CLÁUDIA CRISTINA GHIRARDELLO DECCÓ

**Construção de Mapas de Ambiente para Navegação de
Robôs Móveis com Visão Omnidirecional Estéreo**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do
Título de Doutor em
Engenharia.

São Paulo
2004

CLÁUDIA CRISTINA GHIRARDELLO DECCÓ

**Construção de Mapas de Ambiente para Navegação de
Robôs Móveis com Visão Omnidirecional Estéreo**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do
Título de Doutor em
Engenharia.

Programa:
Engenharia Mecânica.

Área de Concentração:
Engenharia de Controle e
Automação Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Jun Okamoto Junior

São Paulo
2004

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu força, saúde, ânimo e inteligência para a conclusão desse trabalho.

A realização de uma tese de doutorado significa uma grande conquista e acima de tudo, uma realização pessoal. Exige, da parte de quem está alcançando este objetivo, um grande esforço, dedicação, abnegação, paciência e grande força de vontade. E, da parte das pessoas relacionadas à esta, compreensão. À todas estas pessoas quero, simplesmente, agradecer.

Primeiramente quero agradecer ao meu orientador Prof. Dr. Jun Okamoto Junior pela oportunidade da realização do trabalho e pela orientação, também pelo apoio e encorajamento dados durante esta fase. Também pelos momentos de discussões técnicas e conversas que me serviram para o aprimoramento e compreensão dos assuntos técnicos.

Agradeço igualmente ao prof. Dr. José Alberto Santos-Victor, pela orientação e incentivo dados durante minha estada em Portugal, pelas longas conversas, cobranças, apoio e sua constante ajuda. Pelo esforço em engajar-me num projeto europeu, o qual me proporcionou “a fama” inicial na área de pesquisa de visão robótica, a qual é demasiadamente interessante e merecedora de empenho e pesquisas.

Ao amigo Gaspar por tantos momentos de discussão técnica e rigorosos apontamentos e questionamentos. Esses geram os frutos para o nascimento de um bom pesquisador, “espírito crítico, muitas indagações e demasiado esforço”. Agradeço a constante ajuda com as ferramentas do Matlab (“eh, computadores não são simpáticos!”). Grandes discussões técnicas, grande apoio e incentivo, repreensões com o tratar dos termos técnicos da literatura e grande amizade me

fizeram uma grande admiradora de ti! Bom ver que o mundo tem pesquisadores e gente como você. Valiosa foi a tua ajuda, Gasparzinho!

Agradeço, especialmente, ao amigo sempre presente, Eduardo Cabral, pela ajuda, incentivo, encorajamento, apoio, carinho e amizade. Pelos momentos de discussão filosófica e técnica, pelas trocas de idéias e participação do desenvolver dessa tese (quantas discussões em plenas horas de almoço!). À você um grande agradecimento, pela ajuda nas horas difíceis, por estender a mão nas horas de tristeza e sufoco, por não permitir-me deixar a peteca cair, por cobrar, ensinar e se preocupar. Valeu! Você foi demais. Agradeço à compreensão e ao carinho presentes em todos os momentos vividos nesses anos.

Ao grande amigo sempre presente Rafael do Espírito-Santo. Começamos juntos o doutorado, trocamos experiências e, enfim, estamos chegando ao fim. À grande amiga Eliane, por tantas horas de apoio, conversas, ajuda, pela sua presença, carinho e amizade mostrados durante todo o tempo que nos conhecemos. Uma amizade tão bela é motivo de satisfação. Também ao amigo Toninho. Agradeço à amiga Andréa, por nossa longa amizade e pelo apoio, pela grande consideração, carinho e força. À amiga Renata, por mostrar-me de um jeito especial o quanto vale o nosso esforço. Vamos lá, ânimo Rê!

Aos meus amigos do laboratório Valdir, Marcus, Fabiano, Silvana e Angélica. A todos pela valiosa amizade, ajuda e carinho. Aos meus amigos da sala de pós-graduação, Emília, Fabrício, Gladys e Walter. Aos amigos do VisLab, Alexandre, Sjoerd, Niall, Etienne, Nuno, Diego e aos amigos que cruzaram o meu caminho durante um ano vivido no VisLab. A todos amigos de trabalho um precioso agradecimento.

Ao Instituto Superior Técnico e ao Instituto de Sistemas e Robótica, pela possível realização de um trabalho conjunto, bem como ao auxílio financeiro por um período da minha estada. Também à Escola Politécnica da USP, pelo espaço físico, material, laboratório e pelas condições de trabalho. Agradeço aos amigos da secretaria, Cássio, Denise, Rose, Ângela e Elaine.

À fapesp, pelo auxílio financeiro e pelas condições de proporcionar os meios para a realização do trabalho, como a viagem, a aquisição do computador, a participação em congressos, etc.

À todos os meus familiares, quero agradecer pela grande admiração e apoio, amor e incentivo. Agora já quero tapete vermelho na passarela, tia Cleide! Quero expressar minha gratidão pela força e admiração. A todos que estiveram comigo presentes durante as fases boas e durante as mais difíceis. Obrigada às tias Mirtes, Fátima, Cleide e Cleusa e à minha sogra Miriam pela admiração e confiança, eu consegui! À avó Dina por estar sempre orando por mim e por prestar um zelo especial. À avó Conceição pela admiração e carinho. Aos meus tios, primos e todos familiares.

Aos meus pais, Luiz e Marlene, pelo grande ensinamento que me deram, pela minha educação e formação, pelo carinho, compreensão, ajuda, e pela presença em todos os momentos da minha vida. Aos meus irmãos, Márcia, Luiz Fernando e Flávia, obrigada por tanta força e carinho. Aos cunhados Nasser e Alan, Eduardo e Roberto. À minha cunhada Cláudia pelas orações e grande apoio.

Aos amigos da Igreja Presbiteriana Independente de Vila Yara, pelas orações e apoio. Também à psicóloga Isabel, por ser uma pessoa especial e amiga.

São tantas as pessoas para as quais queria poder expressar o meu agradecimento com palavras, mas não as acho suficientes para exprimir o meu muito obrigada, a todos.

E, finalmente e especialmente ao meu marido, Ricardo, que dia a dia participou dessa jornada ao meu lado. Que confiou, ajudou, esperou e incentivou. Obrigada pela compreensão, pelo apoio, por ser paciente na época que estive ausente e por me encorajar na presença. Sem teu amor e apoio eu não teria chegado até aqui.

Enfim, a todos aqueles que estiveram comigo e juntamente caminharam ao meu lado, à todos vocês, dedico esta tese.

RESUMO

O problema de navegação de robôs móveis tem sido estudado ao longo de vários anos, com o objetivo de se construir um robô com elevado grau de autonomia. O aumento da autonomia de um robô móvel está relacionado com a capacidade de aquisição de informações e com a automatização de tarefas, tal como a construção de mapas de ambiente. Sistemas de visão são amplamente utilizados em tarefas de robôs autônomos devido a grande quantidade de informação contida em uma imagem. Além disso, sensores omnidirecionais catadióptricos permitem ainda a obtenção de informação visual em uma imagem de 360°, dispensando o movimento da câmera em direções de interesse para a tarefa do robô. Mapas de ambiente podem ser construídos para a implementação de estratégias de navegações mais autônomas. Nesse trabalho desenvolveu-se uma metodologia para a construção de mapas para navegação, os quais são a representação da geometria do ambiente. Contém a informação adquirida por um sensor catadióptrico omnidirecional estéreo, construído por uma câmera e um espelho hiperbólico. Para a construção de mapas, os processos de alinhamento, correspondência e integração, são efetuados utilizando-se métricas de diferença angular e de distância entre os pontos. A partir da fusão dos mapas locais cria-se um mapa global do ambiente. O processo aqui desenvolvido para a construção do mapa global permite a adequação de algoritmos de planejamento de trajetória, estimativa de espaço livre e auto-localização, de maneira a obter uma navegação autônoma.

ABSTRACT

The problem of mobile robot navigation has been studied for many years, aiming at build a robot with an high degree of autonomy. The increase in autonomy of a mobile robot is related to its capacity of acquisition of information and the “automation” of tasks, such as the environment map building. In this aspect vision has been widely used due to the great amount of information in an image. Besides that catadioptric omnidirectional sensors allow to get visual information in a 360° image, discharging the need of camera movement in directions of interest for the robot task. Environment maps may be built for an implementation of strategies of more autonomous navigations. In this work a methodology is developed for building maps for robot navigations, which are the representation of the environment geometry. The map contains the information received by a stereo omnidirectional catadioptric sensor built by a camera and a hyperbolic mirror. For the map building, the processes of alignment, registration and integration are performed using metric of angular difference and distance between the points. From the fusion of local maps a global map of the environment is created. The method developed in this work for global map building allows to be coupled with algorithms of path planning, self-location and free space estimation, so that autonomous robot navigation can be obtained.

SUMÁRIO

RESUMO.....	IV
ABSTRACT.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS	XV
LISTA DE SÍMBOLOS	XVI
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - CONSTRUÇÃO DE MAPAS DE AMBIENTE E NAVEGAÇÃO DE ROBÔS MÓVEIS.....	4
2.1 - Navegação reativa, planejada e híbrida	8
2.2 - Navegação com informação visual.....	9
2.2.1 - Navegação com visão estéreo	10
2.2.2 - Navegação com sistemas catadióptricos	13
2.3 - Navegação com detecção de obstáculos.....	15
2.4 - Construção de Mapas do Ambiente.....	20
2.4.1 - Metodologias para Construção de Mapas.....	21
CAPÍTULO 3 - VISÃO OMNIDIRECIONAL.....	27
3.1 - Formas de aquisição de visão omnidirecional.....	28
3.2 - Centro único de projeção.....	29
3.3 - Formas de espelhos	31
3.4 - Visão estéreo	35
3.4.1 - Visão estéreo omnidirecional.....	37
CAPÍTULO 4 - PROJETO DE ESPELHOS.....	39
4.1 - Câmeras	39
4.2 - Perfis de espelhos	41
4.2.1 - Espelho de resolução vertical.....	41

4.2.1.1 - Câmera convencional.....	44
4.2.1.2 - Câmera log-polar	46
4.2.1.3 - Análise do perfil do espelho	47
4.2.2 - Espelho de resolução horizontal	54
4.2.3 - Espelho misto.....	58
4.3 - Aplicação de cálculo: algoritmo e interface gráfica	58
4.4 - Espelho hiperbólico	61
4.4.1 - Projeção de um ponto no espaço através de um espelho hiperbólico	62
4.4.2 - Aplicação das expressões de projeção do espelho hiperbólico.....	65
<i>CAPÍTULO 5 - IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE VISÃO ESTÉREO</i>	
<i>OMNIDIRECIONAL.....</i>	<i>71</i>
5.1 - Extração de características	74
5.2 - Correspondência	77
5.3 - Triangulação	84
<i>CAPÍTULO 6 - METODOLOGIA DESENVOLVIDA PARA A CONSTRUÇÃO</i>	
<i>DE MAPAS</i>	<i>92</i>
6.1 - Alinhamento	94
6.2 - Correspondência	97
6.3 - Integração	103
6.4 - Sumário do Método de Construção de Mapas.....	109
<i>CAPÍTULO 7 - RESULTADOS</i>	<i>110</i>
7.1 - Robô móvel	110
7.2 - Resultados	111
7.2.1 - Caso Virtual	112
7.2.2 - Caso Real.....	157
<i>CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES.....</i>	<i>168</i>
<i>CAPÍTULO 9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	<i>172</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Conjuntos de pontos P e Q.	21
Figura 2.2 – Alinhamento de pontos P e Q.	22
Figura 2.3– Correspondência realizada através do critério da mínima distância entre o par de pontos.	23
Figura 3.1– Três formas de espelho para visão omnidirecional.	31
Figura 3.2 – Imagem de um piso xadrez obtida com um espelho esférico (à esquerda) e com um espelho projetado por HICKS e BAJCSY (2000) (à direita). (Figura extraída de HICKS e BAJCSY (2000)).	33
Figura 3.3 – Ganho angular vertical.	34
Figura 4.1 - Sensor log-polar.	40
Figura 4.2 - Detalhe do arranjo de pixels na parte central do sensor – “fóvea”.	40
Figura 4.3 – Detalhe do arranjo de pixels na parte periférica do sensor - “retina”....	40
Figura 4.4 – Projeção da dimensão vertical no plano da imagem.	42
Figura 4.5 – Perfil do espelho – câmera convencional.	45
Figura 4.6 – Perfil do espelho – câmera log-polar.	46
Figura 4.7 - $(dh(t)/d\mathbf{r})_n / (dh(t)/d\mathbf{r})_t$ obtida com <i>dif</i>	47
Figura 4.8 - $(dh(t)/d\mathbf{r})_n / (dh(t)/d\mathbf{r})_t$ obtida com derivada centrada.	48
Figura 4.9 - $(dh(t)/d\mathbf{r})_n / (dh(t)/d\mathbf{r})_t$, obtida com derivada analítica.	49
Figura 4.10 - $(dh(t)/d\mathbf{r})_n / (dh(t)/d\mathbf{r})_t$ obtida com <i>dif</i> para diferentes distâncias – câmera convencional.	50
Figura 4.11 - $(dh(t)/d\mathbf{r})_n / (dh(t)/d\mathbf{r})_t$ obtida com derivada centrada para diferentes distâncias - câmera convencional.	50
Figura 4.12 - $(dh(t)/d\mathbf{r})_n / (dh(t)/d\mathbf{r})_t$ obtida com derivada analítica para diferentes distâncias – câmera convencional.	51
Figura 4.13 – Projeção inversa dos raios de luz nos planos verticais em diferentes distâncias.	51
Figura 4.14 - $(dh(t)/d\mathbf{r})_n / (dh(t)/d\mathbf{r})_t$, obtida com <i>dif</i> para diferentes distâncias – câmera log-polar.	53

Figura 4.15 - $(dh(t)/dr)_n / (dh(t)/dr)_t$ obtida com derivada centrada para diferentes distâncias – câmera log-polar.	53
Figura 4.16 - $(dh(t)/dr)_n / (dh(t)/dr)_t$ obtida com derivada analítica para diferentes distâncias – câmera log-polar.	54
Figura 4.17 – Projeção do pavimento no plano da imagem.	55
Figura 4.18 – Interface gráfica – espelho de resolução vertical.	59
Figura 4.19 – Interface gráfica – espelho de resolução horizontal.	60
Figura 4.20 – Interface gráfica – espelho misto.	61
Figura 4.21 – Esquema do processo de formação da imagem através do sistema espelho hiperbólico – câmera.	63
Figura 4.22 – Mapeamento do espelho hiperbólico.	66
Figura 4.23 – Mapeamento de uma parede localizada a uma distância de 1m do centro do espelho.	68
Figura 4.24 – Mapeamento de uma parede localizada a uma distância de 4m do centro do espelho.	69
Figura 4.25 – Mapeamento de um plano horizontal localizado a uma distância de 0,5m abaixo do centro do espelho.	70
Figura 4.26 – Mapeamento de plano horizontal localizado a uma distância de 1,5m abaixo do centro do espelho.	70
Figura 5.1 - Sistema Catadióptrico	71
Figura 5.2 - Espelho Hiperbólico	71
Figura 5.3 – Primeira imagem adquirida pelo robô.	72
Figura 5.4 – Imagem adquirida pelo robô após translação de 20cm.	72
Figura 5.5 – Diagrama de blocos representando o processo de cálculo desenvolvido no ambiente visual KHOROS.	73
Figura 5.6 – Imagem resultante após a extração de características e a binarização. .	75
Figura 5.7 – Resultado da extração de características – quinas dos objetos.	77
Figura 5.8 – Geometria epipolar omnidirecional.	79
Figura 5.9 – Curvas epipolares sobre a segunda imagem omnidirecional.	83
Figura 5.10 – Pontos correspondentes às características selecionadas	84
Figura 5.11 – Triangulação para cálculo da distância.	85

Figura 5.12 - Triangulação no plano xy.	88
Figura 5.13 - Esquema da movimentação do robô segundo um movimento com componentes nas direções x e y	91
Figura 5.14 – Distância do robô às quinas dos objetos presentes no ambiente.	91
Figura 6.1 - Fluxograma do processo de construção do mapa global.	94
Figura 6.2: - Descrição do ponto P_i nos sistemas de coordenadas dos mapas global e local.	97
Figura 6.3: - Caso de correspondência entre quatro pontos do mapa local com três pontos do mapa global. As diferenças de ângulos $ \mathbf{q}_{Q_i}^L - \mathbf{q}_{P_i}^L $, com $i = 1, 2, 3$, são utilizadas para a seleção do ponto P_i correspondente aos pontos Q_1, Q_2, Q_3 e Q_4	101
Figura 6.4 - Distâncias $d_{P_1Q_1}$ e $d_{P_1Q_2}$ utilizadas para a eliminar multiplicidade de correspondência e, assim, selecionar um único ponto correspondente ao ponto P_1	102
Figura 7.1 – Robô móvel	110
Figura 7.2 - Trajetória realizada pelo robô para a aquisição de imagens e composição dos mapas locais.	112
Figura 7.3 - (a) Vista superior do ambiente, posição inicial; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô na posição inicial; (c) Vista superior do ambiente, segunda posição do robô; e (d) imagem omnidirecional adquirida pelo robô na segunda posição.	113
Figura 7.4 - Primeiro mapa de distâncias.	114
Figura 7.5 – (a) Vista superior do ambiente para a terceira posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	115
Figura 7.6 - (a) Vista superior do ambiente para a quarta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	116
Figura 7.7 - (a) Vista superior do ambiente para a quinta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	117
Figura 7.8 - (a) Vista superior do ambiente para a sexta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	118

Figura 7.9 - (a) Vista superior do ambiente para a sétima posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	119
Figura 7.10 - (a) Vista superior do ambiente para a oitava posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	120
Figura 7.11 - (a) Vista superior do ambiente para a nona posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	121
Figura 7.12 - (a) Vista superior do ambiente para a décima posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	122
Figura 7.13 - (a) Vista superior do ambiente para a décima primeira posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	123
Figura 7.14 - (a) Vista superior do ambiente para a décima segunda posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	124
Figura 7.15 - (a) Vista superior do ambiente para a décima terceira posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	125
Figura 7.16 - (a) Vista superior do ambiente para a décima quarta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	126
Figura 7.17 - (a) Vista superior do ambiente para a décima quinta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	127
Figura 7.18 – Mapa global, $Dq_{max} = 3^\circ$	128
Figura 7.19 - Mapa global, $Dq_{max} = 10^\circ$	129
Figura 7.20 - Desvio padrão do ponto de coordenada (530,878)	130
Figura 7.21 – Desvio padrão do ponto de coordenada (419,828)	130
Figura 7.22 – Desvio padrão do ponto de coordenada (-70,905)	131
Figura 7.23 – Desvio padrão do ponto de coordenada (-192,833)	131
Figura 7.24 – Desvio padrão do ponto de coordenada (385,1032)	132
Figura 7.25 - Trajetória realizada pelo robô: ponto inicial indicado pelo triângulo.	133
Figura 7.26 - (a) Vista superior do ambiente, posição inicial do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô na posição inicial; (c) Vista superior do ambiente, segunda posição do robô; e (d) imagem omnidirecional adquirida pelo robô	134
Figura 7.27 - Primeiro mapa de distâncias	135

Figura 7.28 - (a) Vista superior do ambiente para a terceira posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	136
Figura 7.29 - (a) Vista superior do ambiente para a quarta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	137
Figura 7.30 - (a) Vista superior do ambiente para a quinta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	138
Figura 7.31 - (a) Vista superior do ambiente para a sexta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	139
Figura 7.32 - (a) Vista superior do ambiente para a sétima posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	140
Figura 7.33 - (a) Vista superior do ambiente para a oitava posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	141
Figura 7.34 - (a) Vista superior do ambiente para a nona posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	142
Figura 7.35 - (a) Vista superior do ambiente para a décima posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	143
Figura 7.36 - (a) Vista superior do ambiente para a décima primeira posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	144
Figura 7.37 - (a) Vista superior do ambiente para a décima segunda posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	145
Figura 7.38 - (a) Vista superior do ambiente para a décima terceira posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	146
Figura 7.39 - (a) Vista superior do ambiente para a décima quarta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	147
Figura 7.40 - (a) Vista superior do ambiente para a décima quinta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	148
Figura 7.41 - (a) Vista superior do ambiente para a décima sexta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	149
Figura 7.42 - (a) Vista superior do ambiente para a décima sétima posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.	150

Figura 7.43 - (a) Vista superior do ambiente para a décima oitava posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.....	151
Figura 7.44- Mapa global, $Dq_{máx} = 3^\circ$	152
Figura 7.45 - Desvio padrão do ponto (-286,-3368).....	153
Figura 7.46 - Desvio padrão do ponto (567,4025).....	153
Figura 7.47 - Desvio padrão do ponto (1115,2264).....	154
Figura 7.48 - Desvio padrão do ponto (2888,1340).....	154
Figura 7.49 - Desvio padrão do ponto (3631,22).....	155
Figura 7.50 - Mapa global, $Dq_{máx} = 10^\circ$	155
Figura 7.51 - Trajetória realizada pelo robô: ponto inicial indicado pelo triângulo.	157
Figura 7.52 – Primeira imagem adquirida pelo robô, posição inicial (0,0).	158
Figura 7.53 - Imagem adquirida pelo robô na segunda posição da trajetória.	159
Figura 7.54 – Imagem adquirida pelo robô na sexta posição da trajetória.	159
Figura 7.55 - Imagem adquirida pelo robô na oitava posição da trajetória.	160
Figura 7.56 - Imagem adquirida pelo robô na décima posição da trajetória.....	160
Figura 7.57 - Imagem adquirida pelo robô na décima terceira posição da trajetória.	161
Figura 7.58 - Imagem adquirida pelo robô na décima quarta posição da trajetória.	161
Figura 7.59 - Imagem adquirida pelo robô na décima quinta posição da trajetória.	162
Figura 7.60 - Imagem adquirida pelo robô na décima sétima posição da trajetória.	162
Figura 7.61 - Imagem adquirida pelo robô na vigésima primeira posição da trajetória.	163
Figura 7.62 - Imagem adquirida pelo robô na vigésima segunda posição da trajetória, última posição.	163
Figura 7.63 - Mapa global, $Dq_{máx} = 3^\circ$, número de atualizações igual a 3.	164
Figura 7.64 - Mapa global, $Dq_{máx} = 3^\circ$, número de atualizações igual a 7.	164
Figura 7.65 - Mapa global, $Dq_{máx} = 3^\circ$, número de atualizações igual a 9.	165
Figura 7.66 - Mapa global, $Dq_{máx} = 10^\circ$, número de atualizações igual a 4.	165
Figura 7.67 - Desvio padrão do ponto (-136,280)	166
Figura 7.68 - Desvio padrão do ponto (-92,120)	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos e características de navegação de robôs móveis	19
Tabela 2.2– Tabela resumida sobre classificação, tipos e metodologias utilizadas na literatura para a construção de mapas.	26
Tabela 6.1 - Restrições, condições e considerações implementadas no processo de construção de mapas do ambiente	109
Tabela 7.1 - Posições do robô ao longo da trajetória da Figura 7.2.....	114
Tabela 7.2 – Coordenadas dos pontos do mapa global.	129
Tabela 7.3 – Coordenadas e desvios padrão dos pontos do mapa global para $Dq_{máx}$ igual a 3°.	132
Tabela 7.4 - Posições do robô ao longo da trajetória da Figura 7.25.....	135
Tabela 7.5 – Coordenadas de alguns pontos do mapa global.	152
Tabela 7.6 - Coordenadas e desvios padrão dos pontos do mapa global para $Dq_{máx}$ igual a 3°.	156
Tabela 7.7 - Posições do robô ao longo da trajetória da Figura 7.51.....	158

LISTA DE ABREVIATURAS

PWM: Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso).

SLAM: Simultaneous Localization and Map Building. (Localização e Construção de Mapas Simultâneos).

USP: Universidade de São Paulo.

