação robótica, pois o sistema de navegação tem como referência um mapa probabilístico do ambiente, possibilitando a escolha de regiões com menores probabilidades de existência de obstáculos para a locomoção, tornando assim a navegação mais segura. A grade é atualizada a cada ciclo de aquisição de dados e se os modelos do sistema estiverem corretos, espera-se que quanto mais imagens se tenham do mesmo ambiente, maior credibilidade o mapa terá.

O uso da grade de evidências pode melhorar a qualidade de um mapa que foi gerado a partir de um sistema de sensoriamento tipicamente ruidoso, tais como o sonar (Souza, 2003) e o sistema de visão omnidirecional catadióptrico estéreo (Correa, 2004), por isso, esse tema tem sido foco de diversas pesquisas, e para uma melhor compreensão da sua aplicabilidade, serão citadas algumas soluções propostas em outros trabalhos.

Souza (2003) desenvolveu um trabalho que estuda a utilização de sensores ultrassônicos como detectores de obstáculos em um sistema robótico móvel. O estudo tratou dos aspectos de modelamento dos sensores sônicos e do tratamento dos dados obtidos experimentalmente, de forma a reduzir incertezas inerentes aos sensores. Foram analisadas também técnicas de fusão de dados sensoriais para mapeamento de ambientes desconhecidos.

O modelo do sonar que foi utilizado (Souza, 2003) relata a provável distância do objeto mais próximo inserido no campo de visualização do sensor. O objeto pode estar em qualquer lugar dentro de uma faixa de erro. O modelo do sensor descreve exatamente quanto se deve aumentar ou diminuir a probabilidade de existência de um obstáculo em uma determinada posição. Os resultados da medição de vários sensores foram fundidos e armazenados em grades de evidência, de forma a mapear uma região espacial com grande probabilidade de existência de obstáculos.

O modelo proposto foi simulado através de um software desenvolvido em ambiente Matlab, com a finalidade de testar a técnica de mapeamento desenvolvida sem considerar os erros gerados pelos sonares. O mapeamento de um ambiente real, com dimensões e obstáculos conhecidos foi realizado pelo robô Nomad XR4000, que se locomoveu pelo ambiente realizando paradas que vão da posição 1 até a posição 10 Fig. (2.21). A posição e orientação do robô são fornecidas por sensores locais e a cada parada são extraídas 24 leituras de sonares dispostos radialmente no robô. A partir desses dados foi construída uma matriz de evidências, que representou razoavelmente o ambiente.

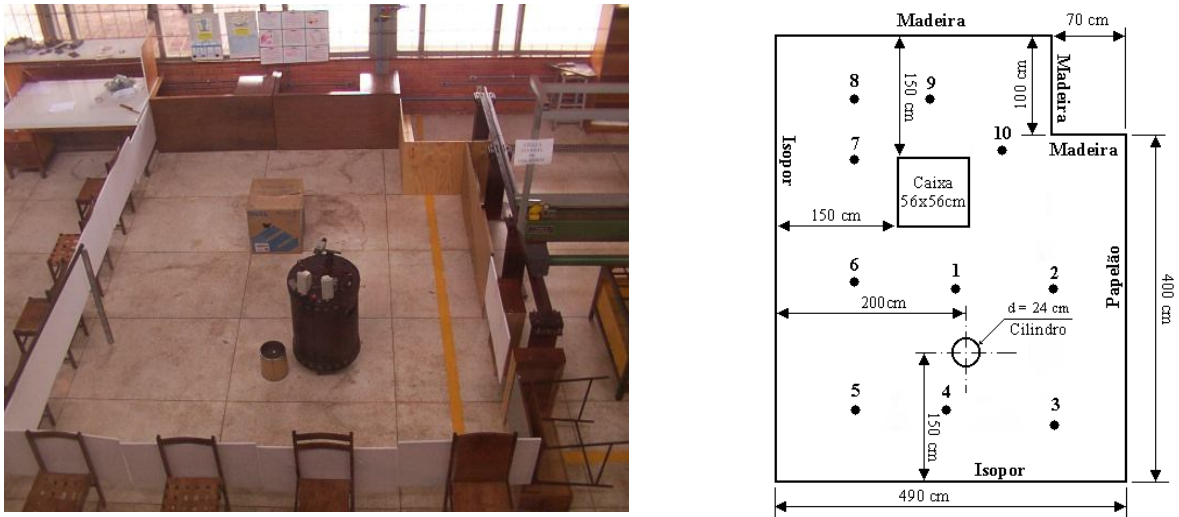


Figura 2.21 - Ambiente mapeado (Souza, 2003).

Comparando o mapeamento de um ambiente simples, sem a utilização do modelo probabilístico do sonar Fig. (2.22, a) com o que utiliza esse modelo Fig. (2.22, b), verifica-se que ocorreu uma limpeza das regiões onde não há obstáculo, isso ocorre pelo fato de

que a região entre o objeto e o sonar recebe um decréscimo na probabilidade, pois se a onda sonora passou por essa região sem sofrer reflexão é de se esperar que não exista nenhum objeto. Esse decréscimo depende do modelo do sonar que foi proposto.

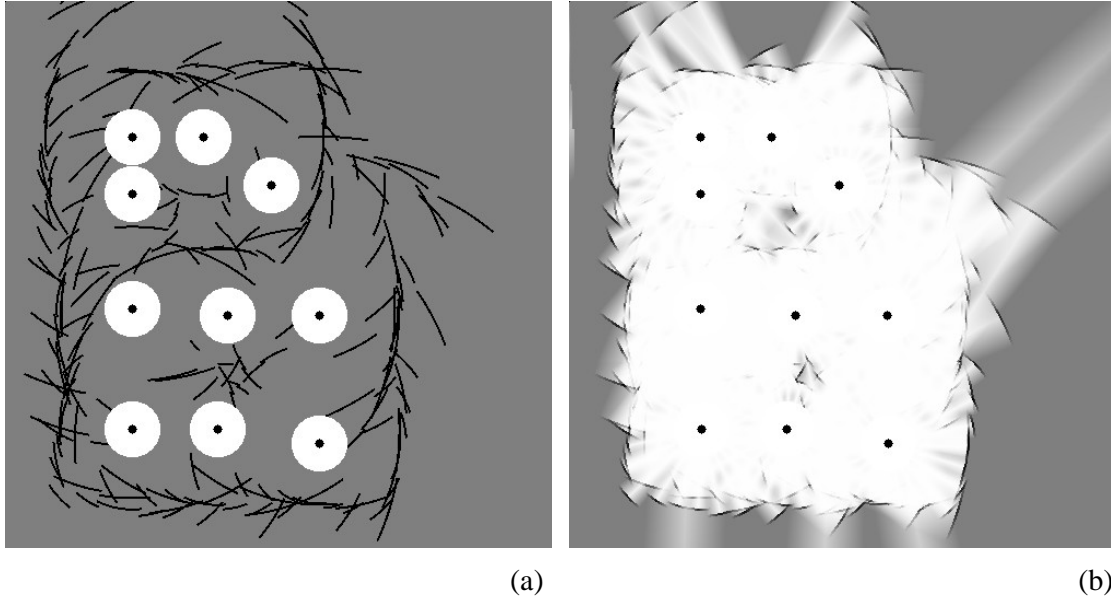


Figura 2.22 - Mapa gerado: (a) sem modelo; (b) com modelo (Souza, 2003).

Para haver uma melhoria na qualidade do mapa gerado, o autor sugeriu que fosse desenvolvido um programa que determine a tendência dos diversos pontos escuros da grade, ou seja, pontos com alta probabilidade, aproximando ao máximo do mapa ideal Fig. (2.23).

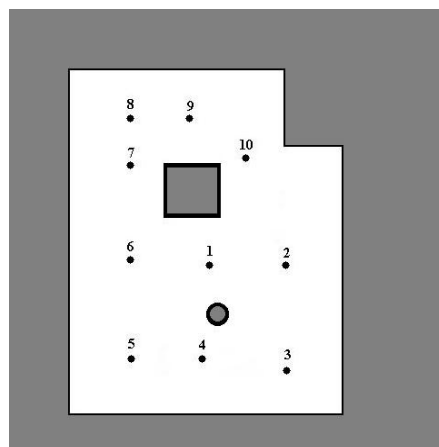


Figura 2.23 - Mapa ideal (Souza, 2003).

2.3.1 Modelo do sensor

Para que seja possível a navegação de um robô móvel por um ambiente desconhecido, faz-se necessário dotá-lo de um sistema de sensoriamento externo capaz de identificar a geometria do ambiente e detectar possíveis obstáculos (Souza, 2003). O mapeamento do ambiente é um problema complexo que pode ser abordado de diversas maneiras, dependendo dos tipos de sensores utilizados. Correa (2004) utilizou a visão estereoscópica omnidirecional como sensor que fornece dados probabilísticos da localização de um obstáculo. O armazenamento desses dados pode ser feito com a utilização de grades de evidência.

Um mapa representado por uma grade de evidência tem armazenado em cada célula a probabilidade de existência de um obstáculo. Para representar essa matriz pode ser utilizado um gráfico bidimensional, com variação de tons de cinza, que vai de 0 a 255, em que a probabilidade 0 é representada pela cor branca, definida pela variação de cinza igual a 255 e a probabilidade 1 é representada pela cor preta com variação de cinza igual a 0.

O principal objetivo do modelo do sensor é de determinar qual a região da grade de evidências deve ter sua probabilidade alterada e de quanto deve ser essa alteração. A região onde se detectou um objeto deve ter sua probabilidade aumentada, tornando-a mais escura e a região onde não se identificou qualquer obstáculo deve ter sua probabilidade reduzida, tornando-a mais clara. Como de início não se conhece a região a ser mapeada, atribui-se a ela uma probabilidade de 50%, gerando um mapa de cor cinza, com pixel igual a 128 (Souza, 2003 e Santana Souza, 2008).

A determinação do modelo probabilístico do sensor, independentemente de qual tipo seja, é uma importante etapa do processo de mapeamento de um ambiente e esse tema tem sido foco de diversos pesquisadores, dentre eles serão citados:

Yi et al. (2000) propôs um modelo Fig. (2.24) que ajuda no mapeamento de um ambiente com a utilização de sonares como elementos que medem a distância do objeto mais próximo. Esse sistema é bastante ruidoso e complexo, pois o sonar fornece dados pouco densos e dotados de erros consideráveis.

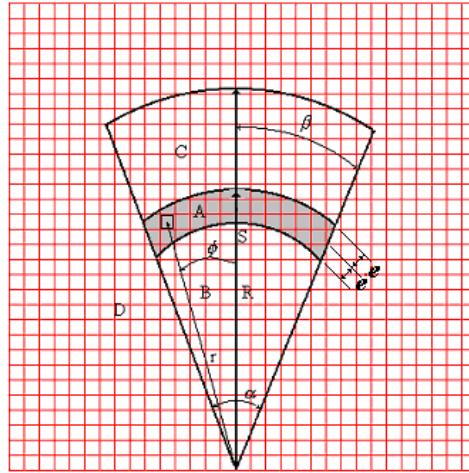


Figura 2.24 - Modelo do sonar.

em que α é o ângulo de varredura do sonar, e é o erro de medição do sensor, que é determinado pela metade da incerteza de medição I_m ($I_m = 2e$), A e B são respectivamente as regiões de maior e menor probabilidade de existência de um obstáculo, R é a bissetriz que divide o ângulo do feixe ao meio, com uma abertura de ângulo β .

A probabilidade de o sonar identificar um objeto existente é fornecida pela probabilidade condicional $P(S/H)$, a qual é definida pelo modelo do sonar, que varre as regiões A e B , conforme as equações (2.3) e (2.4).

Modelo da região A

$$P(S/H) = \frac{\left(\frac{e - |R - r|}{e}\right)^2 + \left(\frac{\beta - \phi}{\beta}\right)^2}{2} \quad (2.3)$$

Modelo da região B

$$P(S/H) = \frac{\left(\frac{R - r - e}{R - e}\right)^2 + \left(\frac{\beta - \phi}{\beta}\right)^2}{2} \quad (2.4)$$

Santana Souza (2008) propôs um método de mapeamento de ambientes utilizando grades de evidências modificadas pelo modelo probabilístico do sensor. Esse trabalho foi implementado com a utilização de um robô do modelo Pioneer 3-AT da ActivMedia Robotics e explora suas capacidades sensoriais. O sistema de sonar do robô é modelado segundo um modelo proposto por Elfes (1989) em sua tese de Doutorado Eq. (2.5), que trata as incertezas de medição do sonar, tanto no raio que define a posição do objeto detectado quanto no ângulo de varredura do sensor. O modelo é descrito por uma distribuição Gaussiana bidimensional.

$$P(Z, \theta | d_{x,y}, \theta_{x,y}) = \frac{1}{2\pi\sigma_z\sigma_\theta} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(z - d_{x,y})^2}{\sigma_z^2} + \frac{(\theta - \theta_{x,y})^2}{\sigma_\theta^2} \right) \right] \quad (2.5)$$

onde z é a distância entre o sensor e o objeto, $d_{x,y}$ é a distância entre o sensor e a célula estudada, θ é o ângulo de orientação do sensor em relação ao eixo x do referencial global fixo no ambiente; $\theta_{x,y}$ é o ângulo formado entre um vetor, com origem no ponto em que está o sonar e passa pela célula $m_{x,y}$, e o eixo x do referencial global adotado; σ_z^2 e σ_θ^2 são as variâncias que computam as incertezas na distância medida z e no ângulo θ respectivamente. Os parâmetros descritos podem ser melhor compreendidos, observando a Fig. (2.25).

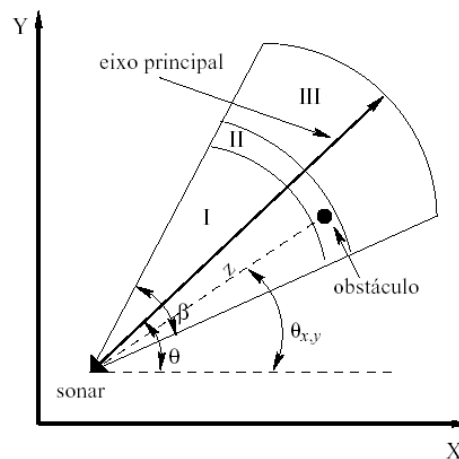


Figura 2.25 - Região de cobertura do sonar, (Santana Souza, 2008).

A equação Gaussiana utilizada resulta em um gráfico que descreve a probabilidade de que a célula da grade esteja ocupada, visto que o sonar identificou algum obstáculo. Esse gráfico pode ser observado na Fig. (2.26).

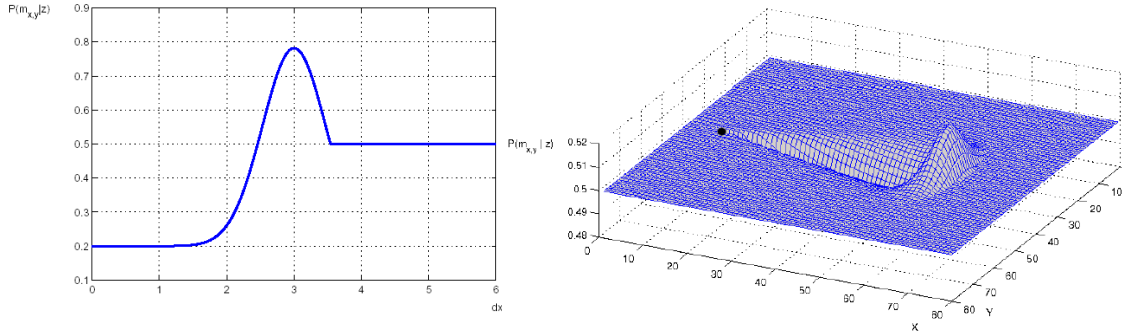


Figura 2.26 - Função de ocupação para um sensor modelado por uma distribuição Gaussiana bidimensional, (Santana e Souza, 2008)

O autor Santana Souza (2008) propôs uma fusão sensorial que considera tanto os erros característicos dos sonares como as incertezas inerentes ao sistema de odometria do robô. Essa fusão originou as Eqs. (2.6 e 2.7) que determinam as variâncias considerando as influências causadas pelos erros da odometria e do sensor.

$$\sigma_z = z \times \eta + E_{lin}(\Delta l) + N(0, \varepsilon_{lin}) \quad (2.6)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\beta}{2} + E_{ang}(\Delta\theta) + N(0, \varepsilon_{ang}) \quad (2.7)$$

onde, σ_z é a incerteza para a medida z Fig. (2.23), que define a distância entre o centro do sensor e o objeto em um deslocamento linear Δl realizado pelo robô. η é o fator de erro típico do sonar em uso, que foi estimado pelo autor como o valor de +/- 1%, $E_{lin}(\Delta l)$ é a função que calcula o erro causado por fatores sistemáticos na odometria, $N(0, \varepsilon_{lin})$ é a distribuição normal que calcula os erros lineares causados por fatores não-sistemáticos, σ_θ é a incerteza inerente a um ângulo de orientação do sonar θ a um deslocamento angular $\Delta\theta$ realizado pelo robô, β é o ângulo de abertura do feixe principal do sonar, $E_{ang}(\Delta\theta)$ é a função que descreve o erro sistemático referente a um deslocamento angular e $N(0, \varepsilon_{ang})$ é a distribuição normal que calcula o erro angular não-sistemáticos para o mesmo deslocamento.

Através das modificações feitas no modelo proposto por Elfes (1989) é possível representar a degradação que os erros de odometria acarretam ao processo de mapeamento (Santana Souza, 2008). Pois a probabilidade de que a medição do sonar esteja correta passa a ser ponderada pelos erros do sistema de odometria do robô. Dessa forma, o mapa final será mais coerente com a qualidade dos dados dos sonares e da odometria. Os resultados obtidos com essa modificação podem ser observados se compararmos o mapa construído com o modelo que considera apenas os erros sistemáticos dos sensores Fig. (2.27) com os que consideram também os erros sistemáticos de odometria Fig (2.28).



Figura 2.27 - Mapa sendo construído sem considerar os efeitos dos erros de odometria (Santana Souza, 2008).



Figura 2.28 - Mapa construído com a correção dos erros sistemáticos de odometria (Santana Souza, 2008).

Souza (2003) utilizou um modelo simples para o sensor ultra-sônico, que fornece informações importantes sobre a existência de um objeto em uma determinada região varrida pelo feixe de um sonar. O diagrama da Fig. (2.29) mostra o modelo básico desse sensor, que considera suas incertezas intrínsecas.

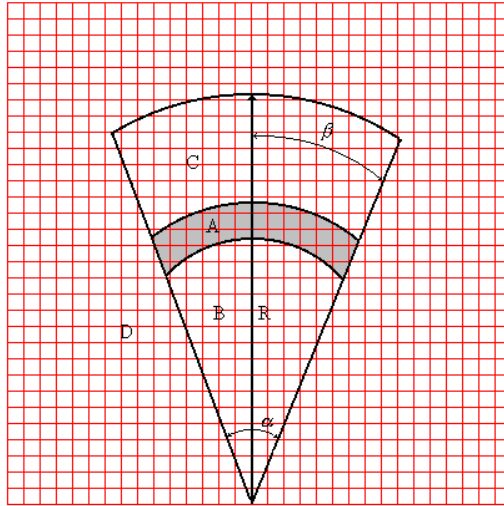


Figura 2.29 – Parâmetros do modelo básico do sonar, (Souza, 2003).

em que α é o ângulo de varredura do sonar, R é a bissetriz que divide o ângulo do feixe ao meio e é definido pelo alcance máximo do sonar, com uma abertura de ângulo β .

A área a ser mapeada é dividida em quatro regiões (A, B, C e D) sobrepostas a uma grade de evidências, sendo que cada célula representa uma região do espaço físico.

A área A é a região de pilhas onde há maior probabilidade de se encontrar um obstáculo. A área B representa a região entre o obstáculo e o sonar, cujas células apresentam baixa probabilidade de existência de objetos. As áreas C e D correspondem às pilhas para as quais a leitura atual do sensor não apresenta qualquer informação útil. Quando se conhecer todos os valores de cada região é possível construir um mapa para navegação, onde o robô pode selecionar uma trajetória que tenha células com menores probabilidades de existência de obstáculos. A atualização do mapa pode ser realizada periodicamente, com a entrada de novos dados.

A posição de cada célula é determinada pela distância r e pelo ângulo θ e a leitura do sonar é representada pelo vetor S , conforme Fig. (2.30). A existência de um obstáculo em uma determinada célula é representado pelo evento H e a ausência pelo seu complementar \bar{H} .

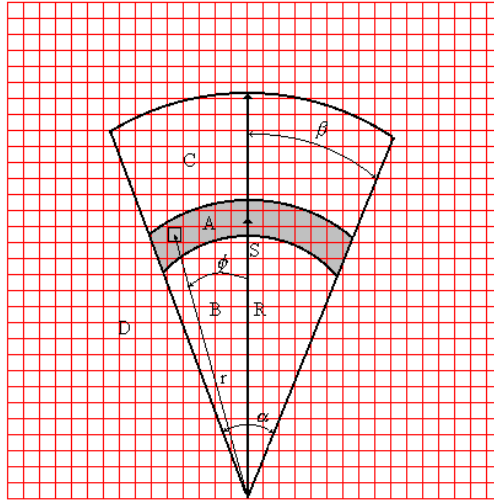


Figura 2.30 - Localização da célula observada, (Souza, 2003).

Como o desejável é saber sobre a existência ou não de um obstáculo em uma determinada posição, considera-se que o cone de varredura do sonar se transforma em um feixe plano, onde a linha central tem a maior probabilidade e a modelagem será dividida em duas partes, área *A* e área *B*.

Área *A* será modelada considerando que as células mais próximas do sensor e da linha central tenham a maior probabilidade, ou seja, quanto menor o r e o θ maior a probabilidade. É comum considerar que a probabilidade de uma pilha estar sendo ocupada nunca seja igual a um, por isso aparece na Eq. (2.15) o termo M ($M < 1$) multiplicado pelo primeiro termo. Para esse experimento se adotou $M = 0,98$.

O modelo da área *B* é semelhante ao modelo da área *A*, porém o sensor fornece a evidência de que a pilha está vazia, então o modelo de *B* é o inverso de *A*. Para a região *B*, pode-se considerar que é possível ter uma célula totalmente vazia, com probabilidade um, eliminando assim o termo M .

Os modelos das áreas *A* e *B* fornecem a probabilidade de um sonar identificar um obstáculo, sendo que a pilha está ocupada por um objeto, tornando-se uma probabilidade condicional, que é definida pelas Eq. (2.8, 2.9, 2.10 e 2.11).

- Área A:

$$P(S/H) = \frac{\frac{R-r}{R} + \frac{\beta-\phi}{\beta}}{2} M \quad (2.8)$$

$$P(S/\bar{H}) = 1 - P(S/H) \quad (2.9)$$

- Área B:

$$P(S/H) = 1 - P(S/\bar{H}) \quad (2.10)$$

$$P(S/\bar{H}) = \frac{\frac{R-r}{R} + \frac{\beta-\phi}{\beta}}{2} \quad (2.11)$$

em que S é a localização da célula que está no campo de varredura do sensor, e sua descrição é dada pela coordenada radial (r, θ)

Com isso, é possível calcular a probabilidade de um sonar retornar uma leitura positiva, visto que o local está sendo ocupado, o que é descrita por $P(S/H)$.

O modelo gerado pelas Eq. (2.8, 2.9, 2.10 e 2.11) é representado na Fig. (2.31), em que inicialmente a probabilidade é de 0,5, pois como não se conhece a região tem-se 50% de chance de se ter um objeto. Ao ser detectado um obstáculo, observa-se que nesta posição a probabilidade aumenta formando um triângulo, e que entre o objeto e o sonar a probabilidade diminui, provocando a formação de um vale.

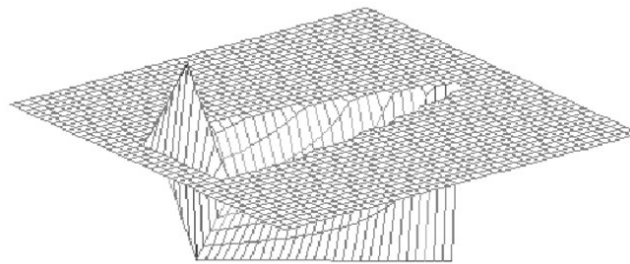


Figura 2.31 - Modelo probabilístico do sonar, (Souza, 2003).

O sonar relata a distância do objeto mais próximo em um determinado sentido. Para esse sistema, o objeto pode estar em qualquer lugar, dentro de um feixe relativamente largo, então o modelo serve para descrever exatamente o quanto se deve aumentar ou diminuir a probabilidade de que o sensor detecte um obstáculo em uma determinada região.

2.3.2 Atualização da grade de evidência

Quando é gerado um mapa baseado em uma grade de evidências, é preciso que se conheça a posição e a orientação do robô para que ele possa se localizar. Quando ele se deslocar para outra posição ou simplesmente girar em torno de seu eixo, dando uma nova orientação, o sistema pode gerar um novo mapa, baseado nas novas informações dos sensores e no mapa anterior. A atualização pode ser realizada com o robô parado, ou em movimento, que em seguida se desloca para uma nova posição, seguindo orientações geradas a partir do mapa armazenado. Em sua nova posição o sistema realiza outras leituras do ambiente, atualiza novamente o mapa e continua o ciclo (Souza, 2003).

Os erros provocados pelo sistema de localização do robô causam erros de posicionamento e de orientação. Esses erros são acumulativos, pois cada vez que o robô se desloca, novos erros podem ser incrementados ao sistema. Os erros gerados prejudicam a atualização do mapa, pois o robô dispõe de informações de uma posição, mas pode estar em outra.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são detalhadas as ações desenvolvidas no trabalho, possibilitando o projeto e a utilização de um sistema de visão omnidirecional catadióptrico, com espelho hiperbólico de lobo duplo, no processo de mapeamento de ambientes desconhecidos, a partir do processamento de imagens estéreas, adquiridas pelo sistema de visão proposto. O sistema omnidirecional desenvolvido é testado com o mapeamento de um ambiente simulado, em que o mapa gerado é armazenado em uma grade de evidências, que determina qual a probabilidade de existência de obstáculos. Como o processo de mapeamento é simulado e o sistema omnidirecional não foi fabricado, serão considerados que:

- Não há refração da luz no cilindro transparente Fig. (3.1), ou seja, o índice de refração do cilindro é considerado zero e a espessura a menor possível, pois a refração da luz depende diretamente da espessura da parede do cilindro e do índice de refração do material, que na simulação serão considerados desprezíveis. Em uma abordagem com um sistema real, o desvio da imagem provocado pela refração da luz pode ser compensado por uma calibração do sistema;
- A temperatura do ambiente é constante e não há variação do perfil do espelho;
- Não há erro de odometria no sistema de locomoção do robô;

Não há erro na aquisição da imagem, provocada por parâmetros intrínsecos da câmera;

3.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA PROPOSTO

A opção de um sistema de visão omnidirecional catadióptrico, com espelho hiperbólico de lobo duplo, desenvolvido neste trabalho Fig. (3.1), é associado a um programa de geração de mapas 2D, que utiliza técnicas computacionais de visão omnidirecional catadióptrica estérea, desenvolvido especificamente para esse sistema ótico.

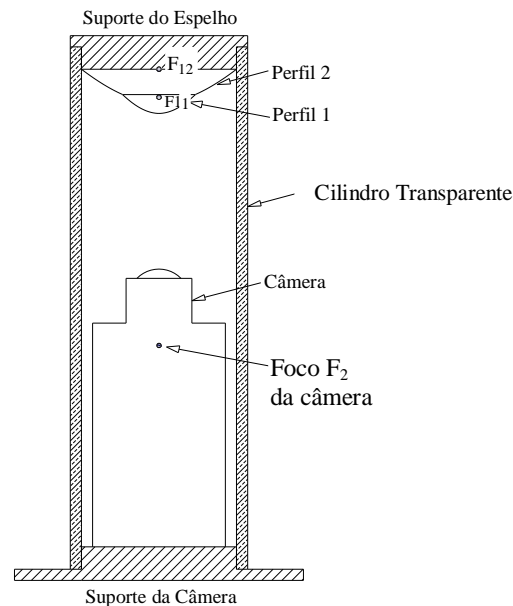


Figura 3.1 - Sistema de visão omnidirecional catadióptrico.

O sistema de visão proposto gera um par de imagens concêntricas e estéreas do ambiente observado. Essa visualização é consequência da associação de um espelho convexo de lobo duplo, com uma câmera de projeção perspectiva, em que o ambiente é refletido pelo espelho em direção ao campo de visualização da câmera. Uma imagem formada por esse sistema normalmente contém mais informações do meio observado do que a imagem gerada por uma câmera convencional. A alta densidade de informações contidas na imagem e sua ampla visualização tornam o sistema mais versátil, porém, mais sensível a erros.

Um sistema omnidirecional catadióptrico com espelho hiperbólico de lobo duplo associado à visão estereoscópica, cria um sistema de visão computacional que possibilita o mapeamento de ambientes estáticos e dinâmicos, mas com grandes possibilidades de erro. Para resolver as limitações do sistema de visão proposto Tabela (3.1), foi abordado neste trabalho a geração de mapas de evidências, a partir de imagens omnidirecionais estéreas concêntricas. A grade de evidência é responsável por armazenar a probabilidade da existência de obstáculos em uma determinada região do ambiente, localizada dentro do campo de visão do sistema.

Tabela 3.1 - Características do sistema de visão proposto.