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADES
a	Ganho do espelho	
	Eixo maior da hipérbole	mm
b	Fator de escala do espelho	mm
	Eixo menor da hipérbole	mm
c	Excentricidade da hipérbole	mm
C	Ponto focal da hipérbole	
O	Centro da imagem	
d	Distância	mm
e	Epipolo	
f	Distância focal da lente	mm
F	Função do perfil do espelho (altura do espelho)	mm
F'	Derivada da função do perfil do espelho	
F	Ponto focal do espelho hiperbólico	
h	Altura	mm
I	Intensidade de brilho do pixel da imagem	
P	Ponto no espaço	
P	Ponto do mapa global	
p	Parâmetro da equação de um plano	
q	Parâmetro da equação de um plano	
s	Parâmetro da equação de um plano	
Q	Ponto do mapa local	
r	Distância radial ($\sqrt{x^2 + y^2}$)	mm
t	Cota radial do espelho	mm
u	Coordenada métrica horizontal da imagem	mm
v	Coordenada métrica vertical da imagem	mm
x	Eixo x do sistema de coordenadas cartesiano	

$\bar{x}$	Média da coordenada x de posição de ponto	mm
y	Eixo y do sistema de coordenadas cartesiano	
$\bar{y}$	Média da coordenada y de posição do ponto	mm
z	Eixo z do sistema de coordenadas cartesiano	

Vetores e Matrizes

A_2	Matriz utilizada no cálculo da curva epipolar	
B_2	Matriz utilizada no cálculo da curva epipolar	
E	Matriz essencial	
I	Imagem	
K	Matriz de parâmetros intrínsecos da câmera	
l	Vetor de coordenadas da curva epipolar	mm
n	Vetor normal ao plano	
M	Máscara do operador de gradiente de Roberts	
N	Matriz utilizada no cálculo da curva epipolar	
p	Vetor de coordenadas de ponto no espaço	mm
q	Vetor de coordenadas de ponto na imagem	pixel
Q	Matriz fundamental	
R	Matriz de rotação	
S	Matriz de translação anti-simétrica	
t	Vetor de translação	mm
u	Vetor de coordenadas métricas na imagem	mm
v	Vetor genérico	

Letras Gregas

a	Ângulo da direção normal ao espelho em relação à vertical	graus
	Fator de escala da imagem	pixel/mm
b	Parâmetro de espelho	
g	Ângulo de movimentação do robô	graus
D	Diferença, variação	

e	Tolerância de comparação para verificação de ponto pertencente a reta	pixel
f	Ângulo de elevação do raio incidente no espelho	graus
	Ângulo de rotação do robô	graus
l	Parâmetro da equação de uma reta no espaço	
q	Ângulo radial da câmera	graus
	Ângulo azimutal de pontos no espaço	graus
r	Posição radial de ponto na imagem omnidirecional	mm
r_0	Raio da parte central (fóvea) da câmera log-polar	mm
y	Ângulo de reflexão do raio incidente na imagem	graus

Subscritos

B	Binária
c	Sistema de coordenadas da câmera
e	Sistema de coordenadas do espelho
G	Sistema de coordenadas do mapa global
h	Hipérbole
i	Índice de ponto do mapa global
	Índice de posição de pixel na imagem
j	Índice de ponto do mapa local
	Índice de posição de pixel na imagem
L	Sistema de coordenadas do mapa local
m	Sistema de coordenadas do mundo
$máx$	Máximo
n	Numérica
P_i	Ponto do mapa global
Q_j	Ponto do mapa local
t	Teórica
u	Posição horizontal na imagem
v	Posição vertical na image m

x	Direção x do sistema de coordenadas cartesiano
y	Direção y do sistema de coordenadas cartesiano
z	Direção z do sistema de coordenadas cartesiano
0	Centro
1	Imagem 1
2	Imagem 2

Sobrescritos

G	Ponto descrito no sistema de referências do mapa global
L	Ponto descrito no sistema de referências do mapa local
T	Transposto

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Robôs móveis são programados para realizarem tarefas de maneira autônoma. A autonomia de um robô fica fortemente condicionada por sua capacidade de perceber o ambiente de navegação. Um robô deve ser capaz de interagir coerentemente com seu mundo, sendo capaz de recuperar descrições espaciais úteis, usando informação adquirida pelos sensores e utilizando eficientemente essas descrições com o objetivo de realizar uma tarefa específica. Uma tarefa que um robô móvel deve realizar autonomamente é a navegação dentro de um ambiente, sem colisões com obstáculos.

Uma outra tarefa que proporciona uma maior autonomia é a construção de mapas de ambiente. Um mapa é uma representação da estrutura do ambiente e pode ser utilizado para outras tarefas, inclusive navegação. Nas tarefas de exploração de ambientes o robô navega adquirindo informações para a construção de um mapa. O robô pode, ainda, baseando-se em um mapa existente, navegar resolvendo os problemas de localização, planejamento de trajetória e verificar se a posição final foi atingida. Tarefas de navegação local, como desvios a obstáculos, podem ser realizadas sem o recurso de mapas do ambiente, já para tarefas mais globais, como navegação, a utilização de algum tipo de descrição ou representação do espaço se torna necessária.

Naturalmente, o tipo de mapa deve ser adequado não só às tarefas de navegação que se pretendem realizar, mas também à natureza dos sensores utilizados. Sensores de ultra som, infravermelho e câmeras são os mais utilizados. Câmeras são sensores potencialmente úteis pois através de imagens obtêm-se uma grande quantidade de informações relevantes para a construção de mapas.

Nesse trabalho utiliza-se um sistema de visão não convencional, denominado sistema omnidirecional. Sistemas omnidirecionais podem ser obtidos por meio da conciliação de câmeras e espelhos, ambos alinhados verticalmente. Ao se utilizar um sensor omnidirecional formado por uma câmera e um espelho, adquire-se informação em 360° ao redor do robô. Dessa forma obtêm-se um sensor potencialmente útil para

aplicações na área de navegação e possibilita a construção de sistemas mais autônomos. O desenvolvimento de perfis de espelhos para visão omnidirecional é abordado no capítulo 4 dessa tese.

Nesse trabalho utiliza-se um espelho hiperbólico por esse possuir o centro único de projeção. Devido ao perfil do espelho, uma reta vertical do ambiente é projetada como uma linha radial no plano da imagem. Tal característica de projeção é utilizada no processo de visão estéreo, cujo princípio inicial é a extração de características do ambiente para a aquisição de distâncias aos objetos.

Nesse trabalho utiliza-se um par de imagens omnidirecionais para a formação do sistema estéreo. Com um sistema estéreo convencional adquire-se distâncias aos objetos presentes no campo visual das câmeras. Com um par de imagens omnidirecionais, obtêm-se um estéreo omnidirecional, ou seja, adquire-se distâncias de todos os objetos dispostos ao redor do robô. Nesse trabalho extraem-se as quinas dos objetos do par de imagens omnidirecionais para a obtenção das distâncias. As quinas dos objetos são pontos que fornecem subsídios relevantes para a construção do mapa do ambiente.

As etapas desenvolvidas para a obtenção de distâncias do robô aos objetos utilizando-se um sistema de visão estéreo omnidirecional são: (1) aquisição de duas imagens omnidirecionais obtidas em duas posições distintas do robô, separadas por uma translação; (2) correspondência das quinas extraídas no par de imagens omnidirecionais e (3) triangulação.

O processo de correspondência estéreo desenvolvido nesse trabalho é realizado diretamente nas imagens omnidirecionais, tornando desnecessário o processo de retificação das mesmas, o que torna o sistema mais rápido. O desenvolvimento das etapas do sistema de visão estéreo omnidirecional é descrito no capítulo 5 dessa tese.

As distâncias do robô às quinas dos objetos, obtidas com o sistema estéreo omnidirecional, são dispostas em um mapa plano, denominado de mapa de distâncias. Cada mapa de distâncias é denominado de mapa local, pois contém as

distâncias dos objetos para aquela posição do robô. Com a aquisição de novos mapas locais, adquiridos com a navegação do robô, constrói-se um mapa global.

O problema de construção de mapas de ambiente é composto por três processos, que são realizados para cada mapa local adquirido e são: (1) o alinhamento, ou registro, entre o mapa local e o mapa global; (2) a correspondência entre os pontos dos mapas e (3) a integração do mapa local no mapa global.

Nesse trabalho efetuou-se o alinhamento descrevendo-se as coordenadas dos pontos do mapa global em cada mapa local adquirido. Após a descrição dos pontos do mapa global no sistema de referências do mapa local é feita a correspondência. Na correspondência verifica-se, segundo o critério de mínimo ângulo, qual é o ponto do mapa global correspondente ao ponto do mapa local. Para os casos de múltiplas correspondências, ou seja, quando mais que um ponto do um mapa local corresponde ao mesmo ponto do mapa global, utiliza-se o critério de mínima distância entre os pontos. A integração consiste em incorporar novos pontos no mapa global e em atualizar a informação dos pontos já adquiridos.

A metodologia proposta e desenvolvida para a construção de mapas de ambiente é descrita no capítulo 6 dessa tese. Destaca-se a utilização de dois critérios para a correspondência de pontos entre mapas (mínimo ângulo e mínima distância) bem como a utilização de condições (ordenamento e unicidade) e restrição (consideração de pontos mais próximos ao robô) para a solução do problema.

Considera-se que o processo de atualização do mapa global é feito para cada mapa local adquirido, o que favorece a possível implementação de navegação de robôs móveis com a realização simultânea da localização do robô (navegação com SLAM).

A metodologia implementada nesse trabalho é utilizada para um robô holonômico, no entanto pode ser aplicada para um robô não-holonômico.

CAPÍTULO 2 - CONSTRUÇÃO DE MAPAS DE AMBIENTE E NAVEGAÇÃO DE ROBÔS MÓVEIS

Robôs móveis navegam em ambientes e realizam tarefas com certo grau de autonomia. Um simples exemplo de tarefa de navegação consiste em que o robô parta de uma posição inicial e atinja uma posição final. Tarefas de robôs autônomos consistem em planejamento de trajetória, auto-localização, rastreamento visual de marcos do ambiente, detecção e desvio de obstáculos, construção de mapas do ambiente, dentre outras.

Os mapas do ambiente são construídos para serem utilizados em posteriores tarefas de navegação, fornecendo ao robô subsídios para o reconhecimento do ambiente de navegação, planejamento de trajetória, a auto-localização e a realização de demais tarefas. Em um trabalho de cooperação, vários robôs podem adquirir informações em conjunto, a fim de se construir um mapa do ambiente.

Para a construção de um mapa, pode-se classificar um ambiente segundo a sua estrutura, podendo ser estruturado ou não estruturado. DESOUZA e KAK (2002) propõem que um ambiente estruturado contenha alguma regularidade na informação, que pode ser extraída para fornecer subsídios para a navegação. Um ambiente não estruturado não contém nenhuma regularidade na informação que possa representá-lo.

A definição de ambiente estruturado ou não estruturado é algo ainda não muito explícito na literatura, mas, essencialmente, em um ambiente estruturado existem restrições geométricas que podem ser utilizadas para a construção de modelos, tal como retas e planos. No caso desestruturado, não existem restrições geométricas que possam ser parametrizadas, ou utilizadas, para representar um mapa. Assim, no caso desestruturado não é possível construir mapas usando retas, planos ou outras primitivas geométricas. Neste caso, ficam limitadas as representações mais genéricas como voxels (um pixel volumétrico que pode estar ou não ocupado) ou imagens (em que não são feitas hipóteses sobre o conteúdo geométrico das mesmas).

No caso não estruturado, além de não existirem hipóteses auxiliares, que simplifiquem a construção dos mapas, o movimento do robô é mais geral, isto é, em vez de andar sobre um pavimento plano, pode andar sobre terreno irregular, por isso é mais difícil de ser tratado.

Uma outra classificação do tipo de ambiente é se este é externo ou interno, podendo ser estruturado ou não. Como exemplo de navegação em ambientes externos estruturados, pode-se citar a navegação de carros autônomos que navegam em estradas, cuja estrutura pode ser caracterizada por um plano de navegação com faixas que delimitam a estrada (GIACHETTI, CAMPANI e TORRE, 1998). Como exemplo de navegação em ambientes externos desestruturados, seguem-se os trabalhos de navegação em planetas (como por exemplo, a exploração de Marte por robôs móveis) (GOLDBERG, MAIMONE e MATTHIES, 2002) ou os trabalhos de robôs submarinos (VAN DER ZWAAN e SANTOS-VICTOR, 2001), onde nenhuma estrutura pode ser extraída.

Ambientes internos, como salas, corredores e laboratórios, podem ser considerados como estruturados. Na sua maioria contêm retas (dentre elas verticais e horizontais), e planos, os quais podem ser coletados para a criação de um modelo representativo do ambiente. Assim, no caso de ambientes internos, a navegação pode ser auxiliada por um mapa que descreve a estrutura ou a posição dos objetos no ambiente.

Os mapas de ambientes internos podem ser construídos em uma etapa de exploração anterior à etapa de navegação (YAMAUCHI, 1997), ou podem ser construídos simultaneamente ao problema de navegação (REKLEITIS e DUJMOVIC, 1999). Têm-se também casos onde se realizam navegações sem a construção ou utilização de mapas do ambiente (GOLDBERG, MAIMONE e MATTHIES, 2002) e (VAN DER ZWAAN e SANTOS-VICTOR, 2001).

Tipicamente existem duas abordagens para a representação de mapas do ambiente. São os mapas geométricos ou topológicos. Mapas geométricos contêm informação da geometria do ambiente, da posição dos objetos e distâncias entre esses. Como exemplo, citam-se as grades de ocupação, conexão de polígonos e gráfico de

Voronoi. Os mapas topológicos não possuem qualquer informação sobre a geometria do ambiente, eles são representados por elos conectados a nós. Nos nós o robô pode tomar certas ações, como virar à esquerda ou à direita, e reconhecer marcos para se localizar no ambiente (THRUN, 1997) e (THRUN, 2002). O reconhecimento dos marcos visuais dá ao robô uma localização qualitativa no ambiente, obtendo sua posição em termos do quanto está mais próximo ou mais distante do alvo. Na navegação com mapas geométricos a localização é quantitativa, sabendo o robô qual sua exata posição no ambiente.

As grades de ocupação, amplamente utilizadas em tarefas de navegação, consistem em uma divisão do ambiente em células. À cada célula da grade é atribuído um valor probabilístico que representa o estado de ocupação da célula. Na primeira leitura do sensor os valores possíveis de estados de ocupação podem ter uma probabilidade nula (célula livre), de valor unitário (célula ocupada), ou com valor de probabilidade intermediária (célula desconhecida). No decorrer da navegação, novas leituras são efetuadas e os estados das células são atualizados (ELFES, 1989).

Alguns trabalhos utilizam uma seqüência de imagens como mapa do ambiente, pois uma seqüência de imagens pode determinar uma rota de navegação. A seqüência de imagens é adquirida em uma etapa de aprendizagem, na qual o robô é movido segundo uma trajetória pré-determinada e segundo espaçamentos constantes para a aquisição das imagens, que são gravadas. A seqüência de imagens é utilizada no processo de localização do robô, quando esse percorre a rota. A localização é efetuada através da comparação entre as imagens adquiridas durante a navegação, com as imagens adquiridas durante a aprendizagem, sendo obtida com o par que tem a máxima comparação (MATSUMOTO et al., 1999) e (MATSUMOTO et al., 2000).

Uma exploração é realizada com a finalidade de construir um mapa do ambiente. A questão central desse tópico de navegação de robôs móveis é saber como o robô pode explorar o ambiente construindo um modelo do mesmo, sendo o mais preciso possível. Em uma exploração o robô pode não ter, precisamente, uma posição final a atingir. Nesse caso, a exploração é finalizada quando todas as informações relevantes

para a construção do mapa foram obtidas, ou seja, quando o espaço de navegação desejado foi explorado.

YAMAUCHI (1997) desenvolveu um método de exploração de ambientes em que a partir dos dados adquiridos de sensores laser e ultra-som, obtém-se um mapa de grades de ocupação. As células do mapa de grades que têm probabilidade de ocupação de valor desconhecido ou livre formam uma região denominada fronteira. O método utilizado na exploração consiste em fazer o robô visitar as regiões de fronteiras e, assim, atualizar as células com valor desconhecido. A exploração termina quando todas as fronteiras foram visitadas.

Exploração e navegação de robôs também podem ser baseadas em marcos do ambiente. As considerações para essas metodologias consistem em utilizar um sensor, geralmente visão, para o reconhecimento desses marcos no ambiente. Ao explorar o ambiente, o robô busca os marcos e constrói o mapa (REKLEITIS e DUJMOVIC, 1999).

Explorando os marcos naturais do ambiente dispostos em um mapa de grades de ocupação, um método de exploração é proposto por TAYLOR e KRIEGMAN (1993), no qual o robô localiza os marcos do ambiente e cria mapas locais. Nesse trabalho, um mapa local é o modelo construído de uma parte do ambiente, um mapa global é a representação do ambiente todo. O robô possui uma lista de todos os marcos que precisa visitar e quando o robô se localiza no mapa local, calcula a intersecção com outro mapa local, criando uma conexão entre dois lugares e construindo um gráfico de lugares, que representa a estrutura do ambiente.

Para se construir um mapa geométrico necessita-se da interpretação da informação adquirida pelo sensor. Através dessa informação, estima-se a localização de características geométricas em um sistema de referência global, construindo dessa forma um mapa do ambiente. A tarefa de localização do robô é utilizar essa estimativa de localização das características contidas no mapa para determinar a posição do robô. LEONARD e DURRANT-WHYTE (1991) afirmam que enquanto a localização é um processo “top-down” de corresponder observações com previsões

de um modelo geométrico, a construção de mapas requer um processo mais difícil “bottom-up” de gerar explicações para informações geradas por sensores.

O mapa utilizado para a navegação, os sensores utilizados e as tarefas implementadas, são aspectos importantes para a obtenção de maior autonomia na navegação de robôs móveis. Essa maior autonomia também pode ser obtida construindo robôs de acordo com alguma arquitetura específica.

2.1 - Navegação reativa, planejada e híbrida

Robôs móveis são construídos segundo diferentes arquiteturas. Para o robô navegar em ambientes, detectar e desviar de obstáculos, localizar-se e planejar sua trajetória, um certo grau de autonomia é requerido. Também uma certa autonomia é exigida quando o robô deve reagir com rapidez às mudanças dinâmicas do ambiente. As arquiteturas de programação de robôs são também fundamentais para a realização de um sistema mais autônomo.

Na navegação de robôs baseada na arquitetura deliberativa, ou clássica, todas as tarefas requeridas para a navegação são planejadas. De acordo com essa arquitetura, algoritmos de planejamento de trajetória, auto localização e detecção de obstáculos, são implementados para a realização dessas tarefas. Na arquitetura reativa (BROOKS, 1986), o robô navega com base em comportamentos, que são atitudes do robô face à dinâmica do ambiente. Com esse tipo de arquitetura um robô navega sem que seja sabido qual é a possível trajetória do robô a ser realizada durante a navegação, pois essa depende de qual(is) comportamento(s) irá(ao) atuar. Atualmente arquiteturas híbridas são implementadas em algumas aplicações, para fornecer uma maior autonomia na navegação, essas incluem tanto comportamentos como planejamentos.

A navegação reativa é considerada uma navegação de baixo nível, onde o robô não tem nenhum conhecimento sobre o ambiente (não contém um mapa), nem informação sobre a posição final a atingir. A navegação baseada em mapas é

considerada uma navegação de mais alto nível, onde é elaborado o planejamento da trajetória no percurso de navegação.

MINGUEZ et al. (2001) implementam uma arquitetura híbrida combinando as duas arquiteturas de navegação. Os comandos de desvios de obstáculos são provenientes do comportamento reativo para uma navegação livre de colisões. No aspecto mais global, o robô planeja a trajetória e constrói um mapa de grades de ocupação com as informações provenientes de um sensor laser.

SANTOS, CASTRO e RIBEIRO (1998) desenvolvem uma arquitetura composta de procedimentos reflexivo, reativo e funcional, propondo um método que faz uma clara distinção entre navegação local e global. O modo reflexivo serve para o robô se esquivar de becos sem saída e para a detecção de colisão iminente. No modo reativo, três módulos de navegação são implementados: teleoperação, navegação local e seguimento de trajetória. O modo funcional avalia a trajetória para o próximo passo e seleciona a estratégia de navegação local a ser ativada; também calcula, em tempo real, planejamentos de movimentos que influenciam o comportamento do modo reativo. Os sensores utilizados são: um sensor de varredura laser, ultra-som e uma câmera.

Estratégias de exploração, baseadas na arquitetura reativa, também são utilizadas onde níveis de exploração e construção de mapas são implementados. Em um nível sensorial, o robô adquire informação do ambiente; em um nível topológico, o robô cria o mapa global com a identificação de lugares e de seguimentos de trajetória; e, em um nível geométrico, o robô calcula as informações métricas dos lugares com base nos dados do mapa topológico construído. Esse método proposto é utilizado para exploração em corredores (KUIPERS e BYUN, 1991).

2.2 - Navegação com informação visual

Inúmeros sensores podem ser utilizados para a aquisição de informação para navegação. Dentre esses, destacam-se os de ultra-som, lasers e visão computacional. Utilizando visão computacional pode-se empregar diferentes metodologias, tais

como: fluxo óptico, extração de características, reconhecimento de marcos no ambiente etc, para extração de informações relevantes para a navegação.

A informação de fluxo óptico, que representa a variação de intensidade de brilho da imagem pode ser utilizada para navegação de um carro autônomo em estradas (GIACHETTI, CAMPANI e TORRE, 1998) e também para robôs em ambientes internos.

SANTOS-VICTOR e SANDINI (1997), utilizando a informação de fluxo óptico, implementam uma navegação qualitativa onde o robô realiza a detecção de obstáculos e é capaz de estacionar em uma dada posição, com controle de posição e orientação. O robô navega centralizado em corredores, acelerando, quando a variação do fluxo óptico é pequena (o que significa que as paredes estão bem afastadas), ou desacelerando, quando a variação do fluxo óptico é grande (o que significa que as paredes estão próximas).

2.2.1 - Navegação com visão estéreo

Uma técnica muito empregada em trabalhos de navegação de robôs é a de visão estéreo. A partir da informação de distâncias do robô aos objetos presentes no ambiente, mapas são construídos, trajetórias são planejadas e tarefas de navegação, como a detecção de obstáculos, são executadas.

Diferentes configurações do sistema estéreo podem ser utilizadas, como por exemplo: um sistema estéreo divergente, obtido com um par de câmeras dispostas lateralmente (SANTOS-VICTOR et al., 1995) e (SANTOS-VICTOR e SANDINI, 1997); um sistema estéreo trinocular, obtido com três câmeras (LITTLE e MURRAY, 1998); (MURRAY e JENNINGS, 1997) e (MURRAY e LITTLE, 1998); um sistema estéreo convencional, obtido com as câmeras dispostas horizontalmente (KUMANO, OHYA e YUTA, 2000); sistemas formados por câmeras e espelhos, podendo ser dispostos verticalmente (KOYASU, MIURA e SHIRAI, 2002) ou horizontalmente (SVOBODA, PAJDLA e HLAVÁČ, 1998); e outras.

Dispondo duas câmeras lateralmente de modo a fazer uma analogia com a disposição lateral dos olhos dos insetos, SANTOS-VICTOR et al. (1995) e SANTOS-VICTOR e SANDINI (1997) constrói um sistema estéreo divergente. Acredita-se que a disposição dos olhos dos insetos favorece os mecanismos de navegação, que se baseiam na variação de brilho da cena (fluxo óptico) e não na informação de profundidade (visão estéreo), como no caso do ser humano. Nesse caso, o controle de posição do robô é baseado na comparação das velocidades das imagens das câmeras da esquerda e da direita. Se o robô está no centro do corredor, a diferença entre a velocidade das imagens, vista pelo par de câmeras, é aproximadamente zero. Mantendo a diferença de fluxo óptico do par de câmeras nula e utilizando um mecanismo de sustentação, que atua nos casos de inexistência de fluxo óptico, o robô navega centralizado em corredores.

Utilizando um sistema trinocular estéreo o planejamento de trajetória, a construção de mapas (MURRAY e JENNINGS, 1997), a navegação (MURRAY e LITTLE, 1998) e a auto localização do robô (LITTLE e MURRAY, 1998) são implementadas, obtendo uma navegação robusta. Com o sistema formado por três câmeras, as ambigüidades decorrentes do processo de correspondência são eliminadas, considerando a melhor correspondência obtida entre os dois pares de câmeras (topo - base e esquerda - direita). Com essa disposição, obtém-se uma melhoria nos resultados de correspondência, visto que o segundo par de câmeras serve para eliminar as ambigüidades do primeiro par estéreo. Para eliminar alguns ruídos, ainda restantes do processo de correspondência, utilizam-se de técnicas de erosões morfológicas e segmentação de superfícies, aplicadas nas regiões que contém disparidade constante.

No planejamento de trajetória, podem ser aplicadas técnicas de campos de potencial no mapa de grade de ocupação. Segundo essa técnica, as células com valores desconhecidos exercem forças repulsivas e as células vazias, que representam posições livres, exercem forças atrativas para a navegação do robô (MURRAY e JENNINGS, 1997) e (MURRAY e LITTLE, 1998). Através do sistema estéreo trinocular calcula-se as distâncias do robô aos objetos e obstáculos e essas distâncias

são convertidas em um mapa de grade de ocupação. A auto localização do robô é baseada em marcos. Detectando as quinas dos objetos e, considerando quinas que pertencem a planos cujas disparidades são constantes, calcula-se as distâncias a esses planos. Seleccionando somente essas quinas, a auto localização é implementada, tornando a navegação mais robusta (LITTLE e MURRAY, 1998).

Utilizando visão estéreo convencional (formado por duas câmeras paralelas) uma proposta para navegação com detecção de obstáculos é implementada. Conhecendo a trajetória específica de navegação e utilizando a informação da presença de obstáculos, a navegação é realizada. O método se baseia em supor que todos os objetos presentes na imagem estão no plano do chão. A metodologia proposta resolve os problemas oriundos da projeção dos objetos no plano do chão. O problema da reflexão da luz é solucionado através da detecção de bordas, que não resulta em bordas bem contornadas como a dos objetos. O problema de pontos de alto contraste do chão que não representam obstáculos é solucionado pelo diferente cálculo utilizado para a correspondência de pontos, que é feito pela comparação de cada linha dos pares de imagens (KUMANO, OHYA e YUTA, 2000).

Com um sistema estéreo composto por duas câmeras e dois espelhos hiperbólicos alinhados verticalmente, obstáculos móveis são detectados em tempo real. As imagens omnidirecionais adquiridas são convertidas em imagens panorâmicas nas quais as linhas epipolares se tornam verticais e paralelas. Examinando-se cada coluna da imagem panorâmica de disparidade e realizando a correspondência com as linhas verticais adjacentes, constrói-se um gráfico da disparidade na imagem panorâmica. A partir da disparidade obtém-se um mapa bidimensional onde os pontos de menor disparidade são os mais próximos. No mapa de obstáculos estáticos, detecta-se a maior disparidade (ou a menor distância) em cada direção, estimando-se o espaço livre de navegação. A detecção de obstáculos móveis é realizada através da verificação de pontos de objetos que surgem no espaço livre utilizando-se um filtro de Kalman (KOYASU, MIURA e SHIRAI, 2002).

ISHIGURO, YAMAMOTO e TSUJI (1990) utilizam filtro de Kalman para estimar a posição do objeto em um mapa global. No seu trabalho imagens panorâmicas são

adquiridas por um sistema de visão estéreo omnidirecional composto por uma câmera giratória. A correspondência entre duas imagens panorâmicas é encontrada através de programação dinâmica. Com o sistema estéreo omnidirecional disposto em distintas posições determina-se as distâncias dos objetos presentes no meio de navegação. As distâncias adquiridas pelo par de imagens omnidirecionais compõem um mapa local de distâncias, os quais são integrados em um mapa global. Como o sistema é formado por uma câmera giratória a integração entre os mapas é realizada utilizando somente a rotação efetuada pela câmera, já que a translação é nula.

2.2.2 - Navegação com sistemas catadióptricos

Inúmeros trabalhos de navegação de robôs móveis utilizam sistemas compostos por câmeras e espelhos para obterem um campo visual abrangente (DELAHOUCHE et al., 1997); (GASPAR, WINTERS e SANTOS-VICTOR, 2000); (MATSUMOTO et al., 1999); (WINTERS et al., 2001); (YAGI, KAWATO e TSUJI, 1994); (YAGI, NISHIZAWA e YACHIDA, 1995); (YAMAZAWA, YAGI e YACHIDA, 1995), etc.

Utilizando um sistema composto por uma só câmera e um espelho hiperbólico, além de também utilizar a informação de fluxo óptico, MATSUMOTO et al. (1999) implementam uma navegação de robôs em corredores. Com uma seqüência de imagens adquiridas durante um processo de exploração de ambientes, a navegação pode ser feita indicando-se as posições inicial e final dessa seqüência de imagens. Essa seqüência de imagens constitui um mapa topológico do ambiente e representa os percursos para a navegação de robôs em corredores. O robô resolve o problema de localização através da correspondência da imagem adquirida no decorrer da navegação com as imagens do mapa.

MATSUMOTO et al. (2000), através da retificação da seqüência de imagens omnidirecionais adquiridas, eliminam as distorções causadas pela forma do espelho. Essas novas imagens são utilizadas no processo de correspondência. Através da disparidade das imagens estéreo, o robô se localiza nos corredores e, através da

detecção do fluxo óptico calculado sobre as imagens omnidirecionais, o robô navega verificando as distâncias aos objetos.

GASPAR e SANTOS-VICTOR (1999) utilizam um sistema catadióptrico para realizar uma navegação de um robô móvel, baseado no rastreamento de marcos visuais. Os marcos são dispostos no plano de navegação de maneira a formar uma trajetória para a navegação do robô. As imagens são adquiridas com um espelho esférico.

WINTERS e SANTOS-VICTOR (1999a e 1999b) e WINTERS et al. (2000) utilizam um espelho esférico para realizar uma navegação de robôs em corredores. Duas modalidades de navegação são implementadas, topológica e servo visual, de forma a realizar o controle global e local da posição do robô. A navegação topológica consiste em primeiramente fazer o robô adquirir imagens do corredor a intervalos fixos de distância. Estas imagens são guardadas de tal forma a constituir um mapa utilizando um método de compressão de imagens. No decorrer da navegação o robô utiliza estas imagens adquiridas previamente para a localização global. Obtém-se uma imagem panorâmica do tipo *'bird's eye views'*, que consiste em uma vista ortográfica do plano em que o robô navega. Nessas imagens, as linhas retas que delimitam os dois lados de um corredor aparecem como retas paralelas e são utilizadas para o controle servo visual, ou seja, para orientação local do robô.

GASPAR, WINTERS e SANTOS-VICTOR (2000), utilizando o método das aparências sobre imagens de um mapa topológico do ambiente, estimam a posição do robô ao longo de um corredor. O método das aparências consiste em fornecer uma estimativa qualitativa da posição do robô baseando-se na comparação da imagem adquirida no decorrer da navegação com uma imagem do mapa topológico. O sistema omnidirecional utilizado é formado por uma câmera e um espelho esférico.

VASSALLO, SCHNEEBELI e SANTOS-VICTOR (1998) consideram que as retas paralelas, que representam as bordas das laterais do corredor, interceptam-se no ponto de fuga e um controle servo visual é utilizado para a centralização do robô no corredor. Um mapa do ambiente é previamente adquirido e, através do método das

aparências, é estimada a posição do robô ao longo da trajetória. Em trabalho posterior o robô é equipado com uma câmera e um espelho esférico e a navegação, baseada em resposta visual, permite a realização de tarefas, tais como, percorrer uma trajetória em corredores de ambientes internos e tomar decisões de virar à direita ou esquerda no final do corredor.

WINTERS et al. (2001) mostram como construir uma representação tri-dimensional do ambiente utilizando imagens omnidirecionais para uma navegação autônoma. Sistemas catadióptricos constituídos por espelhos esféricos não podem ser representados por um modelo de projeção central, contudo, o sistema é modelado por um mapeamento em uma esfera seguido de uma projeção em um plano (GEYER e DANIILIDIS, 2000), produzindo um modelo com centro único de projeção. É utilizado um método estatístico (amostragem de dados) para a extração de dados das imagens omnidirecionais, as quais são adquiridas à priori.

2.3 - Navegação com detecção de obstáculos

Uma tarefa importante para uma navegação autônoma é a implementação de detecção de obstáculos. Alguns trabalhos implementam desvios da trajetória para o robô não colidir com obstáculos enquanto navega (KIM et al., 1996) e (OHYA, KOSAKA e KAK, 1997). Utilizando dados provenientes de um sensor de ultra-som BORESTEIN, EVERETT E FENG (1996) atualizam um mapa de grades de ocupação. Além disso, através do método de campos de potenciais detecta obstáculos do ambiente.

KIM et al. (1996), também utilizando um sensor de ultra-som, propõem um método para planejamento de trajetória, para uma navegação livre de colisões. O planejamento de trajetória é realizado em um mapa de grades de ocupação, no qual os obstáculos estão dispostos em um arranjo polar. Este mapa é atualizado conforme novas leituras sensoriais são adquiridas. Um histograma angular de distâncias do robô ao centro das células ocupadas é construído e esse espaço é dividido em regiões ocupadas. O algoritmo de planejamento de trajetória atua fazendo o robô passar pelo ponto médio das regiões ocupadas.

Muitos trabalhos utilizam ultra-som ou laser para a detecção de obstáculos móveis, e visão computacional para a detecção de obstáculos estáticos (GROSS, 2001) e (OHYA, KOSAKA e KAK, 1997). Utilizando-se visão computacional, obstáculos podem ser interpretados de diferentes maneiras: SANTOS-VICTOR (1994) detecta obstáculos pelo valor de fluxo óptico na imagem que for diferente do valor do fluxo óptico do chão. Trabalhos que utilizam espelhos (cônicos ou hiperbólicos), realizam a detecção de obstáculos através da busca das retas radiais na imagem omnidirecional, visto que são a projeção das retas verticais do ambiente por esses espelhos (DELAHOCHÉ et al., 1997); (OHYA, KOSAKA e KAK, 1997); (YAGI, KAWATO e TSUJI, 1994); (YAGI, NISHIZAWA e YACHIDA, 1995) e (YAMAZAWA, YAGI e YACHIDA, 1995). Para BADAL et al. (1994), obstáculos são interpretados pela reta vertical que tiver uma altura mínima acima do nível do chão, detectados por um sistema estéreo convencional.

GROSS (2001) realiza uma navegação de robôs de serviço com sensores de ultra-som e visão. Um robô navega em um ambiente totalmente estruturado composto por grandes corredores com passagens igualmente espaçadas entre eles. O sensor visual é utilizado para distinguir a posição e para a auto localização do robô. Baseado na informação de fluxo óptico, o robô realiza uma navegação com desvios dos obstáculos. A partir dos dados de ultra-som, constrói-se um mapa de grades de ocupação e propõe-se um novo método para a correção de odometria baseado em visão.

BADAL et al. (1994), utilizam um método passivo para navegação em tempo real onde o robô detecta e desvia de obstáculos. Através de um sistema estéreo é calculada a disparidade do par de imagens e todos os pontos acima do nível do chão são extraídos. A partir da projeção destes pontos é construído um mapa instantâneo de obstáculos. Este mapa é projetado em um vetor unidimensional, que representa movimentos para as direções de desvio dos obstáculos.

YAGI, KAWATO e TSUJI (1994) e YAGI, NISHIZAWA e YACHIDA (1995) utilizam a informação azimutal de uma sequência de imagens para navegação livre de colisões com obstáculos. Através da projeção cônica das retas verticais do

ambiente no plano da imagem, o ângulo azimutal é utilizado para a localização dos obstáculos. O ângulo azimutal serve para o robô estimar sua posição e orientação na imagem omnidirecional, estimar o caminho livre e navegar evitando colisões no ambiente.

YAMAZAWA, YAGI e YACHIDA (1995) realizam uma navegação com detecção de obstáculos através da procura das linhas radiais da imagem omnidirecional. É utilizado um sistema catadióptrico com espelho hiperbólico. Assim, o robô detecta as linhas radiais da imagem e re-projeta no plano horizontal do chão. Determina-se a posição do ponto no ambiente. Esta posição é estimada usando um método de correlação em uma sequência de imagens perspectivas e, a partir da posição, calcula o movimento do robô.

DELAHOCHÉ et al. (1997) utilizam a informação de odometria e de visão omnidirecional para realizar uma navegação em ambientes internos e estruturados. Um espelho cônico é utilizado. As linhas verticais do ambiente servem de característica (marco) para a auto localização do robô, que, durante o seguimento da trajetória, compara a imagem das retas adquiridas com as do mapa do ambiente. O filtro de Kalman estendido é utilizado com a fusão dos dados provenientes do sensor de odometria e de visão para estimar a posição do robô. O algoritmo de navegação contém quatro fases: (1) predição, (2) observação, (3) correspondência, e (4) estimativa de posição. A fase de predição é proveniente da odometria; a fase de observação coleta a informação de visão; a fase de correspondência utiliza os dados provenientes dos dois sensores, e uma última fase, que estima a melhor configuração de posição do robô, frente aos dados observados.

Também utilizando o conhecimento das retas radiais da imagem omnidirecional, obtida com uma única câmera, detecta-se obstáculos através de uma diferença de imagens, a adquirida no instante da navegação, com a do mapa previamente adquirido. Este método de detecção, realizado para navegação em corredores, consiste em dividir a imagem retificada em cinco regiões e encontrar a região de livre navegação. O sensor de ultra-som é utilizado para a detecção de obstáculos

móveis e com visão detecta-se obstáculos dinâmicos (OHYA, KOSAKA e KAK, 1997).

Resumidamente, uma maior autonomia pode ser fornecida ao robô através de um conjunto de fatores, que estão relacionados com a arquitetura implementada, com o sensor utilizado, com a tarefa realizada, etc. A Tabela 2.1 mostra esses fatores, de forma resumida.

Tabela 2.1 - Tipos e características de navegação de robôs móveis

NAVEGAÇÃO DE ROBÔS MÓVEIS			
	TIPO	CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES/ REF.
Sensores	Ultra som	Utilizado para detecção de obstáculos estáticos ou móveis. Problema da reflexão angular.	Detecção de obstáculos móveis, determinação de distância. (BORESTEIN, EVERETT E FENG, 1996); (KIM et al., 1996) e (YAMAUCHI, 1997).
	Única Câmera	Grande quantidade de informação. Campo visual limitado.	Rastreamento visual, detecção de obstáculos estáticos. (GROSS, 2001) e (OHYA, KOSAKA e KAK, 1997).
	Visão Omnidirecional	Campo visual abrangente. Inúmeras formas de espelho disponíveis. Imagem distorcida.	Obtenção de imagens panorâmicas. Planejamento de trajetórias, auto-localização, construção de mapas de ambiente. (DELAHOCHÉ et al., 1997); (GASPAR e SANTOS-VICTOR, 1999) e (SVOBODA, PAJDLA e HLAVÁČ, 1998).
Arquitetura	Clássica/Deliberativa	Mais lenta. Baseada em planejamentos.	(MURRAY e JENNINGS, 1997); (MURRAY e LITTLE, 1998).
	Reativa	Mais rápida. Baseada em comportamentos.	(BROOKS, 1986).
	Híbrida	Composição de arquiteturas para diferentes funcionalidades.	(KUIPERS e BYUN, 1991); (MINGUEZ et al., 2001) e (SANTOS, CASTRO e RIBEIRO, 1998).
Mapas do Ambiente	Sem Mapas	Robô não adquire conhecimento sobre o ambiente.	(KUMANO, OHYA e YUTA, 2000); (SANTOS-VICTOR, 1994) e (VASSALLO, SCHNEEBELI e SANTOS-VICTOR, 1998).
	Com Mapas	Utilizados para a auto localização do robô, para a detecção de obstáculos, para o planejamento de trajetória, para o rastreamento de marcos do ambiente, dentre outras.	(GASPAR, WINTERS e SANTOS-VICTOR, 2000); (LITTLE e MURRAY, 1998); (MATSUMOTO et al., 1999); (MURRAY e JENNINGS, 1997) e (MURRAY e LITTLE, 1998).
	Topológicos	Qualitativos	(THRUN, 1997, e 2002).
	Geométricos	Quantitativos	(ELFES, 1989).

2.4 - Construção de Mapas do Ambiente

Hoje em dia inúmeros trabalhos de navegação de robôs móveis investigam as possíveis metodologias utilizadas para a construção de mapas, bem como as possíveis formas de representação do ambiente, com o intuito de obter um mapa denso em informação, o qual seja capaz de proporcionar uma maior autonomia na navegação.

Um modelo do ambiente é uma representação, geométrica ou topológica, que contém informação para relevantes tarefas de navegação de robôs autônomos. Por meio de sensores ativos (lasers) ou passivos (câmeras) pode-se adquirir informação de distâncias em ambientes. Um mapa de distâncias é uma representação da geometria do ambiente. Utilizando-se o mapa de distâncias pode-se implementar tarefas de navegação de robôs autônomos, tais como: auto localização, verificação de espaço livre de navegação, planejamento de trajetória e detecção de objetos para navegação livre de colisão, dentre outras.

A construção de mapas é realizada pela aquisição de informação do ambiente, como distâncias. Com o decorrer da navegação, o robô adquire mais informações e faz a correspondência entre as informações adquiridas com o robô nas diferentes posições. Por último, essas informações são integradas e constrói-se um mapa global.

Segundo MANESSIS (2003), a construção de mapas para navegação, ou a reconstrução de modelos tri-dimensionais, consiste de três etapas:

1. alinhamento: processo que visa obter a transformação de duas distintas medições (de um conjunto 2D ou de superfícies 3D) num único sistema de coordenadas através da informação que relaciona as duas medições.
2. correspondência: processo realizado após o alinhamento de pontos, consiste em corresponder os pontos das duas medições.
3. integração: processo que incorpora os pontos correspondidos no único sistema de coordenadas para a construção do modelo final.

Para a solução da etapa de correspondência, MANESSIS (2003) divide o problema em duas categorias:

- Tendo-se um sistema mecânico precisamente calibrado, utiliza-se a transformação rígida conhecida que relaciona os dois conjuntos de informações, ou,
- Determina-se a transformação rígida que relaciona os dois conjuntos distintos de dados.

2.4.1 - Metodologias para Construção de Mapas

Conforme a Figura 2.1, vê-se que o processo de alinhamento consiste em determinar qual é a transformação que levou um conjunto de pontos P para um conjunto de pontos Q.

Figura 2.1 – Conjuntos de pontos P e Q.

O conhecimento dessa transformação alinha os dois conjuntos de dados permitindo a descrição dos pontos em um único sistema de coordenadas, conforme a Figura 2.2. Com as informações descritas no mesmo sistema de coordenadas utiliza-se algum critério para corresponder o conjunto de pontos de P ao conjunto de Q.

Figura 2.2 – Alinhamento de pontos P e Q.

A maioria dos métodos de correspondência se baseiam no algoritmo ICP (Iterative Closest Point), que utiliza o critério da mínima distância entre os pontos. O ICP calcula iterativamente a transformação rígida e a correspondência entre os pontos, convergindo para a solução da correspondência que minimiza a somatória das distâncias ao quadrado entre os pontos de dois conjuntos de dados.

O algoritmo ICP original foi desenvolvido por BESL e MACKAY (1992) e consiste de quatro etapas:

- 1) pesquisa do ponto mais próximo: calcular para ponto q de Q o ponto p mais próximo em P, utilizando a distância euclidiana;
- 2) calcular o alinhamento: calcular a transformação rígida que minimiza a soma dos quadrados das distâncias entre os pares de pontos próximos (q,p);

$$E = \sum_i^{N_p} \|Tq_i - p_i\|^2$$

- 3) aplicar a transformação: aplicar a transformação rígida a todos os pontos da primeira estrutura de pontos, o conjunto Q;
- 4) iterar: repetir os passos 1 a 3 até convergir.

A solução de correspondência pelo critério da mínima distância entre os dois conjuntos de dados é esboçada na Figura 2.3.

Figura 2.3– Correspondência realizada através do critério da mínima distância entre o par de pontos.

Inicialmente é estimada a matriz de rotação igual a matriz identidade e a translação igual a zero. Por esta estimativa inicial ser, por vezes, muito grosseira, a correspondência de pontos pode não atingir bons resultados. Em outras palavras, o ICP requer uma boa estimativa inicial para convergir para bons resultados.

Em cada iteração o algoritmo ICP introduz falsos alinhamentos de pares de pontos, pois só utiliza a consideração de mínima distância para achar o ponto correspondente. Com base nisso, inúmeras alterações foram propostas para uma melhor procura de pontos correspondentes, tais como utilizando a informação de cor da imagem, assinatura e a seleção de características invariantes para serem correspondidas. Todas as alterações propostas visam obter uma correspondência mais refinada (RODRIGUES e LIU, 2002).

Muitos métodos têm sido propostos para a correspondência entre pontos, tais como: métodos iterativos, histograma geométrico e outros. RODRIGUES e LIU (2002) desenvolvem um novo algoritmo para a correspondência baseado no histograma de erro de correspondência relativo.

Uma versão robusta do ICP é descrita nos trabalhos de CHETVERIKOV et al. (2002a) e CHETVERIKOV e STEPANOV (2002b) na qual o Trimmed ICP (TrICP) utiliza a informação dos mínimos quadrados para cada iteração do ICP. O alinhamento é realizado considerando um fator de sobreposição entre o conjunto de dados, onde o ICP original é um caso particular de TrICP para quando a taxa de sobreposição é de 100%.

Para a reconstrução tridimensional de ambientes realizada por uma navegação visual, JANKOWSKA, KRZYZYNSKI e SANTOS-VICTOR (2002) utilizam o ICP implementando duas modificações. Uma é a operação de correlação entre imagens ao invés da mínima distância entre pontos. A correlação é realizada segundo uma janela centrada nos pontos de quinas das imagens. A outra modificação é a utilização dos graus de liberdade, utilizados como restrições no processo de alinhamento das imagens. Três graus de liberdade são utilizados nesse caso, a rotação do eixo perpendicular ao plano de movimento do robô e duas translações no plano do movimento.

DORAI, WENG e JAIN (1997) englobam o erro da orientação da superfície 3D para o alinhamento de pontos. Erros no alinhamento de diferentes vistas de um objeto 3D afetam a construção tridimensional do mesmo e se torna impossível encontrar a transformação rígida que alinha duas imagens. O alinhamento de pontos é encontrado levando em consideração os erros de medida e de ruídos. Através dos mínimos quadrados estima-se a variância mínima das transformações ocorridas no par de imagens.

Em inúmeros trabalhos a minimização da distância entre os pontos de dois conjuntos de dados é a métrica utilizada para a seleção de correspondência. Um método diferente é proposto no trabalho de YAGI, NISHIZAWA e YACHIDA (1995), no qual a métrica utilizada é o mínimo ângulo entre os pontos. O método é proposto para a correspondência de mapas adquiridos com um sistema de visão omnidirecional composto por uma câmera e um espelho hiperbólico. Como o ângulo azimutal do ponto plano da imagem descreve a orientação do ponto no ambiente, pode-se utilizá-lo como medida para encontrar a correspondência entre um par de mapas. Nesse método, para cada novo mapa adquirido, os valores dos ângulos azimutais dos pontos dos mapas são dispostos em ordem crescente e são correspondidos pela mínima diferença angular entre eles.

Projetando um espelho que mapeia pontos do chão linearmente com o aumento dos pixels no plano da imagem NAKAMURA e ISHIGURO (2002) realizam a construção de um mapa plano do ambiente para navegação. Primeiramente são

extraídas as retas de um par de imagens. Para cada par é calculado o histograma angular das retas nas direções x e y . Pela máxima correlação cruzada entre os histogramas de um par de imagens encontra-se a transformação rígida que alinha o par.

A Tabela 2.2 mostra um resumo da classificação, dos tipos e das metodologias encontradas na literatura relacionadas à construção de mapas de ambiente.

Tabela 2.2– Tabela resumida sobre classificação, tipos e metodologias utilizadas na literatura para a construção de mapas.