Omnidirecional	Vantagens	Limitações
Múltiplas câmeras.	Possibilita uma visão ampla e de alta definição do ambiente observado, possibilitando um mapeamento preciso.	É necessária a utilização de várias câmeras, o que o torna dispendioso, pouco compacto e com alto custo computacional.
Catadióptrico com espelho esférico de lobo simples.	Possibilita uma visão de 360° do ambiente, a baixo custo de fabricação e de fácil instalação.	Não tem centro único de projeção. É limitado ao mapeamento de ambientes estáticos e cria regiões não visíveis do ambiente na direção do movimento.
Catadióptrico com espelho hiperbólico de lobo simples.	Possibilita uma visão de 360° do ambiente com boa definição e livre de superposição de imagens, pois o espelho hiperbólico tem centro único de projeção.	Por ser de lobo simples o sistema é limitado ao mapeamento de ambientes estáticos e cria regiões não visíveis do ambiente na direção do movimento do sistema.

Catadióptrico associado a uma câmera convencional.	Possibilita o mapeamento de ambientes estáticos e dinâmicos na região de visualização da câmera convencional.	A imagem estérea que possibilita o mapeamento do ambiente é limitada à região de visão da câmera convencional utilizada.
Catadióptrico com espelho hiperbólico de lobo duplo.	O perfil hiperbólico do espelho proporciona um centro único de projeção, eliminando assim as distorções causadas por superposição de imagens; A utilização de um perfil de lobo duplo possibilita a obtenção de um par de imagens estereoscópicas, retiradas no mesmo instante, eliminando assim a necessidade de locomoção do sistema durante a aquisição do par estéreo de imagens, o que possibilita o mapeamento de ambientes dinâmicos e a eliminação do problema da não visualização do ambiente na direção do movimento do sistema.	Como o espelho tem perfil muito específico, o método utilizado no processamento da imagem tem que considerar o perfil do espelho. Para se obter resultados significativos no mapeamento de ambientes é necessário que o espelho tenha alta precisão dimensional (0,0001 mm) (Grassi-Jr, 2002), o que aumenta o custo de fabricação. As grandes exigências dimensionais tornam o sistema dependente de calibração (Vassallo, 2004).

As subdivisões deste capítulo descrevem as técnicas utilizadas para reduzir as limitações do sistema de visão omnidirecional proposto.

3.2 DEFINIÇÃO DA CÂMERA DE PROJEÇÃO PERSPECTIVA

Um dos objetivos do sistema de visão deste trabalho é projetar o ambiente modelado em 3D numa área bidimensional plana da câmera, ou seja, transformar as coordenadas tridimensionais em coordenadas bidimensionais. Essa transformação é conhecida por transformação projetiva planar. A projeção perspectiva caracteriza-se por apresentar um centro óptico para qual a luz converge.

Para o desenvolvimento de um sistema de visão é importante perceber o processo de formação da imagem, ou seja, a ligação entre o mundo real e a imagem capturada pela câmera. Para esse projeto serão analisadas duas características importantes. A primeira questão é geométrica e preocupa-se com a obtenção da posição na imagem de um dado ponto tridimensional. A segunda questão está relacionada com a determinação do valor armazenado em cada pixel da imagem, que nesse caso será uma imagem digital em níveis de cinza que é a representação em uma única amostra de um espaço de cores. As imagens

monocromáticas são armazenadas utilizando-se um byte por pixel, o que permite 256 intensidades possíveis, sendo que o preto é representado pelo valor 0 e o branco pelo valor 255.

Para a questão geométrica será utilizada um modelo de câmera pontual (pinhole) com o plano de imagem colocado à frente do centro óptico. Esse modelo não é utilizável em imagens digitais porque uma pequena abertura significa uma pequena passagem de energia luminosa (insuficiente para ser detectável). Mas esse modelo é contudo uma boa aproximação para o caso real de uma câmera equipada com uma lente, que permite a projeção de um ponto 3D como um ponto 2D e concentra energia suficiente para a detecção no CCD da câmera.

Para a aquisição da imagem será utilizada um modelo de câmera monocromática de 8 bits com CCD quadrado de 1008 x 1008 pixels, disponível no laboratório do Grupo de Automação e Controle da Universidade de Brasília (GRACO/UNB). O modelo de câmera escolhido tem boa resolução, baixo custo e necessita de menos processamento do que uma câmera colorida. As principais características da câmera estão descritas na Tabela (3.2).

Tabela 3.2 - Propriedades da câmera proposta para o sistema omnidirecional

Característica	Justificativa	Representação	Definição
CCD da câmera	Está relacionado com a resolução da imagem. Deve ser verificada a disponibilidade comercial.	CCD	Monocromático de 1008 x 1008 pixels
Dimensão de cada pixel	Está relacionado com a resolução da imagem. Deve ser verificada a disponibilidade comercial.	p	0,009 x 0,009 mm
Distância entre o centro de projeção e o plano de projeção (distância focal)	É escolhido de forma a tornar o sistema o mais compacto possível, quanto menor a distância focal mais compacto será o sistema	f	16 mm

3.3 PROJETO DO ESPELHO HIPERBÓLICO DE LOBO DUPLO

Será utilizado um espelho com perfil hiperbólico de lobo associado a uma câmera de projeção perspectiva para compor o sistema de visão omnidirecional catadióptrico. A principal vantagem desse perfil é a existência de apenas um centro de projeção de imagem.

O centro único de projeção é obtido com a associação de um espelho hiperbólico formado por um conjunto de pontos C_n com uma câmera de projeção perspectiva Fig. (3.2). Os feixes de luz originados pelos pontos p_1 e q_1 são refletidos pela superfície do espelho nos pontos p_2 e q_2 em direção ao CCD da câmera, originando os pontos p_3 e q_3 respectivamente. Como o perfil do espelho é hiperbólico, os raios de luz refletidos pela superfície do espelho são redirecionados para o ponto focal F_2 , que deve coincidir com o ponto focal da câmera de projeção perspectiva.

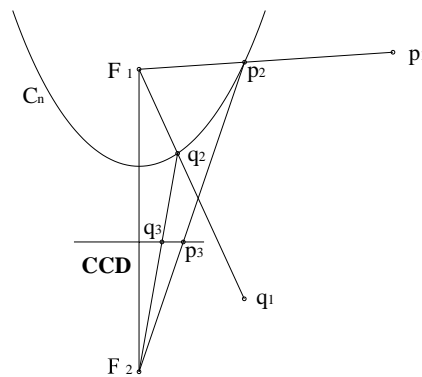


Figura 3.2 - Perfil hiperbólico.

A reconstrução de um ambiente a partir de um par de imagens estéreas omnidirecionais geradas a partir de um sistema com espelho de lobo simples é limitada pela formação de uma região não visível do espaço na direção do movimento, e pela impossibilidade de mapeamento de ambientes dinâmicos. Como o sistema precisa se deslocar para a obtenção da segunda imagem do par estéreo torna-se impossível o mapeamento de ambientes dinâmicos. Isso se explica pela perda de informações existentes durante o deslocamento simultâneo do sistema e do objeto.

Essas limitações podem ser resolvidas pela utilização de um espelho hiperbólico de lobo duplo, que gera instantaneamente um par de imagens estéreas omnidirecionais, tornando possível o cálculo da posição do objeto em estudo sem a necessidade de locomoção do sistema, evitando assim a perda de informações.

3.3.1 Definição da superfície de reflexão do espelho

Uma hipérbole é definida pela interseção entre uma superfície cônica e um plano. A curva gerada na interseção é o conjunto de todos os pontos C_n para os quais a diferença da distância entre dois pontos focais F_1 e F_2 é constante Fig. (3.3).

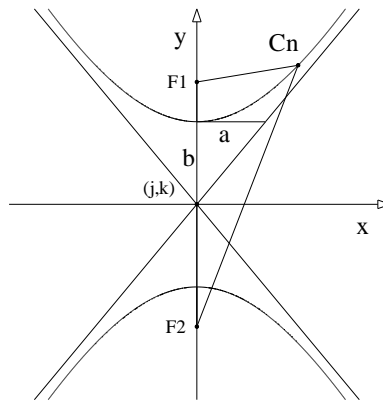


Figura 3.3 - Hipérbole.

A curva hiperbólica é definida pela Eq. (3.1).

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

tal que (j,k) é o centro da hipérbole e os parâmetros a e b são os semi-eixos. Se o centro da hipérbole coincidir com a origem, ou seja, $j=0$ e $k=0$, a equação da hipérbole é simplificada Eq. (3.2).

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

Se a origem de coordenadas cartesianas for transladada do ponto (j, k) Fig. (3.3) para o foco F_2 Fig. (3.4) e o ponto focal da câmara coincidir com o foco F_2 , tem-se uma representação da associação de um espelho hiperbólico com uma câmara de projeção perspectiva, em que a origem coincide com o foco da câmara.

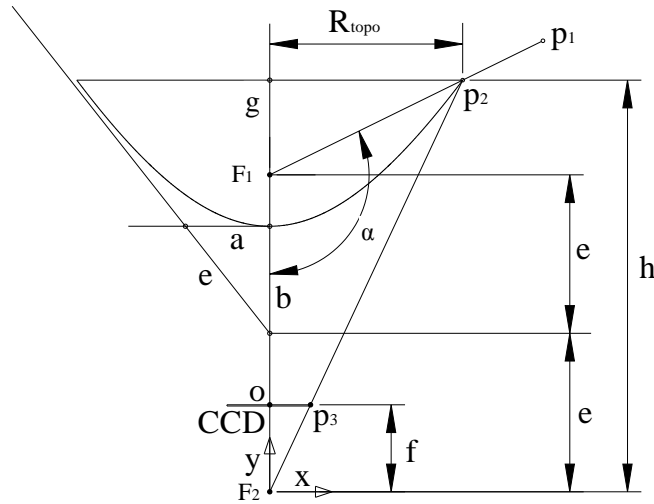


Figura 3.4 - Espelho hiperbólico associado a uma câmera de projeção perspectiva

em que f é a distância focal da câmera, h é a distância entre a borda do espelho e o ponto focal da câmera, R_{topo} é a coordenada no eixo das abscissas do topo do espelho e α é o ângulo máximo de visualização do sistema, ou seja, é o maior ângulo de incidência de raios luminosos que serão refletidos pelo espelho em direção ao CCD da câmera. Esses parâmetros são relacionados pelas equações que definem a hipérbole Eq. (3.3) e Eq. (3.4) e pelas relações trigonométricas do triângulo retângulo F_1p_2g Eq. (3.5).

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

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

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

Para que o sistema de visão omnidirecional utilize toda a capacidade do CCD da câmera e tenha um tamanho adequado à sua utilização, foi determinada empiricamente uma boa relação entre os elementos h e R_{topo} Eq. (3.6), que é definida pela relação entre os triângulos semelhantes F_2p_2g e F_2p_3o .

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

em que, R_{pixel} é o raio da maior circunferência que pode ser inscrita no CCD da câmera Fig.(3.5), medido em pixel e T_{pixel} é a dimensão de cada pixel do CCD da câmera, medido em milímetros.

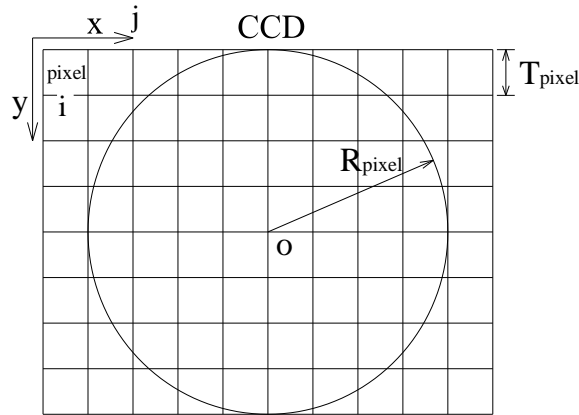


Figura 3.5– Circunferência de raio R_{pixel} inscrito no CCD da câmera.

Para calcular os pontos que definem o perfil do espelho hiperbólico é utilizada a Eq. (3.4). Essa equação é dependente das variáveis a e b , que são relacionadas pela excentricidade c da hipérbole Eq. (3.7).

$$c = \frac{a}{b} \quad (3.7)$$

Substituindo a coordenada (R_{topo}, h) do ponto P_2 da hipérbole e a Eq. (3.3) na equação que define a curva hiperbólica Eq. (3.4), obtêm-se a Eq. (3.8), que simplificada Eq. (3.9), Eq. (3.10) e Eq. (3.11) origina uma equação que expressa o parâmetro b em função da relação

a/b Eq. (3.12) e substituindo a Eq. (3.7) na Eq. (3.8), obtêm-se uma equação que expressa o parâmetro b em função da excentricidade c Eq. (3.13).

$$h = \sqrt{a^2 \left(1 + \frac{R_{topo}^2}{b^2}\right)} + \sqrt{a^2 + b^2} \quad (3.8)$$

$$h = \frac{a}{b} \sqrt{b^2 + R_{topo}^2} + b \sqrt{\frac{a^2}{b^2} + 1} \quad (3.9)$$

$$\left(\frac{a}{b} \sqrt{b^2 + R_{topo}^2}\right)^2 = \left(h - b \sqrt{\frac{a^2}{b^2} + 1}\right)^2 \quad (3.10)$$

$$b^2 - b \left(2h \sqrt{\frac{a^2}{b^2} + 1}\right) + \left(-\frac{a^2}{b^2} R_{topo}^2 + h^2\right) = 0 \quad (3.11)$$

$$b = h \sqrt{\frac{a^2}{b^2} + 1} - \frac{a}{b} \sqrt{h^2 + R_{topo}^2} \quad (3.12)$$

$$b = h \sqrt{c^2 + 1} - c \sqrt{h^2 + R_{topo}^2} \quad (3.13)$$

O parâmetro c , que representa a excentricidade da hipérbole, influencia na curva hiperbólica e conseqüentemente na região de visualização do sistema. O espelho inferior (Esp_1) com foco $F_{1,1}$ tem como região de visualização a área A Fig. (3.6) e o espelho superior (Esp_2) com foco $F_{1,2}$ tem como região de visualização a área B . Para determinar o parâmetro c de cada espelho, foram implementados diversos valores para c_1 e c_2 . O principal objetivo dessa implementação é projetar um espelho que associa a melhor interseção AB de área de visualização com a melhor distância entre os pontos focais $F_{1,1}$ e $F_{1,2}$, pois quanto maior for essa distância menor é a sensibilidade a erros, que são gerados durante o processamento da imagem. Entretanto, se a distância for muito grande o sistema deixa de ser compacto, reduzindo assim a possibilidade de o sistema ser embarcado em um robô móvel. Depois de analisar os resultados obtidos durante as interações, optou-se por escolher as excentricidades hiperbólicas $c_1=1,5$ e $c_2=0,9$ para o espelho inferior ($Esp.1$) e superior ($Esp.2$), respectivamente.

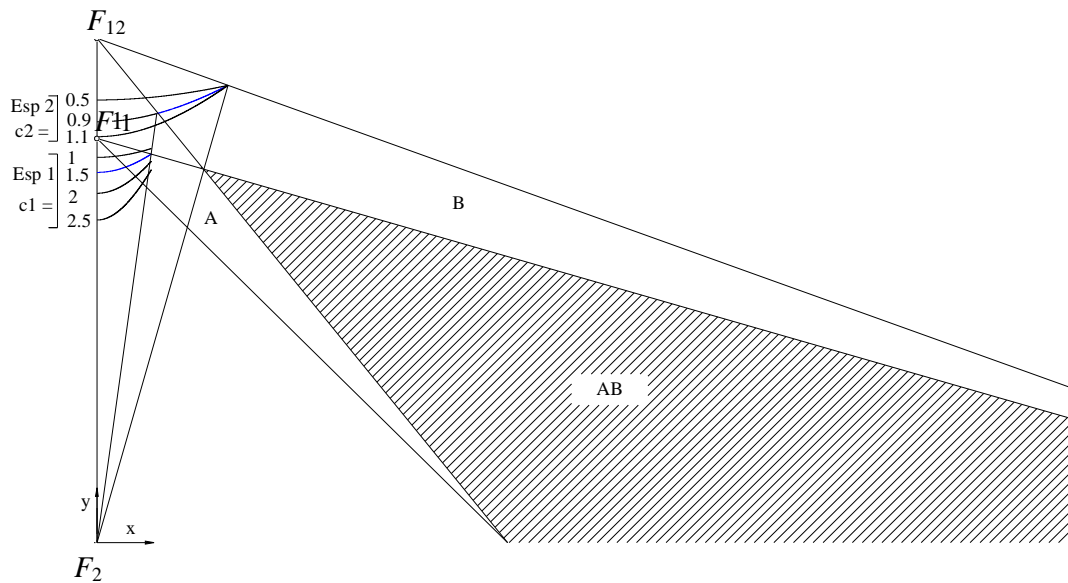


Figura 3.6 - Variações dos perfis dos espelhos

Para calcular as coordenadas dos pontos que definem os perfis dos espelhos 1 e 2, foi utilizado um sistema composto pelas equações Eq. (3.3), Eq. (3.4), Eq. (3.6), Eq. (3.7) e Eq. (3.13), formando um sistema indeterminado. Para resolver esse problema, foram estabelecidos os valores de alguns parâmetros. As escolhas desses valores tiveram como base o melhor aproveitamento da área do CCD da câmera e a visualização da região desejada Fig. (3.7), em que o lobo inferior tem como superfície espelhada o Esp_1 e é responsável pela visualização da região A e o lobo superior tem como superfície espelhada o Esp_2 que é responsável pela visualização da região B. A intersecção dessas duas regiões forma a região AB, que é a que realmente interessa, pois os objetos que existirem nessa área serão refletidos pelos dois lobos do espelho, formando uma imagem omnidirecional estérea. As regiões que não fazem parte da intersecção serão descartadas durante o processamento da imagem. Para esse projeto foram estabelecidos os valores de $R_{topo1} = 23.3\text{ mm}$, $R_{topo2} = 60\text{ mm}$, $f = 16\text{ mm}$ e $T_{pixel} = 0,009\text{ mm}$. O CCD da câmera é um quadrado de 1008×1008 pixels, o que define um $R_{pixel2} = 504$ pixels e para determinar o R_{pixel1} foi utilizado a relação $R_{pixel1} = (R_{pixel2} - (R_{pixel2} - sombra)/2) / T_{pixel}$. Essa equação foi definida para otimizar o aproveitamento do CCD da câmera. A variável *sombra* é o raio que define a região do CCD que não será utilizado, pois nessa área está o reflexo da própria câmera ou do robô que tem o sistema embarcado. Para que o sistema omnidirecional possa ser embarcado no centro da parte superior do robô móvel Nomad XR4000, com dimensões de 620 mm de diâmetro e 850 mm de altura, foi utilizado $sombra = 1\text{ mm}$. O valor da *sombra*

foi calculado, considerando que o ponto focal da câmera está a uma altura de 200 mm a partir da parte superior do robô.

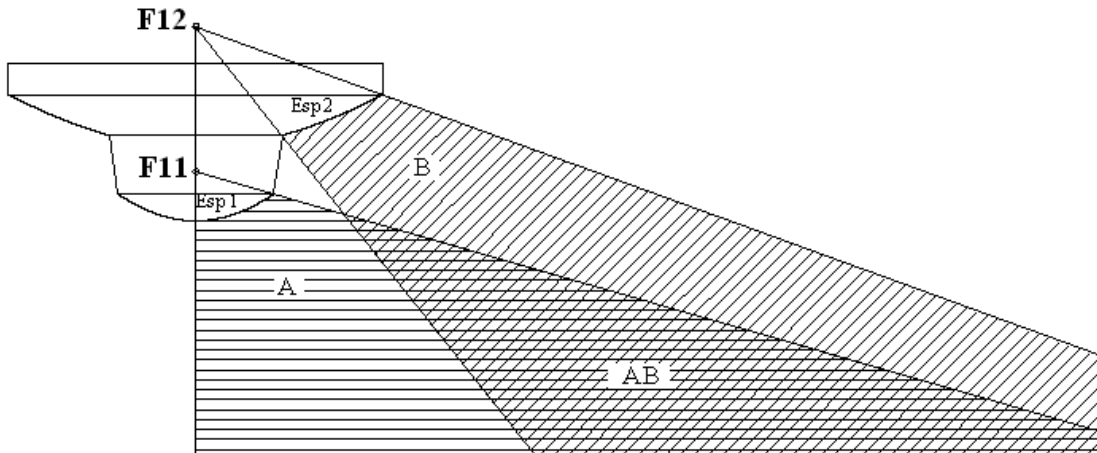


Figura 3.7 - Perfil do espelho de lobo duplo projetado.

Com a definição dos parâmetros iniciais e a aplicação do programa desenvolvido, foram calculados os outros parâmetros necessários para o projeto do espelho Tab. (3.3).

Tabela 3.3 - Parâmetros do sistema de visão projetado.

PARÂMETROS FIXADOS					PARÂMETROS CALCULADOS					
<i>Espelho</i>	R_{topo} (mm)	f (mm)	T_{pixel} (mm)	R_{pixel} (pixel)	c (adim)	h (mm)	$2e$ (mm)	a (mm)	b (mm)	α (graus)
1	23,3	16	0,009	233	1,5	184,971	187,068	77,825	51,883	70
2	60	16	0,009	504	0,9	211,640	233,420	78,075	86,750	71

Com a determinação dos parâmetros necessários e com a substituição desses na equação hiperbólica Eq. (3.4), são geradas duas equações Eq. (3.14) e Eq. (3.15), que definem as hipérbolas dos perfis 1 e 2, respectivamente.

$$y_1 = \sqrt{77,825^2 \cdot \left(1 + \frac{x_1^2}{51,883^2}\right)} + 93,534 \quad (3.14)$$

$$y_2 = \sqrt{78,075^2 \left(1 + \frac{x_2^2}{86,750^2} \right)} + 116,710 \quad (3.15)$$

As Eq. (3.14) e Eq. (3.15) foram resolvidas com x_1 e x_2 incrementados de 0,005 mm, gerando assim 4660 pontos para o perfil 1 e 6800 pontos para o perfil 2 Fig. (3.8,b). Para uma melhor visualização do espelho foi construído um modelo 3D Fig. (3.8,a). Essa imagem foi gerada pelo AutoCAD™, através da revolução do perfil calculado e representa fielmente o espelho hiperbólico de lobo duplo que foi projetado, cujos parâmetros estão expressos na Tab. (3.3).

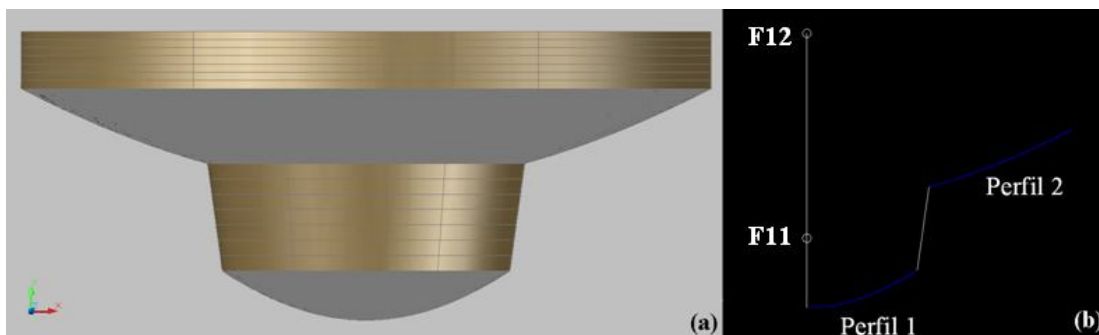


Figura 3.8 - Espelho hiperbólico de lobo duplo: (a) sólido gerado a partir da revolução do perfil do espelho; (b) perfil do espelho calculado.

3.3.2 Acabamento superficial do espelho

O espelho projetado pode ser fabricado em alumínio polido e para se conseguir um acabamento superficial que reflita o ambiente estudado com o mínimo de distorção possível, é recomendado que se utilize um torno de ultraprecisão para realizar o acabamento espelhado (Correa, 2004). A escolha desse método é justificada pela capacidade de fabricação de diversos tipos de perfis, com grande precisão dimensional que esse método proporciona. A utilização desse equipamento dificulta o processo de fabricação, porém diminui os erros de forma provocados por outros processos de polimentos, tais como a cromagem ou polimento com abrasivos. Para reduzir o tempo de utilização do torno de ultraprecisão e conseqüentemente os custos de fabricação, pode ser realizada uma preusinagem em um torno CNC convencional.

Mesmo com a utilização de um torno de ultraprecisão é necessário observar alguns parâmetros construtivos que determinam a precisão necessária para que o espelho satisfaça as limitações do sistema omnidirecional projetado. Terão que ser observados basicamente dois parâmetros do perfil do espelho. O primeiro parâmetro é o desvio de forma que o perfil usinado terá com relação ao perfil teórico calculado. O segundo parâmetro é o acabamento superficial do espelho, isto é, qual deve ser o acabamento da superfície espelhada para que a reflexão da luz proporcione uma imagem nítida.

A determinação do incremento mínimo que deve ser utilizado durante o processo de usinagem será determinado com o auxílio de uma simulação computacional, onde é criado um ambiente virtual com dimensões conhecidas. A rotina de programação desenvolvida para gerar a imagem estérea do ambiente virtual utiliza o POV-Ray, um software livre que tem como objetivo a criação de imagens em três dimensões com grande realismo, por isso, tem sido utilizado em alguns trabalhos de simulação computacional (Burbridge e Spacek, Svoboda et al, 1997).

A simulação foi realizada com o sistema de visão omnidirecional catadióptrico embarcado na parte superior de um robô cilíndrico com 850 mm de altura e 620 mm de diâmetro, semelhante às dimensões do robô móvel Nomad XR4000 produzido pela Nomadic Technologies (1999), disponível no laboratório GRACO (Grupo de Automação e Controle) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (UNB). O robô foi posicionado no centro de uma sala quadrada de 6 x 6 m com piso quadriculado de 500 x 500 mm em preto e branco, com paredes quadriculadas de 500 x 500 mm em preto e vermelho ou preto e verde. Foram colocadas três caixas azuis de tamanhos diferentes no piso da sala Fig. (3.9). A caixa 1 tem 500 x 500 x 800 mm de altura, a caixa 2 é um cubo de 500 mm de lado e a caixa 3 tem 500 x 400 x 300 mm de altura.

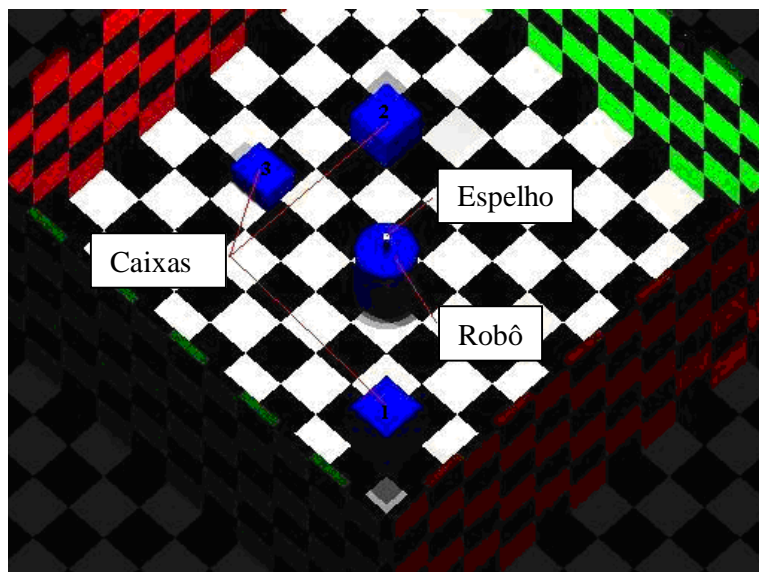


Figura 3.9 - Ambiente simulado.

Para obtenção da primeira imagem omnidirecional estérea do ambiente simulado Fig. (3.10), foi utilizado um incremento de 0,005 mm para a obtenção da superfície espelhada, resultando em 4660 pontos para o perfil 1 e 6800 pontos para o perfil 2.

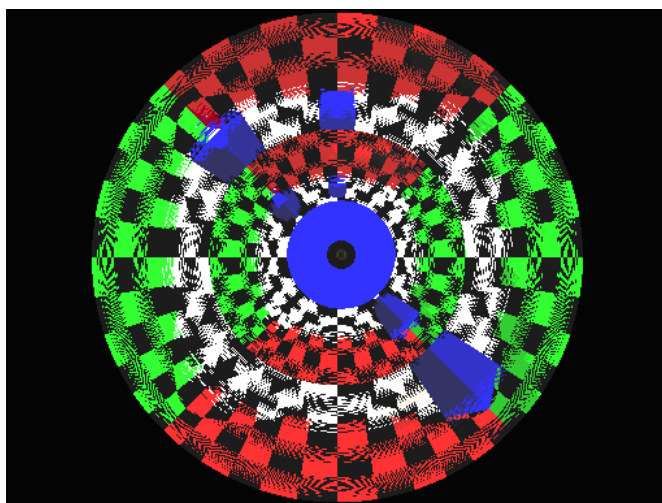


Figura 3.10 - Simulação com espelho hiperbólico de lobo duplo, com coordenadas reduzidas.

Nota-se que há distorção na imagem, tais efeitos ópticos são gerados pelos erros de forma do perfil. Para resolver esse problema foi realizada outra simulação com incremento de

0,0001 mm, que é aproximadamente o incremento de um torno de ultraprecisão (Grassi-Jr , 2002), resultando em uma superfície espelhada, com 230.000 pontos para o perfil 1 e 340.000 pontos para o perfil 2 Fig. (3.11).