Mapas do ambiente			
Classificação do ambiente	Estruturado	Contém características como retas, planos, ou outras primitivas geométricas para sua representação, robô se movimenta sobre o plano.	
	Desestruturado	Não contém nenhuma regularidade na informação ou característica a ser extraída que possa representá-lo, o terreno de navegação pode ser plano ou não.	
	Externo	Podem ser estruturados, como estradas, ou desestruturados, como solo marítimo.	
	Interno	Em sua maioria são estruturados, como salas e corredores.	
Representação	Geométrica	Contém informação da geometria do ambiente e de posições ocupadas.	
	Topológica	Não contém informação da geometria do ambiente, representados por elos conectados a nós.	
Etapas necessárias para a construção de mapas	Alinhamento	Processo que visa obter a transformação de dois diferentes mapas para um único sistema de coordenadas.	
	Correspondência	Processo de correspondência entre os pontos de dois mapas.	Transformação rígida conhecida → utilizada para o alinhamento.
			Transformação rígida desconhecida → métodos que maximizam a sobreposição entre os mapas resultam no conhecimento da transformação rígida.
	Integração	Descrição dos pontos em um único sistema de referência, o referencial global.	
Metodologias utilizadas para a construção de mapas	Iterative Closest Point (ICP)	Utiliza o critério de mínima distância para corresponder pontos entre os mapas (BESL e MACKAY, 1992).	
	Proximidade Angular	Utiliza a mínima diferença dos ângulos azimutais entre os pontos para achar a correspondência (YAGI, NISHIZAWA e YACHIDA, 1995).	
	Histograma Angular	Utiliza a correlação cruzada entre duas imagens e encontra os pontos correspondente quando a correlação é máxima (NAKAMURA e ISHIGURO, 2002).	

CAPÍTULO 3 - VISÃO OMNIDIRECIONAL

Para a navegação de robôs móveis é necessário extrair informações do ambiente de maneira que essas forneçam subsídios para a navegação. A aquisição de informação é feita através de sensores. A escolha do sensor mais adequado depende do tipo de tarefa de navegação que se pretende implementar e torna a navegação mais autônoma.

Inúmeros sensores são utilizados, dentre esses, citam-se: ultra-som, infravermelho, GPS, lasers e visão artificial. Sensores de ultra-som e lasers são sensíveis a superfícies refletoras, tornando-se útil para medir distâncias. Sensor de infravermelho possui boa resolução angular, tornando-se útil para detectar a presença ou ausência de objetos. GPS podem ser utilizados para o sistema de localização dos robôs. Sensores baseados em câmeras são capazes de capturar imagens de forma contínua e fornecer a posição dos objetos.

Na medida em que esses sensores têm a capacidade de extrair informações do ambiente, as quais sejam relevantes para a execução de tarefas de robôs móveis, tornam-se eficientes para proporcionar uma navegação mais autônoma. Uma das maneiras de se proporcionar mais autonomia na navegação é ampliando a quantidade de informação adquirida, por meio de fusão de sensores, ou com um campo visual mais abrangente, para o caso de câmeras.

Nas aplicações de robótica móvel é interessante ter um campo visual mais abrangente do que o obtido com uma câmera e lente comuns. Um sistema de visão panorâmica, ou omnidirecional, fornece uma imagem de 360° do ambiente.

A visão omnidirecional (do latim “*omnis*”, em português “*oni*”, que significa tudo ou todo, e “*direcional*”, que se propaga em todas as direções) tem sido muito utilizada para inúmeras aplicações, dentre elas citam-se: vigilância remota, reconstrução tridimensional, rastreamento visual e navegação de robôs móveis.

Na área de navegação de robôs móveis a visão omnidirecional pode fornecer, dentre outras:

- a aquisição de imagens panorâmicas;
- a detecção de obstáculos;
- a verificação de espaço livre para navegação;
- a não colisão do robô com obstáculos;
- e o reconhecimento de marcos no ambiente.

Portanto, para potencializar a autonomia de um robô, câmeras omnidirecionais são acopladas a bordo desse para fornecerem uma informação global ao seu redor.

3.1 - Formas de aquisição de visão omnidirecional

Existem inúmeras formas de aquisição de imagens omnidirecionais. Câmeras giratórias, composição de um conjunto de câmeras dispostas em diferentes posições do ambiente; lentes especiais como “olho de peixe” e a conciliação de meios refletores e refratores (espelhos e câmeras) são alguns exemplos.

No caso de câmeras giratórias, a câmera gira com velocidade de rotação constante em torno do seu eixo vertical. A resolução horizontal da imagem panorâmica não depende da resolução angular da câmera e sim da resolução angular da rotação. Sendo, portanto, possível obter uma imagem omnidirecional de grande resolução se o sistema for controlado precisamente. A desvantagem da utilização de câmeras giratórias está relacionada ao longo tempo de aquisição de imagens, tornando-as inaplicáveis para problemas de tempo real e para ambientes dinâmicos (YAGI, 1999).

A composição de câmeras no ambiente pode ser feita de tal maneira a obter uma imagem panorâmica. No entanto, é difícil obter um sistema compacto em razão da existência de inúmeras câmeras.

Lentes especiais como “olho de peixe” fornecem a visão de um hemisfério. No entanto, a imagem obtida possui boa resolução no centro e baixa resolução na

periferia. Assim, a projeção dos objetos presentes no ambiente se tornam distorcidas pela projeção na parte periférica da imagem.

Uma outra maneira de obter visão omnidirecional é com a utilização de meios catadióptricos. Um sistema catadióptrico é composto de um meio dióptrico com um catóptrico. Um meio dióptrico é aquele em que a luz atravessa um meio e continua sua propagação em outro meio, tal como a lente de uma câmera. Um meio catóptrico é aquele em que a luz incide e é refletida para o mesmo meio de propagação, tal como os espelhos. Conciliando uma câmera e um espelho, sendo este alinhado com o eixo óptico da câmera, obtêm-se um sensor potencialmente útil para aplicação em tarefas de navegação de robôs móveis.

Um sistema omnidirecional catadióptrico é muito atrativo devido a sua simplicidade e compactidade. Inúmeros pesquisadores têm investigado e utilizado este tipo de sistema nos últimos anos, para as variadas aplicações (CHAHN e SRINIVASAN, 1997); (CONROY e MOORE, 1999); (GASPAR et al., 2002); (HICKS e BAJCSY, 1999) e (SVOBODA, PAJDLA e HLAVÁČ, 1998).

3.2 - Centro único de projeção

Além da consideração da estrutura utilizada para obter um sistema omnidirecional, uma outra propriedade que qualifica esse tipo de sistema é a propriedade do centro único de projeção (YAGI, 1999). O centro único de projeção (*single effective viewpoint* ou *single projection center*) é uma característica importante de um sensor omnidirecional, e necessária, dependendo do tipo de aplicação a ser utilizada. O centro único de projeção garante a unicidade entre um ponto do espaço tridimensional e a sua projeção em um único ponto da imagem omnidirecional.

Algumas formas de obtenção de imagens omnidirecionais não garantem o centro único de projeção, tal como no caso das lentes do tipo “olho de peixe”. Com este sistema é difícil gerar uma imagem perspectiva livre de distorções. No caso de câmeras giratórias, esta propriedade só é possível com um perfeito alinhamento entre o eixo de rotação da câmera e o centro de projeção de todas as imagens. Para o caso

de inúmeras câmeras dispostas no ambiente, o perfeito alinhamento e calibração destas é necessário para atingir o centro único de projeção, o que é, no entanto, muito difícil de ser assegurado (YAGI, 1999).

A obtenção de um centro único de projeção é relativamente simples em um sistema catadióptrico. O espelho constituído com tal propriedade garante, automaticamente, que somente um único ponto no mundo irá refletir na superfície do espelho, e incidir em um único ponto na imagem. A imagem formada por um sistema catadióptrico, que tem o centro único de projeção, é livre de borramento e sua projeção, em uma imagem perspectiva, é livre de distorção. Além disso, o centro único de projeção torna fácil a geração de uma imagem perspectiva, livre de distorções, em qualquer plano de projeção, a partir da imagem omnidirecional. A possibilidade de criação de uma imagem perspectiva é potencialmente útil para algumas aplicações em visão robótica.

Existem algumas maneiras para se obter o centro único de projeção nos sistemas catadióptricos. Para o espelho hiperbólico, como todo raio incidente no espelho é refletido passando pelo foco, as leis de reflexão garantem o centro único de projeção. No caso do espelho parabólico, a característica de centro de projeção único é satisfeita ao se modelar o sistema com uma câmera de projeção ortográfica, onde, após a incidência no espelho, todos os raios são refletidos paralelamente ao eixo do espelho. Câmeras telecêntricas ou com zoom são exemplos de câmeras ortográficas. No caso do espelho esférico, os raios incidentes são refletidos após passarem por diferentes focos, o que não garante um centro único de projeção, e por este motivo, imagens adquiridas por espelhos esféricos são as mais distorcidas. Contudo, ele tem a vantagem de ter curvatura constante, sendo assim fácil de ser fabricado. Mas, devido à ausência do centro único de projeção, não pode ser utilizado para as tarefas que exijam imagens sem distorção e possibilidade de criação de imagens perspectivas de qualidade. Os espelhos cônicos têm as mesmas características dos espelhos esféricos, ou seja, ser de fácil fabricação e não possuir o centro único de projeção.

A Figura 3.1 mostra as projeções em três tipos de espelhos: hiperbólico, esférico e parabólico. Observa-se que o espelho esférico não possui centro único de projeção.

Figura 3.1– Três formas de espelho para visão omnidirecional.

3.3 - Formas de espelhos

O formato do espelho determina a formação da imagem de um sistema de visão catadióptrico. Muitas formas de espelhos têm sido utilizadas e testadas. Os primeiros espelhos a serem utilizados foram os planos e cônicos (YAGI, KAWATO e TSUJI, 1994) e (YAGI, NISHIZAWA e YACHIDA, 1995). Posteriormente os convexos, tais como os parabólicos (NAYAR, 1997), hiperbólicos (MATSUMOTO et al., 1999) e (YAMAZAWA, YAGI e YACHIDA, 1995) ou esféricos (GASPAR e SANTOS-VICTOR, 1999) e (WINTERS e SANTOS-VICTOR, 1999a).

Imagens obtidas por diferentes tipos de espelho apresentam diferentes resoluções. Espelhos cônicos tem boa resolução na parte periférica. Espelhos esféricos, tal como

as lentes “olho de peixe”, têm boa resolução na parte central. O espelho hiperbólico tem a vantagem de boa resolução nas partes central e periférica, sendo que a abrangência do seu campo visual é descrita no projeto do perfil do espelho. O espelho parabólico tem resolução intermediária entre os espelhos esférico e hiperbólico, porém, contém o maior campo visual obtido dentre os espelhos convexos.

Há um compromisso entre resolução da imagem e campo visual do espelho. BAKER e NAYAR (1998) derivam a classe de sistemas catadióptricos que contém centro único de projeção e avaliam a função que descreve a resolução de um sistema catadióptrico. Apesar de possuir a vantagem de um campo visual abrangente, um sistema catadióptrico, em geral, apresenta um efeito de borramento da imagem. Segundo BAKER e NAYAR (1998), esse borramento pode ser causado por dois motivos: pela abertura da lente ou pela curvatura do espelho. Espelhos com centro único de projeção não causam esse efeito na imagem.

Além dos espelhos planos, cônicos e convexos, outros podem ser projetados. Esses espelhos são projetados cujas formas geométricas são funções de mapeamentos lineares do mundo, no plano da imagem. Apesar de não terem centro único de projeção, fornecem uma imagem livre de distorções. Esses espelhos são chamados, na literatura, de espelhos de resolução constante (DECCÓ et al., 2001); (GÄECHTER, 2001) e (HICKS e BAJCSY, 1999).

HICKS e BAJCSY (1999 e 2000) apresentam um perfil de espelho que mapeia linearmente um plano horizontal do espaço tridimensional, no plano da imagem. Tal perfil de espelho foi desenvolvido para propósitos de navegação de robôs móveis. Como ilustração, suponha que o sistema catadióptrico está sobre um plano horizontal como o de um tabuleiro de xadrez. A imagem adquirida por um espelho esférico é distorcida e a imagem adquirida por esse espelho é livre de distorções, como visto na Figura 3.2. Todas as retas desenhadas no chão continuam retas na imagem omnidirecional, sem a necessidade de fazer qualquer processamento da imagem adquirida pelo sistema de visão. A imagem obtida com o espelho desenvolvido é

uma projeção ortográfica escalonada do plano visualizado (plano horizontal). Este tipo de visão é chamado na literatura de “*birds eye view*”.

Figura 3.2 – Imagem de um piso xadrez obtida com um espelho esférico (à esquerda) e com um espelho projetado por HICKS e BAJCSY (2000) (à direita). (Figura extraída de HICKS e BAJCSY (2000)).

GÄECHTER (2001) apresenta um perfil de espelho que mapeia linearmente um plano vertical do espaço tridimensional, no plano da imagem. Tal perfil de espelho foi desenvolvido para ser utilizado no estudo de uma câmera log-polar. Essa câmera possui os elementos sensores distribuídos circularmente e seguindo uma função de distribuição logarítmica do centro para a periferia. Assim, para o arranjo de pixels, a resolução da imagem se mantém constante. Através da leitura direta dos pixels do sensor dessa câmera, obtém-se uma imagem panorâmica sem a necessidade de processamento da imagem.

DECCÓ et al. (2001) utilizando uma função de mapeamento linear de um plano horizontal e de um plano vertical, desenvolveu um novo perfil de espelho com duas seções. Uma parte do espelho (que forma a parte interna da imagem omnidirecional) mapeia, linearmente, o plano horizontal no plano da imagem, e, a outra parte do espelho (que é a parte mais externa da imagem omnidirecional) mapeia, linearmente, o plano vertical no plano da imagem. Tal perfil de espelho pode ser projetado para ser utilizado em uma câmera convencional ou log-polar.

Esses perfis de espelhos são descritos por funções que mapeiam um plano (horizontal (HICKS e BAJCSY, 1999), vertical (GÄECHTER, 2001) ou os dois simultaneamente (DECCÓ et al., 2001)), linearmente, no plano da imagem.

Uma família de espelhos que preservam a relação linear entre o ângulo de incidência da luz no espelho (que corresponde ao ângulo de elevação (j)) e o ângulo de reflexão na câmera (que é chamado de ângulo radial (y)) foi desenvolvido por CHAHL e SRINIVASAN (1997), como mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Ganho angular vertical.

Ao longo da superfície do espelho é mantida uma relação constante entre a variação do ângulo de elevação (dj) e a variação correspondente do ângulo radial (dy). Assim, nesse espelho é mantido um ganho angular vertical, $b = dj / dy$, localmente constante.

Um outro trabalho realizado é o de CONROY e MOORE (1999), que desenvolve um par de espelhos, simetricamente axiais. Como as câmeras convencionais tem um arranjo de pixels, onde a parte mais interna da imagem tem uma densidade de pixels menor, e portanto produz uma imagem de menor resolução, e a parte mais externa da imagem tem uma densidade de pixels maior, produzindo uma imagem de maior resolução; as imagens obtidas não têm resolução constante. Para obter uma imagem

omnidirecional com resolução constante em qualquer posição, CONROY e MOORE (1999) desenvolveram um perfil de espelhos cuja propriedade satisfeita é da invariância da densidade de pixels com a variação dos ângulos de elevação da cena. O par de espelhos coaxiais é utilizado em visão estéreo.

GASPAR et al. (2002) apresentam uma metodologia geral e unificada para projetar os tipo de espelho de resolução constante.

3.4 - Visão estéreo

Uma ferramenta muito importante em navegação de robôs é a visão estéreo. Com visão estéreo é possível determinar a distância dos objetos dentro do campo visual do robô. O processo de obtenção das distâncias dos objetos no ambiente em relação ao robô consiste, basicamente, de três etapas: 1) extração de características da imagem; 2) correspondência das características; e, 3) triangulação. BROWN, BURSCHKA e HAGER (2003) realizam uma excelente revisão sobre esses temas. Com a medida de distância aos objetos o robô pode estimar o caminho livre e planejar a trajetória para realizar a navegação.

Para compor um sistema estéreo é necessário a aquisição de duas imagens. O problema fundamental em visão estéreo é determinar onde pixels, pontos ou outras características correspondentes estão presentes nas duas imagens; esse problema é chamado de correspondência.

O princípio da correspondência é a busca da coordenada de um ponto, selecionado em uma das imagens, através de uma comparação com a coordenada desse ponto na outra imagem. Para essa busca utiliza-se uma determinada característica, como por exemplo: bordas, quinas ou mesmo a variação da intensidade luminosa. Essa característica é selecionada na primeira imagem, e a procura dessa característica na segunda imagem é realizada utilizando-se uma restrição, a linha epipolar. A procura na linha epipolar restringe o problema de busca bidimensional para um problema de busca unidimensional.

A forma da linha epipolar depende da geometria do sistema de visão. Para o caso de visão estéreo binocular, onde duas câmeras são dispostas paralelamente, a linha epipolar é horizontal (FAUGERAS, 1993). Para o caso omnidirecional catadióptrico essa linha se torna uma curva (SVOBODA, PAJDLA e HLAVÁC, 1997) e (SVOBODA, PAJDLA e HLAVÁC, 1998).

Existem inúmeros métodos de busca por pontos correspondentes ao longo da linha epipolar. A procura da melhor correspondência pode ser realizada através de buscas locais. Um método muito popular para se determinar pontos correspondentes é a minimização da soma da diferença ao quadrado da intensidade luminosa dentro de uma janela centrada em um dado pixel da linha epipolar (sum of square difference, SSD). Esse método é fácil de ser implementado e tem sido largamente utilizado para navegação de robôs móveis (WANG e HSIAO, 1996). ZHANG (2002) apresenta um estudo dos algoritmos de correspondência estéreo encontrados na literatura.

Um método eficiente para resolver o problema de correspondência de pontos é a programação dinâmica (WANG e HSIAO, 1996) que utiliza um conjunto de restrições para a seleção do pixel correspondente. Algumas dessas restrições são:

- **linha epipolar:** um pixel correspondente deve estar localizado na linha epipolar;
- **ordem:** a relação de sequência de pixels deve ser mantida no par de imagens, ou seja, se um determinado pixel da primeira imagem tem um correspondente na segunda imagem, um pixel seguinte a este da primeira imagem terá seu correspondente seguinte ao pixel já correspondido da segunda imagem;
- **unicidade:** cada pixel de uma imagem só contém um pixel correspondente na outra imagem;
- **limitação de disparidade:** a mínima distância de um objeto ao robô define a máxima disparidade e a máxima distância define a mínima disparidade, essas disparidades são utilizadas como restrições para as disparidades intermediárias.

Dessa forma, correspondências locais boas podem ser ignoradas em favor de uma correspondência mais satisfatória para todos os pontos da linha epipolar.

Uma vez obtidos os pontos correspondentes nas duas imagens, pode-se calcular a distância do ponto físico no espaço ao sistema de visão, através da técnica de triangulação. Ou seja, dados os pontos correspondentes nas duas imagens e a localização relativa dos dois sistemas de visão, calcula-se, a partir de considerações geométricas, a distância do ponto no espaço.

3.4.1 - Visão estéreo omnidirecional

Devido ao ângulo de visão de 360° , sistemas omnidirecionais são bastante eficientes para navegação de robôs móveis. Sistemas de visão estéreo proporcionam a obtenção das distâncias de todos os objetos localizados ao redor do robô.

A geometria estéreo está fundamentada para o caso convencional em FAUGERAS (1993). SVOBODA, PAJDLA e HLAVÁČ (1998) desenvolvem a geometria estéreo para o caso omnidirecional, utilizando um espelho hiperbólico. Para o caso estéreo omnidirecional, a procura por pontos correspondentes é realizada ao longo da curva epipolar.

Alguns trabalhos utilizam visão estéreo omnidirecional para a obtenção de distâncias. Diferentes sistemas catadióptricos podem ser utilizados. Algumas configurações com câmeras e espelhos são estudadas por OLLIS, HERMAN e SINGH (1999) para a obtenção de um campo visual abrangente e de algumas formas de visão estéreo. É realizada uma análise do campo visual, da resolução da imagem e da acurácia na distância, para cada configuração estudada. As conclusões obtidas mostram que a acurácia na distância calculada depende da configuração do sistema, e que a triangulação pode não ser obtida quando a proximidade de dois espelhos é muito grande, ou quando espelhos coaxiais têm um pequeno afastamento entre eles. Afastando os espelhos e garantindo a sobreposição dos campos visuais aumenta-se a certeza no cálculo das distâncias. No caso de configurações onde ocorram oclusões, as distâncias a certos objetos não podem ser inferidas, por estes não estarem presentes nas duas imagens.

Pode-se também utilizar um sistema omnidirecional para compor um sistema estéreo como feito por CONROY e MOORE (1999), que usa um par de espelhos, dispostos coaxialmente, para a obtenção de duas imagens. A imagem omnidirecional contém a imagem obtida por cada espelho. A correspondência é realizada sobre a imagem panorâmica retificada.

No trabalho de KUMANO, OHYA e YUTA (2000) são utilizadas duas câmeras paralelas para compor o sistema estéreo; KOYASU, MIURA e SHIRAI (2002) utilizam um sistema estéreo composto por duas câmeras e dois espelhos hiperbólicos, alinhados verticalmente; SVOBODA, PAJDLA e HLAVÁČ (1998) também utilizam um sistema catadióptrico formado por duas câmeras e dois espelhos hiperbólicos, alinhados horizontalmente, para a obtenção de visão estéreo.

CAPÍTULO 4 - PROJETO DE ESPELHOS

Diferentes perfis de espelhos podem ser desenvolvidos para algum tipo específico de aplicação. O desenvolvimento de espelhos para visão omnidirecional têm sido bastante estudados na literatura com a finalidade de aplicação em robótica móvel (CONROY e MOORE, 1999); (GÄECHTER, 2001) e (HICKS e BAJCSY, 1999), os quais podem ser utilizados com câmeras convencionais ou com uma câmera especial com distribuição de pixels log-polar (DECCÓ et al., 2001).

4.1 - Câmeras

Nas câmeras convencionais o plano da imagem contém um arranjo retangular de pixels. Cada pixel é um elemento sensor que capta a quantidade de luz incidente e a resposta é um sinal proporcional a essa quantidade de luz incidente no sensor.

A visão humana é um sensor que capta a luz. O olho humano contém duas partes, uma parte central, chamada fóvea, e a parte mais periférica, chamada retina. No olho humano a maior resolução ocorre na fóvea, por isso focaliza-se os olhos na direção dos objeto de interesse. A resolução diminui ao afastar-se do centro para a periferia, onde não tem-se boa qualidade de imagem.

A câmera log-polar é composta de duas partes, uma central (simulando a fóvea) e outra periférica (simulando a retina). Os pixels são dispostos em um arranjo circular, dispostos em anéis. A Figura 4.1 mostra o arranjo de pixels da camera log-polar.

A parte da fóvea contém 42 anéis e a parte da retina contém 110 anéis. Na parte da fóvea o tamanho do pixel é constante. Na parte da retina o tamanho do pixel aumenta segundo uma função logarítma e a taxa de crescimento do tamanho do pixel é igual a 1.02337.

Figura 4.1 - Sensor log-polar.

A Figura 4.2 mostra um detalhe da disposição dos pixels na parte central (fóvea) do sensor log-polar.

Figura 4.2 - Detalhe do arranjo de pixels na parte central do sensor – “fóvea”.

A Figura 4.3 mostra um detalhe da disposição dos pixels na parte periférica do sensor log-polar.

Figura 4.3 – Detalhe do arranjo de pixels na parte periférica do sensor - “retina”.

O sensor, intitulado SVAVISCA, tem algumas características quanto a sua estrutura:

- A retina contém 110 anéis, em cada anel há 252 pixels.
- O sensor contém 42 anéis na fóvea arranjados em uma simetria onde há 1 pixel no primeiro anel, 6 no segundo, e então 12, 18, 24, etc, até 252 no 42º anel.
- O número total de pixels é 33.193 sendo 5.166 na fóvea.
- O mínimo tamanho do pixel é $6.8 \times 6.45 \mu\text{m}^2$, razão de 1.054.
- Na fóvea a mínima altura do pixel é $6.52 \mu\text{m}$.
- O raio da fóvea é $272.73 \mu\text{m}$
- A taxa de crescimento do pixel é igual a 1.02337
- A área do fotosensor tem um diâmetro de $7.135,44 \mu\text{m}$.

4.2 - Perfis de espelhos

Diferentes perfis de espelhos são estudados para o estudo das projeções e mapeamentos no plano da imagem e para o desenvolvimento de futuros estudos na área de robótica móvel utilizando-se de visão omnidirecional.

O espelho de resolução vertical (GÄECHTER, 2001) é obtido através do mapeamento de um plano vertical no plano da imagem e o espelho de resolução horizontal (HICKS e BAJCSY, 1999) é obtido através do mapeamento de um plano horizontal no plano da imagem. A partir do projeto desses espelhos pode-se desenvolver um espelho misto, que contém duas seções, obtendo-se um espelho que faz o mapeamento de dois planos (vertical e horizontal) em uma imagem.

4.2.1 - Espelho de resolução vertical

Considerando-se visualizar o espaço de trabalho ao redor do robô e obter um perfil de um espelho para formar um sistema de visão omnidirecional, considera-se que o robô situa-se no centro de um cilindro de raio d .

Das leis da óptica (BORN e WOLF, 1975), sabe-se que um ponto tridimensional no mundo irá, após reflexão por um espelho, ser projetado no plano da imagem de uma

câmera. Esse espelho pode ser obtido através das projeções de pontos de uma dada dimensão vertical no plano da imagem de raio r . Sendo assim, ao considerar-se a geometria da Figura 4.4, um determinado ponto situado a uma determinada altura h na dimensão vertical é projetado em uma determinada posição no plano da imagem, após incidir em um ponto t do espelho.

Seja t a coordenada horizontal medida no espelho. A função $F(t)$ dá a forma da superfície do espelho obtida pelas leis da reflexão. Ao invés de acharmos uma expressão que defina $F(t)$, primeiramente podemos sugerir uma equação para $h(t)$. Ou seja, pode-se pensar em uma função que relaciona h com t .

Figura 4.4 – Projeção da dimensão vertical no plano da imagem.

Da relação trigonométrica:

$$\tan(\mathbf{f}) = \frac{(d - t)}{F(t) - h(t)} \quad (4.1)$$

tem-se uma expressão para a função $h(t)$, dada por:

$$h(t) = F(t) - \cot(\mathbf{f})(d - t) \quad (4.2)$$

Assumindo que o ângulo de incidência no espelho é igual ao ângulo de reflexão, e fazendo o produto escalar das componentes do ângulo de incidência, da normal e do ângulo de reflexão, uma nova equação para $h(t)$ é encontrada:

$$h(t) = F(t) + \frac{2tF'(t) - (F(t) - f)(1 - F'(t)^2)}{2(F(t) - f)F'(t) + t(1 - F'(t)^2)}(d - t) \quad (4.3)$$

Resolvendo essa equação para a derivada do perfil do espelho, $F'(t)$, chega-se à uma equação diferencial. Essa equação descreve a forma da superfície do espelho que faz a projeção de uma dimensão vertical no plano da imagem, dada por:

$$F'(t) + \frac{t(d - t) + (F(t) - f)(F(t) - h(t))}{(F(t) - f)(d - t) - t(F(t) - h(t))} - \sqrt{\left(\frac{t(d - t) + (F(t) - f)(F(t) - h(t))}{(F(t) - f)(d - t) - t(F(t) - h(t))}\right)^2 + 1} = 0 \quad (4.4)$$

De acordo com a eq. (4.4) vê-se que 3 parâmetros influenciam a forma do espelho adquirida:

- a distância focal f da câmera;
- a distância d entre o eixo óptico do sistema e a superfície do cilindro que se deseja mapear;
- a função $h(t)$ que define o tipo de função de mapeamento no plano da imagem.

Ou seja, para o projeto do espelho de resolução vertical esses três fatores são necessários: a que distância, com relação ao centro do robô, encontra-se o plano que deseja-se mapear; qual a distância focal da câmera utilizada (f) e, além destes fatores, qual a função que descreve o tipo do mapeamento dessa dimensão no plano da imagem, dada por $h(t)$.

4.2.1.1 - Câmera convencional

Supondo um mapeamento linear entre a coordenada do ponto no mundo e a coordenada no plano da imagem, a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$h(\mathbf{r}) = a\mathbf{r} + b \quad (4.5)$$

onde a e b são constantes.

Substituindo a eq. (4.5) em (4.4), a coordenada no plano da imagem $\mathbf{r}$ é substituída por t e a equação do perfil do espelho é resolvida para o vetor t (pontos do espelho).

A relação entre t e $\mathbf{r}$ é obtida por projeção perspectiva, dada por:

$$\mathbf{r} = \frac{f t}{F(t) - f} \quad (4.6)$$

Portanto, substitui-se a eq. (4.6) em (4.5) e calcula-se o valor de $h(\mathbf{r})$ para cada ponto do espelho. Substitui-se o valor de $h(\mathbf{r})$ na eq. (4.4), que é resolvida numericamente.

Para cada ponto t estes passos são resolvidos até t ser igual ao raio do espelho, quando, finalmente, obtém-se os pontos do espelho.

Para o cálculo do perfil do espelho deve-se estimar $F(0)$ inicialmente. Estima-se $F(0)$ através da relação de projeção perspectiva, dada pela eq. (4.7), sendo essa a condição inicial para o cálculo de $F(t)$.

$$F(0) = \frac{f t}{\mathbf{r}} \quad (4.7)$$

O valor da máxima distancia radial do plano da imagem ($\mathbf{r}$) é igual a 0,24 cm, conforme a especificação do sensor.

Para a projeção do perfil do espelho inicialmente especifica-se 4 parâmetros, relacionados à dimensão e ao campo de visão do espelho:

- distância focal f ;
- raio do espelho, dada pela coordenada t ;

- ganho a ;
- fator de escala b .

O ganho a do espelho e o fator de escala b são relacionados ao campo de visão do espelho, enquanto que o raio do espelho está relacionado à dimensão do espelho desejado e f com a câmera que irá compor o sistema omnidirecional.

O ganho a é calculado através da eq. (4.5), sendo calculado para a máxima altura da dimensão vertical que se deseja visualizar. O fator de compensação b é um fator de escala, especificando a mínima altura que se deseja visualizar, sendo medida abaixo do plano da imagem. Assume-se $d = 200$ cm, $t_{máx} = 3$ cm e $f = 1,25$ cm. Obtêm-se $a = 2000$ e $b = -400$ cm. O valor de $F(0)$ estimado é de 15,5 cm. Esse valor representa a distância entre o plano da imagem e o primeiro ponto do espelho.

Tendo estimado a distância do primeiro ponto do espelho com relação ao plano da imagem, calcula-se, para cada ponto, o conjunto das equações (4.7), (4.6), (4.5) e (4.4). A Figura 4.5 mostra o perfil do espelho obtido para a câmera convencional. O ângulo de visão obtido é de aproximadamente 79.2° .

Figura 4.5 – Perfil do espelho – câmera convencional.

4.2.1.2 - Câmera log-polar

Para a câmera log-polar a eq. (4.5) é substituída por

$$h(\mathbf{r}) = a \log\left(\frac{\mathbf{r}}{\mathbf{r}_0}\right) + b \quad (4.8)$$

onde $\mathbf{r}_0$ é o raio da parte central do sensor (fóvea), onde se tem um arranjo uniforme de pixels. Este raio é equivalente a 0.027273 cm. O valor da máxima distancia radial do plano da imagem ($\mathbf{r}_{máx}$) é igual a 0,36 cm.

Novamente o mesmo processo para o cálculo dos pontos do espelho é feito, resolvendo o conjunto de equações (4.7), (4.6), (4.8) e (4.4), que é resolvida numericamente.

O valor de $F(0)$ para o cálculo do perfil do espelho para a câmera log-polar deve ser estimado inicialmente. Sendo a distância focal igual a 2.5 cm, obtém-se $F(0)$ igual a 21 cm.

A Figura 4.6 mostra o perfil do espelho obtido para a câmera log-polar. O ângulo de visão obtido é de aproximadamente 69.6°.

Figura 4.6 – Perfil do espelho – câmera log-polar.

4.2.1.3 - Análise do perfil do espelho

Tais espelhos foram designados para projetar linearmente (com $\mathbf{r}$ ou com o logarítmo de $\mathbf{r}$) uma dimensão vertical no plano da imagem.

Para avaliar se o perfil do espelho corresponde ao que fora designado realizou-se uma análise do perfil do espelho. Essa análise consta em verificar a variação da função linear $(h(t))$ com a variação da função no plano da imagem ($\mathbf{r}$), variação numérica sobre a teórica. A razão entre a derivada numérica, dada pela eq. (4.3), e a derivada teórica, dada pela eq. (4.5) (caso convencional), é expressa por:

$$(dh(t)/d\mathbf{r})_n / (dh(t)/d\mathbf{r})_t \quad (4.9)$$

onde os índices n e t representam, respectivamente, o numérico e o teórico.

A Figura 4.7 mostra a variação de $(dh(t)/d\mathbf{r})_n / (dh(t)/d\mathbf{r})_t$ para o caso da câmera convencional obtida com a seguinte expressão:

$$dif = \frac{h(t + \Delta t) - h(t)}{\Delta t} \quad (4.10)$$

que é a equação para uma diferenciação numérica entre o ponto $h(t)$ considerado e um ponto posterior, $h(t + \Delta t)$, com Δt sendo o intervalo entre os pontos.

Figura 4.7 - $(dh(t)/d\mathbf{r})_n / (dh(t)/d\mathbf{r})_t$ obtida com dif .

O valor ideal da razão é 1, que significa que o espelho foi projetado mapeando linearmente a função $h(t)$ no plano da imagem (curva azul). Observa-se pelo gráfico que a taxa diminui com o aumento dos valores de r . Isso significa que a diferença entre os pontos aumenta na direção do topo para a base da dimensão vertical.

Desde que esse cálculo não realiza uma derivação e sim uma diferenciação, verifica-se uma ligeira diferença entre os valores teórico e o numérico. Realizou-se a mesma análise com o método da derivada centrada no ponto. Nesse método, para um dado valor, considera-se a diferença dos pontos seguinte menos o anterior ao ponto considerado, sobre o dobro do intervalo entre os pontos. Com este procedimento obtém-se a derivada no próprio ponto. Com o método da derivada centrada obteve-se a variação da taxa $(dh(t)/dr)_n / (dh(t)/dr)_t$, indicada na Figura 4.8.

Figura 4.8 - $(dh(t)/dr)_n / (dh(t)/dr)_t$ obtida com derivada centrada.

Como era de se esperar a taxa da variação da função $h(t)$ sobre a variação do plano da imagem, numérica sobre teórica, tem valor igual a 1. Portanto conclui-se que o espelho faz a projeção dos raios de um plano vertical linearmente com a distância radial do plano da imagem.

Para verificar a influência do método de derivação nessa análise do perfil do espelho realizou-se um novo método, utilizando a derivada analítica. Esse método consta em fazer a derivação da eq. (4.4). A Figura 4.9 mostra o resultado da taxa $(dh(t)/d\mathbf{r})_n / (dh(t)/d\mathbf{r})_t$ realizado com a derivada analítica. Conclui-se que o método de derivação tem grande influência na análise e validação do perfil do espelho e que o espelho faz o mapeamento linear do plano vertical, conforme estabelecido.

Figura 4.9 - $(dh(t)/d\mathbf{r})_n / (dh(t)/d\mathbf{r})_t$, obtida com derivada analítica.

Pela figura vê-se que, para a distância de referência para o qual o espelho foi projetado, $d=200$ cm, a taxa $(dh(t)/d\mathbf{r})_n / (dh(t)/d\mathbf{r})_t$ tem valor igual a 1.

Uma análise foi realizada para diferentes distâncias: 100,150, 200, 300 e 400 cm. A taxa $(dh(t)/d\mathbf{r})_n / (dh(t)/d\mathbf{r})_t$ é mostrada no gráfico, a qual é normalizada com a distância de referência, $d=200$ cm para os diferentes métodos de derivação analisados e são mostradas nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12.

**Figura 4.10 - $(dh(t)/dr)_n / (dh(t)/dr)_t$ obtida com *dif* para diferentes distâncias –
câmera convencional.**

**Figura 4.11 - $(dh(t)/dr)_n / (dh(t)/dr)_t$ obtida com derivada centrada para
diferentes distâncias - câmera convencional.**

Figura 4.12 - $(dh(t)/dr)_n / (dh(t)/dr)_t$ obtida com derivada analítica para diferentes distâncias – câmera convencional.

A inclinação das curvas mostram a variação da função $h(t)$ com a variação de r . Para a distância em referência esta variação é aproximadamente igual a 1, para as diferentes distâncias os comportamentos são diferentes. Para o entendimento considere a Figura 4.13.

Figura 4.13 – Projeção inversa dos raios de luz nos planos verticais em diferentes distâncias.

De acordo com a Figura 4.13 vemos que, se considerarmos um ponto P colocado sobre a intersecção do raio que passa pela curva de referência ($d=200$ cm) e, neste ponto traçarmos uma reta que intercepte as curvas de 100 cm e 400 cm, teremos os pontos P' e P'' . Esses pontos são, respectivamente, as posições que o ponto P deveria ocupar nas retas a 100 cm e 400 cm de distância, se o espelho fosse um espelho plano, obviamente.

Como o espelho não é um espelho plano, as posições de P projetado em diferentes distâncias estão acima de P' para a distância de 100 cm e abaixo de P'' para a distância de 400 cm. Devido a estas diferentes posições que ocupam o ponto P nas diferentes distâncias, temos as diferentes inclinações nas curvas das Figuras 4.10, 4.11 e 4.12.

É interessante ainda notar que, pontos abaixo do ponto P (distância 200 cm) ocupam posições superiores quando projetados na distância de 100 cm. E pontos acima de P ocupam posições inferiores nesta mesma distância (100 cm). Isso mostra porque este comportamento é oposto quando os pontos na distância de 200 cm são projetados para a distância de 400 cm. Isso é verificado nas figuras cujos métodos de derivação são da derivada centrada e analítica, mostrando assim, que são os métodos mais confiáveis.

A mesma análise foi realizada para diferentes distâncias (100,150, 200, 300 e 400 cm) para o caso da câmera log-polar. Sendo, nesse caso, a razão entre a derivada numérica, dada pela eq. (4.3), e a derivada teórica, dada pela eq. (4.8).

As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 mostram a análise da razão $(dh(t)/d\mathbf{r})_n / (dh(t)/d\mathbf{r})_t$, normalizada com a distância de referência ($d=200$ cm) para os diferentes métodos de derivação.

Figura 4.14 - $(dh(t)/dr)_n / (dh(t)/dr)_t$, obtida com dif para diferentes distâncias – câmera log-polar.

Figura 4.15 - $(dh(t)/dr)_n / (dh(t)/dr)_t$ obtida com derivada centrada para diferentes distâncias – câmera log-polar.

Figura 4.16 - $(dh(t)/dr)_n / (dh(t)/dr)_t$ obtida com derivada analítica para diferentes distâncias – câmera log-polar.

Analisando a Figura 4.16 verifica-se que na câmera log-polar a diferença entre os pontos é a mesma, independentemente da distância em que estejam. Ao se ver uma imagem de uma escala graduada em uma câmera log-polar, tem-se a mesma variação entre os pontos da escala para imagens obtidas em diferentes distâncias. É claro que a imagem terá tamanhos diferentes, sendo maior quanto mais próxima estiver do sensor.

Contudo, através dessas análises não se pode determinar qual é a melhor câmera, a escolha de um tipo específico depende, naturalmente, da aplicação a ser utilizada.

4.2.2 - Espelho de resolução horizontal

Considerando que um robô navega e realiza uma trajetória sobre um plano, um espelho foi projetado tal que, a uma dada altura h do plano da imagem, um plano horizontal (pavimento) é linearmente mapeado no plano da imagem. Essa consideração afirma que o sensor catadióptrico irá mapear um certo comprimento no plano da imagem, ao longo da direção radial.

Novamente baseia-se no modelo de projeção perspectiva e, como no caso do espelho de resolução vertical, o espelho de resolução horizontal é projetado tal que mapeie

um determinado plano horizontal linearmente com o aumento da distância radial no plano da imagem. A equação do espelho é derivada considerando que o plano horizontal está a uma determinada altura h do plano da imagem tal como mostra a Figura 4.17.

Figura 4.17 – Projeção do pavimento no plano da imagem.

De acordo com esta geometria e considerando que o ângulo de incidência ($\mathbf{f} + \mathbf{q}$) é igual ao ângulo de reflexão ($\mathbf{y}$), ou seja, $\mathbf{f} + \mathbf{q} = \mathbf{y}$, conseqüentemente $\mathbf{f} + 2\mathbf{q} = \mathbf{y} + \mathbf{q}$ e, portanto,

$$\tan(\mathbf{f} + 2\mathbf{q}) = \tan(\mathbf{y} + \mathbf{q}) = \frac{d(t) - t}{F(t) + h} \quad (4.11)$$

Nesta equação $F(t)$ é um ponto no espelho, medido na coordenada vertical a partir do plano da imagem e t são os pontos do espelho, medido na direção horizontal (cota

radial). O máximo valor de t é igual ao raio do espelho; $d(t)$ é a medida da distância no pavimento para cada raio de luz incidente no ponto t do espelho, e ρ é a distância radial no plano da imagem. O ângulo q é definido como sendo o ângulo entre a normal à superfície do espelho e a linha vertical do ponto de intersecção com a reta normal.

Da relação trigonométrica

$$\tan(2q) = \frac{2F'(t)}{1 - F'(t)^2} \quad (4.12)$$

E considerando que

$$\tan(f) = \frac{t}{F(t)} \quad (4.13)$$

Chega-se em (4.14) substituindo (4.12) e (4.13) em (4.11) e levando-se em conta a relação de soma trigonométrica de dois ângulos.

$$\frac{\frac{t}{F(t)} + \frac{2F'(t)}{1 - F'(t)^2}}{1 - \frac{t}{F(t)} \frac{2F'(t)}{1 - F'(t)^2}} = \frac{d(t) - t}{F(t) + h} \quad (4.14)$$

Pode-se encontrar uma equação para a função $d(t)$, que é a função que descreve o mapeamento de um ponto do pavimento no plano da imagem, descrita pela eq. (4.15).

$$d(t) = (F(t) + h) \frac{\frac{t}{F(t)} - \frac{2F'(t)}{1 - F'(t)^2}}{1 - \frac{t}{F(t)} \frac{2F'(t)}{1 - F'(t)^2}} - t \quad (4.15)$$

Resolvendo a eq. (4.14) para a derivada do perfil do espelho $F'(t)$, chega-se à equação diferencial que descreve a forma da superfície do espelho projetado em função do mapeamento do plano horizontal no plano da imagem, dada por:

$$F'(t) + \frac{t(d(t)-t) + (F(t)+h)(F(t)-f)}{(F(t)-f)(d(t)-t) - t(F(t)+h)} - \sqrt{\left(\frac{t(d(t)-t) + (F(t)+h)(F(t)-f)}{(F(t)-f)(d(t)-t) - t(F(t)+h)}\right)^2 + 1} = 0 \quad (4.16)$$

De acordo com essa equação vê-se que 3 parâmetros influenciam a forma do espelho:

- a distância focal f da câmera;
- a altura h entre o plano do pavimento e o plano da imagem;
- a função $d(t)$ que define o tipo de função de mapeamento no plano da imagem.

Ou seja, para o projeto do espelho de resolução horizontal precisa-se saber qual a altura do plano da imagem; qual a distância focal da câmera utilizada (f) e, além destes fatores, qual a função de mapeamento desta dimensão no plano da imagem, dada por $d(t)$.

Câmera convencional

Para ter uma relação linear entre a coordenada do ponto no pavimento e a coordenada do ponto no plano da imagem a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$d(\mathbf{r}) = a\mathbf{r} + b \quad (4.17)$$

Substituindo a eq. (4.17) em (4.16) a coordenada no plano da imagem $\mathbf{r}$ é substituída por t e a equação do perfil do espelho é resolvida para o vetor t (pontos do espelho).

A relação entre t e $\mathbf{r}$ é obtida por projeção perspectiva, dada por:

$$\mathbf{r} = \frac{f}{F(t)-f} t \quad (4.18)$$

Portanto, a eq. (4.18) é substituída na eq. (4.17) e calculada para cada ponto do espelho. Em seguida é calculado o valor de $d(\mathbf{r})$ e é substituído na eq. (4.16), que é resolvida numericamente.

Para cada ponto t estes passos são resolvidos até t ser igual ao raio do espelho, quando finalmente os pontos do espelho são obtidos.

Câmera log-polar

Para a câmera log-polar a eq. (4.17) é substituída por

$$d(\mathbf{r}) = a \log \left(\frac{\mathbf{r}}{\mathbf{r}_0} \right) + b \quad (4.19)$$

onde $\mathbf{r}_0$ é o raio da fóvea, equivalente a 0.027273 cm. Novamente o mesmo processo para o cálculo dos pontos do espelho é feito, substituindo a eq. (4.19), calculada para cada ponto do espelho, na eq. (4.16).

4.2.3 - Espelho misto

Os espelhos de resolução vertical constante e de resolução horizontal constante têm campos visuais focalizando diferentes planos e podem ser utilizados para diferentes tarefas de navegação. Pode-se, para diferentes propósitos de navegação, projetar um espelho cuja parte mais interna focalize o pavimento do plano do chão e cuja parte mais externa focalize o plano vertical. Esse espelho contém duas seções e as equações que definem seu perfil são as equações que regem o perfil do espelho de resolução horizontal e de resolução vertical constantes.

4.3 - Aplicação de cálculo: algoritmo e interface gráfica

Uma interface gráfica foi construída através do GUIDE (Graphical User Interface) do MatLab para poder-se projetar diferentes perfis de espelho. As variáveis de projeto de perfil de espelho (tamanho do espelho, o raio do espelho interno, a distância focal da câmera e a distância dos planos vertical e horizontal) são colocadas como parâmetros de entrada, sendo definidas por um usuário. Um outro parâmetro utilizado como dado de entrada é o ângulo de visão. É preciso indicar os valores dos máximos e mínimos ângulos de visão requeridos para as duas seções do espelho. Esses valores são convertidos em distâncias pelos programas internos, as quais são usadas nos cálculos dos perfis dos espelhos.

Com a utilização da interface gráfica pode-se, facilmente, visualizar os perfis de espelhos obtidos para diferentes valores dos dados de entrada. Ao ser ativado o botão

para calcular o perfil do espelho uma série de programas e funções serão executadas e o perfil do espelho é mostrado na parte gráfica da interface. Podem ser calculados os perfis de espelhos para as câmeras convencional e log-polar.

As Figuras 4.18, 4.19 e 4.20 mostram exemplos feitos através da interface gráfica.

Figura 4.18 – Interface gráfica – espelho de resolução vertical.

Na parte central dessa interface são colocados os valores de entrada para o processamento dos cálculos de perfis de espelho.

Os gráficos da parte esquerda dessa interface referem-se ao perfil dos espelhos para as câmeras convencional e log-polar. No caso do espelho log-polar a parte do início do espelho, correspondente ao raio interno do sensor ($r_0 = 0.027273$ cm), não é utilizada para o mapeamento do espelho de resolução vertical.

Os gráficos da parte direita dessa interface referem-se a análise do perfil dos espelhos, avaliando-se o comportamento da taxa $(dh(t)/dr)_n / (dh(t)/dr)_i$ para diferentes distâncias, para os casos das câmeras convencional e log-polar.

A Figura 4.19 mostra o perfil do espelho de resolução horizontal obtido para as câmeras convencional e log-polar. Observe que foi colocado o valor "3" para o raio da fóvea, indicando que todo o espelho (raio do espelho = 3 cm) mapeará o pavimento no plano da imagem.

Figura 4.19 – Interface gráfica – espelho de resolução horizontal.

A Figura 4.20 mostra o perfil de um espelho misto e a análise da função de mapeamento. Nesse exemplo nota-se a interface entre as duas partes do espelho, chamadas na interface de fóvea e retina.

Figura 4.20 – Interface gráfica – espelho misto.

4.4 - Espelho hiperbólico

Apesar de terem sido estudados os espelhos de resolução constante para mapeamentos de planos lineares, para esse trabalho de construção de mapas de ambiente para navegação de robôs móveis utiliza-se um espelho com perfil hiperbólico. A utilização do espelho hiperbólico é explicada por esse possuir diversas características que fazem com que sua utilização como um sensor, em um sistema de navegação de robôs, apresente diversas vantagens. Essas características são:

- o espelho hiperbólico possui centro único de projeção;
- a imagem obtida é livre de distorção;
- as retas verticais do ambiente são projetadas como linhas radiais no plano da imagem;
- permite cálculo de visão estéreo de forma fácil.

Os itens a seguir apresentam o processo de formação da imagem em um sistema catadióptrico com espelho de perfil hiperbólico.

4.4.1 - Projeção de um ponto no espaço através de um espelho hiperbólico

O processo de formação da imagem através de um espelho hiperbólico é de fundamental importância. As equações que determinam como um ponto no espaço é projetado na imagem são necessárias, tanto no processo de correspondência para determinação da curva epipolar, como no processo de triangulação para determinação da distância dos objetos em relação ao robô.