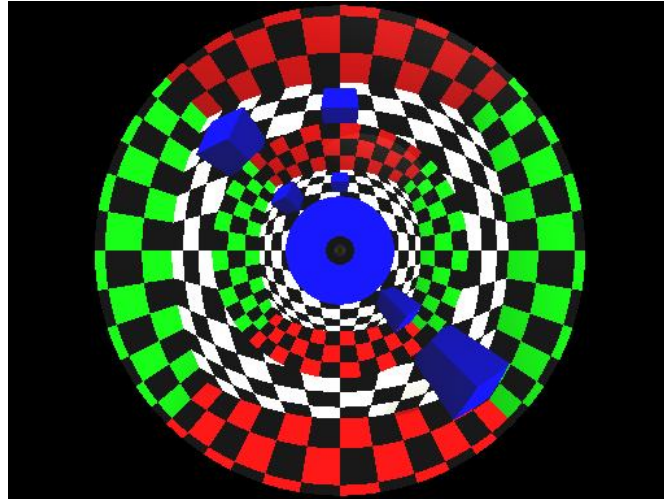


Figura 3.11 - Simulação com espelho hiperbólico de lobo duplo.

O resultado obtido nessa simulação confirma, neste caso específico, a possibilidade da utilização de um torno de ultraprecisão na fabricação do espelho hiperbólico de lobo duplo.

3.4 MAPEAMENTO DE AMBIENTE UTILIZANDO IMAGEM ESTÉREA OMNIDIRECIONAL

Para que um robô móvel possa navegar em uma determinada região é necessário conhecer as dimensões desse ambiente, de maneira que possibilite a localização dos obstáculos existentes e a determinação de sua trajetória. Uma das maneiras de se conhecer uma região é a realização de um mapeamento local, que pode ser realizado com a utilização de diversos tipos de sensores, tais como sonar, scanner laser ou câmera. Neste trabalho será utilizado um sistema de visão omnidirecional catadióptrico com espelho hiperbólico de lobo duplo, que possibilita a obtenção de uma imagem omnidirecional estérea do ambiente estudado. Com o processamento da imagem estérea é possível determinar as distâncias dos objetos existentes no ambiente e posterior realização do mapeamento.

A imagem omnidirecional estérea será processada com a utilização de técnicas estereoscópicas, que definem o tipo de característica que deve ser observada no ambiente, a localização dos pares de características semelhantes na imagem estereoscópica e a definição do mapa que representa o ambiente, a partir da triangulação entre características correspondentes.

Uma característica é um elemento do ambiente que está projetado na imagem e deve ter sua posição definida, para que seja possível a reconstrução do ambiente. A escolha da característica adequada é uma etapa importante do trabalho, e para que haja um bom resultado devem ser considerados o tipo de ambiente estudado e o tipo de sistema de visão utilizado.

A correspondência entre características semelhantes em um par de imagens estéreas consiste na identificação dos pares de características existentes nas duas imagens, que representem um mesmo elemento no ambiente. Para isso é preciso definir uma característica na primeira imagem e utilizar um algoritmo de varredura que encontre na segunda imagem o elemento equivalente. Essa etapa do trabalho geralmente é responsável por grande parte do processamento utilizado na visão estérea. Bons procedimentos e boas técnicas devem reduzir o custo computacional e minimizar os erros.

Com o conhecimento prévio dos parâmetros intrínsecos do sistema e com a utilização do par de características semelhantes identificados é possível calcular a distância entre o ponto do ambiente que está sendo estudado e o ponto focal do espelho. O processo de triangulação deve percorrer o caminho inverso ao da luz que gera a imagem. Esse método é extremamente sensível à escolha do par de características semelhantes, pois um pequeno erro nessa etapa pode provocar uma grande variação na coordenada que deveria identificar a posição do elemento existente no ambiente.

3.4.1 Aquisição de imagem estérea omnidirecional

Os parâmetros que definem o perfil do espelho são responsáveis pela visualização da região desejada do ambiente. Como o espelho proposto tem lobo duplo, esse problema fica mais acentuado, pois a área de interesse tem que ser refletida pelos dois espelhos,

formando um par de imagens estéreas radiais e concêntricas, sendo que as imagens não podem ter superposição de áreas no CCD da câmera.

Para testar o perfil do espelho que foi desenvolvido, será realizada uma simulação de aquisição de imagem a partir de um ambiente virtual com dimensões conhecidas. A rotina de programação desenvolvida foi compilada com o auxílio do POV-Ray, programa que cria imagens 3D realistas e com alta precisão dimensional. Esses são os principais fatores que motivaram a escolha do software.

Para que a simulação represente a realidade com máxima fidelidade, foi estabelecida para a simulação uma câmera com parâmetros iguais aos que foram utilizados para a determinação do perfil do espelho, ou seja, uma câmera de projeção perspectiva com foco $f = 16mm$ e CCD quadrado de 1008 x 1008 pixels.

A iluminação foi definida de maneira que o ambiente receba claridade uniforme. Para isso foram determinados quatro pontos de iluminação, um em cada canto da imagem, a uma altura 3m.

O ambiente a ser estudado consiste em um piso de 800 x 800 mm, com quadriculado preto e branco de 50 x 50 mm, gerado com recursos de definição de planos e texturas do próprio programa.

O espelho hiperbólico de lobo duplo foi gerado em 3D, a partir da revolução do perfil calculado, com incremento de 0,0001 mm para a coordenada das abscissas. Para que o sólido gerado tenha uma superfície espelhada é necessário definir uma textura que tenha uma alta reflexão.

Depois da definição dos elementos foi realizada a compilação do programa que gerou a imagem do ambiente refletida no espelho Fig (3.12). A imagem gerada está no formato tipo PGM (Portable Gray Map) em níveis de cinza.

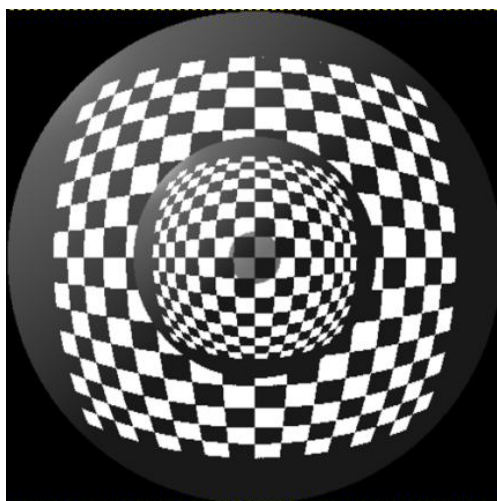


Figura 3.12 - Imagem omnidirecional estérea, com resolução de 1008 x 1008 pixels.

Para saber se a imagem foi gerada corretamente é necessário realizar o processamento da imagem de maneira que se possa reconstruir o tabuleiro a partir da imagem omnidirecional estérea gerada. A reconstrução do tabuleiro é descrito nas seções 3.4.2, 3.4.3 e 3.4.4 apresentadas a seguir.

3.4.2 Extração de características da imagem por segmentação

O processo de segmentação consiste em localizar diferentes objetos na imagem, normalmente delimitados por bordas, mudança de intensidade ou coloração (Huguet, 2003). A técnica de segmentação que será utilizada nesse trabalho baseia-se nas bordas existentes na imagem, ou seja, as características da imagem a serem analisadas são os contornos dos elementos pertencentes ao ambiente. A detecção de bordas é uma operação de baixo nível para a extração de feições, normalmente baseada na aplicação de operações de detecção de variação de brilho na imagem, que pode ser descrito como um gradiente local.

A maioria dos processos de identificação de bordas baseia-se no fato de que as discontinuidades são na verdade uma modificação abrupta do nível de cinza em torno do pixel em estudo Fig. (3.13, a), assim, tal modificação pode ser determinada pela derivada do sinal de cinza na posição do pixel. Neste trabalho será utilizado um método de

diferenciação de primeira ordem Fig. (3.13, c), que enfatiza pontos de mudança na função Fig. (3.13, b) e apresenta resposta nula onde não há variação.

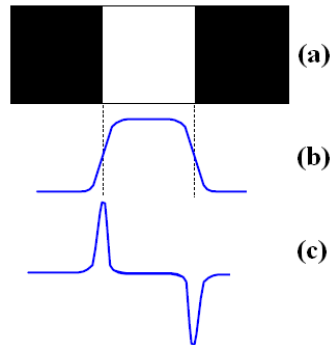


Figura 3.13 - Variação de pixel: (a) variação do nível de cinza; (b) mudança na função; (c) diferenciação de primeira ordem.

Para se obter uma aproximação da primeira derivada será utilizado o operador de Prewitt (Gonzalez e Woods, 2007), que é uma máscara de diferenciação que, em convolução com a imagem, realça as bordas que tenham variação na intensidade do pixel. A escolha do operador de Prewitt deu-se pelo fato de que esse operador apresenta um menor custo computacional e o sistema omnidirecional projetado é feito para navegação de robôs móveis, necessitando assim de um sistema com baixo custo computacional. Após o realce das bordas será realizada uma binarização da imagem realçada, que tem como objetivo reduzir os falsos contornos.

As máscaras do operador de Prewitt Fig. (3.14) são utilizadas em convolução com a imagem $I(i,j)$ e retornam os gradientes G_x e G_y nas direções x e y respectivamente Eq. (3.15, 3.16, 3.17, 3.18 e 3.19). Os gradientes são utilizados para o cálculo da imagem I_{con} , Eq. (3.20), que é armazenada em forma de vetor. Esse formato de imagem é a soma das linhas da matriz que armazena os dados da imagem em formato PGM.

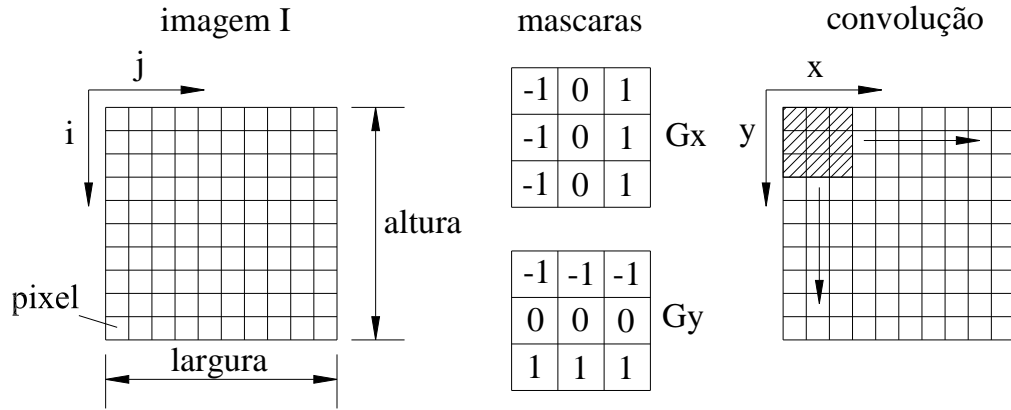


Figura 3.14 - Operador de Prewitt.

$$k_i = (y-1)l\text{argura} + x \Rightarrow \text{para}\{x = j+1 : l\text{argura} - 1; y = i+1 : \text{altura} - 1\} \quad (3.15)$$

$$k = y.l\text{argura} + x \Rightarrow \text{para}\{x = j+1 : l\text{argura} - 1; y = i+1 : \text{altura} - 1\} \quad (3.16)$$

$$k_o = (y+1)l\text{argura} + x \Rightarrow \text{para}\{x = j+1 : l\text{argura} - 1; y = i+1 : \text{altura} - 1\} \quad (3.17)$$

$$G_x = -I[k_i - 1] + I[k_i + 1] - I[k - 1] + I[k + 1] - I[k_o - 1] + I[k_o + 1] \quad (3.18)$$

$$G_y = -I[k_i - 1] - I[k_i] - I[k_i + 1] + I[k_o - 1] + I[k_o] + I[k_o + 1] \quad (3.19)$$

$$I_{con}[k] = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (3.20)$$

A imagem I_{con} Fig. (3.15, a) é a imagem I Fig. (3.12) com as bordas realçadas, em que quanto maior o gradiente calculado maior será o valor armazenado no pixel, que tem um valor entre 0 e 255. Para facilitar na identificação das bordas da imagem, foi realizada uma binarização na imagem I_{con} , Eq. (3.21), que utiliza como valor de corte o $t_0=100$. Com isso surge a imagem binária I_{bi} , Fig. (3.15, b).

$$\begin{aligned} & \text{if}(I_{con} > t_0) & (3.21) \\ & \Rightarrow I_{bi}[k] = 255; \\ & \text{else} \\ & \Rightarrow I_{bi}[k] = 0; \end{aligned}$$

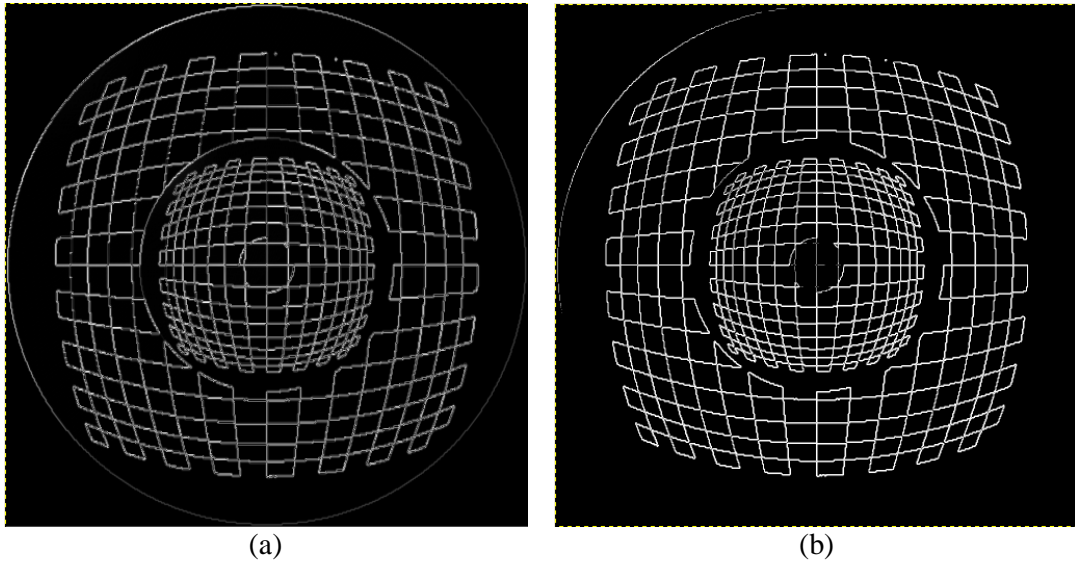


Figura 3.15 - Imagem processada: (a) realce de bordas; (b) imagem binária.

3.4.3 Correspondência entre características semelhantes

Uma das principais etapas do processamento de uma imagem estereoscópica é a localização dos pares de características semelhantes que representam o mesmo ponto do ambiente, ou seja, identificar o ponto c_2 , tendo o ponto c_1 conhecido Fig. (3.16). Uma característica importante do sistema com espelho hiperbólico de lobo duplo é que o ponto correspondente c_2 sempre pertence ao prolongamento da linha radial que une o ponto O ao ponto c_1 . Isso facilita a identificação do ponto c_2 e reduz o custo computacional, pois a busca pelo ponto correspondente fica limitada a uma reta que pertence à área do CCD da câmera que é disponível para a projeção da imagem refletida pelo espelho 2.

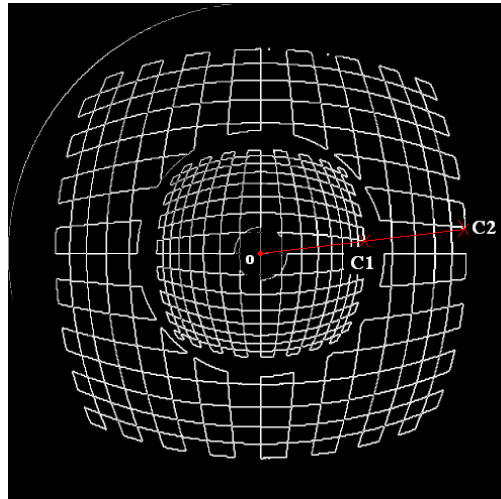


Figura 3.16 - Pontos correspondentes.

O método utilizado para a identificação do par de pontos correspondentes é o do menor somatório dos quadrados das diferenças. Esse método realiza o somatório das diferenças de uma janela previamente determinada M_1 e M_2 Fig. (3.17), em que os centros das janelas são os pontos c_1 e c_2 a serem estudados e os outros elementos das matrizes são as vizinhanças dos pontos.

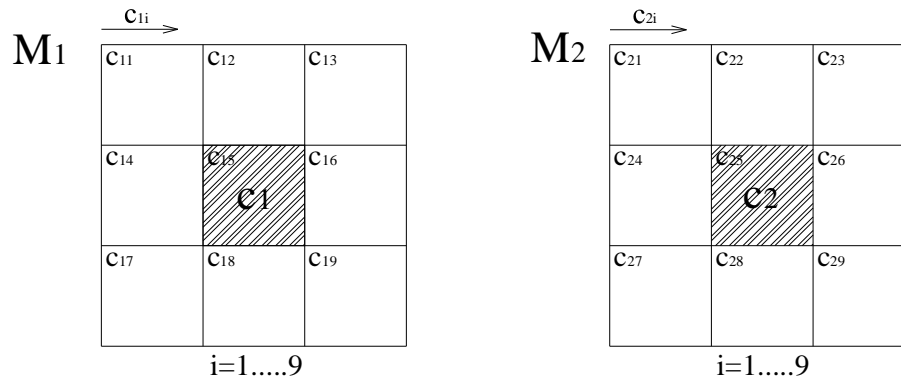


Figura 3.17 - Janelas do somatório dos quadrados das diferenças.

Inicialmente é estabelecido um ponto de interesse c_1 e a dimensão i da janela. Posteriormente é estabelecido um provável ponto correspondente c_2 e em seguida é realizado o somatório dos quadrados das diferenças Eq. (3.22). Essa operação é realizada

para todos os possíveis pontos de correspondência, sendo que o ponto que proporcionar o menor valor SSD , deve ser o ponto correspondente. Esse método pode gerar erros, que são agravados pela homogeneidade dos pixels da imagem, pois quanto mais homogênea for a imagem, maiores serão as chances de se ter pontos que tenham vizinhanças semelhantes. Para amenizar esse problema pode-se escolher uma máscara com dimensões maiores ou com formatos específicos.

$$SSD = \sum_{i=1}^{i=n} (c_{1i} - c_{2i})^2 \quad (3.22)$$

No sistema omnidirecional estéreo, a imagem gerada pelo espelho 1 é menor do que a gerada pelo espelho 2, com isso, o mesmo objeto tem escalas diferentes para as imagens geradas pelos dois espelhos, tornando a janela com formato quadrado ineficaz para a identificação do ponto equivalente. Neste trabalho é proposto um novo modelo, que utiliza uma janela circular Fig. (3.18), em que cada pixel vizinho se encontra a um ângulo ε , previamente estabelecido. Quanto menor o ε , maior será a quantidade de pontos vizinhos e melhor poderá ser o resultado, porém o custo computacional é aumentado. Para esse trabalho foi adotado um $\varepsilon = 0,1$ radianos, para um ângulo de 2π , o que estabelece uma janela com 60 células, ou seja, $n=60$.

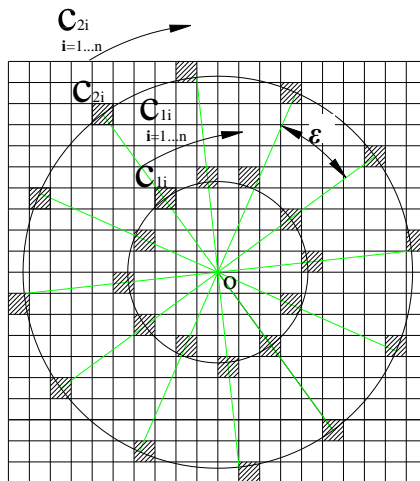


Figura 3.18 - Modelo radial da janela do somatório dos quadrados das diferenças.

Para implementar o sistema desenvolvido, foi elaborado uma rotina em linguagem *C* que é representado pelo fluxograma da Fig. (3.19) e para testar esse programa, foi realizada uma simulação que identifica os pares de pontos equivalentes. Na simulação, foi utilizada a imagem binária desenvolvida na seção anterior Fig. (3.15, b). A imagem foi dividida em duas áreas relevantes Fig. (3.20, a), a primeira I_1 , limitada pelas circunferências de raios R_1 e R_2 e a segunda I_2 , limitada pelas circunferências R_3 e R_4 . Inicialmente são identificados na área I_2 os pixels com valores iguais a 255 (branco) e para cada pixel identificado é determinado um pixel correspondente que pertença à área I_1 .

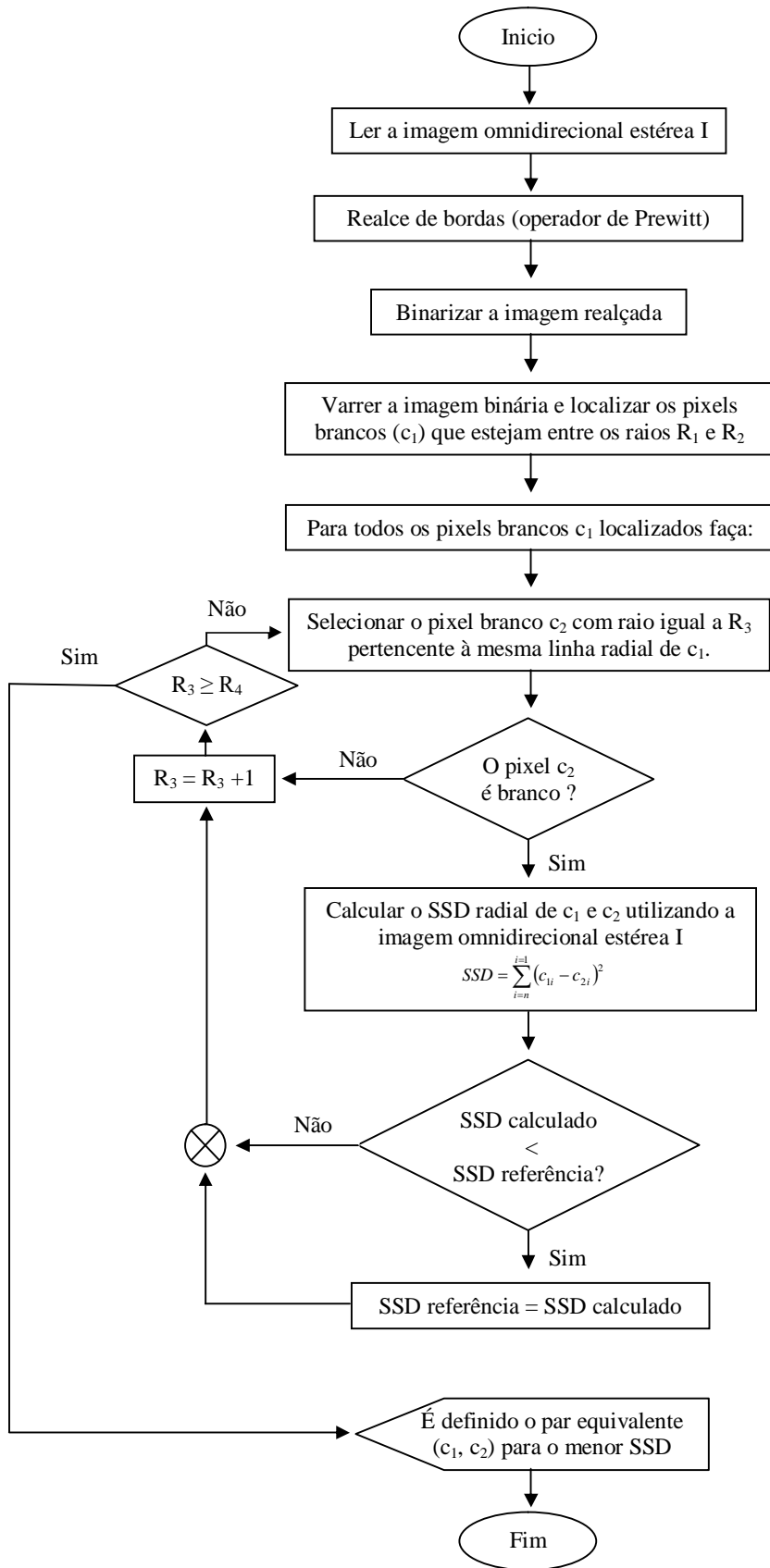


Figura 3.19 - Fluxograma de identificação do par equivalente.

Após a identificação dos pontos equivalentes, foi gerada uma imagem com as coordenadas dos pontos equivalentes que foram determinados Fig. (3.20, b).

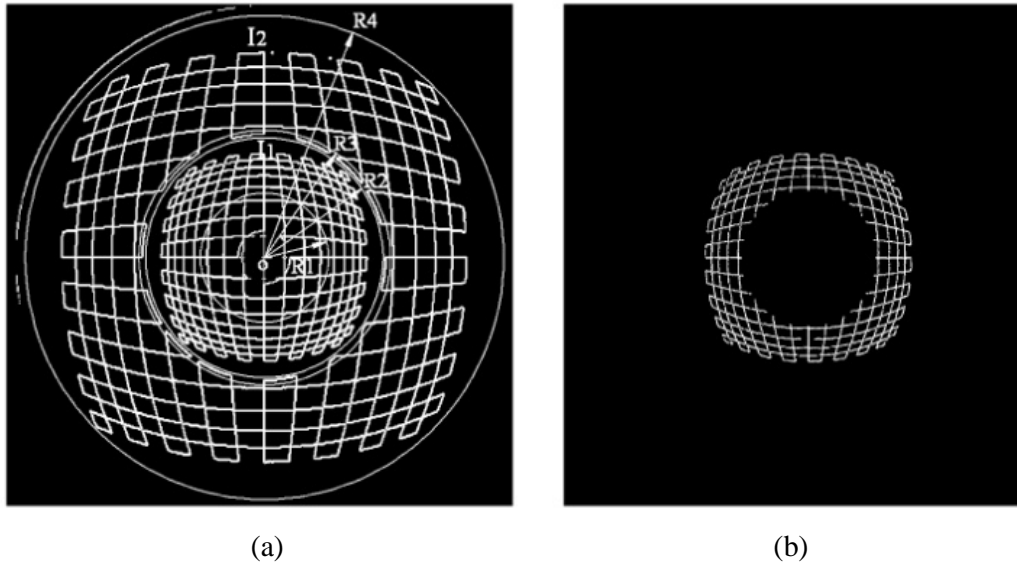


Figura 3.20 - Determinação dos pontos equivalentes: (a) áreas de varredura; (b) pontos equivalentes.

Após a identificação, a imagem gerada foi sobreposta à imagem binária, tendo como resultado uma superposição bastante expressiva Fig. (3.21). Em uma análise visual foram identificados alguns pontos que não foram sobrepostos e continuaram brancos. Isso significa que existem alguns pares de pixels supostamente equivalentes que estão errados, ou seja, os dois pontos não representam o mesmo ponto do ambiente. A utilização desse par de pontos provoca um erro na determinação da coordenada do ponto de origem pertencente ao ambiente, gerando assim erros de posicionamento de obstáculos no mapa calculado.

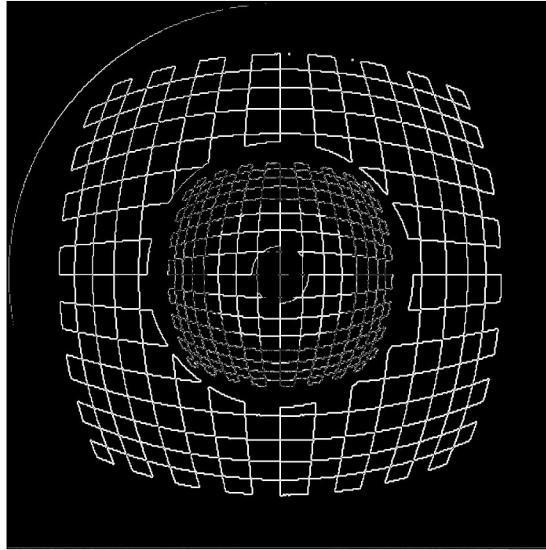


Figura 3.21 - Superposição de imagens.

3.4.4 Triangulação entre características correspondentes

A cada suposto par de pontos equivalentes c_1 e c_2 localizados Fig. (3.22, b) é calculada a coordenada (X, Y) do ponto P Fig. (3.22, a) que pertence ao ambiente. Para o cálculo da coordenada do ponto P foi determinado um modelo matemático que descreve o caminho inverso ao da luz e para isso foram utilizadas equações trigonométricas que descrevem as relações necessárias.

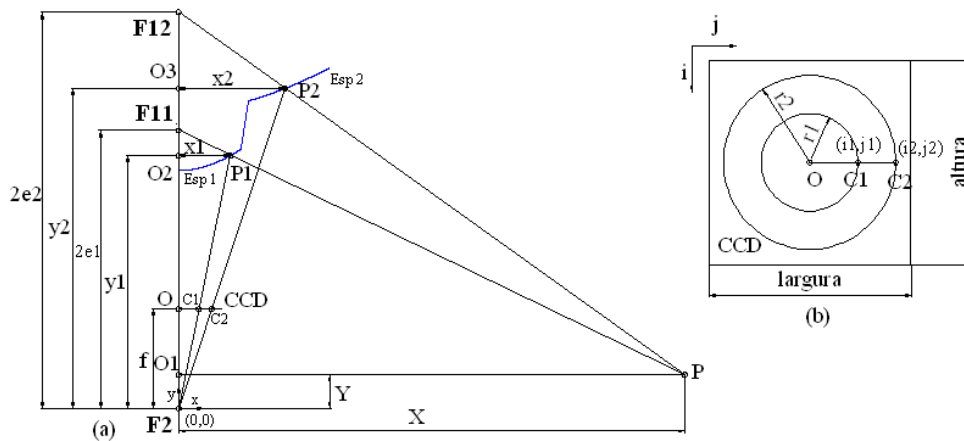


Figura 3.22 - Coordenada de um ponto do ambiente: (a) triangulação; (b) CCD da câmera.