A projeção de um ponto do espaço na imagem, obtida através de um espelho hiperbólico, pode ser representada por quatro transformações de coordenadas:

- transformação do ponto descrito no sistema de coordenadas do “mundo” para o sistema de coordenadas do espelho;
- transformação do ponto descrito no sistema de coordenadas do espelho para o sistema de coordenadas da câmera;
- transformação perspectiva do ponto descrito no sistema de coordenadas da câmera para o plano da imagem;
- transformação de escala do sistema de unidades métricas para um sistema de medidas em pixel.

A Figura 4.21 apresenta um esquema do espelho e da câmera com essas quatro transformações.

Figura 4.21 – Esquema do processo de formação da imagem através do sistema espelho hiperbólico – câmera.

Um ponto P no espaço é descrito em termos do referencial do mundo pelas suas coordenadas $\mathbf{p}_m = [x_m, y_m, z_m]^T$. Este ponto é descrito no sistema de coordenadas do espelho através de uma transformação de coordenadas, dada pela seguinte expressão:

$$\mathbf{p}_e = \mathbf{R}_{m,e}(\mathbf{p}_m - \mathbf{t}_e) \quad (4.24)$$

onde $\mathbf{R}_{m,e}$ é a matriz de rotação do sistema do mundo para o sistema do espelho e $\mathbf{t}_e$ é o vetor de translação do sistema do mundo para o sistema do espelho.

O raio de luz que passa pelo ponto P incide na superfície do espelho no ponto P_h . Como todo raio incidente na hipérbole é refletido passando pelo foco (centro do

sistema de coordenadas do espelho), o vetor $\mathbf{p}_h$ fornece a direção do ponto P_h . Esse ponto na superfície do espelho é obtido por uma função não linear que representa a equação da hipérbole, ou seja,

$$\mathbf{p}_h = \mathfrak{I}(\mathbf{p}_e)\mathbf{p}_e \quad (4.25)$$

onde a função $\mathfrak{I}(\mathbf{v})$, com $\mathbf{v}$ sendo um vetor de dimensão 3×1 , é dada por:

$$\mathfrak{I}(\mathbf{v}) = \frac{b^2(\pm cv_z + a \|\mathbf{v}\|)}{b^2 v_z^2 - a^2 v_x^2 - a^2 v_y^2} \quad (4.26)$$

com a , b e c sendo os parâmetros da hipérbole.

O ponto P_h é representado no sistema de coordenadas da câmera através da seguinte transformação de coordenadas:

$$\mathbf{p}_c = \mathbf{R}_{e,c}(\mathbf{p}_h - \mathbf{t}_c) \quad (4.27)$$

onde $\mathbf{t}_c$ é o vetor de translação dado por $[0, 0, -2c]^T$ e $\mathbf{R}_{e,c}$ é a matriz de rotação do sistema do espelho para o sistema da câmera.

O vetor $\mathbf{p}_c$, ou o ponto P_h , é descrito no plano da imagem através de uma projeção perspectiva descrita pela seguinte equação:

$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{p}_c}{z_c} \quad (4.28)$$

onde $\mathbf{u} = [u, v, 1]^T$ representa as coordenadas do ponto P_h no plano da imagem, e z_c é a coordenada z do ponto P_h descrito no sistema da câmera. Observa-se que nessa expressão foi utilizada uma distância focal, f , normalizada igual a 1 (um).

A imagem em pixel, descrita pelo vetor $\mathbf{q} = [q_u, q_v, 1]^T$, é obtida a partir das coordenadas métricas da imagem, $\mathbf{u} = [u, v]$, através de uma transformação de escala e translação, definida pela seguinte expressão:

$$\mathbf{q} = \mathbf{K}\mathbf{u} \quad (4.29)$$

onde $\mathbf{K}$ é uma matriz que contém alguns parâmetros intrínsecos da câmera. Essa matriz é dada por:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_u & 0 & q_{u0} \\ 0 & \mathbf{a}_v & q_{v0} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

onde, $\mathbf{a}_u$ e $\mathbf{a}_v$ são os fatores de escala da imagem na direção horizontal e vertical respectivamente, que incorporam a distância focal diferente de 1 (um), e q_{u0} e q_{v0} representam as coordenadas em pixels do centro da imagem.

O modelo completo, incluindo as quatro transformações de coordenadas efetuadas e a projeção do ponto na superfície do espelho, é descrito por:

$$\mathbf{q} = \mathbf{K} \frac{\mathbf{R}_{e,c}}{z_c} \left\{ \mathcal{S}[\mathbf{R}_{m,e}(\mathbf{p}_m - \mathbf{t}_e)] \mathbf{R}_{m,e}(\mathbf{p}_m - \mathbf{t}_e) - \mathbf{t}_c \right\} \quad (4.31)$$

Essa expressão fornece uma relação entre as coordenadas de um ponto no espaço, descritas em relação ao sistema de coordenadas do mundo, e as coordenadas deste ponto no plano da imagem, em pixels.

4.4.2 - Aplicação das expressões de projeção do espelho hiperbólico

Esse item apresenta uma análise do mapeamento do espelho hiperbólico, de um ponto do espaço para o plano da imagem.

Na medida em que o espelho apresenta simetria tangencial, somente um corte radial é utilizado nessa análise. Assim, a coordenada radial r representa a distância ao centro do sistema de coordenadas no plano xy , ou seja, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Além disso, assume-se que o sistema de coordenadas do mundo (x_m, y_m, z_m) e o sistema de coordenadas do espelho (x_e, y_e, z_e) coincidem e, por questão de simplicidade, renomeia-se o sistema de coordenadas do espelho (ou do mundo) simplesmente por (x, y, z) .

De acordo com a Figura 4.22 um ponto P qualquer do mundo pode ser descrito pelo vetor $\mathbf{p} = [h, d]^T$, onde d é a distância ao longo do eixo radial r do sistema de referência do espelho (centrado no foco da hipérbole, ponto F), e h é a altura. O raio incidente no espelho hiperbólico que passa pelo ponto P e pelo foco da hipérbole é refletido passando pelo ponto C (o outro foco da hipérbole) e projetado no ponto definido pelas coordenadas do vetor $\mathbf{q}$ no plano da imagem.

Figura 4.22 – Mapeamento do espelho hiperbólico.

Uma análise da forma como são mapeados os pontos do mundo no plano da imagem após serem projetados por um espelho hiperbólico pode ser realizada, através de considerações geométricas simples.

A posição do ponto P_h na superfície da hipérbole, descrita pelas suas coordenadas (r_h, z_h) , pode ser encontrada através da intersecção da reta incidente no espelho que passa pelo ponto P com a hipérbole.

A reta incidente no espelho que passa por P é descrita por:

$$z = \frac{h}{d} r \quad (4.32)$$

A equação da hipérbole com centro em F é representada por:

$$\frac{(z+c)^2}{a^2} - \frac{r^2}{b^2} = 1 \quad (4.33)$$

onde a e b são parâmetros da hipérbole e $2c$ é a distância entre os focos (pontos F e C).

Substituindo a eq. (4.32) em (4.33) e fazendo $r = r_h$ obtém-se:

$$r_h = \frac{db^2}{h^2b^2 - a^2d^2} \left(-hc + a\sqrt{h^2 + d^2} \right) \quad (4.34)$$

Agora, substituindo a eq. (4.34) na eq. (4.32) encontra-se a correspondente coordenada z_h , dada por:

$$z_h = \frac{hb^2}{h^2b^2 - a^2d^2} \left(-hc + a\sqrt{h^2 + d^2} \right) \quad (4.35)$$

O ponto (r_h, z_h) na superfície da hipérbole é mapeado no plano da imagem através de uma projeção perspectiva, resultando em:

$$\mathbf{r} = \frac{f r_h}{(2c + z_h)} \quad (4.36)$$

onde $\mathbf{r}$ é a coordenada radial no plano da imagem, dada por,

$$\mathbf{r} = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4.37)$$

com u e v sendo as coordenadas cartesianas métricas no plano da imagem, como definido anteriormente.

A expressão (4.36) fornece o mapeamento do ponto P no plano da imagem realizada por reflexão de um espelho hiperbólico e projeção perspectiva.

Na medida em que a eq. (4.36) é uma expressão complexa de d e h , a sua análise é mais simples e mais fácil de entender através de gráficos. Dois casos são analisados: 1) mapeamento de uma parede localizada a uma distância fixa d centrada no espelho; e 2) mapeamento do chão localizado a uma distancia fixa h do espelho. Para cada um desses dois casos, dois mapeamentos são realizados: um para curtas distâncias do espelho (da ordem de 1 metro) e outro para distâncias maiores (da ordem de 4 metros).

As Figuras 4.23 e 4.24 apresentam o mapeamento de uma parede localizada a distancia de 1m e 4m, respectivamente.

Figura 4.23 – Mapeamento de uma parede localizada a uma distância de 1m do centro do espelho.

Figura 4.24 – Mapeamento de uma parede localizada a uma distância de 4m do centro do espelho.

Nota-se que com o afastamento da parede a projeção dos raios incidentes na hipérbole irão incidir em posições distintas no plano da imagem (superiores as da parede mais próxima), exceto o ponto $h = 0$, que é o raio incidente na altura do foco da hipérbole. Todo o mapeamento é realizado levando em consideração a equação da hipérbole.

As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam d em função de r para h constante, que é o caso do mapeamento do chão.

Figura 4.25 – Mapeamento de um plano horizontal localizado a uma distância de 0,5m abaixo do centro do espelho.

Figura 4.26 – Mapeamento de plano horizontal localizado a uma distância de 1,5m abaixo do centro do espelho.

CAPÍTULO 5 - IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE VISÃO ESTÉREO OMNIDIRECIONAL

O sistema catadióptrico omnidirecional é composto por uma câmera e um espelho hiperbólico, como mostrado na Figura 5.1. Esse sistema é montado sobre um robô móvel e, com uma pequena translação do robô, adquire-se a segunda imagem para a composição do par de imagens que formam o sistema estéreo omnidirecional.

Figura 5.1 - Sistema Catadióptrico

A Figura 5.2 mostra o perfil do espelho hiperbólico.

Figura 5.2 - Espelho Hiperbólico

O sistema estéreo omnidirecional é composto pela aquisição de duas imagens omnidirecionais. Primeiramente, com o robô em uma dada posição inicial, adquire-se a primeira imagem, mostrada pela Figura 5.3. Em seguida, após uma translação de 20 cm o robô adquire outra imagem do ambiente, mostrada na Figura 5.4.

Figura 5.3 – Primeira imagem adquirida pelo robô.

Figura 5.4 – Imagem adquirida pelo robô após translação de 20cm.

Para a obtenção de distâncias do robô aos objetos é necessário adquirir duas imagens. O processo de visão estéreo (NACCACHE e HACHIYA, 2001) e (CORRÊA, DECCÓ e OKAMOTO, 2003) se baseia em selecionar características em uma imagem, procurar na segunda imagem a característica correspondente a esta selecionada e, pela triangulação, calcular a distância ao ponto no ambiente. Essas três etapas constituem o sistema estéreo.

O sistema de processamento de imagens do sistema de visão catadióptrico omnidirecional estéreo foi desenvolvido no ambiente visual KHOROS. O KHOROS é um programa computacional de interface gráfica. A grande vantagem de sua utilização é permitir visualizar em janelas as etapas de processamento implementadas através de rotinas escritas na linguagem C e visualizar as imagens resultantes de cada etapa, tais como as imagens mostradas nas Figuras 5.3 e 5.4. Além disso, o KHOROS fornece funções que implementam algoritmos básicos de processamento de sinais e de imagens, facilitando o desenvolvimento de novos aplicativos.

A Figura 5.5 apresenta a interface do programa desenvolvido no ambiente visual KHOROS contendo as três etapas de processamento de visão estéreo.

Figura 5.5 – Diagrama de blocos representando o processo de cálculo desenvolvido no ambiente visual KHOROS.

As etapas de processamento representadas na Figura 5.5 estão detalhadas a seguir.

5.1 - Extração de características

A primeira etapa do sistema de visão estéreo é a etapa de extração de características. Nesse trabalho, as características selecionadas para o processo de correlação são as quinas dos objetos presentes do ambiente. Devido a uma particularidade de projeção do espelho hiperbólico, as retas verticais do ambiente são projetadas como linhas radiais no plano da imagem omnidirecional. Essa particularidade permite a extração das retas radiais da imagem e, posteriormente, os pontos de extremidades das retas.

Inicialmente as bordas das imagens são extraídas utilizando-se o operador de Roberts, que consiste em uma técnica de processamento de imagens digitais. O operador de Roberts consiste de duas máscaras de dimensão 2x2 pixels, uma para detecção de bordas com inclinação de 45° com a horizontal ($\mathbf{M}_{45}$) e outra para bordas com inclinação de -45° com a horizontal ($\mathbf{M}_{-45}$), definidas por:

$$\mathbf{M}_{45} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

e

$$\mathbf{M}_{-45} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Realiza-se a convolução dessas duas máscaras com a imagem omnidirecional. O resultado é uma imagem, cujas regiões com limites bem definidos na imagem original, terão tons de cinza alto (valores que se aproximam do branco) e cujas regiões, de limites suaves na imagem original, terão tons de cinza baixos. As regiões da imagem original com tons de cinza constante, têm como resultado o menor tom de cinza (valores que se aproximam do preto).

Obtêm-se uma imagem em tons de cinza com as bordas presentes ressaltadas. Cada pixel da nova imagem é calculado segundo a seguinte expressão:

$$I'(i, j) = \sqrt{(I(i, j) - I(i+1, j+1))^2 + (I(i+1, j) - I(i, j+1))^2} \quad (5.3)$$

onde $I(i, j)$ é a intensidade luminosa do pixel (i, j) da imagem omnidirecional original e $I'(i, j)$ é a intensidade luminosa do pixel (i, j) da imagem que contém as bordas ressaltadas.

A imagem resultante do operador Roberts é então binarizada, segundo um determinado limiar de acordo com a eq. (5.4).

$$I_B(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{se } I'(i, j) \geq T \\ 0, & \text{se } I'(i, j) < T \end{cases} \quad (5.4)$$

onde $I_B(i, j)$ é a intensidade luminosa do pixel (i, j) da imagem binarizada e T é um limiar escolhido empiricamente.

Um exemplo de imagem resultante dos processos de extração de bordas e binarização é vista na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Imagem resultante após a extração de características e a binarização.

Após a extração das linhas radiais da imagem omnidirecional binarizada, é realizado um processamento sobre essas para a extração das quinas.

O processo consiste em percorrer a imagem omnidirecional binarizada e selecionar a seqüência de pixels de valor 1 segundo cada direção angular. Aqui utiliza-se uma variação angular igual a um oitavo de grau ($1/8^\circ$), escolhido empiricamente. A projeção de uma reta no plano da imagem, onde os pixels estão dispostos num arranjo retangular, pode ocupar pixels segundo uma distribuição não retilínea para uma dada direção angular. Assim, um processamento é necessário para a extração das extremidades das linhas radiais da imagem omnidirecional, os quais sejam os pontos representativos das quinas dos objetos presentes no ambiente.

O processamento utilizado consiste em analisar se os segmentos de reta encontrados em cada direção pertencem ou não ao mesmo segmento de reta. Esse processo é realizado utilizando-se geometria analítica e obtém-se apenas um par de pontos para cada reta.

Sendo a equação de uma reta dada por:

$$\mathbf{p}_x = \mathbf{p}_A + \lambda \mathbf{v} \quad (5.5)$$

onde $\mathbf{p}_A$ é um vetor com as coordenadas de um ponto A de referência da reta e $\mathbf{p}_x$ é um vetor com as coordenadas de um ponto X qualquer dessa reta, $\mathbf{v}$ é um vetor unitário que define a direção da reta e λ é uma constante. Seja um ponto B onde se deseja verificar se pertence ou não à mesma reta do ponto A . O ponto B pertence à reta se ao substituir suas coordenadas na equação da reta (eq. 5.5) no lugar de $\mathbf{p}_x$ a igualdade for obedecida. Contudo, no algoritmo computacional, essa igualdade é transformada na seguinte desigualdade:

$$|(\mathbf{p}_B - \mathbf{p}_A) - \lambda \mathbf{v}| \leq \epsilon \quad (5.6)$$

onde ϵ é a tolerância da comparação, assumida como sendo igual a 0,8 pixel, e $\mathbf{p}_B$ é o vetor que contém as coordenadas do ponto B . Dessa forma, o ponto B é considerado pertencente à mesma reta se a desigualdade da eq. (5.6) for obedecida.

O algoritmo percorre os 360° da imagem omnidirecional binarizada e para cada $1/8^\circ$ de ângulo percorrido, caso encontre uma reta, registra a posição, em pixel, do

primeiro e do último '1'. O valor da posição desses dois pontos são extraídos para uma tabela, os quais representam as quinas dos objetos do ambiente.

Como mencionado, nesse trabalho utilizam-se as quinas dos objetos presentes no ambiente e não as bordas. A razão de se utilizar as quinas é que o processo de correspondência produz melhores resultados para pontos de junções do que pontos de bordas, já que seu princípio de funcionamento baseia-se na distinção entre os pixels de uma janela na vizinhança do ponto candidato. Trabalhando com as quinas restringe-se a busca da correspondência.

A imagem resultante, conforme mostrada na Figura 5.7, apresenta o resultado dessa etapa de processamento de extração das quinas dos objetos da imagem omnidirecional. Os pontos marcados representam as quinas dos objetos presentes no ambiente.

Figura 5.7 – Resultado da extração de características – quinas dos objetos.

5.2 - Correspondência

Após o processo de extração de características realizado nas duas imagens omnidirecionais, passa-se para o processo de correspondência. Este processo, como

visto na Figura 5.3, contém duas partes principais: o cálculo das curvas epipolares e a correlação de pontos. Esses dois cálculos são detalhados a seguir.

Curva epipolar

De acordo com a geometria estéreo os pontos característicos selecionados na primeira imagem geram uma curva epipolar na segunda imagem, o que reduz o problema da busca bidimensional (imagem) para o caso unidimensional (curva epipolar) (FAUGERAS, 1993). Primeiramente, para a geração dessa curva, é necessário calcular a projeção de cada ponto do espaço no espelho, ou seja, pontos P_h 's.

A geometria perspectiva de um sistema de duas câmeras (estéreo convencional) assegura para cada ponto selecionado na imagem 1, $\mathbf{q}_1$, com coordenadas em pixel, é gerada uma linha epipolar $\mathbf{l}_2$ na segunda imagem. A linha epipolar $\mathbf{l}_2$ é relacionada com o ponto $\mathbf{q}_1$ através da seguinte equação:

$$\mathbf{l}_2 = \mathbf{Q}\mathbf{q}_1 \quad (5.7)$$

onde $\mathbf{Q}$ é a chamada matriz fundamental (FAUGERAS, 1993).

A expressão matemática para a geometria epipolar é dada por:

$$\mathbf{q}_2^T \mathbf{Q} \mathbf{q}_1 = 0 \quad (5.8)$$

e prediz que o vetor $\mathbf{t}$ conectando os centros de projeção das duas câmeras C_1 e C_2 são coplanares com os vetores $\mathbf{q}_1$ e $\mathbf{q}_2$. Essa equação relaciona os vetores $\mathbf{q}_1$ e $\mathbf{q}_2$ pela matriz fundamental $\mathbf{Q}$, que envolve a projeção perspectiva.

Essa mesma relação pode ser escrita para o caso omnidirecional, cuja representação geométrica está apresentada na Figura 5.8, através da matriz essencial ($\mathbf{E}$), sendo assim:

$$\mathbf{p}_{h2}^T \mathbf{E} \mathbf{p}_{h1} = 0 \quad (5.9)$$

onde $\mathbf{p}_{h1}$ e $\mathbf{p}_{h2}$ são os vetores que contém as coordenadas de posição dos pontos P_{h1} e P_{h2} .

Figura 5.8 – Geometria epipolar omnidirecional.

De acordo com a Figura 5.8, a coplanaridade dos vetores $\mathbf{t}$, $\mathbf{p}_{h1}$ e $\mathbf{p}_{h2}$ pode ser descrita por:

$$\mathbf{p}_{h2} \mathbf{R} (\mathbf{t} \wedge \mathbf{p}_{h1}) = 0 \quad (5.10)$$

onde $\mathbf{R}$ é a matriz de rotação entre os sistemas de coordenadas, centrado nos dois espelhos e o símbolo $\wedge$ denota produto vetorial.

Definindo $\mathbf{S}$ como sendo a matriz de translação anti-simétrica dada por:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

de forma que $\mathbf{t} \wedge \mathbf{p}_{h1} = \mathbf{S}\mathbf{p}_{h1}$, pode-se escrever:

$$\mathbf{p}_{h2}^T \mathbf{R} \mathbf{S} \mathbf{p}_{h2} = 0 \quad (5.12)$$

Assim, finalmente

$$\mathbf{p}_{h2}^T \mathbf{E} \mathbf{p}_{h1} = 0 \quad (5.13)$$

onde a matriz $\mathbf{E} = \mathbf{R}\mathbf{S}$ é a matriz essencial. A eq. (5.13) descreve a relação entre os vetores $\mathbf{p}_h$'s englobando os efeitos da rotação e translação dos sistemas de coordenadas dos dois espelhos.

Cada plano epipolar (gerado por quaisquer $\mathbf{t}$ e $\mathbf{p}_{h1}$) intersecta o espelho formando uma curva epipolar cuja geometria é uma cônica. Essa cônica é projetada para o plano da imagem através de uma projeção perspectiva. Nota-se que o formato da curva epipolar depende da transformação de coordenadas entre os sistemas de coordenadas dos dois espelhos.

Para um ponto $\mathbf{q}_1$ selecionado no primeiro plano da imagem, a cônica gerada, no segundo plano da imagem, é dada por:

$$\mathbf{q}_2^T \mathbf{A}_2(\mathbf{E}, \mathbf{q}_1) \mathbf{q}_2 = 0 \quad (5.14)$$

onde $\mathbf{A}_2(\mathbf{E}, \mathbf{q}_1)$ é uma função não linear da matriz essencial $\mathbf{E}$, do ponto $\mathbf{q}_1$ e dos parâmetros de calibração das câmeras e do espelho. A matriz $\mathbf{A}_2(\mathbf{E}, \mathbf{q}_1)$ é obtida segundo o procedimento apresentado a seguir. A intersecção do espelho (hipérbole) com a reta que une os focos das hipérboles (F_1, F_2), e que corresponde ao vetor translação, $\mathbf{t}$, gera dois pontos que, projetados no plano imagem, são chamados de epipolos. Esses pontos são denotados por e_1 e e_2 conforme a Figura 5.8. Toda curva epipolar passa pelos epipolos.

Para determinar a curva epipolar é preciso calcular a posição dos epipolos. O plano epipolar é descrito pelos vetores $\mathbf{p}_{h1}$, $\mathbf{t}$ e o foco do espelho F_1 . A normal a este plano epipolar, descrito em termos das coordenadas do primeiro espelho, é dada por:

$$\mathbf{n}_1 = \mathbf{t} \wedge \mathbf{p}_{h1} \quad (5.15)$$

O vetor normal $\mathbf{n}_1$ descrito em termos das coordenadas do segundo espelho, é expressos por:

$$\mathbf{n}_2 = \mathbf{R}\mathbf{n}_1 = \mathbf{R}(\mathbf{t} \wedge \mathbf{p}_{h1}) = \mathbf{R}\mathbf{S}\mathbf{p}_{h1} = \mathbf{E}\mathbf{p}_{h1} \quad (5.16)$$

A curva epipolar na imagem 2 corresponde à projeção no plano da imagem da intersecção do plano definido pela normal $\mathbf{n}_1$ com a hipérbole 2. Assim, sendo o plano epipolar perpendicular a $\mathbf{n}_1$ é descrito por:

$$px + qy + sz = 0 \quad (5.17)$$

Isolando a coordenada z dessa equação e substituindo na seguinte expressão,

$$\frac{(z + \sqrt{a^2 + b^2})}{a^2} - \frac{x^2 + y^2}{b^2} = 1, \quad (5.18)$$

que é a equação da hipérbole definida no sistema de coordenadas do espelho com centro no foco F_2 , resulta em uma equação polinomial que fornece a relação entre as coordenadas x e y da intersecção do plano epipolar com a hipérbole. Esta equação é dada por:

$$(p^2b^2 - s^2a^2)x^2 + 2pqb^2xy + (q^2b^2 - s^2a^2)y^2 - 2spb^2ex - 2sqb^2ey - s^2b^4 = 0 \quad (5.19)$$

Esta equação pode ser escrita na forma matricial, resultando na seguinte expressão:

$$\mathbf{p}_2^T \mathbf{A}_{x2} \mathbf{p}_2 = 0, \quad (5.20)$$

onde $\mathbf{p}_2 = [x, y, 0]^T$ e a matriz $\mathbf{A}_{x2}$ é dada por:

$$\mathbf{A}_{x2} = \begin{bmatrix} p^2b^2 - s^2a^2 & pqb^2 & -pseb^2 \\ pqb^2 & q^2b^2 - s^2a^2 & -qseb^2 \\ -pseb^2 & -qseb^2 & s^2b^4 \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

Admitindo-se que $s \neq 0$, ou seja, o eixo do espelho não está contido no plano epipolar, tem-se a seguinte relação linear entre $\mathbf{p}_{h2}$ e $\mathbf{p}_2$:

$$\mathbf{p}_{h2} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \frac{-px - qy}{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{-p}{s} & \frac{-q}{s} & 0 \end{bmatrix} \mathbf{p}_2 \quad (5.22)$$

O ponto $\mathbf{p}_{h2}$ pode ser calculado a partir da sua projeção $\mathbf{u}_2$ utilizando-se de princípios geométricos simples. O ponto $\mathbf{p}_{h2}$ é definido pela intersecção da hipérbole com a reta que une o ponto C_2 com o ponto $\mathbf{u}_2$. Contudo, feitas estas operações, o ponto $\mathbf{p}_{h2}$ estará descrito no sistema de coordenadas da câmera, assim, deve-se realizar então fazer uma transformação de coordenadas para o sistema do espelho. Este processo resulta na seguinte expressão para $\mathbf{p}_{h2}$ em função de $\mathbf{u}_2$:

$$\mathbf{p}_{h2} = \mathfrak{I}(\mathbf{R}_{e,c} \mathbf{u}_2) \mathbf{R}_{e,c} \mathbf{u}_2 + \mathbf{t}_c \quad (5.23)$$

Sabendo-se que o vetor de translação $\mathbf{t}_c$ aponta na direção de $-z$ e tem módulo igual a $2c$, substituindo a eq. (5.22) na eq. (5.23) resulta,

$$\mathfrak{I}(\mathbf{R}_{e,c}^T \mathbf{u}_2) \mathbf{R}_{e,c}^T \mathbf{u}_2 = \mathbf{p}_{h2} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{p}{s} & -\frac{q}{s} & 2c \end{bmatrix} \mathbf{p}_2 \quad (5.24)$$

Contudo, na medida em que $\mathfrak{I}(\mathbf{R}_{e,c}^T \mathbf{u}_2) \neq 0$, tem-se que:

$$\mathbf{p}_2 \approx \mathbf{N} \mathbf{R}_{e,c}^T \mathbf{u}_2 = \mathbf{N} \mathbf{R}_{e,c}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{q}_2 \quad (5.25)$$

onde

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{p}{2se} & \frac{q}{2se} & \frac{1}{2se} \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

Finalmente, substituindo a eq. (5.25) na eq. (5.20) tem-se:

$$\mathbf{q}_2^T \mathbf{K}^{-T} \mathbf{R}_{e,c} \mathbf{N}^T \mathbf{A}_{x2} \mathbf{N} \mathbf{R}_{e,c}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{q}_2 = 0 \quad (5.27)$$

que, ao ser comparada com a expressão (5.9), conclui-se que:

$$\mathbf{A}_2 = \mathbf{K}^{-T} \mathbf{R}_{e,c} \mathbf{B}_2 \mathbf{R}_{e,c}^T \mathbf{K}^{-1} \quad (5.28)$$

onde $\mathbf{B}_2$ é dado por:

$$\mathbf{B}_2 = \mathbf{N}^T \mathbf{A}_{x2} \mathbf{N} = \begin{bmatrix} -4s^2 a^2 e^2 + p^2 b^4 & pqb^4 & psb^2(-2e^2 + b^2) \\ pqb^4 & -4s^2 a^2 e^2 + q^2 b^4 & qsb^2(-2e^2 + b^2) \\ psb^2(-2e^2 + b^2) & qsb^2(-2e^2 + b^2) & s^2 b^4 \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

Aplicando a eq. (5.19) para o cálculo das curvas epipolares, obtêm-se, para o caso da imagem da Figura 5.3, as curvas em tom de verde apresentadas na Figura 5.9. Conforme mencionado, pode-se observar que todas as curvas passam pelos dois epipolos da imagem.

Figura 5.9 – Curvas epipolares sobre a segunda imagem omnidirecional.

Correlação

A correlação de pontos é um método baseado na correlação de intensidade luminosa. É feita a busca de pontos correlatos segundo uma janela. Os pixels dessa janela são comparados com os pixels de uma janela de mesmo tamanho centrada no ponto destacado da primeira imagem, que percorre a imagem maximizando a equação:

$$E(i_0, j_0) = \sum_{(i,j) \in W_k(i_0, j_0)} (I_1(i, j) - I_2(i, j))^2 \quad (5.30)$$

onde $I_1(i, j)$ é a intensidade de brilho do ponto (i, j) da janela W centrada no ponto (i_0, j_0) da imagem 1 e $I_2(i, j)$ é a intensidade de brilho do ponto (i, j) da imagem 2 pertencente à uma janela de mesmo tamanho da janela W .

Obtém-se a Figura 5.10 como resultado da busca dos pontos correspondentes realizado nas curvas epipolares mostradas na Figura 5.9.

Figura 5.10 – Pontos correspondentes às características selecionadas na Figura 5.7.

5.3 - Triangulação

Tendo os pares de pontos correspondentes a um mesmo ponto no espaço, é possível, por meio da construção geométrica de triângulos, determinar a distância do ponto no espaço da câmera. A Figura 5.11 apresenta um esquema do processo de triangulação utilizada para o cálculo da distância de um ponto genérico P . Observa-se que, de fato, no sistema omnidirecional estéreo não existem duas câmeras e dois espelhos. Existe somente um conjunto espelho-câmera que é transladado da posição 1 para a posição 2.

Figura 5.11 – Triangulação para cálculo da distância.

Referindo-se ao processo de projeção de um ponto no espaço através de um espelho hiperbólico, apresentado no capítulo IV.4.2, na análise efetuada nessa seção, adota-se as seguintes hipóteses:

- O sistema de coordenadas da câmera está alinhado com o sistema de coordenadas do espelho, ou seja, a rotação entre esses dois sistemas de coordenadas é nula. Assim, $\mathbf{R}_c = \mathbf{I}$, onde $\mathbf{I}$ é a matriz identidade;
- Na medida em que o robô utilizado somente se movimenta no plano e que o seu sistema de comando mantém constante a sua orientação, assume-se que o conjunto câmera-espelho na posição 1 está sempre alinhado com o conjunto câmera-espelho na posição 2, ou seja, a orientação dos sistemas de coordenadas dos dois espelho é a mesma e a translação é somente a translação do robô;

- Para o cálculo da posição da projeção do ponto P na superfícies dos dois espelhos assume-se que o sistema de coordenadas do mundo é coincidente com o sistema de coordenadas do espelho. Assim, a rotação do mundo para o espelho é a matriz identidade, ou seja, $\mathbf{R}_{m,e} = \mathbf{I}$, e a translação do sistema de coordenadas do mundo para o espelho é zero, ou seja, $\mathbf{t}_e = \mathbf{0}$.

Para que a primeira hipótese e as equações que descrevem o mecanismo de formação da imagem sejam válidas, a montagem do conjunto câmera–espelho deve garantir que o centro da câmera coincida com o segundo foco da hipérbole e que a câmera e o espelho estejam corretamente alinhados. O ajuste do conjunto câmera-espelho na posição correta é realizado pelo procedimento sugerido por SVOBODA (1997), ou seja, pela movimentação da câmera até que a imagem do raio externo do espelho seja projetada na imagem em um círculo de raio $r_{máx}$. Sendo $r_{máx}$ calculado através da eq. (5.31)

$$r_{máx} = \frac{t_{máx}}{F(t_{máx}) + 2c} \quad (5.31)$$

onde $t_{máx}$ é o raio máximo do espelho e $F(t_{máx})$ é a altura do espelho correspondente ao seu raio máximo.

Para calcular a distância de um ponto P no espaço, primeiramente, tem-se que obter a posição da projeção desse ponto nos dois espelhos, ou seja, obter os pontos P_{h1} e P_{h2} . Na medida em que o espelho apresenta simetria tangencial, somente um corte radial pode ser utilizado para se determinar esses pontos.

A posição do ponto P_{h1} , descrita pelas suas coordenadas r_{Ph1} e z_{Ph1} , pode ser encontrada através da intersecção do raio de luz que reflete na superfície do espelho em P_{h1} , passa pelo foco C_1 e projeta na posição $\mathbf{q}_1$ no plano da imagem 1, com a superfície do espelho. A reta que descreve o raio refletido pelo ponto P_{h1} é dada por:

$$z = \frac{r}{\|\mathbf{u}_1\|} - 2c \quad (5.32)$$

onde c é a excentricidade do espelho hiperbólico e $\|\mathbf{u}_1\|$ é a norma do vetor de coordenadas métricas normalizadas da projeção do ponto P_{h1} na imagem 1 (ver seção IV.4.2).

A equação da superfície do espelho é descrita pela hipérbole expressa na eq. (4.29). A intersecção da reta dada pela eq. (5.32) com a eq. (4.29) é o ponto P_{h1} , cujas coordenadas podem ser obtidas por meio da substituição da eq. (5.32) na eq. (4.29), resultado nas eq. (5.33) e (5.34).

$$r_{Ph1} = \frac{\frac{c}{\|\mathbf{u}_1\|} \pm \sqrt{\frac{c^2}{\|\mathbf{u}_1\|^2} - \left[\frac{1}{\|\mathbf{u}_1\|^2} - \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right] b^2}}{\left[\frac{1}{\|\mathbf{u}_1\|^2} - \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right]} \quad (5.33)$$

$$z_{Ph1} = \frac{r_{h1}}{\|\mathbf{u}_1\|} - 2c \quad (5.34)$$

onde a e b são parâmetros do espelho hiperbólico. Observa-se que as coordenadas r_{Ph1} e z_{Ph1} estão descritas no sistema de coordenadas do espelho 1.

Similarmente para o ponto P_{h2} , tem-se:

$$r_{Ph2} = \frac{\frac{c}{\|\mathbf{u}_2\|} \pm \sqrt{\frac{c^2}{\|\mathbf{u}_2\|^2} - \left[\frac{1}{\|\mathbf{u}_2\|^2} - \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right] b^2}}{\left[\frac{1}{\|\mathbf{u}_2\|^2} - \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right]} \quad (5.35)$$

$$z_{Ph2} = \frac{r_{h2}}{\|\mathbf{u}_2\|} - 2c \quad (5.36)$$

onde $\|\mathbf{u}_2\|$ é a norma do vetor de coordenadas métricas normalizadas da projeção do ponto P_{h2} na imagem 2. Nota-se que as coordenadas r_{Ph2} e z_{Ph2} estão descritas no sistema de coordenadas do espelho 2.

As coordenadas cartesianas x_{Ph1} , y_{Ph1} , x_{Ph2} e y_{Ph2} dos pontos P_{h1} e P_{h2} podem ser obtidas através das coordenadas radiais r_{Ph1} e r_{Ph2} e dos ângulos azimutais das posições $\mathbf{q}_1$ e $\mathbf{q}_2$. Assim,

$$x_{Ph1} = r_{Ph1} \cos \mathbf{q}_1 \quad (5.37)$$

$$y_{Ph1} = r_{Ph1} \sin \mathbf{q}_1 \quad (5.38)$$

$$x_{Ph2} = r_{Ph2} \cos \mathbf{q}_2 \quad (5.39)$$

$$y_{Ph2} = r_{Ph2} \sin \mathbf{q}_2 \quad (5.40)$$

onde $\mathbf{q}_1$ e $\mathbf{q}_2$ são respectivamente os ângulos azimutais das projeções dos pontos P_{h1} e P_{h2} nas imagens 1 e 2.

Para obter a distância do ponto P ao ponto F_2 (centro do sistema de coordenadas do espelho 2) realiza-se o processo de triangulação. A Figura 5.12 apresenta uma vista da Figura 5.11 no plano xy .

Figura 5.12 - Triangulação no plano xy.

Por semelhança entre os triângulos $F_1X_1P_{h1}$ e F_1AP' e entre os triângulos $F_2X_2P_{h2}$ e F_2AP' tem-se as seguintes expressões:

$$\frac{x_{Ph1}}{y_{Ph1}} = \frac{D_{x1}}{D} \quad (5.41)$$

$$\frac{x_{ph2}}{y_{ph2}} = \frac{D_{x2}}{D} \quad (5.42)$$

onde D_{x1} é a distância $\overline{F_1A}$, D_{x2} é a distância $\overline{F_2A}$ e D é a distância $\overline{AP}$.

A distância entre os centros focais F_1 e F_2 é igual ao módulo do vetor de translação entre as duas câmeras, $\|\mathbf{t}\|$. Portanto,

$$\|\mathbf{t}\| = D_{x2} - D_{x1} \quad (5.43)$$

Substituindo a eq. (5.43) na eq. (5.41) e re-arranjando obtém-se:

$$\frac{x_{ph1}}{y_{ph1}} D + \|\mathbf{t}\| = D_{x2} \quad (5.44)$$

Substituindo a eq. (5.43) na eq. (5.41) resulta em uma expressão para a distância D .

$$D = \|\mathbf{t}\| \frac{y_{ph2}y_{ph1}}{y_{ph1}x_{ph2} - y_{ph2}x_{ph1}} \quad (5.45)$$

As distâncias D_{x1} e D_{x2} são calculadas, respectivamente, substituindo a eq. (5.45) nas eq. (5.41) e (5.42). As distâncias do robô ao centro do espelho nas posições 1 e 2, D_1 e D_2 respectivamente, são então obtidas pelas seguintes equações:

$$D_1 = \sqrt{D^2 + D_{x1}^2} = \sqrt{D^2 \left(1 + \frac{x_{ph1}^2}{y_{ph1}^2} \right)} \quad (5.46)$$

$$D_2 = \sqrt{D^2 + D_{x2}^2} = \sqrt{D^2 \left(1 + \frac{x_{ph2}^2}{y_{ph2}^2} \right)} \quad (5.47)$$

Ressalta-se que a triangulação foi realizada para um caso especial no qual a translação do robô coincide com o eixo x (Figura 5.12). Em um caso genérico onde a translação do robô envolve componentes na direção x e y , como mostra esquematicamente a Figura 5.13, as mesmas equações desenvolvidas para translação ao longo do eixo x podem ser utilizadas alterando-se, porém, o cálculo das

componentes x_{Ph1} , y_{Ph1} , x_{Ph2} e y_{Ph2} dos pontos P_{h1} e P_{h2} . Nesse caso essas componentes devem ser calculadas de forma considerar o ângulo de movimentação do robô, $\mathbf{g}$, de acordo com as seguintes equações.

$$x_{Ph1} = r_{Ph1} \cos(\mathbf{q}_1 - \mathbf{g}) \quad (5.48)$$

$$y_{Ph1} = r_{Ph1} \sin(\mathbf{q}_1 - \mathbf{g}) \quad (5.49)$$

$$x_{Ph2} = r_{Ph2} \cos(\mathbf{q}_2 - \mathbf{g}) \quad (5.50)$$

$$y_{Ph2} = r_{Ph2} \sin(\mathbf{q}_2 - \mathbf{g}) \quad (5.51)$$

com,

$$\mathbf{g} = \tan^{-1} \left(\frac{t_y}{t_x} \right) \quad (5.52)$$

Observa-se que as coordenadas x e y calculadas pelas eq. (5.48) a (5.51) não correspondem de fato às coordenadas cartesianas dos pontos P_{h1} e P_{h2} nos sistemas de coordenadas dos seus respectivos espelhos.

Com essas equações, para cada característica correspondida entre as imagens 1 e 2 é possível obter as distâncias entre a câmera nas posições 1 e 2 e a característica, dadas pelas distâncias D_1 e D_2 , respectivamente.

A Figura 5.14 apresenta um mapa de distâncias dos pontos correspondentes com relação ao robô para o caso das imagens adquiridas. Ressalta-se que as distâncias contidas no mapa de distâncias são as distâncias das quinas do ambiente em relação ao centro do espelho na posição 2.

Figura 5.13 - Esquema da movimentação do robô segundo um movimento com componentes nas direções x e y .

Figura 5.14 – Distância do robô às quinas dos objetos presentes no ambiente.

CAPÍTULO 6 - METODOLOGIA DESENVOLVIDA PARA A CONSTRUÇÃO DE MAPAS

A partir do sistema de visão omnidirecional estéreo obtém-se as posições das quinas dos objetos presentes no ambiente. As posições das quinas são dispostas em um mapa plano denominado mapa de distâncias, como o apresentado na Figura 5.14. Portanto, o mapa de distância é constituído por pontos que representam as posições das quinas de objetos no ambiente descritas em um sistema de coordenadas fixo no robô.

Cada mapa de distância é adquirido em relação à posição instantânea do robô, portanto, consiste em um mapa local do ambiente. A partir da aquisição de mapas locais, com o robô em posições distintas do ambiente, constrói-se um mapa global.

O processo de construção do mapa global consiste na incorporação dos mapas locais de forma a descrever as posições dos objetos segundo um único referencial, o referencial global. O sistema de coordenadas global pode tanto ser um referencial absoluto ou o referencial de um dos mapas locais adquirido. Nesse trabalho adota-se como referencial global o sistema de coordenadas do primeiro mapa local adquirido.

Nesse trabalho a construção do mapa global inicia-se com a aquisição do primeiro mapa local. Assim, as primeiras informações de posições dos objetos presentes no mapa global são as provenientes do primeiro mapa local. A cada novo mapa local adquirido, novas informações são obtidas e incorporadas ao mapa global.

Sendo assim, o processo de construção de mapas de ambiente consiste de, primeiramente, para cada mapa local adquirido, descrever os pontos do mapa global no sistema de referência do mapa local. Estando todos os pontos do mapa global descritos no sistema de referência do mapa local verifica-se a correspondência entre os pontos dos mapas. Ou seja, verifica-se, para cada ponto do mapa local, qual é o ponto correspondente do mapa global. Se o ponto do mapa local é correspondido a

um ponto do mapa global a informação de distância desse ponto é atualizada, se não, esse ponto é considerado como novo ponto e é incorporado no mapa global.

Assim, resumidamente, o processo de construção do mapa global é realizado em três etapas:

1. **Alinhamento:** o alinhamento de pontos entre os mapas consiste na descrição dos pontos do mapa global no sistema de referência do mapa local. Utiliza-se a transformação rígida com informação proveniente da odometria para o alinhamento entre os mapas;
2. **Correspondência:** utiliza-se a restrição de mínimo ângulo azimutal para a verificação de pontos correspondentes entre os mapas local e global. Para casos de múltiplas correspondências, ou seja, onde mais de um ponto do mapa local corresponde a um ponto do mapa global, utiliza-se a restrição de mínima distância entre os pontos;
3. **Integração:** a atualização e a incorporação da medida de distância do ponto é realizada descrevendo-se a coordenada do ponto no sistema de referência do mapa global.

O fluxograma da Figura 6.1 apresenta o processo de construção do mapa global a partir da aquisição dos mapas locais obtidos com o robô em diferentes posições. Após a aquisição do primeiro mapa de distâncias e inicialização do mapa global, inicia-se um ciclo onde o robô se movimenta pelo ambiente e adquire mapas de distâncias locais. Nesse ciclo, as informações de cada novo mapa local são incorporados ao mapa global através das etapas de alinhamento, correspondência e integração.

Figura 6.1 - Fluxograma do processo de construção do mapa global.

Descreve-se a seguir o desenvolvimento das três etapas implementadas para a construção de um mapa global do ambiente.

6.1 - Alinhamento

Nesse trabalho realiza-se o alinhamento dos pontos entre os mapas local e global descrevendo-se as posições dos pontos presentes no mapa global no sistema de coordenadas do mapa local. Para descrever os pontos do mapa global no sistema de

coordenadas do mapa local utiliza-se uma transformação de coordenadas baseada na informação de posição e orientação do robô provenientes da odometria. Os dados provenientes da odometria são as componentes do vetor translação (t_x, t_y) e a rotação do robô ($\mathbf{f}$) em relação ao eixo vertical.

Para o caso de um robô holonômico, tal como o utilizado nesse trabalho, assume-se que o erro de odometria é pequeno. O acionamento do robô é do tipo *sincrodrive* onde o robô possui tração e rotação nas suas três rodas simultaneamente, o que reduz problemas de escorregamento do robô. Esse fator contribui para que o erro de odometria seja pequeno em deslocamentos pequenos, tal como o efetuado pelo robô para a composição do sistema estéreo, equivalente a 200 mm. Dessa forma, utiliza-se os dados da odometria para definir as transformações de coordenadas entre os mapas locais e o mapa global admitindo-se que essa consideração não introduz erros significativos no processo de construção dos mapas.

Ao se enviar um comando de movimento para o robô, composto por uma translação no plano de movimento do robô e uma rotação com relação a posição anterior, o robô assume uma nova posição e orientação. Nessa nova posição e orientação, utilizando-se do sistema de visão estéreo omnidirecional, obtém-se um novo mapa local.

Cada ponto P_i do ambiente de navegação do robô pode ser descrito tanto no sistema de coordenadas do mapa local, como no sistema de coordenadas global. A relação entre as coordenadas de P_i descritas nos sistemas dos mapas global e local é determinada através da transformação rígida que descreve a rotação e translação do sistema de coordenadas global para o sistema de coordenadas local. Essa transformação rígida é definida pela eq.(6.1) a seguir:

$$\begin{bmatrix} x_{Pi}^G \\ y_{Pi}^G \\ z_{Pi}^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \mathbf{f} & -\sin \mathbf{f} & 0 \\ \sin \mathbf{f} & \cos \mathbf{f} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{Pi}^L \\ y_{Pi}^L \\ z_{Pi}^L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

onde $x_{P_i}^G, y_{P_i}^G$ e $z_{P_i}^G$ são as coordenadas do ponto P_i no sistema de coordenadas global e $x_{P_i}^L, y_{P_i}^L$ e $z_{P_i}^L$ são as coordenadas do ponto P_i no sistema de coordenadas local. A translação do robô é realizada no plano xy , portanto $t_z = 0$.

A eq. (6.1) pode ser escrita de forma mais concisa:

$$\mathbf{p}_i^G = \mathbf{R}\mathbf{p}_i^L + \mathbf{t} \quad (6.2)$$

onde $\mathbf{R}$ e $\mathbf{t}$ são, respectivamente, a matriz de rotação e o vetor de translação do sistema global para o sistema local, o vetor $\mathbf{p}_i^G$ contém as coordenadas do ponto P_i no sistema de coordenadas global e o vetor $\mathbf{p}_i^L$ contém as coordenadas do ponto P_i no sistema de coordenadas local.

Para realizar o processo de correspondência de pontos realiza-se o processo de alinhamento no sistema de referência de cada mapa local adquirido, assim, descrevem-se os pontos do mapa global nos sistemas de referência dos mapas locais. Ao se descrever os pontos do mapa global no sistema de coordenadas de cada mapa local está-se visualizando o ambiente segundo um novo ponto de vista e, com isso, evitando-se manter oclusos pontos que, segundo o sistema de coordenadas global, não são visualizados.

Para descrever os pontos do mapa global no sistema de referências de um determinado mapa local, inverte-se a eq. (6.2) obtendo-se o seguinte resultado:

$$\mathbf{p}_i^L = \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{p}_i^G - \mathbf{t}) \quad (6.3)$$

que mais detalhadamente é descrita através da eq. (6.4).

$$\begin{bmatrix} x_{P_i}^L \\ y_{P_i}^L \\ z_{P_i}^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \mathbf{f} & \sin \mathbf{f} & 0 \\ -\sin \mathbf{f} & \cos \mathbf{f} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} x_{P_i}^G \\ y_{P_i}^G \\ z_{P_i}^G \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (6.4)$$

A Figura 6.2 mostra um exemplo onde um ponto P_i é descrito no sistema de referência do mapa global (O_G - x_G y_G) pelo vetor $\mathbf{p}_i^G$ e no sistema de coordenadas do mapa local (O_L - x_L y_L) pelo vetor $\mathbf{p}_i^L$.