Inicialmente foram determinados os raios das circunferências r_1 e r_2 , a qual os pontos c_1 e c_2 pertencem Fig. (3.22, b), ou seja, os segmentos oc_1 e oc_2 respectivamente. Para isso foi utilizado uma relação de triângulo retângulo Eq. (3.23) e Eq. (3.24).

$$r_1 = oc_1 = \sqrt{\left(\frac{\text{altura}}{2} - i_1\right)^2 + \left(j_1 - \frac{\text{largura}}{2}\right)^2} \quad (3.23)$$

$$r_2 = oc_2 = \sqrt{\left(\frac{\text{altura}}{2} - i_2\right)^2 + \left(j_2 - \frac{\text{largura}}{2}\right)^2} \quad (3.24)$$

Como o triângulo F_2Oc_1 é semelhante ao triângulo $F_2o_3P_1$ e o triângulo F_2Oc_2 é semelhante ao triângulo $F_2o_3P_2$, é possível relacionar o elemento x_1 com y_1 Eq. (3.25) e x_2 com y_2 Eq. (3.26).

$$\frac{y_1}{f} = \frac{x_1}{r_1} \quad (3.25)$$

$$\frac{y_2}{f} = \frac{x_2}{r_2} \quad (3.26)$$

Realizando a combinação da Eq. (3.25) com a Eq. (3.4) que deu origem ao perfil do espelho 1 obtêm-se as Eq. (3.27) e Eq. (3.28) e com a fusão da Eq. (3.26) com a Eq. (3.4) que deu origem ao perfil do espelho 2 obtêm-se as e Eq. (3.29) e Eq. (3.30). Com as equações obtidas é possível calcular as coordenadas dos pontos $P_1(x_1, y_1)$ e $P_2(x_2, y_2)$.

$$x_1 = \frac{\left(fe_1b_1 + a_1\sqrt{f^2b_1^2 + r_1^2e_1^2 - a_1^2r_1^2}\right)b_1r_1}{f^2b_1^2 - a_1^2r_1^2} \quad (3.27)$$

$$y_1 = \frac{x_1f}{r_1} \quad (3.28)$$

$$x_2 = \frac{\left(fe_2b_2 + a_2\sqrt{f^2b_2^2 + r_2^2e_2^2 - a_2^2r_2^2}\right)b_2r_2}{f^2b_2^2 - a_2^2r_2^2} \quad (3.29)$$

$$y_2 = \frac{x_2f}{r_2} \quad (3.30)$$

O triângulo $F_{11}PO_1$ é semelhante ao triângulo $F_{11}P_1O_2$ e o triângulo $F_{12}PO_1$ é semelhante ao triângulo $F_{12}P_2O_3$. Utilizando as relações de triângulos semelhantes são obtidas as equações que relacionam as coordenada do ponto P (X , Y) com as coordenadas do ponto P_1 (x_1 , y_1) e P_2 (x_2 , y_2) Eq. (3.31) e Eq. (3.32).

$$\frac{X}{x_1} = \frac{2e_1 - Y}{2e_1 - y_1} \quad (3.31)$$

$$\frac{X}{x_2} = \frac{2e_2 - Y}{2e_2 - y_2} \quad (3.32)$$

Realizando a fusão da Eq. (3.31) com a Eq. (3.32), obtêm-se as Eq. (3.33) e Eq. (3.34), que definem a coordenada real do ponto P .

$$X = \frac{2x_1x_2(e_2 - e_1)}{x_1(2e_2 - y_2) - x_2(2e_1 - y_1)} \quad (3.33)$$

$$Y = 2e_2 - \frac{X(2e_2 - y_2)}{x_2} \quad (3.34)$$

Para cada par de pontos equivalentes o programa desenvolvido determina uma coordenada (X , Y) de um ponto que compões as extremidades dos objetos existentes no ambiente, tornando possível a criação de um mapa do ambiente estudado.

A coordenada X Fig. (3.23) é transformada em um vetor com origem no centro O da matriz que representa o mapa. O vetor tem direção θ igual ao do par de pontos equivalentes que possibilitou o cálculo da coordenada (X , Y).

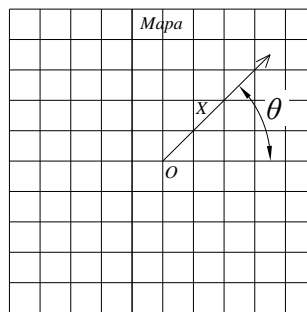


Figura 3.23 – Vetor (X , θ) para cada ponto calculado.

Transcrevendo as coordenadas polares (X, θ) obtidas para uma matriz e gerando um mapa que representa o ambiente estudado Fig. (3.24, a) e sobrepondo o mapa ideal ao mapa calculado Fig. (3.24, b), é possível identificar a semelhança entre os mapas.

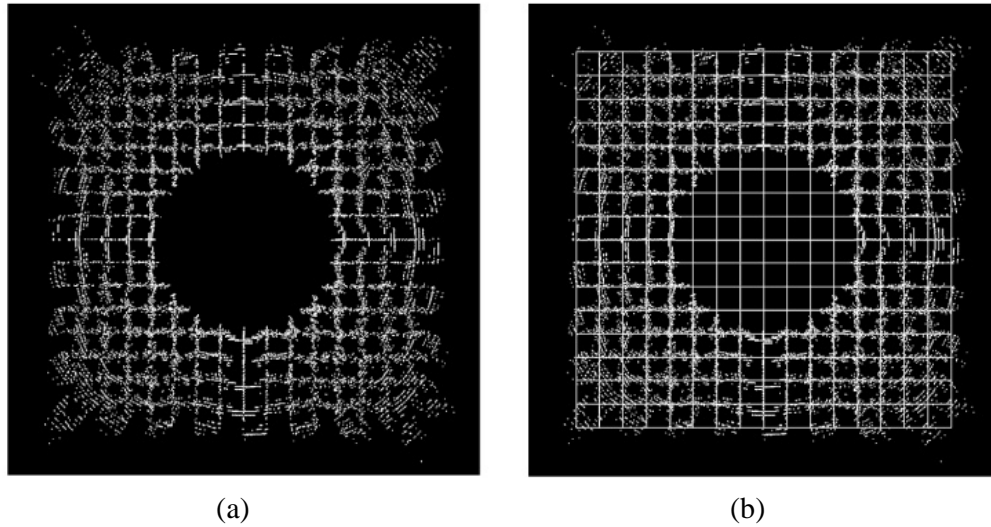


Figura 3.24 - Mapeamento: (a) mapa calculado; (b) superposição do mapa ideal ao mapa calculado.

3.4.5 Incerteza de medição do sistema de visão omnidirecional catadióptrico

O sistema de visão omnidirecional que será utilizado para identificar a posição dos objetos existentes no ambiente gera dados incertos. Uma importante etapa da construção do mapa é a determinação das incertezas geradas por esses sensores, e para isso será utilizada a probabilidade e a estatística.

Para que um robô possa navegar com segurança em um ambiente, é preciso que os objetos existentes tenham suas posições determinadas, gerando assim um mapa do ambiente. Esse mapa será armazenado em uma matriz de probabilidades, denominada grade de evidências. Essa grade tem duas dimensões e representa um ambiente 3D em 2D. As coordenadas dos pontos que definem as bordas dos objetos serão projetadas horizontalmente na grade de evidências, que está localizada no plano de locomoção do robô que é perpendicular ao eixo ótico do sistema omnidirecional Fig. (3.25).

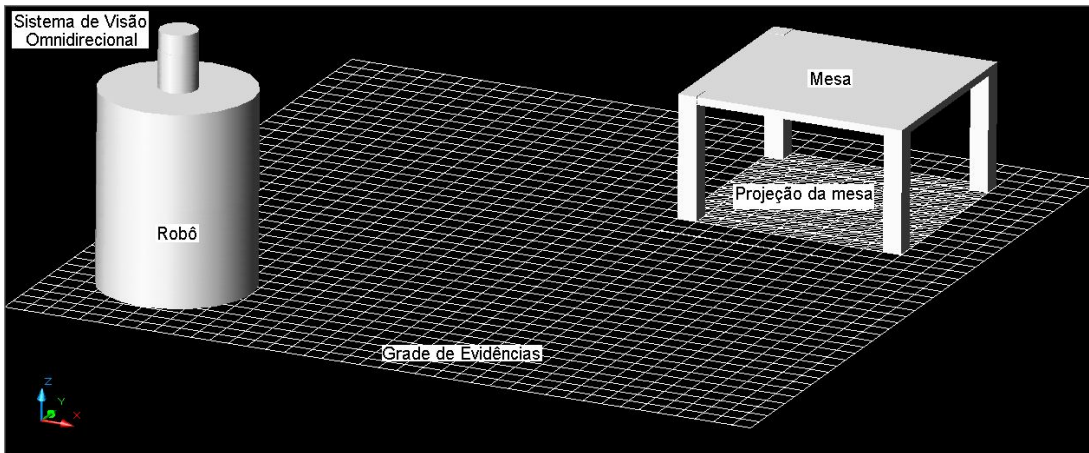


Figura 3.25 - Ambiente virtual da projeção de objetos na grade de evidências.

Como o sistema omnidirecional utilizado não fornece informações exatas a respeito da geometria do ambiente estudado, optou-se por desenvolver um modelo probabilístico que definisse uma área de possível localização do ponto estudado. O modelo do sensor descreve o quanto deve ser aumentado ou diminuído o valor armazenado em cada célula da grade de evidências que estão ao redor do ponto identificado. Inicialmente é preciso desenvolver um modelo para o sistema de visão que forneça informações importantes sobre a existência de um objeto numa determinada região observada.

O autor Elfes (1989) propôs um modelo probabilístico para um sensor ultra-sônico. O sonar é um sensor altamente incerto, assim como o sistema omnidirecional estudado nesse trabalho. O modelo utilizado para o sonar será adaptado para o novo sistema omnidirecional, de modo que as probabilidades que compõem o modelo representem com a maior fidelidade possível o erro gerado pelo sistema omnidirecional.

O modelo proposto por Elfes (1989) Eq. (3.35), trata as incertezas de medição do sonar, em duas dimensões, sendo que a primeira define a distância X do objeto detectado Fig. (3.26) e a segunda define o ângulo θ de posicionamento do sensor. O modelo é descrito por uma distribuição Gaussiana bidimensional, que determina a probabilidade de um evento H ocorrer.

$$H(X, \theta | r_{x,y}, \theta_{x,y}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_X^2\sigma_\theta^2}} \exp \left[-\frac{(X-r_{x,y})^2}{2\sigma_X^2} - \frac{(\theta-\theta_{x,y})^2}{2\sigma_\theta^2} \right] \quad (3.35)$$

onde $r_{x,y}$ representa a distância entre o centro do sensor e a célula estudada $m_{x,y}$, $\theta_{x,y}$ é o ângulo formado entre o vetor r_{xy} e o eixo das abscissas do referencial global adotado; σ_X^2 e σ_θ^2 são as variâncias das incertezas da distância X e do ângulo θ respectivamente.

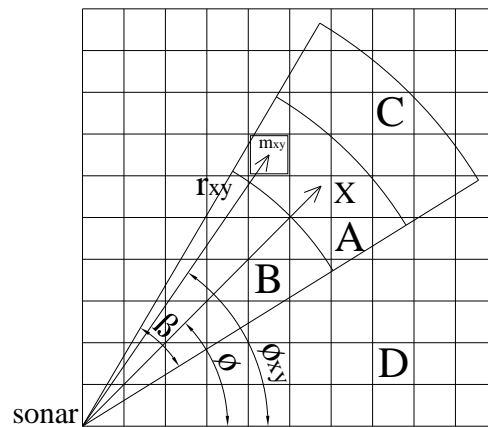


Figura 3.26 – Modelo de um sonar.

A área a ser mapeada é dividida em quatro regiões (A, B, C e D), conforme demonstrado na Fig. (3.26). Essas regiões são sobrepostas a uma grade de evidências, sendo que cada célula representa uma região do espaço físico.

A área A é a região das células em que se tem a maior probabilidade de existência de obstáculos. A área B representa a região entre o obstáculo e o sensor, cujas células apresentam baixa probabilidade de existência de objetos, pois se a onda sonora passou por essa região sem refletir, é de se esperar que não existam objetos nessa região. As áreas C e D correspondem às pilhas para as quais a leitura atual do sensor não apresenta qualquer informação útil ao sistema de navegação do robô.

A posição de cada pilha é determinada pela distância r_{xy} e pelo ângulo $\theta_{x,y}$ e a leitura do sonar é representada pelo vetor X . A existência de um obstáculo em uma determinada célula é representada pelo evento H e a ausência pelo seu complementar \bar{H} .

Como o desejável é saber sobre a existência ou não de um obstáculo em uma determinada posição, considera-se que o cone de varredura do sonar se transforma em um feixe plano, onde a linha central tem a maior probabilidade. A modelagem do sensor é dividida em duas partes, área *A* e área *B*, as quais são representadas pela equação Gaussiana Eq. (3.35), descrita anteriormente. A equação Gaussiana utilizada resulta em um gráfico que descreve a probabilidade de que a célula da grade esteja ocupada, visto que o sonar identificou algum obstáculo. Esse gráfico pode ser observado no modelo utilizado por Martin e Moravec (1996), Fig. (3.27).

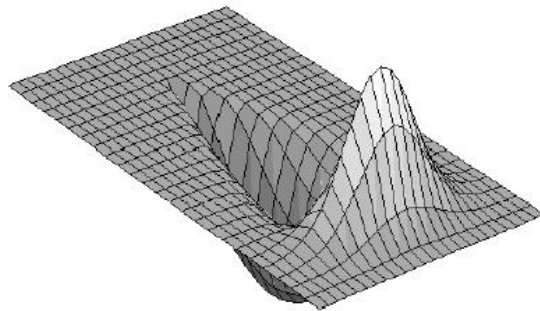


Figura 3.27 - Modelo probabilístico de um sonar, (Martin e Moravec, 1996).

O modelo apresentado para um sensor ultra-sônico não pode ser utilizado para um sistema de visão omnidirecional catadióptrico sem as devidas modificações. A proposta relatada nessa seção tem como base as características intrínsecas de um sistema de visão omnidirecional catadióptrico com espelho de lobo duplo, que poderá ser instalado na parte superior de um robô móvel e utilizado para realizar o mapeamento de um ambiente desconhecido, possibilitando a navegação robótica.

As alterações que serão realizadas no modelo são basicamente duas: a primeira modificação transforma a região *B* do modelo, sendo que o sistema omnidirecional não identifica apenas o primeiro obstáculo como os sensores sônicos, mas sim todos os objetos pertencentes ao seu campo de visão. A região *B* é generalizada a qualquer ponto pertencente ao campo de visão do sistema omnidirecional que não pertence à região *A* Fig. (3.28). A segunda modificação elimina o ângulo β de varredura do sonar, pois o sistema

omnidirecional irá analisar os pontos que determinam os contornos dos objetos, cujo erro angular é mínimo, e portanto desprezado.

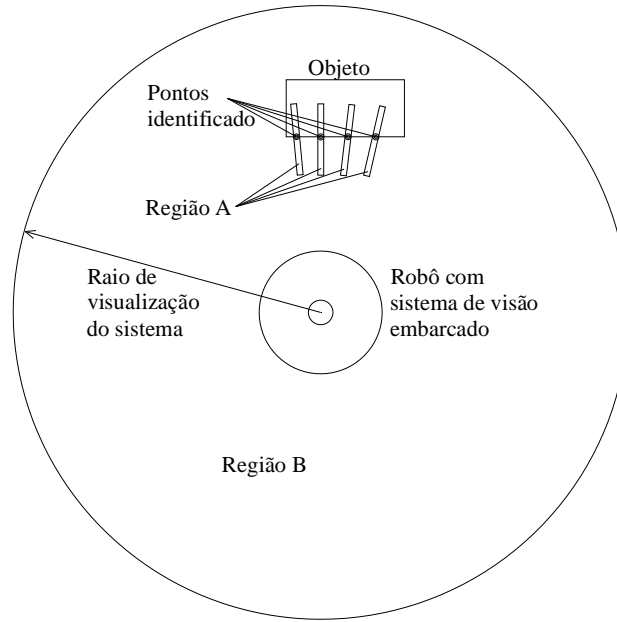


Figura 3.28 – Definição das regiões A e B do sensor.

Com as modificações propostas para o modelo da região A, a Eq. (3.35) fica resumida a uma equação Gaussiana de uma dimensão Eq. (3.36). A região B é definida pelo complemento da região A, ou seja, $H_B(X | r_{xy}) = \bar{H}_A(X | r_{xy})$. Para reduzir o custo computacional da região B será considerado que r_{xy} é sempre igual a X, pois a atualização dessa região será realizada pixel a pixel e independente da sua vizinhança.

$$H(X | r_{x,y}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp \left\{ -\frac{(X-r_{x,y})^2}{2\sigma_x^2} \right\} \quad (3.36)$$

Inicialmente a grade de evidências tem probabilidade de 0,5, pois existem dois eventos possíveis de ocorrer (existência ou ausência de objetos). Após o processamento da imagem omnidirecional estérea a probabilidade das células pertencentes à região A é aumentada de $H_A(X | r_{xy})$ e as células da região B são diminuída de $H_B(X | r_{xy})$.

O desvio padrão pode ser calculado pelas Eq. (3.37) e a variância é determinada pelo quadrado do desvio padrão.

$$(3.37)$$

onde é o fator de erro típico do sensor em uso. Em um sistema de sonar o erro típico é normalmente descrito no manual do fabricante, o que facilita a sua utilização. No sistema de visão omnidirecional proposto, o erro não é conhecido. Para determinar o desvio padrão do sistema omnidirecional, será realizada uma simulação do mapeamento de um ambiente representado em uma imagem cilíndrica, disposta ao redor do sensor Fig. (3.29). A imagem está a uma distância fixa do eixo focal da câmera, que compõe o sistema omnidirecional, que por sua vez está embarcada em um robô móvel. Com isso, a distância radial pertencente à imagem deve ser igual ao raio de curvatura X da imagem.

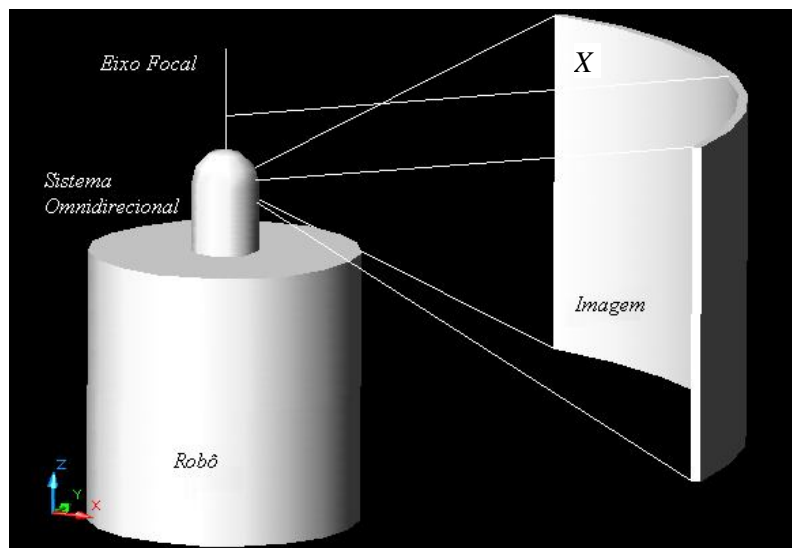


Figura 3.29 - Imagem cilíndrica projetada no espelho.

Com a utilização de um programa desenvolvido em linguagem C Fig. (3.30), é simulada a projeção da imagem cilíndrica nos dois lobos do espelho e a reflexão no CCD da câmera, obtendo assim, uma imagem omnidirecional estérea. Utilizando os métodos da extração de características da imagem, da correspondência entre características semelhantes e o da triangulação entre características correspondentes, descritos na seção 3.4 é possível determinar a distância de cada ponto que compõe as bordas dos objetos pertencentes à

imagem cilíndrica. As distâncias calculadas deveriam ser iguais a X , mas como o sistema omnidirecional gera erros é esperado que o conjunto das distâncias calculadas tenha uma dispersão em torno de X . A partir de uma análise de variância dos resultados é possível determinar o desvio padrão σ_X a variância σ_X^2 e o fator de erro típico $\boldsymbol{\eta}$ do sensor em uso. Com a determinação desses elementos, o modelo do sensor omnidirecional descrito na Eq. (3.36) está completo e pronto para se utilizado.

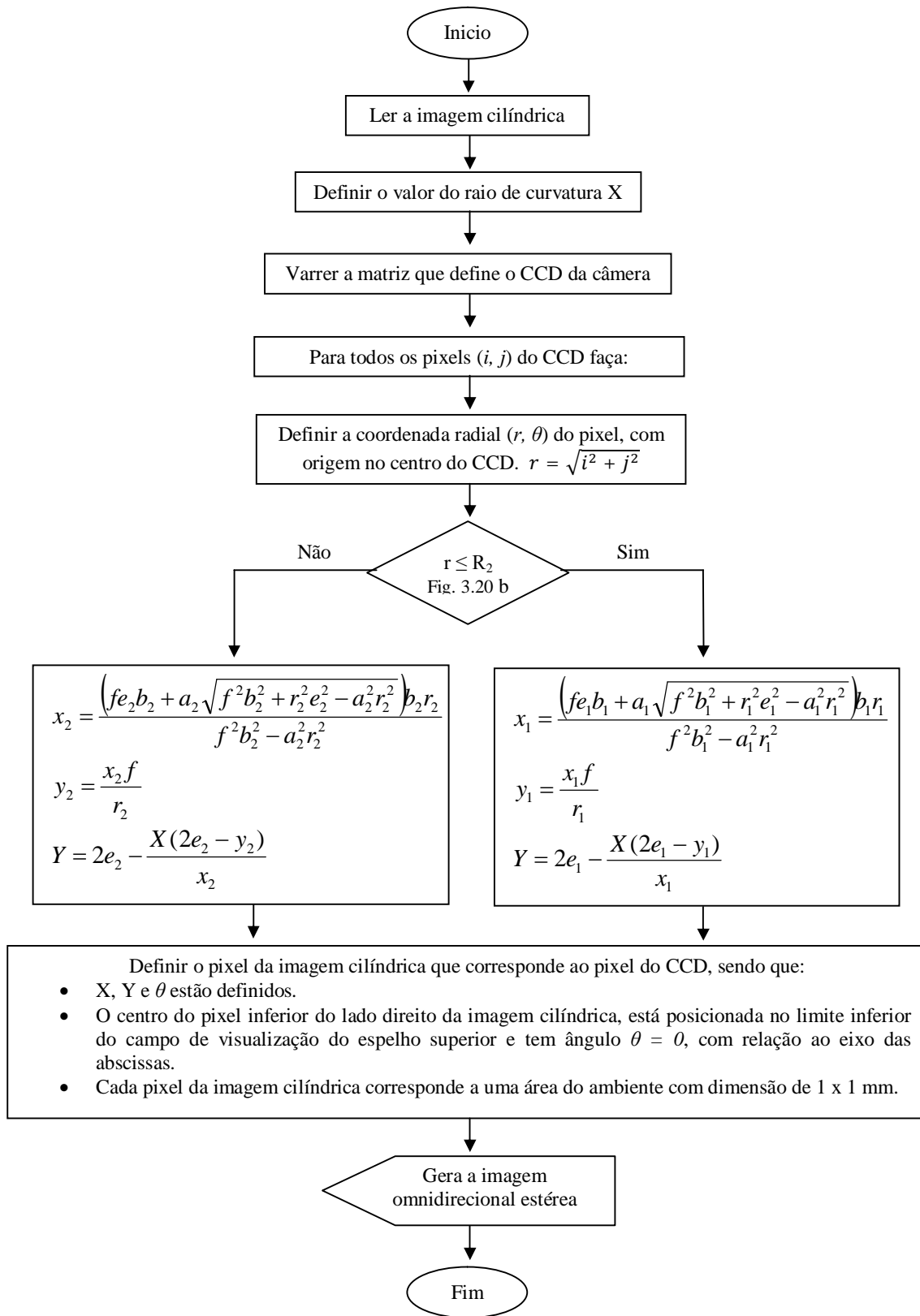


Figura 3.30 - Fluxograma que define a imagem omnidirecional estérea, a partir da imagem cilíndrica.

Os parâmetros do sistema omnidirecional estão descrito na seção 3.3.1. A região de visualização do sistema é determinada seguindo critérios de utilização. Para esse trabalho optou-se por simular a utilização de um sistema de visão omnidirecional embarcado na parte superior de um robô móvel tipo Nomad XR4000. O robô tem formato cilíndrico, com 850 mm de altura e 620 mm de diâmetro. A partir da associação das dimensões do robô com a região de visualização do sistema omnidirecional Fig. (3.31) é possível determinar o raio mínimo R_{min} e o raio máximo R_{max} de visualização do sistema embarcado.

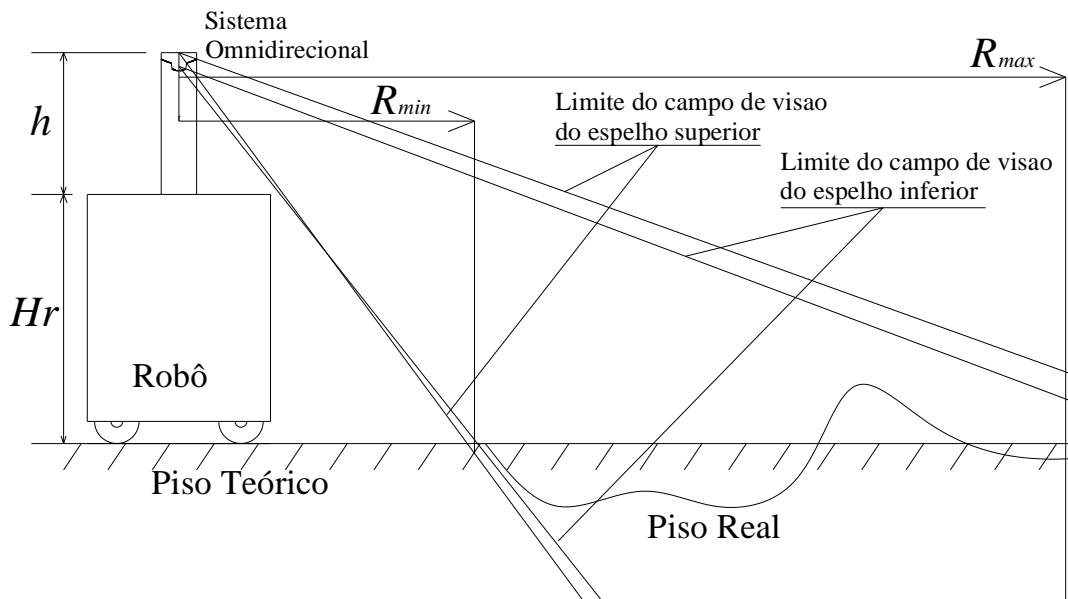


Figura 3.31 - Campo de visão do sistema omnidirecional embarcado em um robô móvel.

Tendo como objetivo, o melhor aproveitamento do sistema embarcado, foi determinado alguns parâmetros que são necessários para a realização da simulação Tab. (3.4).

Tabela 3.4 - Parâmetros do sistema de visão omnidirecional embarcado em um robô móvel.

Parâmetro	Dimensão (mm)	Justificativas
Altura do robô (H_r).	850	Tem como base as dimensões do Robô Nomad XR4000.
Raio mínimo de visualização (R_{min}).	1000	Se subtrair o raio mínimo de visualização (1000 mm) pelo raio do robô (310 mm) resulta em uma distância de 690 mm. A essa distância o sistema de infravermelho do robô identificaria facilmente qualquer obstáculo.
Raio máximo de visualização (R_{max}).	3000	Foram realizadas 10 interações com valores maiores que 3000 mm, em imagens diferentes e acredita-se que a partir dessa distância o sensor utilizado não tenha resolução suficiente para realização do mapeamento.
Altura do sistema omnidirecional (h).	500	Foi definida de maneira que o canto superior do robô não entrasse no campo de visualização do sistema.

Com o campo de visualização definido, serão utilizadas 10 imagens diferentes para a realização do experimento, em que, a variável X é limitada pelo raio mínimo de visualização ($R_{min} = 1000$ mm) e pelo raio máximo de visualização ($R_{max} = 3000$ mm) e terá um incremento de 200 mm para cada interação, resultando num total de 11 valores diferentes para X e um total de 110 interações diferentes para definir o valor do desvio padrão σ_X , da variância σ_X^2 e do fator de erro típico η do sensor em uso.

Par realizar as interações foram utilizadas 10 imagens de um ambiente externo que represente uma região com obstáculos e real necessidade para a navegação de um robô móvel. Os ambientes escolhidos são regiões do solo marciano, onde os robôs gêmeos *Spirit* e *Opportunity* enviados pela Agência Espacial Americana (NASA, 2008) a Marte

obtiveram várias imagens. As imagens são de alta resolução, com dimensões de 6200 x 3000 pixels Fig. (3.32).

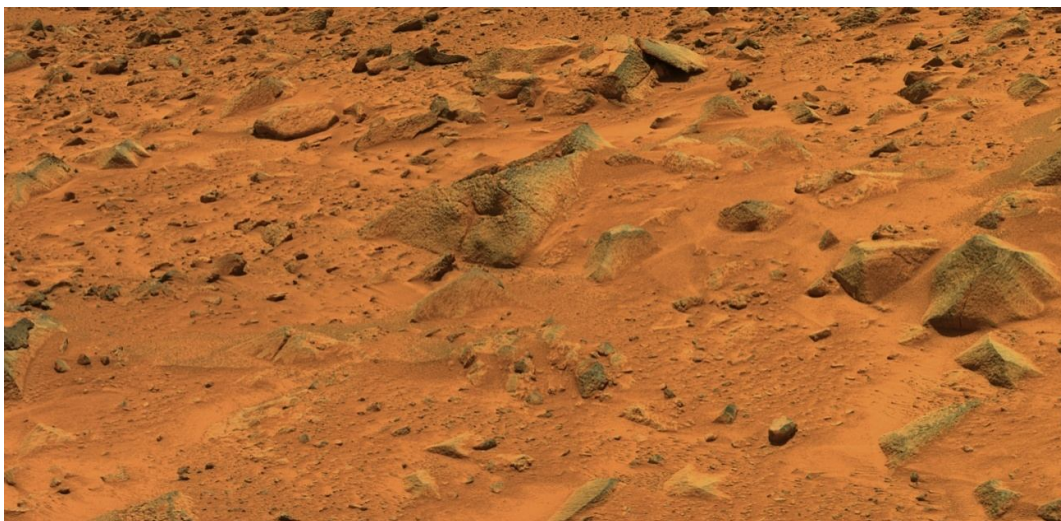








Figura 3.32 – Fotos do solo marciano (NASA, 2008).

Para obtenção da imagem omnidirecional estérea foi utilizado o programa descrito no fluxograma da Fig. (3.30). As interações obedecem a um algoritmo que representa o sistema omnidirecional com grande fidelidade.

1. Determinar o raio de curvatura X da imagem, em milímetros Tab. (3.5).

Tabela 3.5 - Valores atribuídos a X .

Posição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X (mm)	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000

2. Determinar a posição vertical da imagem. Foi considerado que a imagem é posicionada com sua borda inferior apoiada na linha inferior ao campo de visão do espelho superior. Fig. (3.33).

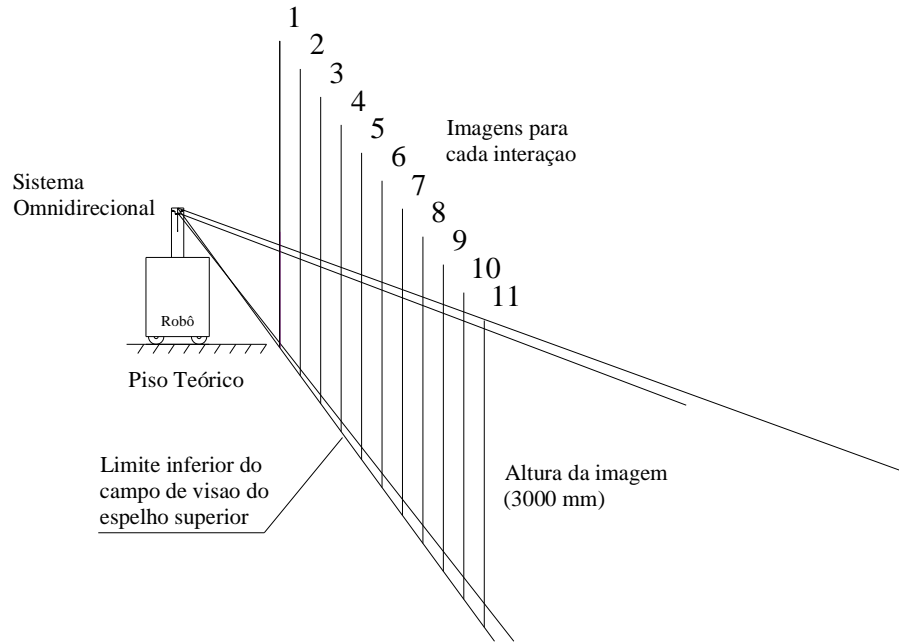


Figura 3.33 - Posição vertical da imagem.

3. Equacionamento da projeção da imagem cilíndrica no espelho, determinando assim as coordenadas (x,y) de cada ponto da imagem sobre o perfil do espelho Eq. (3.38, 3.39, 3.40, 3.41 e 3.42,).

$$A = \frac{(2e + Y)^2}{X^2} - \frac{a^2}{b^2} \quad (3.38)$$

$$B = -\frac{2e(2e + Y)}{X} \quad (3.39)$$

$$C = e^2 - a^2 \quad (3.40)$$

$$x = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (3.41)$$

$$y = e + \sqrt{a^2 \left(1 + \frac{x^2}{b^2}\right)} \quad (3.42)$$

sendo que, Y é a distância vertical entre o pixel da imagem cilíndrica e o centro ótico da câmera e os parâmetros e , a e b definem o perfil do espelho. Esses parâmetros foram determinados na seção 3.3.1.

4. Determinação do raio de projeção R_{ccd} . O raio de projeção é a distância entre o centro da imagem omnidirecional e o centro do pixel que representa a projeção do ponto (x,y) do espelho, no CCD da câmera Eq. (3.43 e 3.44).

$$\delta = \tan^{-1} \frac{x}{y} \quad (3.43)$$

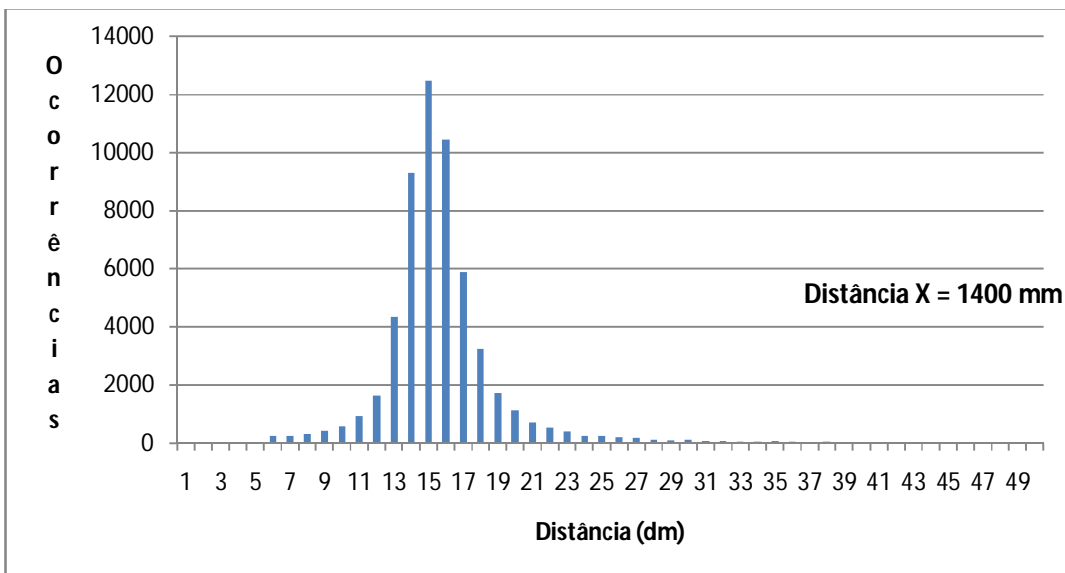
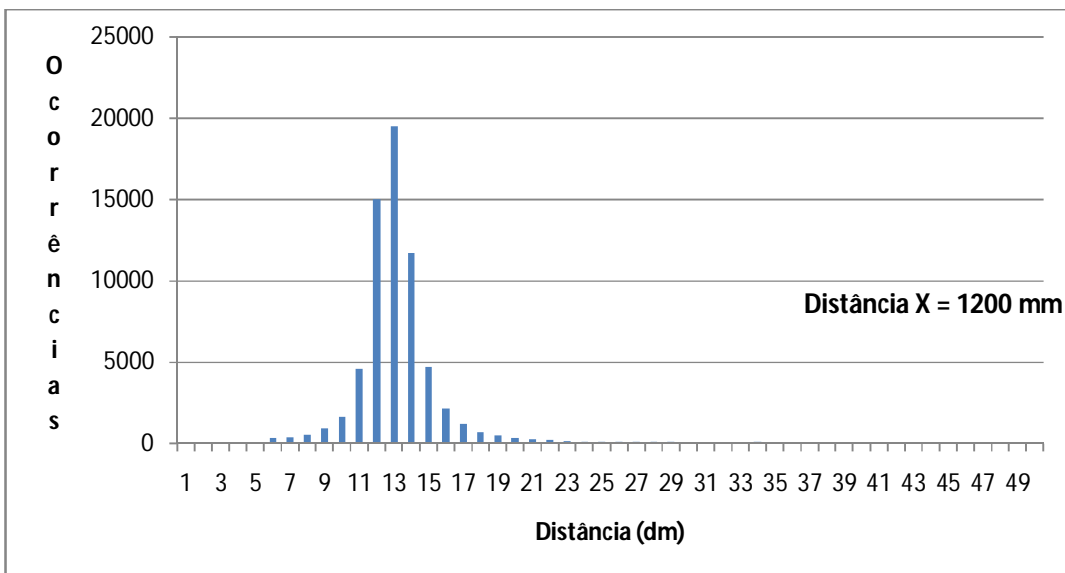
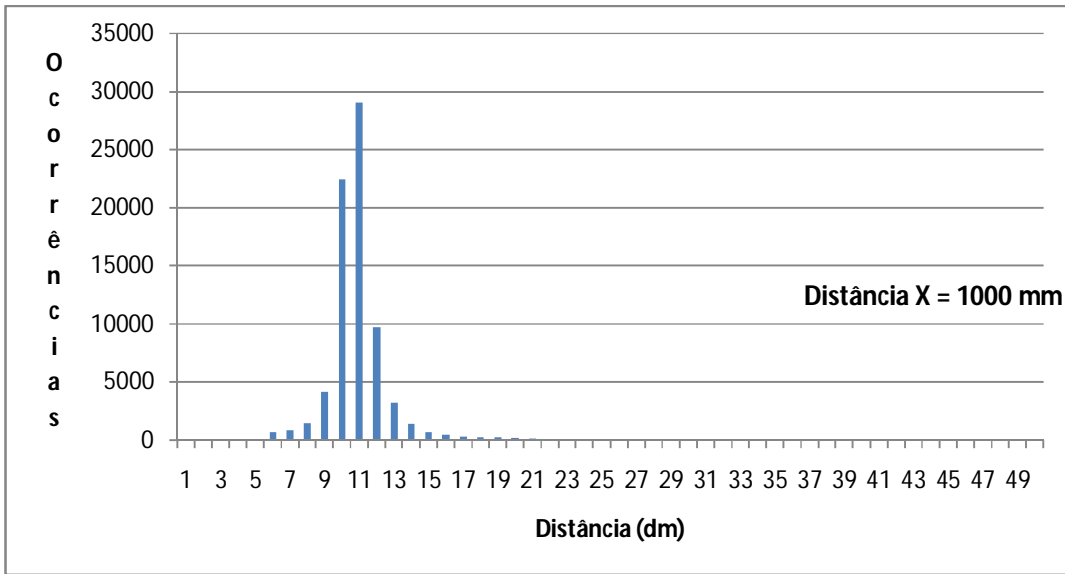
$$R_{ccd} = \frac{f}{T_{pixel} \tan \delta} \quad (3.44)$$

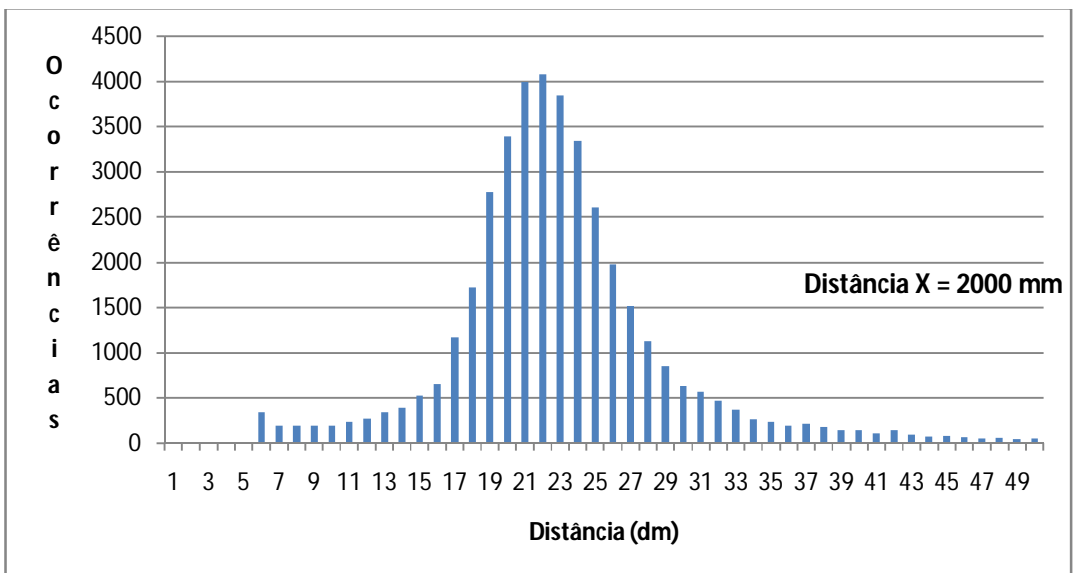
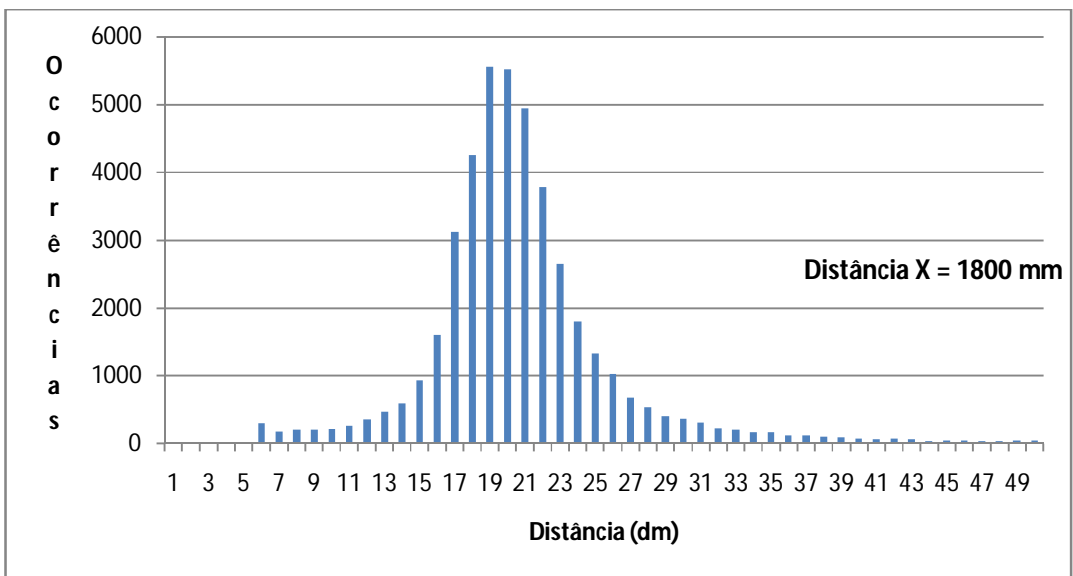
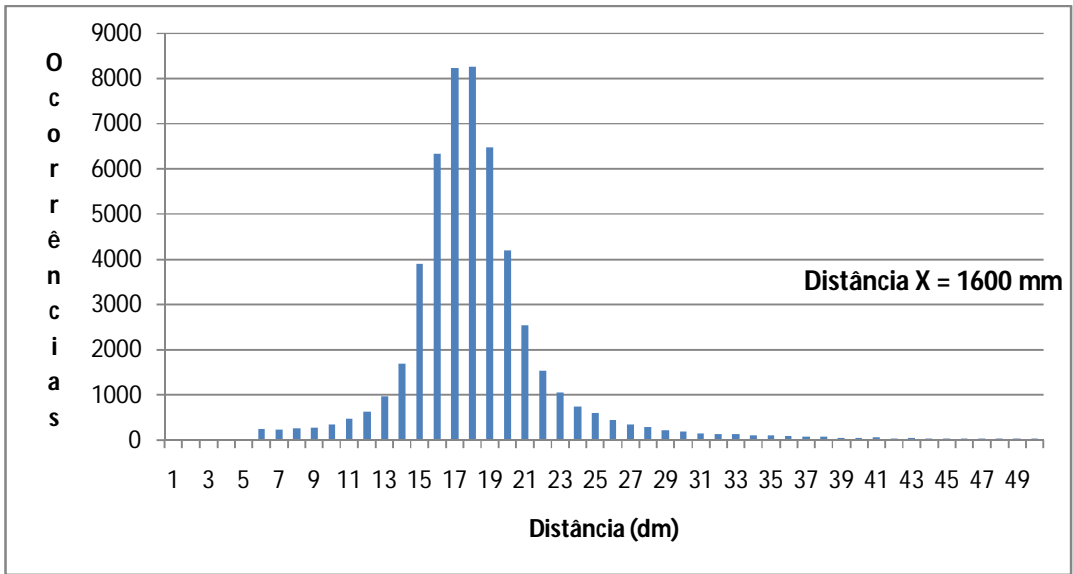
sendo que, δ é o ângulo de projeção do pixel no CCD da câmera com relação ao eixo focal da câmera, T_{pixel} e o tamanho do pixel do CCD e f é distância focal da câmera.

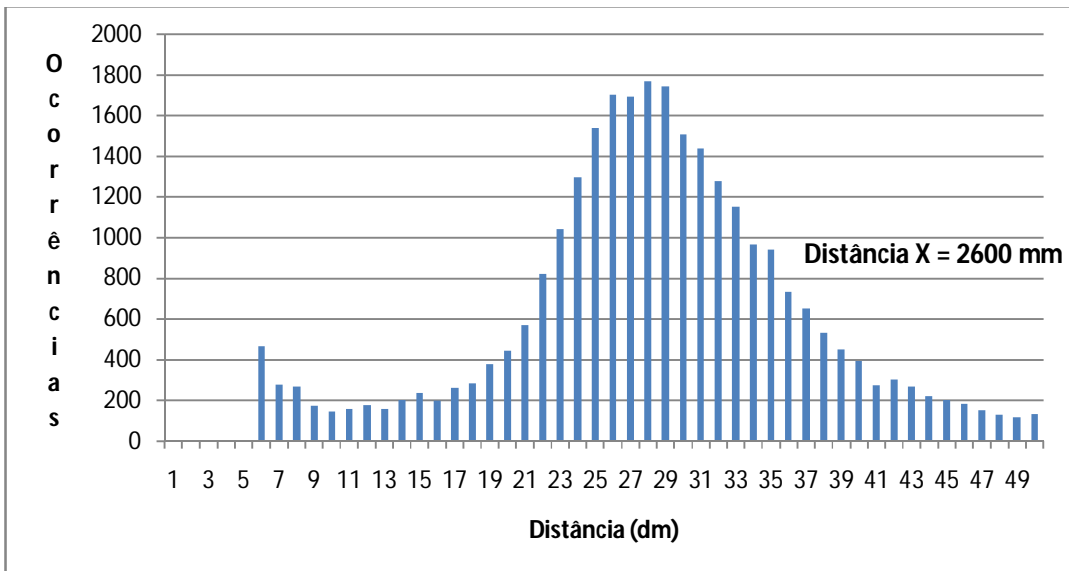
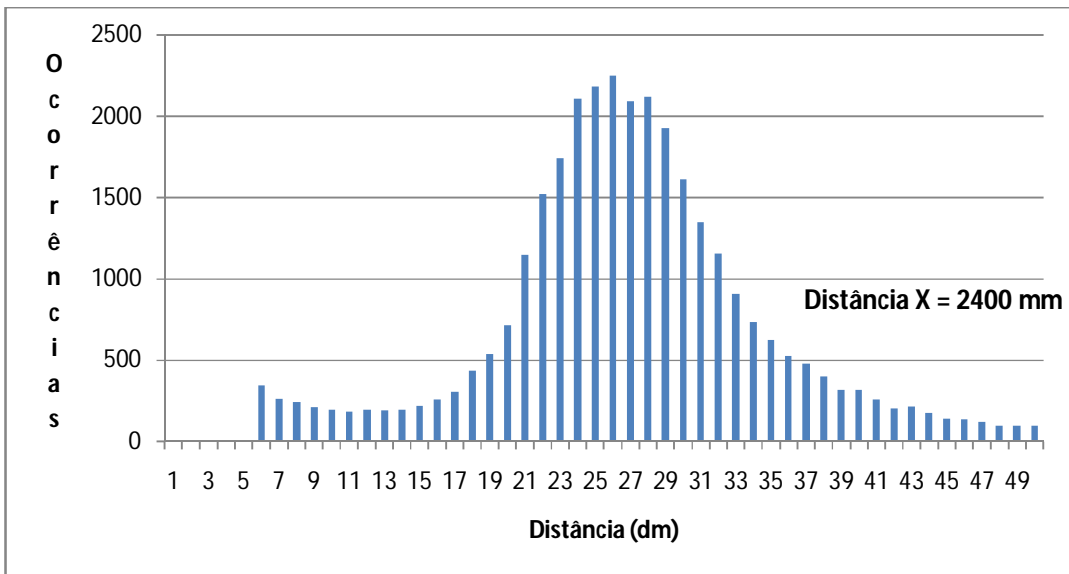
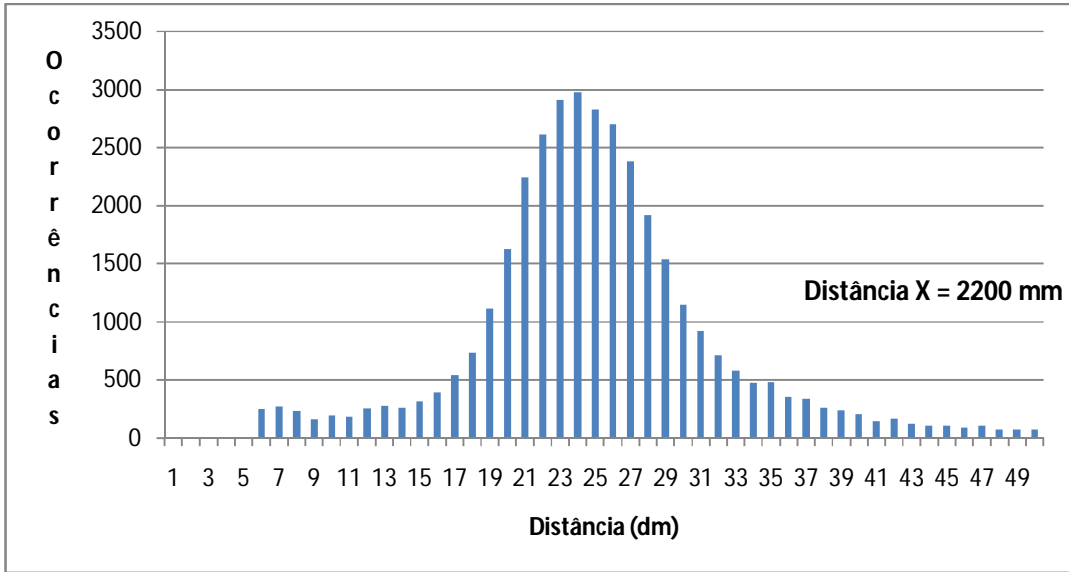
Esse procedimento é repetido para os dois lobos do espelho em todos os pixels da imagem cilíndrica, gerando assim uma imagem omnidirecional estérea.

A partir da imagem omnidirecional estérea obtida é determinada a distância dos objetos existentes na imagem cilíndrica. Os procedimentos utilizados são os mesmos descritos na seção 3.4. O fator de corte $t_0 = 100$ utilizado para realizar a binarização da imagem através da Eq. (3.21) foi determinado pela obtenção do melhor resultado.

Após a determinação das distâncias dos pontos de interesse da imagem, será realizado um agrupamento de dados, utilizando técnicas de distribuição de frequência para os valores calculados. Os resultados estatísticos são apresentados em 11 gráficos de colunas Fig. (3.34), onde os valores são distribuídos em 50 classes com amplitudes iguais a 100 mm, gerando assim, uma faixa de medição de 5000 mm.







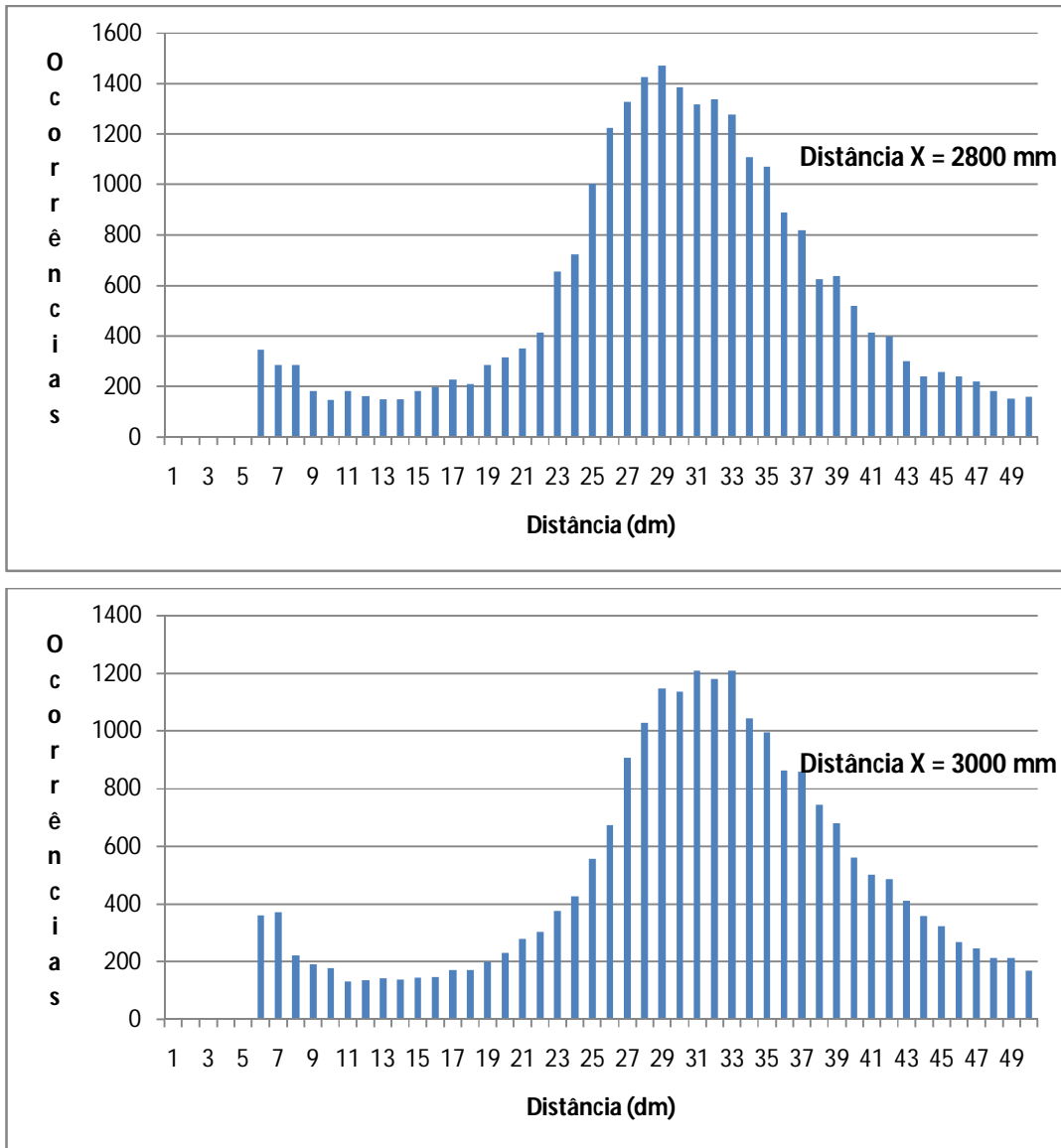


Figura 3.34 – Gráficos de distribuição de frequências com variação do raio de curvatura X.

Com os dados organizados em classes é determinado o valor da variância σ_X^2 e do fator de erro típico η do sensor em uso Tab (3.6).

Tabela 3.6 - Valores da variância e do erro típico do sensor.

X(mm)	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
σ_X^2	82369	109561	164025	219961	311364	380689	471969	577600	700569	789769	798704
η	0,2868	0,2761	0,2893	0,2931	0,3101	0,3086	0,3124	0,3166	0,3220	0,3166	0,3159

Relacionando o valor de X com desvio padrão σ_x é possível construir um gráfico que define a linearidade do sensor Fig. (3.35). Inserindo uma linha de tendência é obtido um coeficiente angular de 0,3, que representa o erro típico do sensor, ou seja, $\eta = 0,3$.

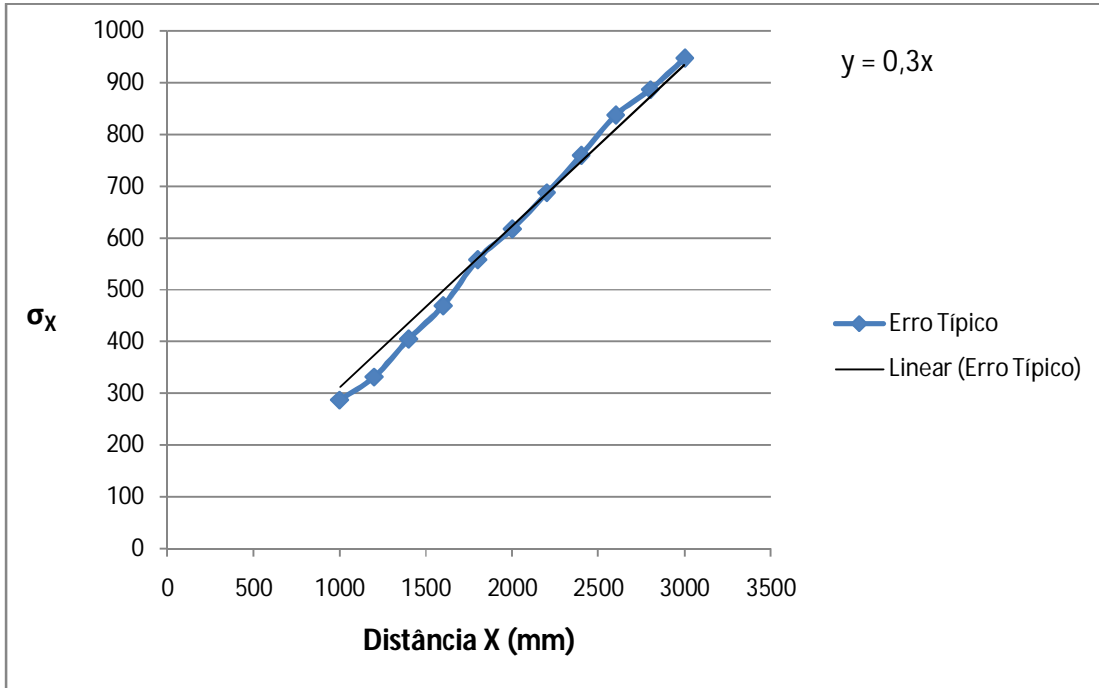


Figura 3.35 – Gráficos de linearidade do erro típico do sensor.

Após a determinação de η é recalculado a variância σ_x^2 para cada distância X , com isso é gerada a curva Gaussiana Eq. (3.44) que define o modelo probabilístico do sensor Fig. (3.36).

$$H(X|r_{x,y}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left[-\frac{(X-r_{x,y})^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad (3.45)$$

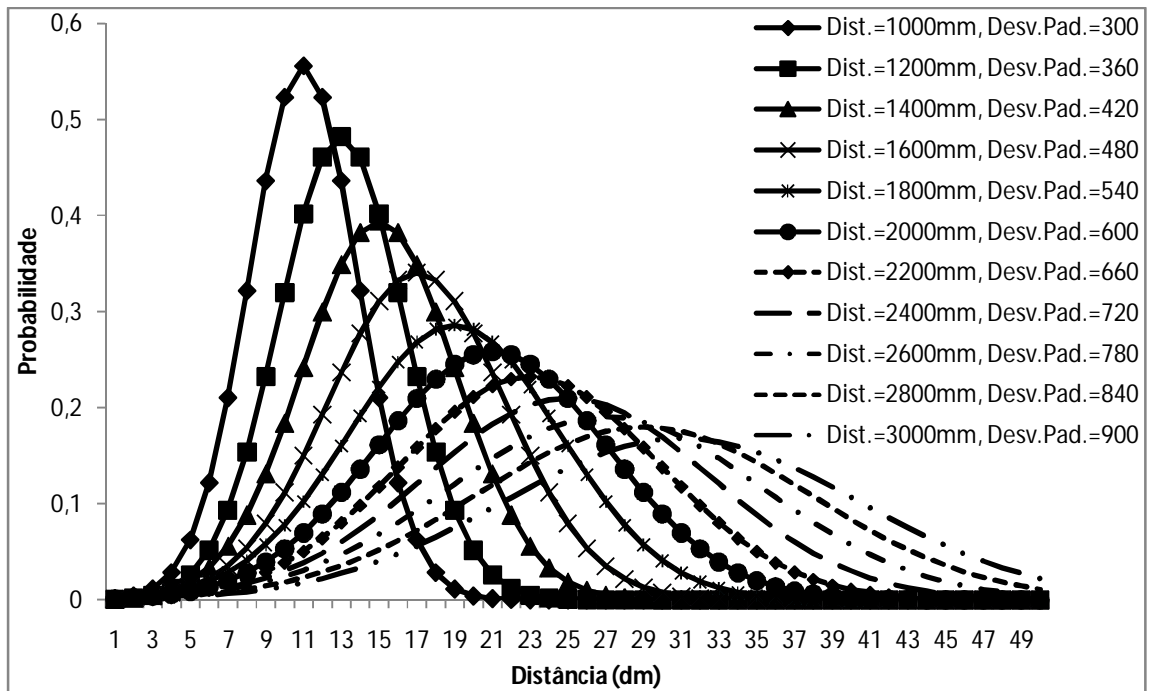


Figura 3.36 – Gráficos do modelo Gaussiano do sensor para várias distâncias.

3.4.6 Mapa de evidências

O mapa gerado pelo sistema de visão proposto é dividido basicamente em dois tipos de grades de evidências. A primeira é o mapa local e define a probabilidade da existência de obstáculos em uma região ao redor do robô. Essa região tem dimensões definidas e é obtida a cada leitura do sistema omnidirecional embarcado. A segunda grade define o mapa global, que é determinado pela soma dos mapas locais. No mapa global, estão localizados os possíveis obstáculos existentes no ambiente mapeado. A cada leitura do sensor é produzido um mapa local, que é incorporado ao mapa global Fig. (3.37).

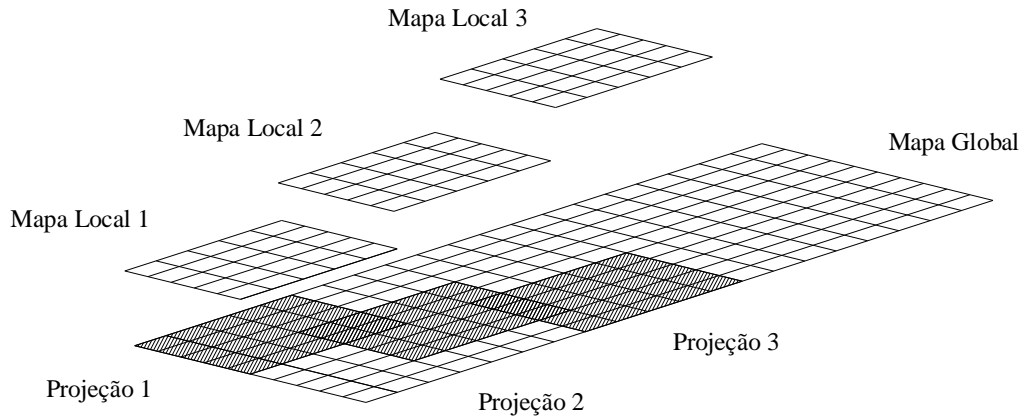


Figura 3.37 - Mapa local 1, 2, e 3 projetados no mapa global.

Inicialmente o mapa global tem probabilidade de 0,5, pois a região mapeada ainda não é conhecida. A atualização do mapa global é realizada com a obtenção de novos mapas locais e a probabilidade é alterada a cada nova atualização. Os locais onde são identificados possíveis objetos (região *A*) Fig. (3.28) terão sua probabilidade aumentada na grade de evidências, conforme modelo do sensor, caso seja negativa a identificação (região *B*) Fig. (3.28), a probabilidade é reduzida.

3.5 MAPEAMENTO SIMULADO DE AMBIENTE

Para testar o sistema de visão omnidirecional desenvolvido neste trabalho, será realizado a simulação do mapeamento de dois ambientes virtuais Fig. (3.38) e Fig. (3.39). Para realizar a simulação será utilizado um sistema de visão omnidirecional catadióptrico com espelho hiperbólico de lobo duplo, que é descrito em detalhes na seção 3.3.1, tornando possível a geração de imagens omnidirecionais estéreas. A posição dos obstáculos é determinada com a utilização de uma série de programas desenvolvidos em linguagem C que utilizam algoritmos baseados em técnicas de processamento de imagens estéreas, os quais são descritos na seção 3.4. O mapa será armazenado em uma grade de evidências que inicialmente tem probabilidade igual a 0,5 e para cada mapa local obtido é realizado uma atualização do mapa global, conforme descrito na seção 3.4.6.

Para identificar possíveis obstáculos o algoritmo desenvolvido utiliza os contornos dos objetos existentes no ambiente como características a serem identificadas e localizadas. A identificação dos elementos é realizada ponto a ponto e gera um mapa formado por um conjunto de pontos dispersos. Essa dispersão depende dos erros gerados durante o processo de aquisição e processamento das imagens estéreas. A grade de evidências é utilizada para reduzir os erros de localização de obstáculos e o modelo do sensor omnidirecional que o método utiliza é descrito na seção 3.4.5.

Para realizar a simulação do mapeamento, são utilizadas duas imagens planas de ambientes diferentes, com dimensões de 6200 x 3000 pixels, em que cada pixel representa uma área de 1 mm², resultando em uma região de 6,2 x 3 metros. A primeira imagem representa um ambiente com objetos monocromáticos de diversos tamanhos Fig. (3.38). O segundo ambiente é representado por uma imagem do solo marciano Fig. (3.39). Esse ambiente é de difícil navegação, pois é composto por um grande número de obstáculos de tamanhos e texturas diferentes. Durante o mapeamento, o robô assume 17 posições na região 1 e 33 posições na região 2, sendo que, e em cada posição é determinado um mapa local com dimensão de 2800 x 2800 pixels, que é utilizado para atualizar o mapa global.

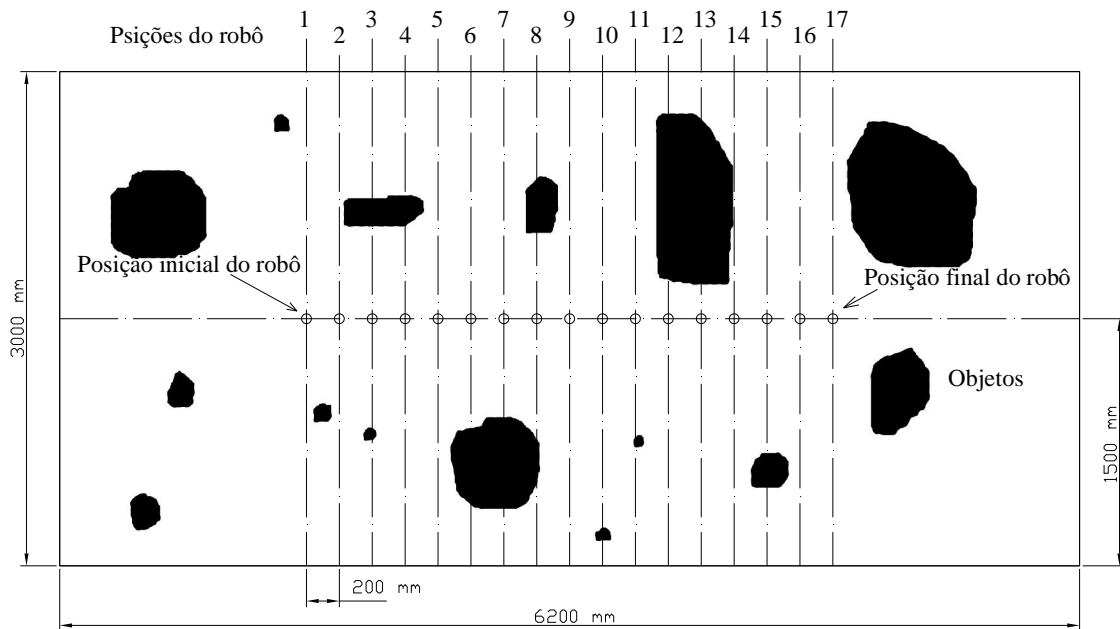


Figura 3.38 – Ambiente 1.

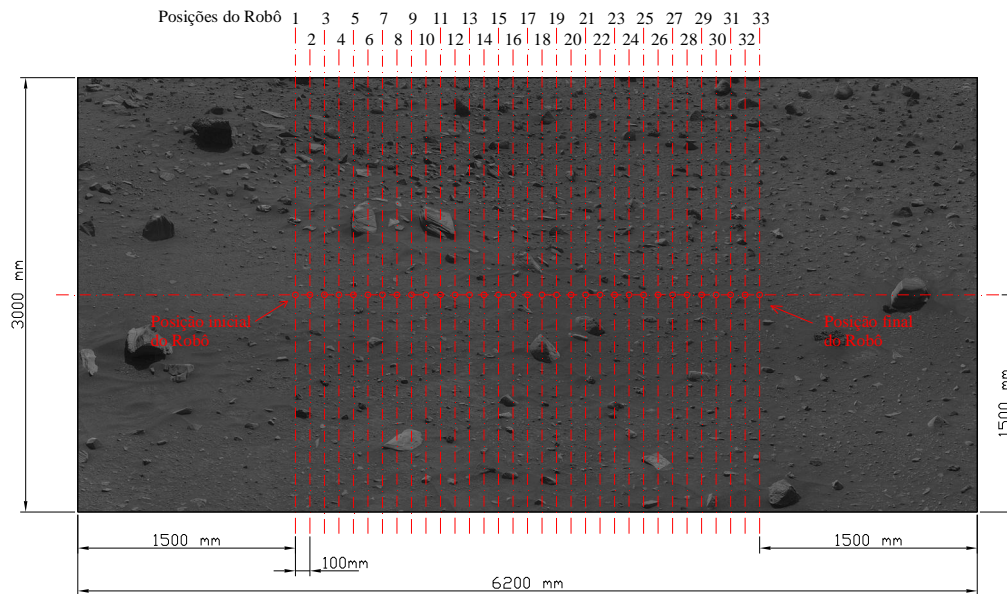


Figura 3.39 – Ambiente 2 (NASA, 2008).

A determinação do mapa local é realizada a partir do posicionamento do robô na imagem do ambiente Fig. (3.40) e extração da imagem local com dimensão de 2800 x 2808 pixels, sendo que cada pixel representa uma área de 1mm^2 do ambiente.

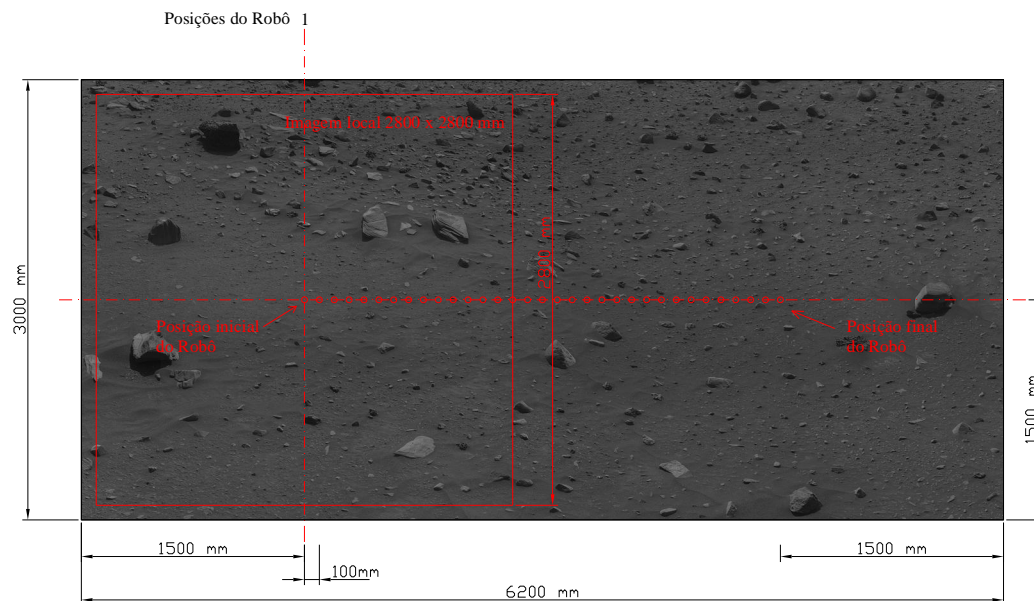


Figura 3.40 – Aquisição da Imagem local.

A imagem local Fig. (3.41, a) é então transformada em uma imagem omnidirecional estérea Fig. (3.41, b) a partir de um algoritmo desenvolvido especificamente para essa tarefa Fig. (3.44).

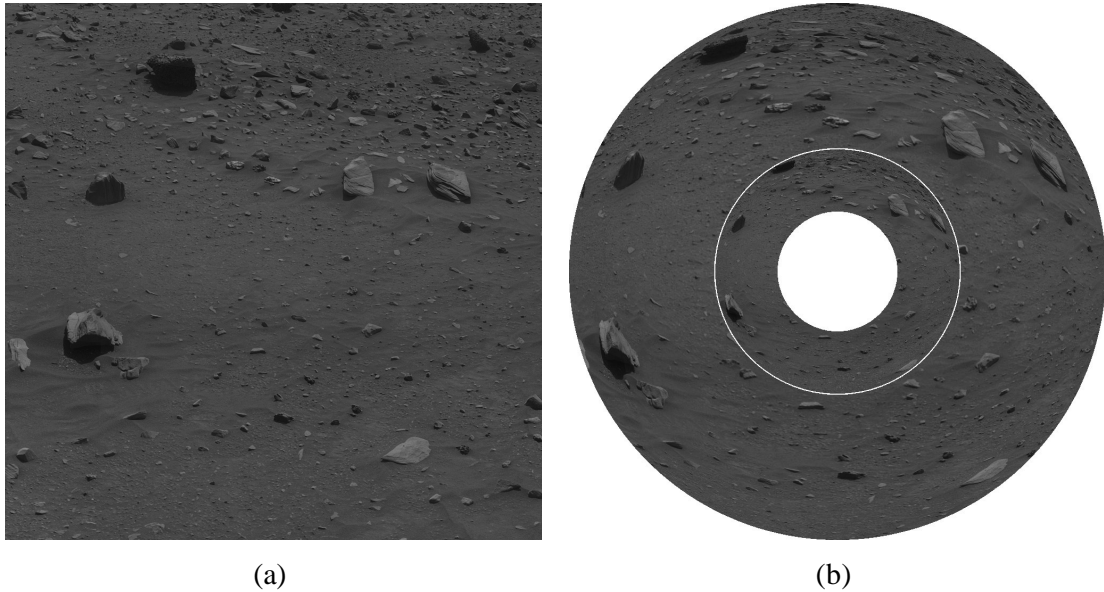


Figura 3.41 – Imagem do ambiente. (a) imagem local, (b) imagem omnidirecional estérea.

O algoritmo utilizado para gerar a imagem omnidirecional Fig. (3.41, b) a partir da imagem local Fig. (3.41, a), fixa a localização do robô no centro da imagem local Fig. (3.42) e a área de visualização do sistema de visão é limitada pelo raio mínimo de visualização R_{min} e pelo raio máximo de visualização R_{max} .

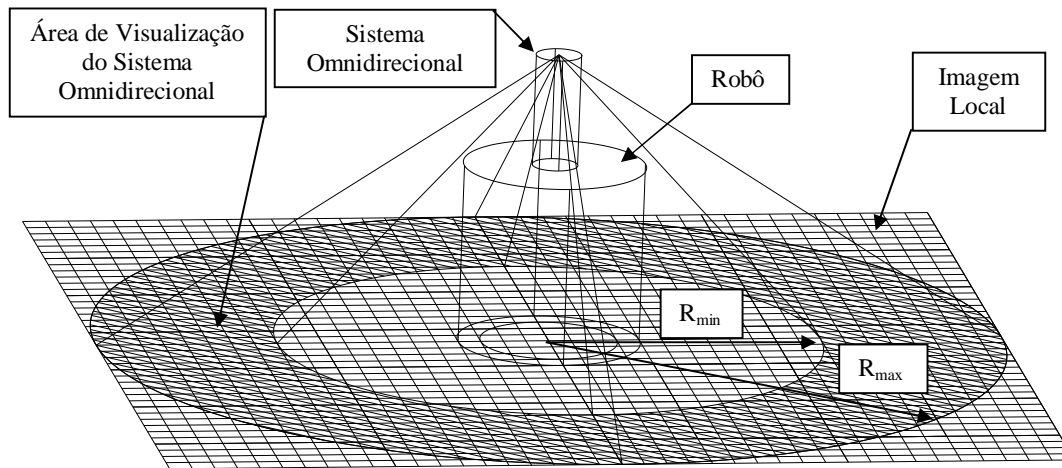


Figura 3.42 – Área de visualização do sistema de visão, embarcado em um robô móvel.

Para essa simulação será utilizado um $R_{min} = 396$ mm, $R_{max} = 1400$ mm e uma distância perpendicular entre o centro da imagem local e ponto focal da câmera de $Y = 311$ mm Fig.(3.43). Essa configuração pode ser utilizada em um robô móvel de pequeno porte, com altura inferior a 311 mm e diâmetro máximo de 293 mm.

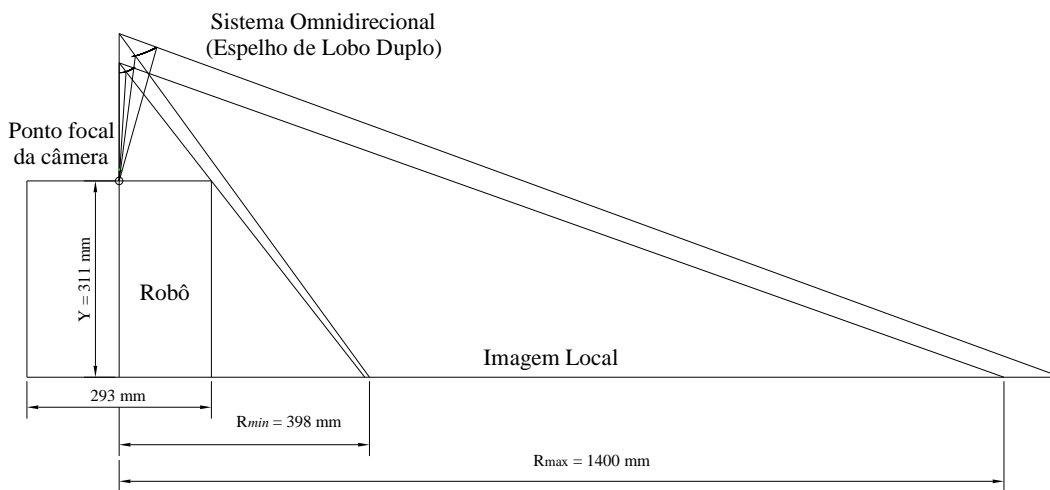


Figura 3.43 – Configuração do sistema embarcado, utilizado na simulação.

Para transferir o valor de cada pixel da área de visualização do sistema omnidirecional pertencente à imagem local, serão utilizadas as Eq. (3.38, 3.39, 3.40, 3.41, 3.42, 3.25 e 3.26). O valor de $Y = 311 \text{ mm}$ e o termo X é determinado pela Eq. (3.46).

$$X = \sqrt{i^2 + j^2} \quad (3.46)$$

em que, i e j são a linha e a coluna da imagem local à qual o pixel copiado pertence.

Para uma melhor compreensão do método desenvolvido para gerar uma imagem omnidirecional, a partir da imagem do ambiente, é descrito na Fig. (3. 44) um fluxograma do programa, que foi desenvolvido em linguagem C.

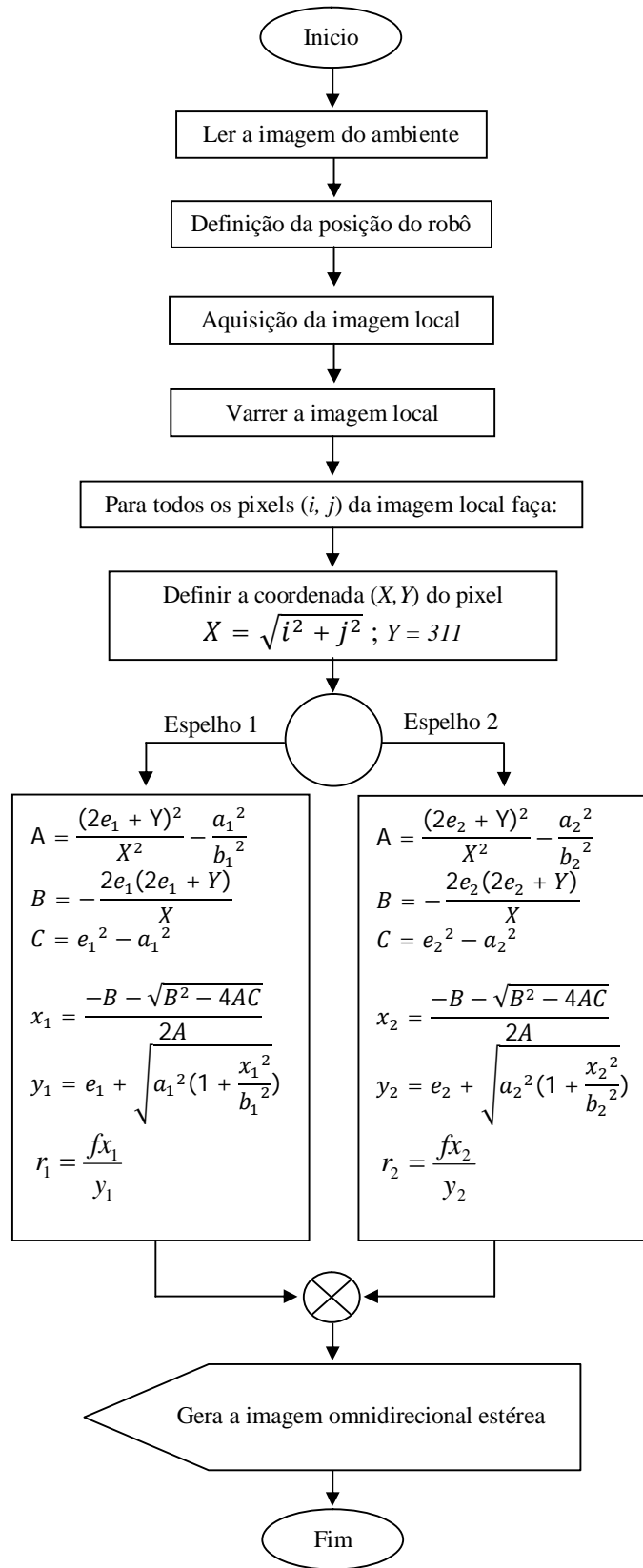


Figura 3.44 - Fluxograma do programa que gera a imagem omnidirecional estérea, a partir da imagem do ambiente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados neste capítulo descrevem os dados levantados, por uma exposição sobre o que foi observado e desenvolvido nessa pesquisa. A descrição dos resultados é apoiada em recursos estatísticos, tais como, a representação do mapa em forma de grades de evidências e do modelo do sensor, representado por uma distribuição Gaussiana de 1D. São apresentados também, tabelas, gráficos e imagens, elaborados no decorrer do trabalho. Na análise e discussão, os resultados estabelecem as relações entre os dados obtidos, o problema da pesquisa e o embasamento teórico dado na revisão da literatura.

A metodologia utilizada para realizar o mapeamento de um ambiente a partir de imagens omnidirecionais estéreas, capturadas por um sistema de visão omnidirecional catadióptrico com espelho hiperbólico de lobo duplo, foi desenvolvida a partir de um amplo estudo realizado em processamento de imagens estéreas, tais como, a aquisição da imagem estérea omnidirecional, a extração de características da imagem, a correspondência entre características semelhantes e a triangulação entre características correspondentes. Para representar o ambiente em forma de mapa de evidências, foi determinado o modelo probabilístico do sensor a partir da incerteza de medição do sistema. Para atingir o objetivo principal foi necessário resolver alguns problemas específicos, tais como:

Definir o sistema de visão omnidirecional: Optou-se por utilizar um sistema omnidirecional catadióptrico com câmera de projeção perspectiva, que resultou em um sistema de visão compacto, com um altura $h = 211,640$ mm e raio $R_{\text{topo}} = 60$ mm. Foi utilizado um modelo de câmera monocromática com distância focal de 16 mm, resolução de 1008×1008 pixels. A escolha de uma câmera monocromática reduziu o custo computacional, gerando assim, uma resposta mais rápida do sistema ao ambiente estudado. Uma maior agilidade na identificação de obstáculos possibilita uma maior velocidade na locomoção do robô móvel.

A resolução da câmera é um fator de grande importância para o sistema, pois quanto maior for o número de pixels do CCD, melhor será a definição da imagem gerada. Em contra partida, câmeras de alta resolução normalmente são de alto custo, necessitam de maior memória de armazenamento de dados e proporcionam um maior custo computacional.

Definir o perfil do espelho: Foi projetado um espelho hiperbólico de lobo duplo com diâmetro máximo de 120 mm Tab. (4.1). O perfil hiperbólico de lobo duplo possibilitou a obtenção de uma imagem omnidirecional concêntrica com centro único de projeção, tornando possível a identificação da posição de possíveis obstáculos sem a necessidade de locomoção do robô. O diâmetro superior do espelho foi escolhido com base na relação sistema compacto versus resolução da superfície espelhada. Quanto menor o diâmetro do espelho menor será seu peso e mais compacto será o sensor. No entanto, espelhos com pequeno diâmetro são mais afetados pelo acabamento superficial e espelhos com deslocamento vertical pequeno (distância entre F_{11} e F_{12}) são mais sensíveis.

Tabela 4.1 - Parâmetros do sistema de visão omnidirecional.

PARÂMETROS FIXADOS					PARÂMETROS CALCULADOS					
Espelho	Rtopo (mm)	f (mm)	Tpixel (mm)	Rpixel (pixel)	c (adim)	h (mm)	2e (mm)	a (mm)	b (mm)	α (graus)
1	23,3	16	0,009	233	1,5	184,971	187,068	77,825	51,883	70
2	60	16	0,009	504	0,9	211,640	233,420	78,075	86,750	71

Os parâmetros do espelho estão relacionados com a região escolhida para o mapeamento. Optou-se por realizar o mapeamento da superfície do ambiente ao redor do robô e a partir desse objetivo foram realizados vários implementos para se conseguir uma boa combinação entre o perfil do espelho 1 e 2 que apresentasse uma grande área de intersecção, de maneira a otimizar a utilização da área do CCD da câmera. Na simulação realizada para testar o sistema de mapeamento de ambientes, foi utilizada um raio de visualização mínimo de 396 mm e um raio de visualização máximo de 1400 mm ao redor do robô. Em uma aplicação real, as escolhas dos raios de visualização devem ser realizadas observando-se a velocidade do processamento da imagem e a velocidade de locomoção do robô, de maneira que o robô navegue em um ambiente previamente mapeado.

Para o processo de fabricação do espelho foram observados dois parâmetros de seu perfil. O primeiro parâmetro que deve ser verificado é o desvio de forma que o perfil usinado terá com relação ao perfil teórico calculado. O segundo parâmetro é o acabamento superficial

do espelho, responsável pela reflexão da imagem. Os erros de forma e de acabamento superficial do espelho podem ser reduzidos se o espelho for fabricado por um processo de usinagem de ultraprecisão, com resolução de 0,0001 mm. O trabalho de Grassi Jr (2002) utilizou um espelho de lobo simples fabricado com esse método e esse incremento. No projeto do espelho de lobo duplo proposto nesse trabalho foi testada a possibilidade de se utilizar esse mesmo incremento, sendo que, a imagem gerada por um espelho de lobo simples é diferente das imagens geradas pelo espelho de lobo duplo.

O autor Grassi Jr (2002) utilizou uma câmera associada a uma placa de aquisição que captura imagens com resolução de 640 (Horizontal) x 480 (Vertical) e nessa tese foi utilizada uma câmera com resolução de 1008 x 1008 pixels, sendo que, a imagem omnidirecional interna, gerada pelo espelho 1, que é a imagem com resolução crítica, utiliza um $R_{pixel} = 233$ Tab. (3.3), que resulta em uma imagem com 466 x 466 pixels, que é aproximadamente a resolução utilizada por Grassi Jr (2002). Apesar das resoluções serem semelhantes, as técnicas de processamento de imagens utilizadas em um sistema de lobo simples são diferentes das técnicas utilizadas em um espelho de lobo duplo. Para testar o incremento de 0,0001 mm, foi simulada a geração de uma superfície espelhada, com 230.000 pontos para o perfil 1 e 340.000 pontos para o perfil 2, resultando na aquisição de uma imagem omnidirecional estérea Fig. (3.11) que possibilitou o mapeamento do ambiente observado.

Identificar o contorno dos objetos: Para localizar os objetos existentes no ambiente optou-se por identificar a posição dos pontos que definem o contorno dos objetos, ignorando assim, os pixels existentes no seu interior. Essa escolha reduziu o número de pixels analisados e conseqüentemente o tempo de processamento do sistema. Os contornos dos objetos foram identificados utilizando o operador de Prewitt para realce de bordas e a binarização para redução do número de pontos analisados do contorno dos objetos;

Determinar os pontos de correspondências: Essa etapa consome grande parte do processamento da imagem e é responsável pela maioria dos erros de mapeamento. Utilizou-se o operador de Prewitt e a binarização da imagem omnidirecional estérea, a fim de facilitar a identificação dos pontos equivalentes. Foi utilizado o método do menor somatório do quadrado das diferenças (SSD), para identificar o par de pontos equivalentes. Esse método requer a utilização de uma janela de varredura da imagem, que em geral tem

formato quadrado, mas esse formato se mostrou inadequado para uma imagem omnidirecional estérea concêntrica, pois a imagem formada pela reflexão do espelho superior tem escala diferente da imagem formada pela reflexão do espelho inferior. Para resolver esse problema, foi desenvolvida uma janela com formato radial Fig. (3.18), que possibilitou a identificação dos pontos equivalentes com bastante eficiência.

Definir a distância radial entre o centro de projeção da imagem e o ponto de interesse observado no ambiente: Os pontos a serem localizados no ambiente pertencem ao contorno dos objetos e o método de localização desenvolvido utiliza o par de pontos equivalente, que por triangulação determina a possível posição do ponto. A principal fonte de erros observada nesse processo é a definição errada do par de pontos equivalente, o que torna a etapa da determinação dos pontos correspondentes a principal fase do mapeamento;

Definir o modelo probabilístico do sistema de visão omnidirecional a ser utilizado na geração da grade de evidências: Foi utilizado um modelo probabilístico Gaussiano de uma dimensão Fig.(4.1), adaptado de modelos de sensores ultra-sônicos. O erro calculado para o sensor omnidirecional, desenvolvido neste trabalho apresentou tendências lineares para objetos localizados entre 1000 e 3000 mm, e tem valor aproximado de 0,3 Fig. (3.35). No mapeamento simulado dos ambientes apresentados Fig. (3.38) e Fig. (3.39), a linearidade do sensor foi extrapolada até a distância de 396 mm, onde foi utilizada uma área de visualização com $R_{min} = 396$ mm e $R_{max} = 1400$ mm Fig. (3.42). Os resultados apresentados demonstraram que o sensor também é linear para esse intervalo. O alto valor que representa o erro inerente ao sensor torna o sistema adequado à utilização de grades de evidências;

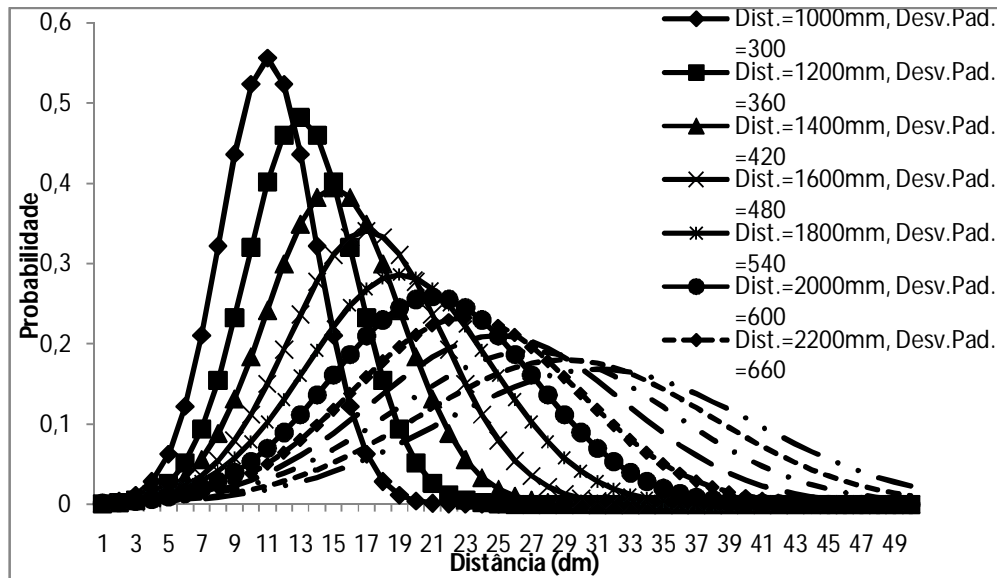


Figura 4.1 – Gráficos do modelo Gaussiano do sensor para várias distâncias.

Atualizar o mapa global: Na simulação do mapeamento dos ambientes Fig. (3.38) e Fig. (3.39), o mapa global foi atualizado a partir de uma série de mapas locais. Em cada atualização do mapa global, são inseridos novos dados referentes à probabilidade de existência de obstáculos. Para cada nova posição do robô, foi extraída uma imagem omnidirecional estérea. Foi observado que quanto mais atualizações são realizadas do mesmo ambiente melhor é a qualidade do mapa gerado, mas com isso, aumenta o tempo de mapeamento. Em um mapeamento real deve ser verificada a qualidade do mapa versus tempo, de maneira a obter um número ótimo de atualizações do mapa global.

Para testar o sistema omnidirecional projetado foi realizada a simulação do mapeamento de dois ambientes diferentes. O ambiente 1 Fig. (4.2) é formado por vários obstáculos de formas e tamanhos diferentes distribuídos aleatoriamente no ambiente. O ambiente 2 Fig. (4.3) é uma foto do solo marciano retirado pelo robô móvel *Spirit* e consiste de um ambiente altamente complexo, com diversas pedras de tamanhos e texturas diferentes.

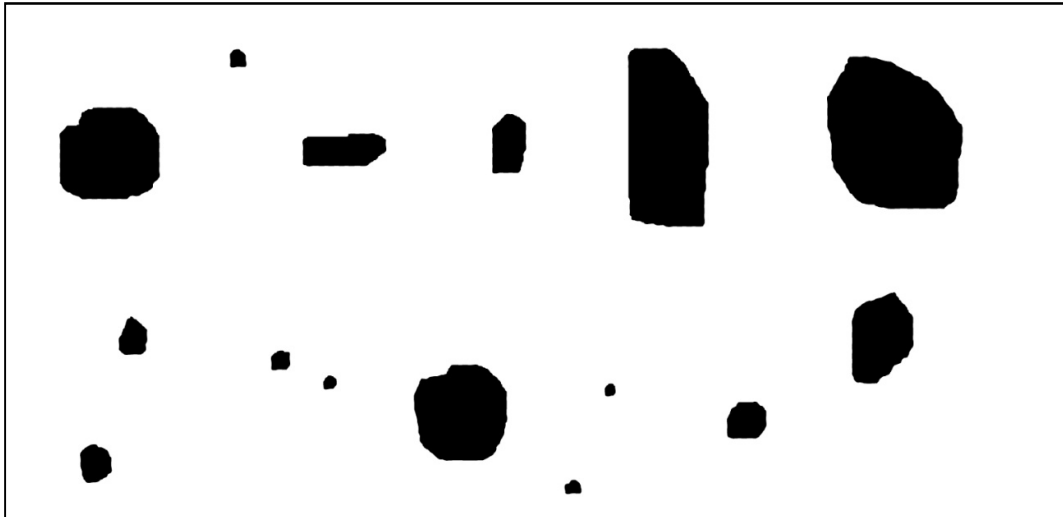


Figura 4.2 – Imagem do ambiente 1.

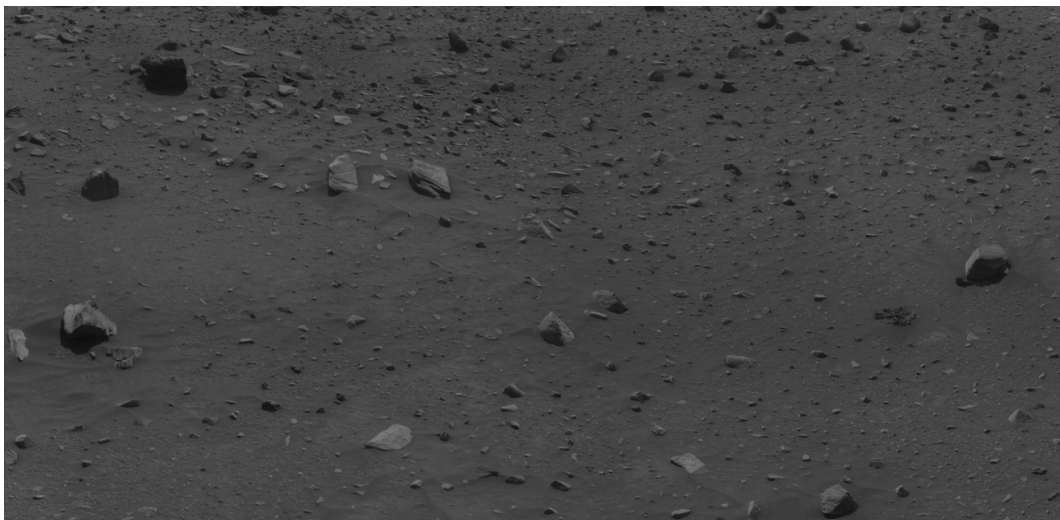
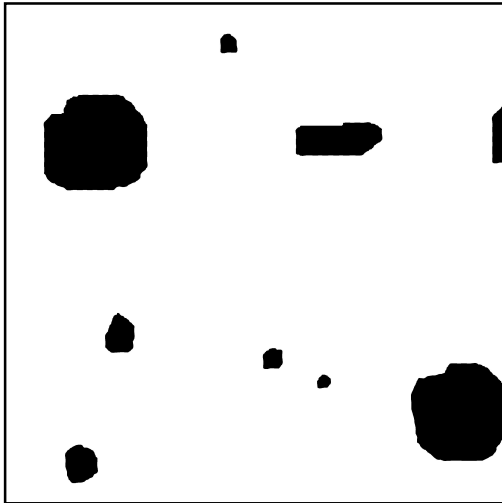
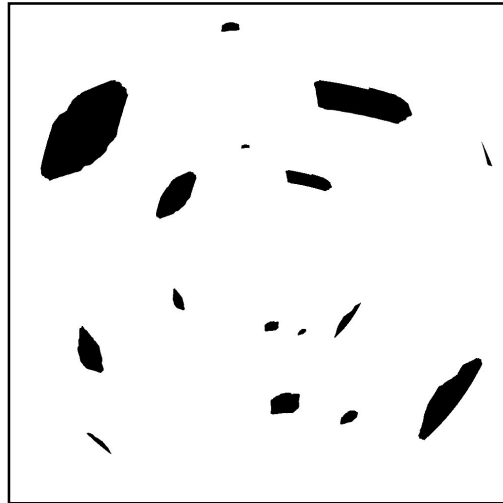


Figura 4.3 – Imagem do ambiente 2 (NASA, 2008).

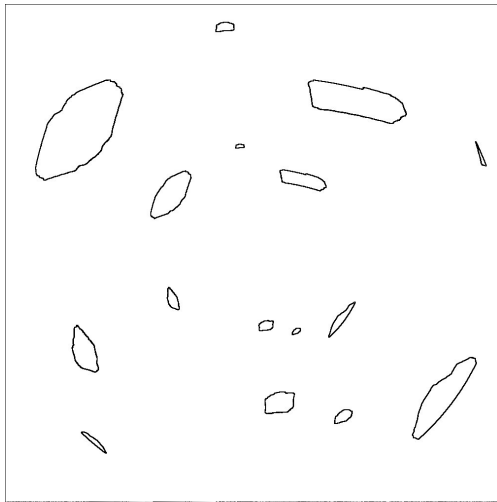
Os resultados apresentados a seguir são referentes ao mapeamento simulado das regiões apresentadas. As figuras com o termo (a) representam as imagens locais extraídas do ambiente, (b) representam as imagens omnidirecionais geradas a partir das imagens locais, (c) representam as imagens omnidirecionais binárias com realce de bordas, (d) representam os mapas locais e (e) representam os mapas globais para cada atualização.



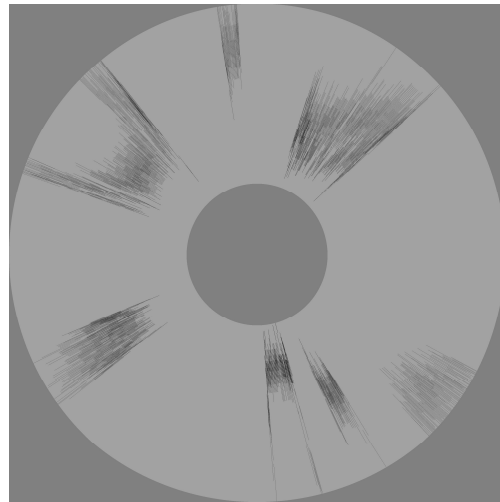
(a) Imagem local



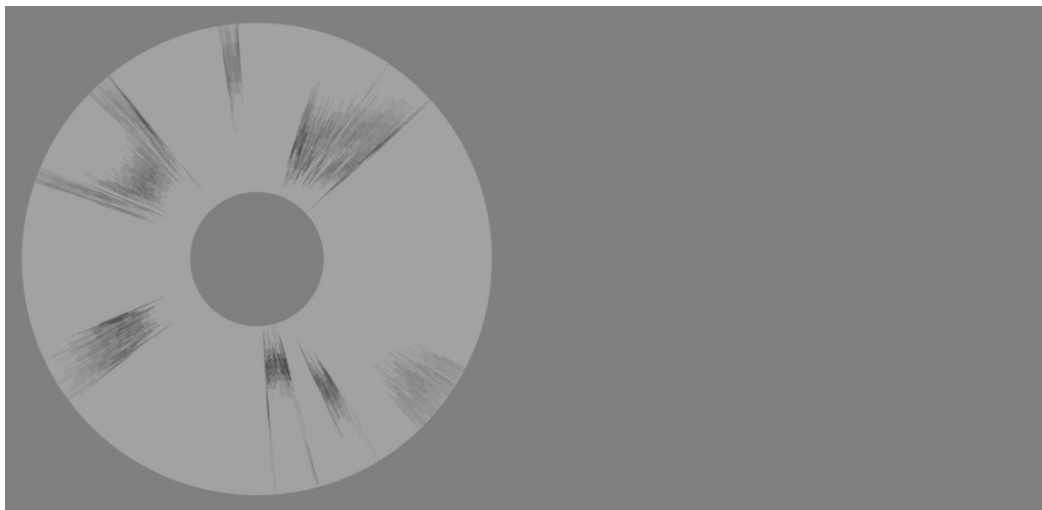
(b) Imagem omnidirecional



(c) Realce de bordas

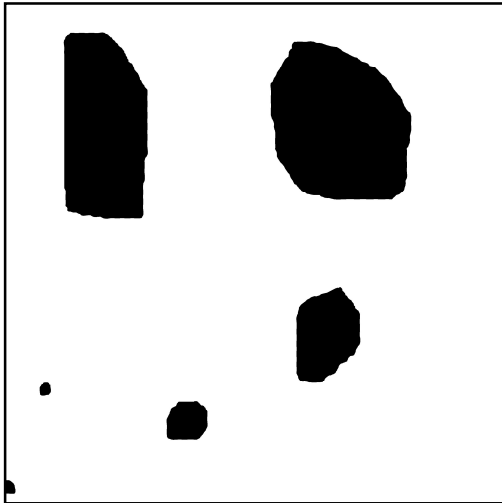


(d) Mapa local



(e) Mapa global

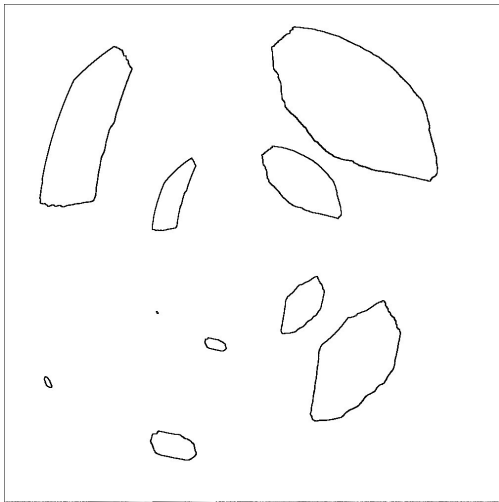
Figura 4.4 – 1ª atualização do mapa global 1



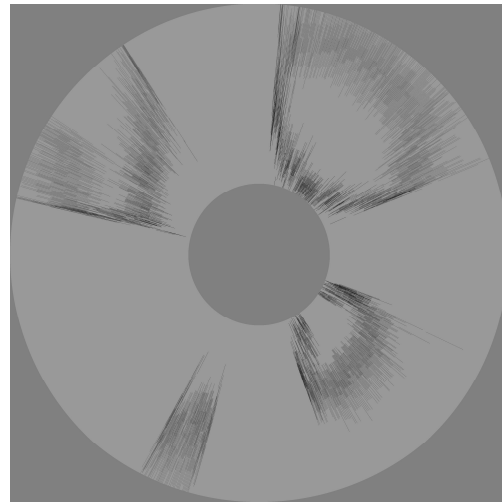
(a) Imagem local



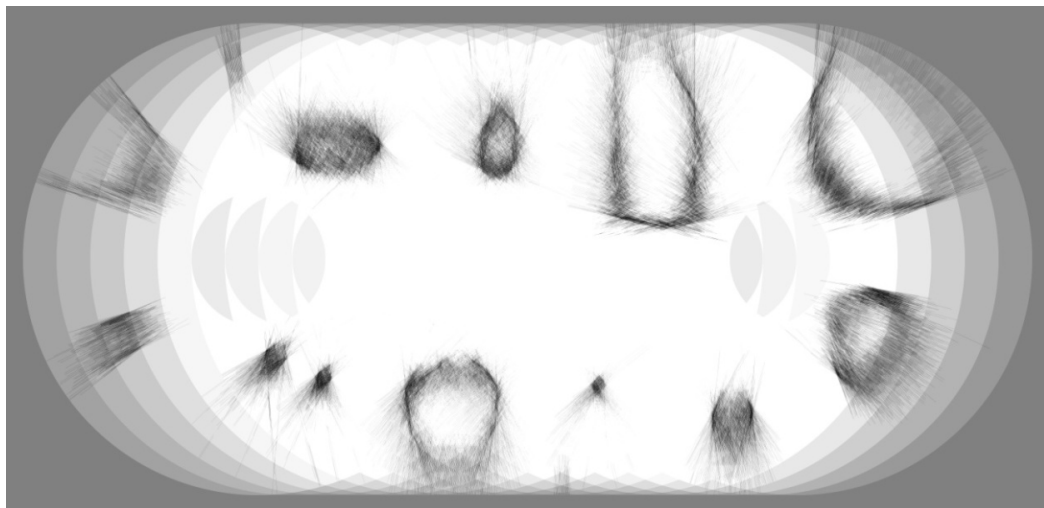
(b) Imagem omnidirecional



(c) Realce de bordas

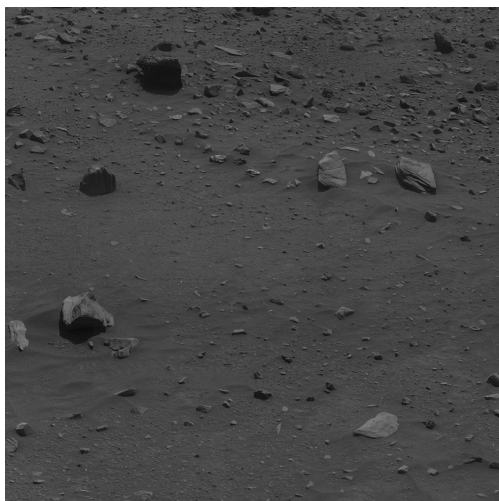


(d) Mapa local

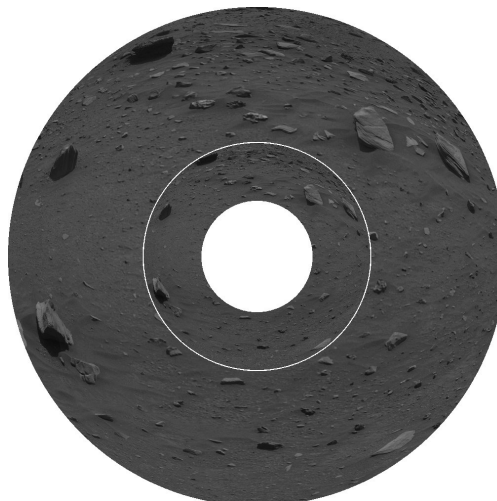


(e) Mapa global

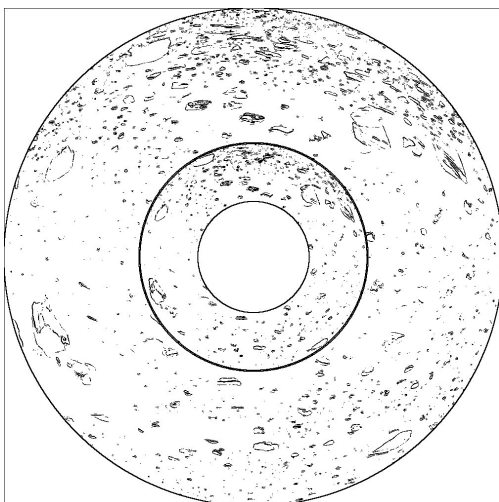
Figura 4.5 – 17ª atualização do mapa global 1



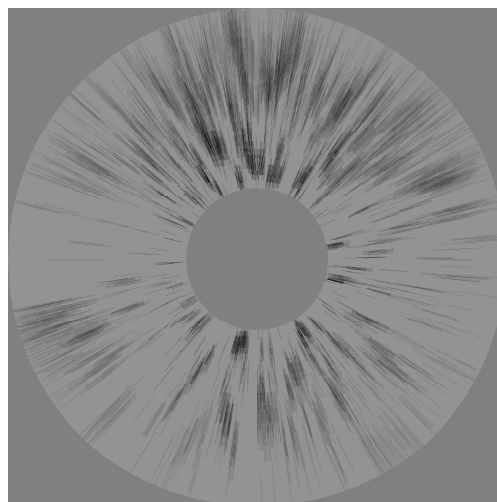
(a) Imagem local



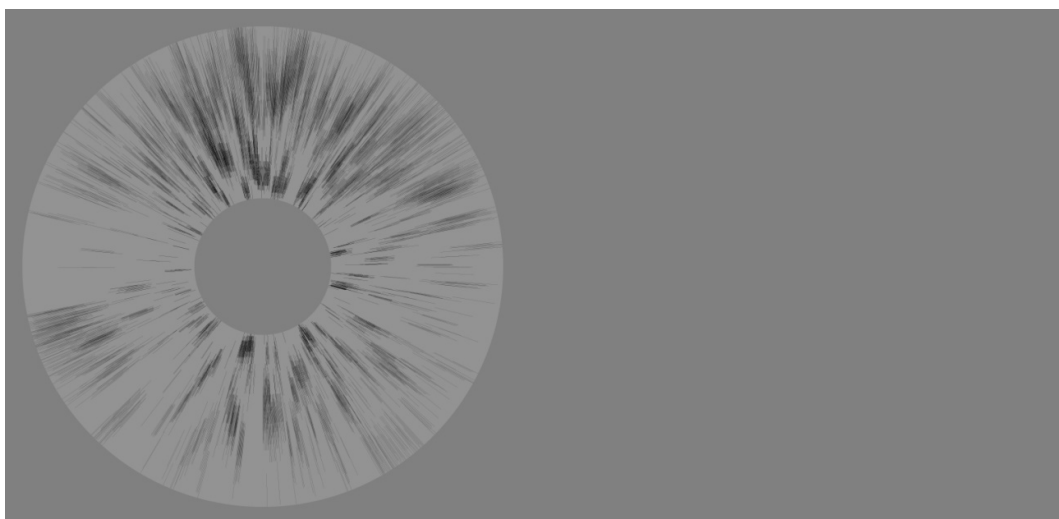
(b) Imagem omnidirecional



(c) Realce de bordas

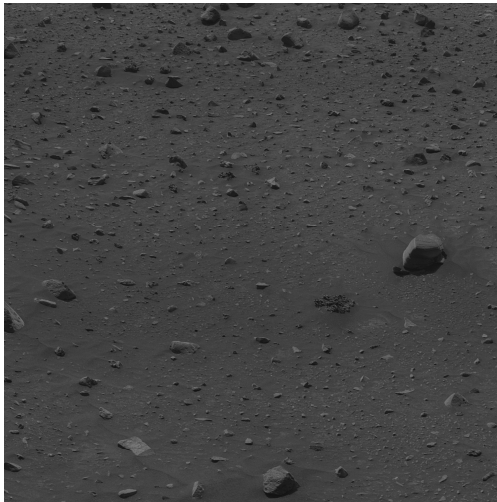


(d) Mapa local



(e) Mapa global

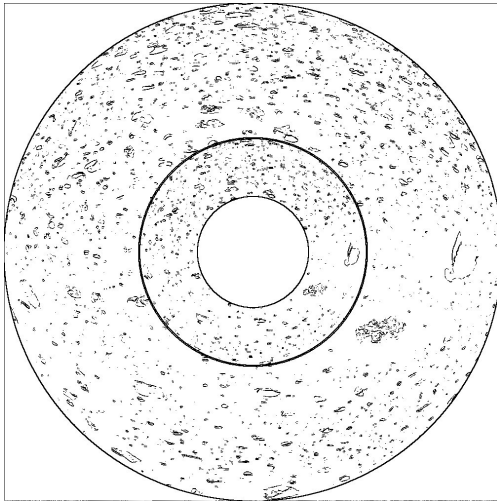
Figura 4.6 – 1ª atualização do mapa global 2



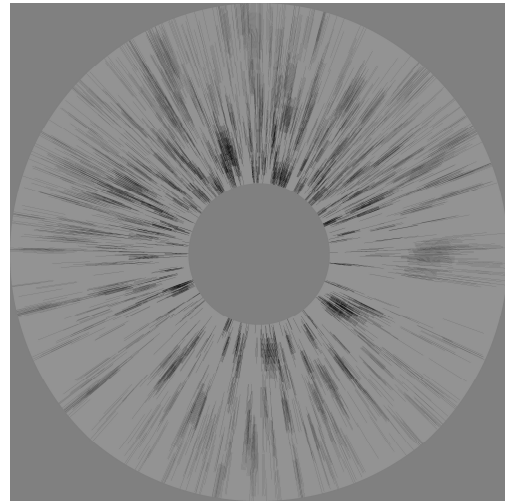
(a) Imagem local



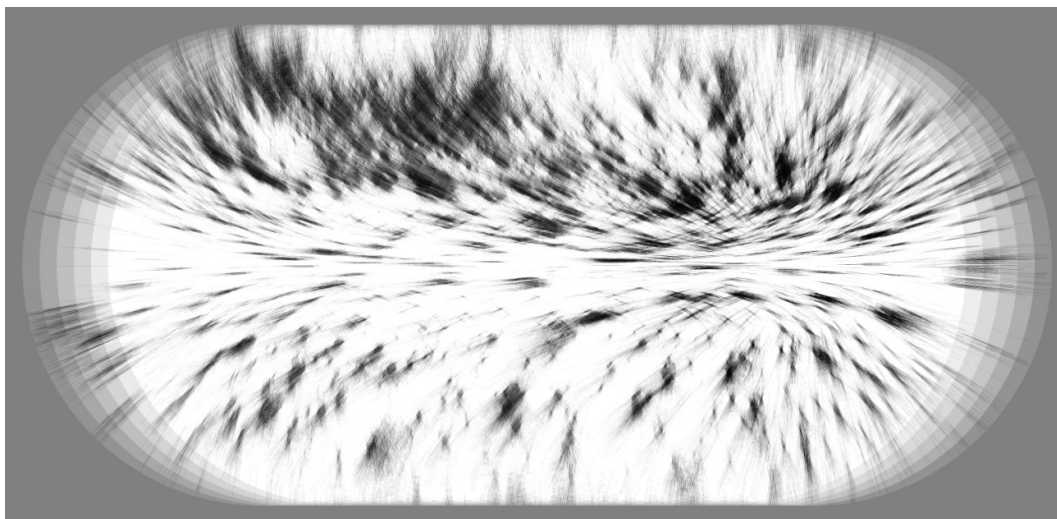
(b) Imagem omnidirecional



(c) Realce de bordas



(d) Mapa local



(e) Mapa global

Figura 4.7 – 33ª atualização do mapa global 2

De acordo com as pesquisas realizadas é possível identificar a complexidade de se utilizar um sistema de visão omnidirecional catadióptrico com espelho de lobo duplo para realizar o mapeamento de um ambiente desconhecido, no qual podem existir obstáculos de diversos tamanhos e formas. Para realizar um mapeamento, é preciso localizar os obstáculos e posicionar o robô no mapa. Para isso foi criada uma matriz que armazena em cada célula a probabilidade de existência de um obstáculo e essa probabilidade é atualizada a cada novo ciclo de aquisição de imagem.

Nesse trabalho foi considerado que não há erro na localização do robô no mapa global, pois o principal objetivo é localizar os obstáculos existentes no ambiente. Em aplicações reais deve ser realizada a fusão dos sensores de localização do robô com os dados obtidos a partir do sistema de visão omnidirecional, a fim de determinar a localização do robô no mapa global. Analisando os resultados obtidos no processo de mapeamento simulado temos:

A imagem local é um quadrado de 2800 pixels de lado, em que cada pixel representa uma área de 1 mm^2 do ambiente estudado. O programa de simulação extraiu a imagem local a partir do posicionamento do robô na imagem que representa o ambiente, em que o centro do robô está localizado no centro da imagem local. Como o processo é simulado e não depende das propriedades do robô, optou-se por utilizar um deslocamento maior (200 mm) para o ambiente mais simples e um deslocamento menor (100 mm) para o ambiente mais complexo. Em uma navegação real deve ser observado o tempo de processamento do robô e a qualidade do mapa gerado, de maneira que o deslocamento do robô seja compatível com a geração de um mapa navegável.

A imagem omnidirecional foi obtida a partir da visualização simulada da imagem local, pelo sistema omnidirecional projetado, onde os objetos existentes sofrem uma deformação, que é característica de sensores omnidirecionais catadióptricos, que podem ser observados nos itens (b) das figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7. Essa deformação não influenciou na determinação da posição dos objetos, pois a deformação ocorre tanto na imagem interna como na imagem externa. Comparando os objetos da imagem omnidirecional externa com os da interna é confirmado a hipótese de que os objetos teriam escalas diferentes, o que

justifica a utilização de uma janela radial para a utilização do método do menor somatório dos quadrados das diferenças (SSD) na identificação dos pares equivalentes.

Na imagem de realce de bordas é verificada visualmente que os objetos existentes na imagem interna estão também representados na imagem externa e que o inverso nem sempre ocorre, ou seja, para cada ponto pertencente à imagem interna, tem um ponto equivalente na imagem externa. Analisando a imagem omnidirecional, item (b) da Fig. (4.8), é observado que, os objetos D e H da imagem local (a), estão representados na imagem 2 (D_2 e H_2) mas não aparecem na imagem 1, que seriam D_1 e H_1 respectivamente, pois os objetos D e H estão apenas no campo de visualização do espelho 2, o que é insuficiente para se ter uma imagem estérea. Portanto, o sistema desenvolvido descarta esses pontos, o que justifica a ausência dos objetos D e H no mapa local (d). Essa observação justifica o método de busca utilizado para localizar os pares de pontos equivalentes, onde é extraído um ponto da imagem interna e em seqüências é procurado o seu ponto equivalente na imagem externa. Se o método utilizasse um ponto da imagem externa para procurar o seu equivalente na imagem interna, haveria pontos que não teriam o seu equivalente e como o método utiliza o menor SSD para a determinação do par equivalente, seriam inseridos falsos pontos no mapa local.

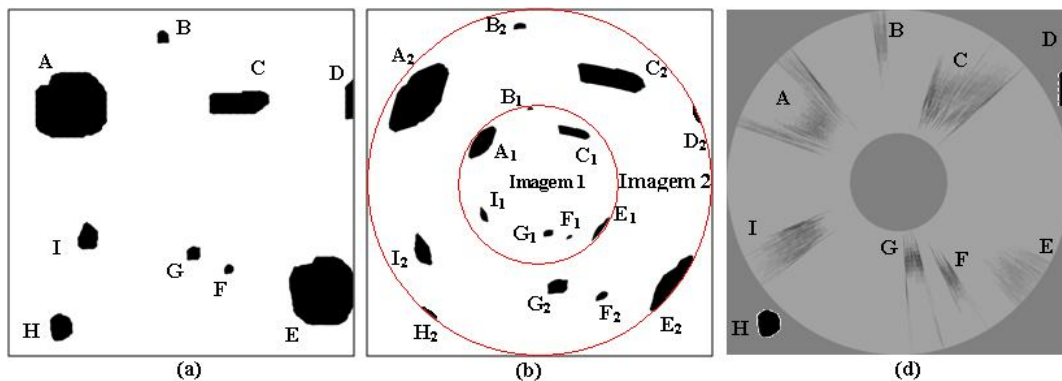


Figura 4.8 – Comparação entre imagens: (a) Imagem local, (b) Imagem omnidirecional, (c) Mapa local.

O mapa local gerado utilizou uma curva Gaussiana de uma dimensão com erro de 30% para identificar a posição dos pontos que definem os contornos dos objetos. Cada ponto extraído do ambiente é representado no mapa local como uma linha radial com variação do

tom de cinza, que representa a probabilidade de existência de um obstáculo. Essa representação criou no mapa local um excesso de pontos, tornando-o rebuscado e confuso, sem definir exatamente a posição do objeto analisado. Esse problema foi resolvido com a utilização de um mapa global, que é melhorado a cada nova atualização.

O mapa global foi obtido a partir da introdução de diversos mapas locais Fig. (3.37) e a confusão observada no mapa local são resolvidas com a atualização do mapa global, onde os objetos observados vão tomando forma a cada nova atualização. Foi observado que a qualidade do mapa global é melhorada significativamente a cada atualização.

Comparando os mapas gerados Fig. (4.9 e 4.11) com as imagens dos ambientes observados Fig. (4.10 e 4.12), verifica-se que ocorre um significativo aumento da probabilidade armazenada nas células da grade de evidências onde são identificados os objetos e uma redução da probabilidade onde não há obstáculos. O aumento ou decréscimo da probabilidade de cada célula depende do modelo proposto para o sensor.

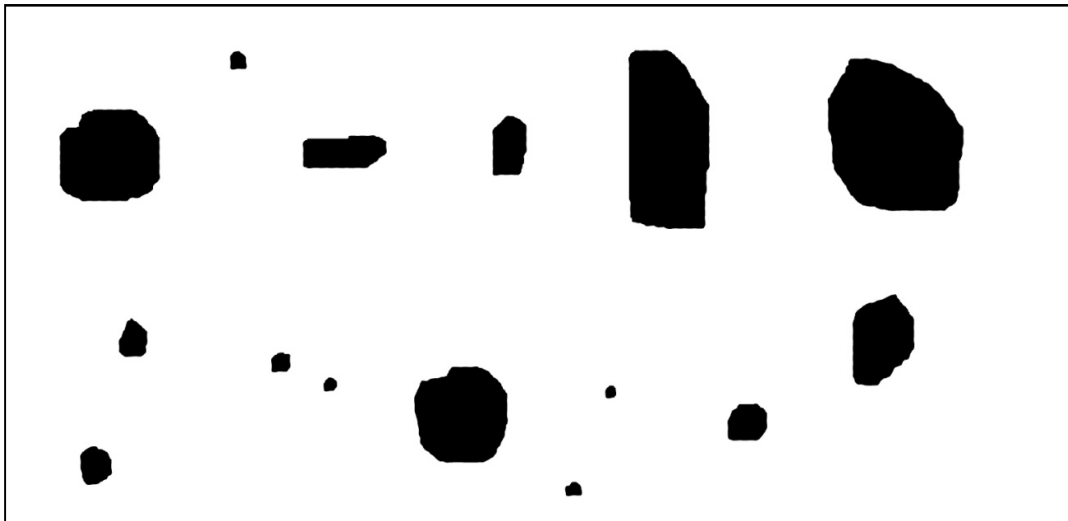


Figura 4.9 – Ambiente 1.

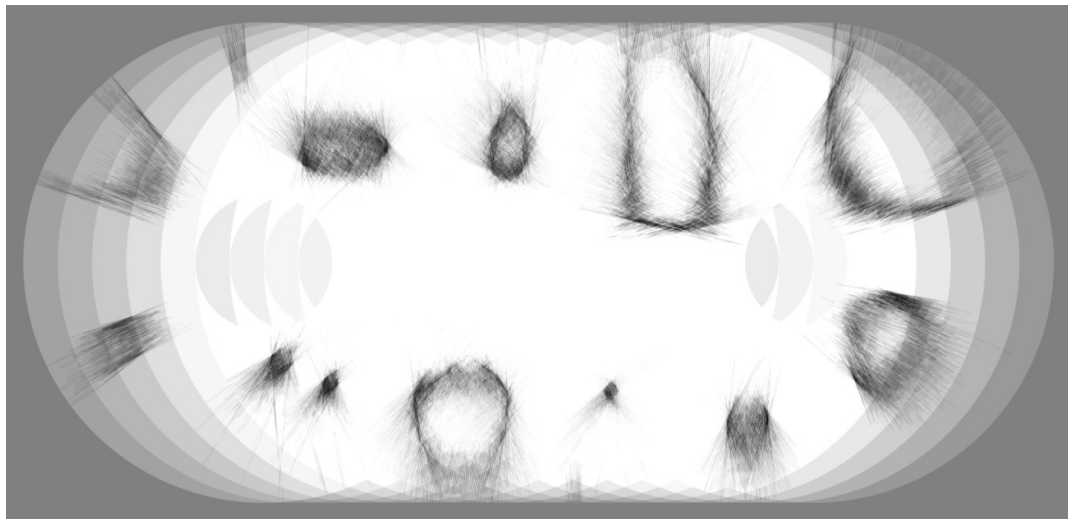


Figura 4.10 – Mapa global 1.

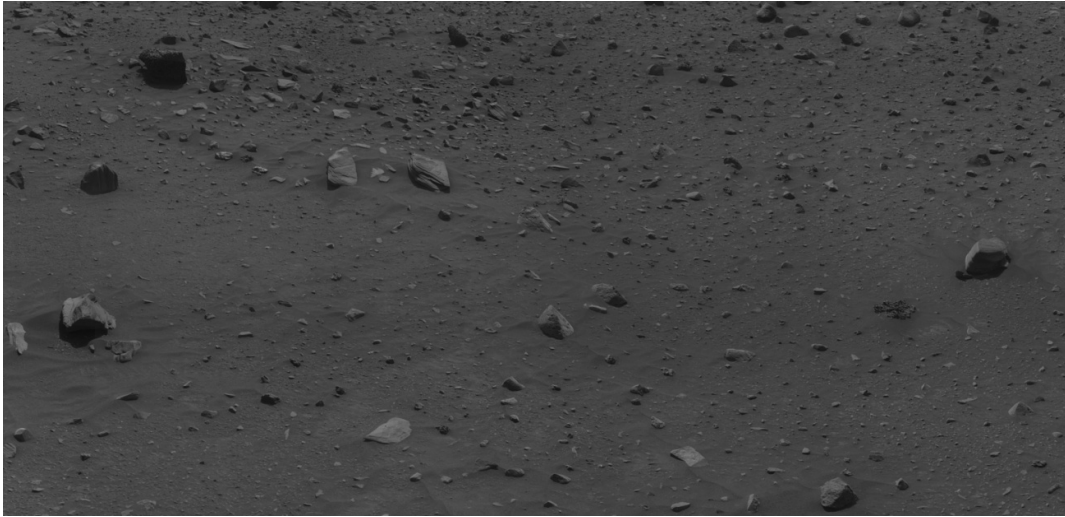


Figura 4.11 – Ambiente 2 (NASA, 2008).

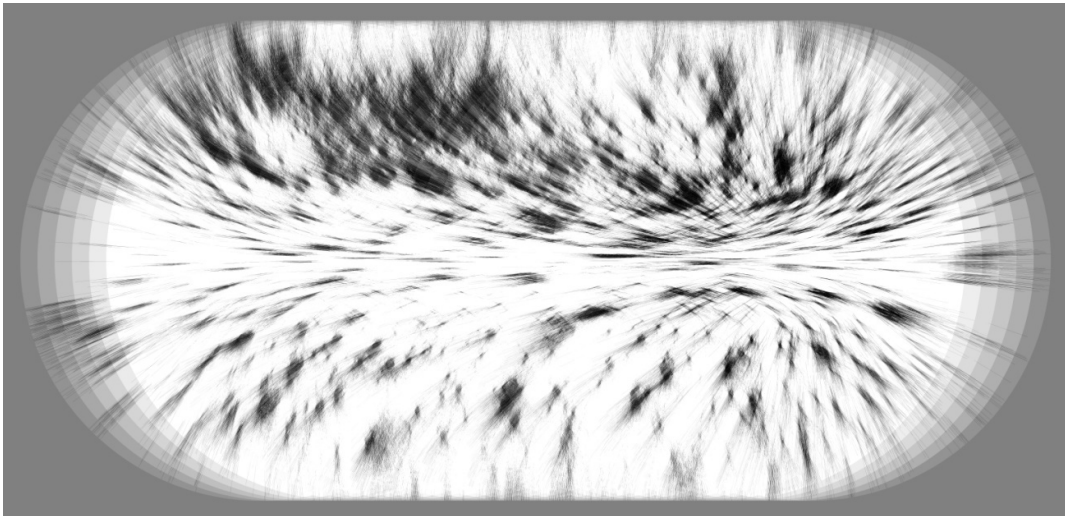


Figura 4.12 – Mapa global 2.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Uma das aspirações da robótica moderna é o desenvolvimento de sistemas cada vez mais autônomos e flexíveis, capazes de se adaptar e aprender à medida que interagem com o ambiente (Vassallo, 2004). Com o aumento da capacidade de processamento dos computadores, a visão computacional é cada vez mais utilizada para mapeamento de ambientes.

Neste trabalho, foi proposta uma abordagem para geração de grades de evidências que represente um ambiente não estruturado, a partir de imagens omnidirecionais etéreas, geradas por um sistema de visão omnidirecional catadióptrico, com espelho hiperbólico de lobo duplo.

Como o espelho do sistema tem centro único de projeção, os cálculos exigidos para realizar a triangulação do sistema estéreo, que é necessária para determinar a distâncias dos objetos existentes no ambiente mapeado, são mais eficientes e rápidos do que em qualquer outra configuração de sistema de visão estéreo omnidirecional, tais como os sistemas que utilizam espelhos esféricos. Os resultados obtidos mostram um erro de 30%, e apresenta a acurácia necessária para navegação de robôs móveis.

Foi desenvolvido um sistema de visão omnidirecional compacto ($h = 211,640$ mm e $R_{\text{topo}} = 60$ mm), composto por uma câmera de projeção perspectiva com boa resolução (1008 x 1008), montada em frente a um espelho hiperbólico de lobo duplo. Duas implementações simuladas foram realizadas para validar o trabalho. O primeiro é o mapeamento simulado de um ambiente simples não estruturado e o segundo é o mapeamento simulado de um ambiente complexo.

Para que o sistema omnidirecional desenvolvido seja fabricado e tenha a acurácia necessária para realizar um mapeamento real, é preciso desenvolver um espelho com perfil bem definido, de maneira que o campo de visão do sistema atenda as especificações do projeto de navegação do robô móvel a ser utilizado. A superfície do espelho deve que ser fabricada com um torno de ultraprecisão com incremento mínimo de 0,0001 mm, de maneira a possibilitar a aquisição de uma imagem nítida do ambiente. O espelho projetado com um incremento de 0,0001 mm gerou uma superfície espelhada, com 230.000 pontos

para o perfil 1 e 340.000 pontos para o perfil 2 Fig. (3.11). A simulação realizada com esse espelho demonstrou que esse acabamento superficial é suficiente para a utilização do sistema em mapeamento de ambientes, através da geração de grades de evidências.

A utilização de um perfil com lobo duplo possibilitou a aquisição de uma imagem omnidirecional estérea instantânea, ou seja, o par estereoscópico tem um deslocamento vertical e não necessita que o sistema seja deslocado. Esta característica possibilita a realização do mapeamento de ambientes desconhecidos, sem a necessidade de deslocamento do robô móvel, o que diminui a possibilidade de choque com obstáculos.

A aquisição da imagem e a atualização do mapa global podem ser realizadas com o robô parado ou em movimento. O intervalo de atualização do mapa global depende da velocidade de processamento do sistema embarcado no robô. Apesar das vantagens que o lobo duplo proporciona ao sistema, é importante citar que, quanto menor for o deslocamento vertical da imagem estérea (distância entre os focos dos espelhos) mais sensível o sistema se torna, onde um pequeno erro na fase da identificação dos pares de pontos equivalente pode provocar um grande erro na identificação da posição do ponto estudado do ambiente. Para esse trabalho foi utilizado um deslocamento vertical de 46,352 mm, que resultou em um modelo probabilístico Gaussiano com erro de 0,3, o que justifica a utilização de grades de evidências na realização do mapeamento.

As técnicas estereoscópicas utilizadas no processamento da imagem omnidirecional estérea, se mostraram eficientes no mapeamento de ambientes simples, tal como o ambiente 1, utilizado na simulação Fig. (3.38), pois possibilitou a localização dos objetos existentes no ambiente, de maneira nítida, a partir de imagens omnidirecionais estérea concêntricas. Para ambientes complexos como o ambiente 2 Fig. (3.39) as técnicas de processamentos utilizadas se mostraram pouco eficientes, pois a grande quantidade de objetos pequenos tornou o mapeamento confuso, sendo que, o sistema foi criado para identificar as bordas dos objetos existentes no ambiente e como o ambiente é contaminado por diversos objetos pequenos, é gerado no mapa global grandes áreas, que podem parecer para o sistema de navegação do robô como sendo um objeto grande, limitando assim, o seu deslocamento por essa região.

O armazenamento do mapa em forma de grades de evidências e o método de atualização do mapa global se mostraram eficientes na identificação da posição dos obstáculos existentes. Comparando os resultados obtidos na simulação com os mapas gerados por sistemas reais desenvolvidos em outros trabalhos (Adorni et al 2001, Koyasu et al 2001, Bunschoten 2003, Correa 2004, Cabral et al 2007, Gong 2008,), acredita-se que seja perfeitamente possível utilizar o sistema de visão projetado, para realizar a navegação autônoma de um robô móvel em um ambiente estruturado ou em um ambiente não estruturado com objetos grandes, tais como o mobiliário de uma casa.

O sistema de visão computacional desenvolvido nesse trabalho pode ser utilizado para mapeamento de ambientes estruturados, principalmente se o ambiente for simples, tal como uma fábrica, um depósito ou uma sala. O sistema pode ainda ser utilizado em ambientes estruturados onde o robô é guiado por uma faixa fixada no piso do ambiente e possibilita também a identificação de obstáculos grandes, tais como seres humanos e mobiliários de uma sala.

Apesar dos bons resultados obtidos serão sugeridas algumas novas abordagens para esse tema, de forma a dar continuidade ao trabalho:

- Deve ser realizado um estudo nos métodos de fabricação do espelho, de forma a produzir um sistema omnidirecional de baixo custo, compacto e que gere imagens de alta resolução;
- Como houve bons resultados na simulação computacional é sugerido que o sistema omnidirecional projetado seja fabricado e testado em um robô móvel que possa navegar em um ambiente externo e não estruturado;
- O mapa global gerado pode ser integrado a um sistema de navegação, que utilize inteligência artificial, tal como o sistema de redes neurais. O sistema inteligente pode aprender como o ambiente está estruturado e atualizar o modelo do sensor, de forma a tornar o mapeamento mais rápido, eficiente e específico para cada ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adorni, G. et al. "A Non-tradicional Omnidirectional Vision System with Stereo Capabilities for Autonomous Robot." In: F. Esposito (Ed.): AI*IA2001, LNAI 2175, pp. 344–355, Springer, Berlin Heidelberg.
- Baker, S.; Nayar, S.K. (1999). "A theory of single-viewpoint catadioptric image formation." In: International Journal of Computer Vision, 32(2):175-196.
- Bartoli, A.; Sturm, P. (2003). "Multiple-View Structure and Motion From Line Correspondences." In: IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'03) 0-7695-1950-4/03.
- Bartoli, A.; Sturm, P. (2004). "The 3D Line Motion Matrix and Alignment of Line Reconstructions." In: International Journal of Computer Vision 57(3), 159–178, 2004.
- Benevenuti, F. (2001). "Calibração de um conjunto binocular para uso em estereoscopia e robótica móvel." Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Bunschoten, R. (2003). "Mapping and Localization from a Panoramic Vision Sensor." Tese de Doutorado, University of Amsterdam, Holanda.
- Cabral, E.L.L.; Oliveira, P.R.G.; Souza JR, J.C. (2007). "An Omnidirectional Stereo Vision System." In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Brasília, Brasil.
- Cabral, E.L.L.; Souza JR, J.C.; Hunold, M.C. (2004). "Omnidirectional Stereo Vision with a Hyperbolic Double Lobed Mirror." In: International Conference on Pattern Recognition (ICPR'04) 1051-4651/04.
- Coelho, M.C.F.S.P. (2002). "Desenvolvimento de um Sistema de Levantamento de Forma 3D usando Visão por Computador." Relatório Técnico, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Cidade do Porto, Portugal.
- Corrêa, R.F. (2004). "Grades de Evidência com Visão Estéreo Omnidirecional para Navegação de Robôs Móveis." Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Decco, C.C.G.(2004). "Construção de Mapas de Ambientes para Navegação de Robôs Móveis com Visão Omnidirecional Estéreo." Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

- Elfes, Alberto (1987), 'Sonar-based real-world mapping and navigation', IEEE Journal of Robotics and Automation 3(3), 249–265.
- Elfes, A. (1989), "Occupancy Grid: A Probabilistic Framework for Robot Perception and Navigation." Tese de doutorado, Carnegie Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania, USA.
- Fairfield, N.; Kantor, G.; Wettergreen, D. (2006). "Real-Time SLAM with Octree Evidence Grids for Exploration in Underwater Tunnels." In: The Robotics Institute Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania.
- França, J.A.; Stemmer, M.R.; França, M.B.M. (2005). "Algoritmo Robusto para Correspondência de Pontos em Imagens Estereoscópicas na Ausência de Calibração." In: Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 26, n. 2, p. 167-181, Londrina, Brasil.
- Gaspar, J.G. et al. (2002) "Constant resolution omnidirectional cameras", In OMNIVIS'02, Copenhagen.
- Geyer, C.; Daniilidis, K. (2000) "A unifying theory for central panoramic systems and practical applications," in European Conference on Computer Vision (ECCV), pp. 445–461.
- Geyer, C. e Daniilidis, K. (2001). Catadioptric projective geometry, International Journal of Computer Vision 3: 223–243.
- Gluckman, J.; Nayar, S.K. (1998). "Ego-motion and omnidirectional cameras." In: Proc. of 6th International Conference on Computer Vision - ICCV98, páginas 999-1005.
- Grassi JR, V. et al. (2001). "Desenvolvimento de Um Sistema de Visão Omnidirecional." In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM).
- Grassi JR, V. (2002). "Sistema de Visão Omnidirecional Aplicado no Controle de Robôs Móveis." Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Gonzalez, R. C. e Woods, R. E. (2007). "Processamento de Imagens Digitais" 3ª Edição, São Paulo; Editora Blucher.
- Halliday, D.; Resnick R.; Walker J. (1995). "Fundamentos de Física vol.4. Óptica e Física Moderna" 4ª Edição, Rio de Janeiro; Livros Técnicos e Científicos Editora.
- Huguet, B.A., (2003). "Reconstrução de Cenas Urbanas Baseada em Estereoscopia e Segmentação por Watershed." Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil.

- H. Ishiguro, K. Ueda and S. Tsuji, Omnidirectional visual information for navigating a mobile robot, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 799-804, 1993.
- Ishiguro, H. (1998). "Development of Low-Cost Compact Omnidirectional Vision Sensors and their applications." Department of Electrical & Computer Engineering, University of California, San Diego.
- Kawanishi, R. et al (2009). "Three-Dimensional Environment Model Construction from an Omnidirectional Image Sequence." In: Journal of Robotics and Mechatronics Vol.21 No.5
- Lin, S.S.; Bajcsy, R. (2003). "High Resolution Catadioptric Omni-Directional Stereo Sensor for Robot Vision." In: International Conference on Robotics & Automation, Taipei, Taiwan, September 14-19.
- Jain, R. et al, (1995). "Machine Vision" New York; McGraw-Hill, Inc.
- Marchand, E.; Chaumette, F. (2007). "Fitting 3D Models on Central Catadioptric Images." In: International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy.
- Maeda, Y. and Shimizuhira, W. (2007). "Multilayered Fuzzy Behavior Control for an Autonomous Mobile Robot with Multiple Omnidirectional Vision System: MOVIS." In: Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.11 No.1.
- Moravec, Hans P. (1996), "Robot Spacial Perception by Stereoscopic Vision on 3d Evidence Grid." Relatório Técnico CMU-RI-TR-96-34, CMU Robotics Institute, Pittsburg, Pennsylvania.
- Martin, M.C.; Moravec, H.P. (1996). "Robot Evidence Grids." Technical Report CMU-RI-TR-96-06, The Robotic Istitute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA.
- Nayar, S. K. (1997) "Catadioptric omnidirectional camera," In: IEEE CVPR'97, pp. 482-488.
- Matsumoto, A. et al (2004). "Navigation of an Omnidirectional Mobile Robot by Teaching a Few Omnidirectional Images." In: Journal of Robotics and Mechatronics Vol.16 No.1.
- NASA, (2008), Página na internet, National Aeronautics and Space Administration, EUA. URL: <http://marsrovers.nasa.gov/home/index.html>. Arquivo capturado em 15 de maio de 2008
- NOMADIC TECHNOLOGIES, (1999), Nomad XR4000 hardware manual release 1.0, Califórnia.

- Pazos, F. (2002), "Automação de Sistemas e Robótica" Rio de Janeiro; Axcel Books do Brasil Editora.
- Pedrosa, Diogo P. F. (2006), "Mapeamento de Ambientes Estruturados com Extração de Informações Geométricas Atavés de Dados Sensoriais", Tese de doutorado, UFRN, Natal, RN.
- Pereira, G.F. et al. (2005). "Calibração de Sistemas Catadióptricos e Detecção da Pose de Robôs Móveis Por Segmentação de Imagens Omnidirecionais." In: VII SBAI / II IEEE LARS, São Luís, Brasil.
- Siegwart, R.; Nourbakhsh, R. (2004), Introduction to Autonomous Mobile Robot, 1ª edição, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, EUA.
- Santana Souza, A.A. (2008). "Mapeamento com Sonar Usando Grade de Ocupação Baseado em Modelagem Probabilística." Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.
- Souza, G.G. (2003). "Estudo e Aplicação do Sonar na Robótica Móvel" Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Souza, G.G.; Motta, J.M.S.T. (2007). "Simulation of an Omnidirectional Catadioptric Vision System With Hyperbolic Double Lobed Mirror for Robot Navigation." In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM), Brasília, Brasil.
- Svoboda, T.; Pajdla, T.; Hlavác, V. (1997). "Central Panoramic cameras: Geometry and Design." TR-K 335-97-147.ps.gz, Czech Technical University, Faculty of Electrical Engineering, Czech Republic.
- Scaramuzza, D. (2008). "Omnidirectional Vision: From Calibration to Robot Motion Estimation." Tese de Doutorado, M.S. Electronic Engineering, Università di Perugia, Italy.
- Svoboda, T.; Pajdla, T.; Hlavac, V. (1998). "Motion estimation using central panoramic cameras". In: IEEE International Conference on Intelligent Vehicles.
- Taha, Z. et al (2010). "Omnidirectional Vision for Mobile Robot Navigation." In: Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.14 No.1
- Vassallo, R.F. (2004). "Uso de Mapeamento Visuomotores com Imagens Omnidirecionais para Aprendizagem por Imitação em Robótica." Tese de Doutorado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil.
- Winters, N. et al. (2000). "Omni-directional vision for robot navigation." In: IEEE Workshop on Omnidirectional Vision (held with CVPR).

- Winters, N. (2001). "A Holistic Approach to Mobile Robot Navigation using Omnidirectional Vision." Tese de Doutorado, Department of Computer Science, University of Dublin, Trinity College.
- Yagi, Y. (1999). "Omnidirectional sensing and its applications." In: IEICE Transactions on Information and Systems, E82D(3):568-579.
- Yaguchi, H. et al (2009). "View-Based Localization Using Head-Mounted Multi Sensors Information." In: Journal of Robotics and Mechatronics Vol.21 No.3
- Yi, Z. et al (2000), "Multi-ultrasonic sensors Fusion for Autonomous Mobile Robot. In". Annual International SPIE Symposium on Aerospace/Defense, Sensing, Simulation & Controls, Orlando.
- Zhu, Z. (2001). "Omnidirectional Stereo Vision." In: Workshop on Omnidirectional Vision, in the 10th IEEE ICAR, Budapest, Hungary.
- Zhu, Z. et al. (2000). "Panoramic Virtual Stereo Vision of Cooperative Mobile Robots for Localizing 3D Moving Objects." In: 0-7695-0704-2/00 IEEE.