Figura 6.2: - Descrição do ponto P_i nos sistemas de coordenadas dos mapas global e local.

Observa-se que o comando de orientação do robô utilizado tem como objetivo manter fixa a orientação do sistema de visão omnidirecional estéreo, ou seja, manter $\mathbf{f} = 0^\circ$. Assim, tanto para a etapa de correspondência como para a etapa de integração (descritas nas próximas seções), assume-se $\mathbf{f} = 0^\circ$. Contudo, a metodologia desenvolvida considera que possa existir um pequeno erro de orientação do robô na etapa de correspondência.

6.2 - Correspondência

O resultado do alinhamento é a descrição de todos os pontos do mapa global no sistema de coordenadas do mapa local. Após o alinhamento, efetua-se a correspondência entre os pontos dos mapas global e local. O método utilizado

corresponde pontos utilizando um critério de proximidade angular. Assim, verifica-se para cada ponto do mapa local, Q_j , qual o ponto do mapa global cujo ângulo azimutal é mais próximo do ângulo azimutal de Q_j .

O critério da distância entre pontos é dependente do movimento do robô, visto que a distância do robô ao ponto, obtida pelo sistema estéreo, pode ser mais ou menos confiável para a correspondência, dependendo se o robô, respectivamente, se aproxima ou se afasta do ponto a ser correspondido. Sabe-se que o erro da distância obtida por um sistema de visão estéreo aumenta quadraticamente com a distância (ISHIGURO, YAMAMOTO e TSUJI, 1990), portanto, se é incluída uma função que engloba o erro de medida do sensor, pode-se utilizar o critério da distância como um bom critério de correspondência. Nessa tese, contudo, optou-se pela consideração de proximidade angular entre os pontos, deixando a correspondência independente do movimento do robô.

A primeira restrição utilizada no processo de correspondência é a restrição do espaço de pontos. Utilizam-se somente os pontos do mapa de distância omnidirecional mais próximos ao robô para cada direção angular. Nota-se que, para navegação de robôs móveis, a consideração dos pontos mais próximos ao robô pode ser utilizada para a implementação da estimativa de espaço livre de navegação. A distância do robô a cada ponto mais próximo pode ser interpretada como o espaço livre de navegação, em cada direção considerada. A partir da estimativa inicial de espaço livre pode-se implementar um planejamento de trajetórias simultaneamente com a construção de mapas, proporcionando uma navegação mais autônoma.

Assim, nesse trabalho considera-se somente os pontos mais próximos ao robô para cada intervalo de ângulo azimutal de $0,5^\circ$.

O intervalo angular de $0,5^\circ$ foi adotado porque corresponde à variação angular média para uma corda de perímetro igual a um pixel. A relação entre corda, raio e ângulo é dada pela seguinte expressão:

$$s = r\Delta\theta \quad (6.5)$$

onde r é o raio na imagem omnidirecional, s é a corda e Dq é o ângulo. Assumindo r como sendo o raio médio da imagem omnidirecional, que é igual a 120 pixels, para uma corda igual a 1 pixel, o ângulo Dq será igual a cerca de $0,5^\circ$.

Juntamente com o critério de mínimo ângulo azimutal, utiliza-se também, para a correspondência, o critério de ordem monotônica crescente.

A condição de ordem monotônica crescente garante que pontos do mapa local que possuem ângulo azimutal em ordem crescente, sejam correspondidos com pontos do mapa global que possuem ângulo azimutal que seguem a mesma ordem crescente. Essa condição é implementada ordenando-se os pontos do mapa local e do mapa global segundo ângulo azimutal crescente antes de se realizar a correspondência. Assim, a condição de ordem monotônica determina que se um ponto Q_j do mapa local corresponde a um ponto P_i do mapa global, então o ponto Q_{j+1} do mapa local (que tem ângulo azimutal maior do que o ponto Q_j) somente pode corresponder a um ponto P_{i+k} , com $k \geq 1$. Nota-se que ângulos azimutais com diferença absoluta menor do que $0,5^\circ$ são considerados iguais, para efeitos de verificação de ordem crescente.

O critério do mínimo ângulo azimutal para a seleção de um ponto P_i do mapa global que corresponde a um ponto Q_j do mapa local pode ser descrito pela seguinte equação:

$$j \text{ correspondente a } i = \arg \left\{ \min_{i=1, \dots, N_G} \left(\left| q_{Q_j}^L - q_{P_i}^L \right| \right) \right\} \quad j = 1, \dots, N_L \quad (6.6)$$

onde $q_{Q_j}^L$ refere-se ao ângulo azimutal do ponto Q_j referente ao eixo x do mapa local e $q_{P_i}^L$ refere-se ao ângulo azimutal do ponto P_i referente ao eixo x do mapa local, N_G é o número de pontos do mapa global e N_L é o número de pontos do mapa local.

Os ângulos azimutais $q_{Q_j}^L$ e $q_{P_i}^L$ são calculados de acordo com as seguintes equações:

$$q_{P_i}^L = \text{atan} \left(\frac{y_{P_i}^L}{x_{P_i}^L} \right) \quad (6.7)$$

e

$$\mathbf{q}_{Qj}^L = \text{atan}\left(\frac{y_{Qj}^L}{x_{Qj}^L}\right) \quad (6.8)$$

onde $x_{P_i}^L$ e $y_{P_i}^L$ são as coordenadas do ponto P_i descritas no sistema de coordenadas do mapa local, e x_{Qj}^L e y_{Qj}^L são as coordenadas do ponto Q_j descritas no sistema de coordenadas do mapa local.

A eq. (6.6) indica que para obter o ponto P_i correspondente ao ponto Q_j calcula-se a diferença absoluta entre o ângulo azimutal do ponto Q_j para os ângulos azimutais de todos os pontos P_i 's. A mínima diferença absoluta entre os ângulos $\mathbf{q}_{Qj}^L$ e $\mathbf{q}_{P_i}^L$, para $i = 1, \dots, N_G$, indicará qual é o ponto P_i correspondente ao ponto Q_j . Esse processo é efetuado para todos os pontos do mapa local.

Além de ter que obedecer o critério de mínimo ângulo para admitir que dois pontos P_i e Q_j são correspondentes, a diferença absoluta entre os seus ângulos azimutais tem que ser menor do que um valor máximo ($\theta_{\text{máx}}$), ou seja, $|\mathbf{q}_{Qj}^L - \mathbf{q}_{P_i}^L| < \theta_{\text{máx}}$. Esse valor máximo é determinado empiricamente. Alguns testes são analisados e mostrados no capítulo de resultados.

A Figura 6.3 ilustra um exemplo de correspondência onde se tem três pontos no mapa global (P_1 , P_2 e P_3) e quatro pontos no mapa local (Q_1 , Q_2 , Q_3 e Q_4). Nesse caso o critério de mínimo ângulo fornece as seguintes correspondências: Q_1 - P_1 , Q_2 - P_2 e Q_4 - P_3 . O ponto do mapa local Q_3 fica sem ser correspondido e, portanto, é considerado um novo ponto a ser incluído no mapa global, na integração.

Figura 6.3: - Caso de correspondência entre quatro pontos do mapa local com três pontos do mapa global. As diferenças de ângulos $|q_{Qj}^L - q_{Pi}^L|$, com $i = 1, 2, 3$, são utilizadas para a seleção do ponto P_i correspondente aos pontos Q_1, Q_2, Q_3 e Q_4 .

Após a correspondência de cada ponto entre os mapas utilizando-se como métrica o valor de mínimo ângulo azimutal, verifica-se a possibilidade de multiplicidade de correspondências, ou seja, mais do que um ponto do mapa local corresponde a um único ponto do mapa global. A multiplicidade de correspondência pode ocorrer devido a alguns fatores, como por exemplo, um erro de alinhamento de pontos, ou quando um ponto ocluído passa a ser visível.

Para eliminar multiplicidades de correspondência uma segunda condição é implementada para a correspondência de pontos. Essa condição é da unicidade, que assegura que um ponto do mapa global só pode ser correspondido a um único ponto do mapa local. Para garantir a unicidade de correspondência de pontos, o critério de mínima distância é implementado. Esse critério baseia-se na mínima distância para corresponder os pontos, selecionando um único ponto do mapa local Q_j para corresponder ao ponto do mapa global P_i em consideração, descartando as outras soluções de correspondência.

O critério da mínima distância pode ser descrito pela seguinte equação:

$$j \text{ correspond ente a } i = \arg \left\{ \min_{j \in C_i} \min (d_{PiQj}^L) \right\} \quad (6.9)$$

onde d_{PiQj}^L refere-se a distância do ponto Q_j ao ponto P_i e C_i é o conjunto dos pontos Q_j 's candidatos a correspondência com P_i .

A distância d_{PiQj}^L é calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$d_{PiQj}^L = \sqrt{(x_{Pi}^L - x_{Qj}^L)^2 + (y_{Pi}^L - y_{Qj}^L)^2} \quad (6.10)$$

A Figura 6.4 ilustra uma duplicidade na correspondência. Para esse caso, dois pontos, Q_1 e Q_2 do mapa local correspondem ao ponto P_1 do mapa global. As distâncias d_{P1Q1} e d_{P1Q2} são calculadas. A solução, segundo o critério da mínima distância entre os pontos, é corresponder o ponto Q_1 do mapa local ao ponto P_1 do mapa global.

Figura 6.4 - Distâncias d_{P1Q1} e d_{P1Q2} utilizadas para a eliminar multiplicidade de correspondência e, assim, selecionar um único ponto correspondente ao ponto P_1 .

6.3 - Integração

A construção do mapa global inicia-se com a aquisição do primeiro mapa local. Portanto, os pontos do mapa global P_i^G são equivalentes às coordenadas dos pontos do primeiro mapa local Q_i^L , dados por:

$$\mathbf{p}_i^G = \mathbf{q}_i^L, \text{ para } i = 1, \dots, N_1 \quad (6.11)$$

onde o subscrito i refere-se ao índice do ponto no mapa e N_1 é o número total de pontos do primeiro mapa adquirido. O sistema de coordenadas do mapa global é o sistema de coordenadas do primeiro mapa. Assim, as coordenadas dos pontos do primeiro mapa local são também as coordenadas iniciais dos pontos do mapa global.

À medida que novos mapas locais são adquiridos, novas informações são obtidas pelo sistema de visão omnidirecional estéreo. Essas informações são integradas ao mapa global num processo denominado de integração. O processo de integração incorpora novas medidas e atualiza as já existentes, resultando na construção do mapa global.

Para a construção do mapa global o processo inicial constitui-se no alinhamento entre mapas. Nesse primeiro processo descreve-se as coordenadas dos pontos do mapa global no sistema de coordenadas do mapa local. Prossegue-se então com o processo de correspondência, por fim descreve-se todos os pontos no sistema de coordenadas do mapa global para efetuar a integração. A transformação de coordenadas dos pontos do mapa local para o sistema de referência do mapa global é realizada utilizando-se a eq. (6.1).

Se no processo de correspondência, um ponto Q_j do mapa local corresponde a um ponto P_i do mapa global, a informação de posição desse ponto no mapa global é atualizada, caso contrário, o ponto é admitido como um ponto novo e é acrescentado ao conjunto de pontos que formam o mapa global.

Para a atualização da coordenada de um ponto P_i do mapa global utiliza-se a média dos valores das coordenadas desse ponto com os seus correspondentes Q_j de cada

mapa local já analisado, obtendo-se uma nova medida. As atualizações são computadas de forma que, tanto a nova informação a ser incluída, como as informações anteriores utilizadas nas atualizações passadas, tenham o mesmo peso para o cálculo da média. Ao se dar o mesmo peso no cálculo da média para todas as medidas, torna-se a integração das coordenadas de posição dos pontos, independente do movimento do robô. Portanto, pode-se considerar o erro de medida das posições dos pontos no ambiente, efetuada pelo sistema de visão estéreo omnidirecional, igual para qualquer medida.

Partindo-se da fórmula geral de uma média, pode-se descrever o processo de atualização de pontos de forma recursiva. A fórmula geral para o cálculo da média de N_i pontos é descrita pela eq. (6.12) (PRESS et al., 1988):

$$\bar{\mathbf{p}}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} \mathbf{p}_{i,k} \quad (6.12)$$

onde $\mathbf{p}_i$ é o vetor que contém as coordenadas do ponto P_i , $\bar{\mathbf{p}}_i$ é o vetor da posição média do ponto P_i calculada pelas n_i medidas de posição desse ponto, e o subscrito k refere-se à k -ésima medida.

A média do vetor de posição $\mathbf{p}_i$ equivale à média de cada coordenada do ponto P_i , ou seja, x_{Pi} , y_{Pi} e z_{Pi} . Portanto, por questões de simplicidade, realiza-se somente o desenvolvimento das equações do processo da atualização para a coordenada x_{Pi} , obtendo-se uma equação que também é aplicável para as coordenadas y_{Pi} e z_{Pi} .

Com finalidade de simplificar a notação, nos desenvolvimentos a seguir, os subscritos referentes aos pontos P_i e Q_i e os superescritos referentes a mapa global e local serão eliminados. Primeiramente, como os índices i e j se tornam iguais após a correspondência, utiliza-se somente o índice i no desenvolvimento das equações. Na medida em que as coordenadas dos pontos do mapa global, x_{Pi}^G , y_{Pi}^G e z_{Pi}^G , consistem em médias elas serão denotadas simplesmente por $\bar{x}_i$, $\bar{y}_i$ e $\bar{z}_i$. As coordenadas dos pontos dos mapas locais descritas no sistema de coordenadas do mapa global,

x_{Qi}^G, y_{Qi}^G e z_{Qi}^G , serão denotadas simplesmente por x_i, y_i e z_i . Dessa forma, a coordenada x de um ponto P_i do mapa global é calculada por:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} x_{i,k} \quad (6.13)$$

Inicialmente a coordenada x do ponto P_i do mapa global, $\bar{x}_{i,1}$, é dada por:

$$\bar{x}_{i,1} = x_{i,1}, \quad (6.14)$$

onde $x_{i,1}$ refere-se à coordenada x do primeiro ponto Q_i do primeiro mapa local.

A partir da eq. (6.13), a primeira atualização da coordenada x do ponto P_i , $\bar{x}_{i,2}$, é efetuada utilizando-se a média de duas medidas como descrito na eq. (6.15):

$$\bar{x}_{i,2} = \frac{x_{i,1} + x_{i,2}}{2} \quad (6.15)$$

onde $x_{i,2}$ refere-se à coordenada x do primeiro ponto Q_i de um mapa local correspondente a P_i , descrita no sistema de coordenadas do mapa global.

A segunda atualização dessa coordenada, $\bar{x}_{i,3}$, é dada por:

$$\bar{x}_{i,3} = \frac{x_{i,1} + x_{i,2} + x_{i,3}}{3} \quad (6.16)$$

onde $x_{i,3}$ refere-se à coordenada x do segundo ponto Q_j de um mapa local que corresponde a P_i descrita no sistema de coordenadas do mapa global. Substituindo (6.15) em (6.16), tem-se:

$$\bar{x}_{i,3} = \frac{2\bar{x}_{i,2} + x_{i,3}}{3} \quad (6.17)$$

Aplicando-se sucessivamente esse processo para novas atualizações, pode-se escrever a eq. (6.17) que pode ser implementada da seguinte forma:

$$\bar{x}_{i,n_i} = \frac{(n_i - 1)\bar{x}_{i,n_i-1} + x_{i,n_i}}{n_i} \quad (6.18)$$

Observa-se que $n_i - 1$ é igual ao número de atualizações realizadas na medida da coordenada x da posição do ponto P_i .

Equivalentemente, atualiza-se a coordenadas y do ponto P_i de acordo com a equação:

$$\bar{y}_{i,n_i} = \frac{(n_i - 1)\bar{y}_{i,n_i-1} + y_{i,n_i}}{n_i} \quad (6.19)$$

As eqs. (6.18) e (6.19) operam de forma recursiva, ou seja, a atualização das coordenadas de posição de um ponto P_i é realizada utilizando-se o valor atualizado anterior e o valor da nova medida. Essa implementação recursiva evita de se realizar o cálculo da somatória de todas as medidas a cada atualização.

Uma outra medida descritiva importante é a variância das coordenadas de posição dos pontos do mapa global, que quantifica a variação da medida em torno da média e demonstra a qualidade dos processos de obtenção dos mapas de distâncias e da correspondência. Conseqüentemente, demonstra também a qualidade do processo de construção de mapas desenvolvido nesse trabalho.

A cada nova atualização da coordenada de um ponto, calcula-se também a variância da medida atualizada. A variância do vetor de posição do ponto P_i após $n_i - 1$ atualizações, $\mathbf{Sp}_{i,n_i}$, é dada por:

$$\mathbf{Sp}_{i,n_i} = \frac{1}{(n_i - 1)} \sum_{k=1}^{n_i} (\mathbf{p}_{i,k} - \bar{\mathbf{p}}_{i,n_i})^2 \quad (6.20)$$

Similarmente ao desenvolvimento realizado para o cálculo da média, obtém-se a variância da coordenada x do ponto P_i , cuja expressão é facilmente estendida para a coordenada y .

O cálculo da variância da coordenada x do ponto P_i após $n_i - 1$ atualizações, $\Sigma x_{i,n_i}$, é realizado através da eq. (6.21).

$$\Sigma x_{i,n_i} = \frac{1}{(n_i - 1)} \sum_{k=1}^{n_i} (x_{i,k} - \bar{x}_{i,n_i})^2 \quad (6.21)$$

Abrindo o termo elevado ao quadrado, tem-se:

$$\Sigma x_{i,n_i} = \frac{1}{(n_i - 1)} \sum_{k=1}^{n_i} (x_{i,k}^2 - 2x_{i,k} \bar{x}_{i,n_i} + \bar{x}_{i,n_i}^2) \quad (6.22)$$

Separando a somatória em três termos obtém-se:

$$\Sigma x_{i,n_i} = \frac{1}{(n_i - 1)} \left[\sum_{k=1}^{n_i} x_{i,k}^2 - 2\bar{x}_{i,n_i} \sum_{k=1}^{n_i} x_{i,k} + n_i \bar{x}_{i,n_i}^2 \right] \quad (6.23)$$

Observa-se, através da eq. (6.23), que o cálculo da variância da coordenada x do ponto P_i depende somente das coordenadas x dos pontos dos mapas locais utilizadas para o cálculo da média da posição do mapa global e da última atualização da média da coordenada x .

A eq. (6.23) pode ser reescrita definindo-se duas novas variáveis da seguinte forma:

$$\Sigma x_{i,n_i} = \frac{1}{(n_i - 1)} \left[S_{2x} + x_{i,n_i}^2 - 2\bar{x}_{i,n_i} (S_{1x} + x_{i,n_i}) + n_i \bar{x}_{i,n_i}^2 \right] \quad (6.24)$$

onde, x_{i,n_i}^2 é a última medida da coordenada x do ponto do mapa local correspondente a P_i , e S_1 e S_2 são duas novas variáveis dadas por:

$$S_{1x} = \sum_{k=1}^{n_i-1} x_{i,k} \quad (6.25)$$

e

$$S_{2x} = \sum_{k=1}^{n_i-1} x_{i,k}^2 \quad (6.26)$$

A eq. (6.24) pode ser implementada recursivamente evitando-se, assim, o cálculo das somatórias a cada atualização.

Observa-se que, quando o mapa global é inicializado, tem-se $n_i = 1$ e $\bar{x}_{i,1} = x_{i,1}$, obtendo-se portanto uma variância indeterminada para a coordenada x dos pontos P_i , ou seja:

$$\Sigma x_{i,1} = \frac{1}{1-1} \sum_{k=1}^1 (x_{i,k} - \bar{x}_{i,1})^2 = \frac{1}{1-1} (\bar{x}_{i,1} - \bar{x}_{i,1})^2 = \text{indeterminado} \quad (6.27)$$

Similarmente, calcula-se a variância da coordenada y do ponto P_i de acordo com a seguinte equação:

$$\Sigma y_{i,n_i} = \frac{1}{(n_i - 1)} [S_{2y} + y_{i,n_i}^2 - 2\bar{y}_{i,n_i} (S_{1y} + y_{i,n_i}) + n_i \bar{y}_{i,n_i}^2] \quad (6.28)$$

onde,

$$S_{1y} = \sum_{k=1}^{n_i-1} y_{i,k} \quad (6.29)$$

e

$$S_{2y} = \sum_{k=1}^{n_i-1} y_{i,k}^2 \quad (6.30)$$

Como mencionado, a análise da variância das medidas atualizadas no mapa global demonstra a qualidade do processo de construção de mapas desenvolvido. Essa análise encontra-se no capítulo de resultados desse trabalho.

Os pontos do mapa local que não foram correspondidos aos pontos do mapa global são considerados pontos novos e, portanto, incluídos no mapa global. Dessa forma, obtém-se um mapa global com a inserção de novos pontos e atualização das posições dos pontos já existentes com as medidas obtidas pelos mapas locais.

6.4 - Sumário do Método de Construção de Mapas

A Tabela 6.1 mostra um resumo das hipóteses, critérios e restrições utilizadas nos processos efetuados para a construção de mapas de ambiente.

Tabela 6.1 - Restrições, condições e considerações implementadas no processo de construção de mapas do ambiente

Restrições, Condições e Considerações Implementadas no Processo de Construção de Mapas do Ambiente		
Alinhamento	Hipóteses	Dados provenientes da odometria; Admite-se erro máximo de odometria na orientação do robô
Correspondência	Restrições	Espaço restringido aos pontos mais próximos do robô em cada direção angular.
	Critérios e condições utilizados	(1) Mínimo Ângulo Azimutal entre os pontos: <ul style="list-style-type: none"> • Ordenamento; • Variação Máxima Angular. (2) Mínima Distância entre os pontos: <ul style="list-style-type: none"> • Unicidade.
Integração	Critérios utilizados	(1) Atualização dos pontos do mapa global: <ul style="list-style-type: none"> • Média (2) Incorporação de novas medidas.

CAPÍTULO 7 - RESULTADOS

7.1 - Robô móvel

A Figura 7.1 apresenta o robô móvel utilizado para a implementação dos sistemas de visão estéreo omnidirecional e de construção de mapas do ambiente.

O robô tem um formato cilíndrico, dividido em cinco níveis sobrepostos. Esquematicamente, no nível superior, encontra-se o sistema de visão omnidirecional catadióptrico, composto por uma câmera convencional apontada para o espelho hiperbólico, ambos no interior de um cilindro de acrílico.

Figura 7.1 – Robô móvel

Em um nível mais baixo encontra-se o sistema responsável pela comunicação externa – um *link* de rádio para sinal de vídeo e outro *link* de rádio *ethernet*, e o microcomputador padrão PC104 que faz a comunicação entre a rede local de computadores do laboratório e o controlador de controle de movimentos do robô.

As imagens obtidas pelo sistema de visão são processadas por um computador externo ao robô, que opera com sistema operacional Linux e que possui uma placa de aquisição de imagens (*framegrabber*) Matrox Meteor. A transmissão das imagens do robô para esse computador externo é feita através do *link* de rádio de vídeo. Neste computador externo são realizados os cálculos que são enviados para o controlador que realizará a movimentação do robô segundo as referências de velocidade de translação e posição angular das rodas do robô. Esses valores de referência são enviados do computador externo para o robô através do link de rádio *ethernet*. Essa comunicação é feita entre um *access point wireless* conectado com a rede local *ethernet*, e um *link* de rádio *ethernet* conectado com a interface de rede do PC104 embarcado no robô. O PC104, por sua vez, envia, através de uma interface serial RS-232c, os valores de referência para o hardware de controle interno do robô.

Em outro nível está o sistema mecânico de acionamento do robô realizado através de um sistema com dois motores e correias dentadas, chamado de *sincrodrive*, que permite o acionamento simultâneo das três rodas do robô, tanto para translação como para rotação. Este sistema de acionamento tende a minimizar escorregamentos entre as rodas e o solo. No nível inferior encontram-se as rodas e as baterias. Três rodas fazem o movimento do robô, as quais se movem simultaneamente para a locomoção em um plano. A translação é feita por um motor DC controlado em malha fechada com o auxílio de um *encoder*, e a rotação é feita por um motor de passo controlado em malha aberta. Todos os motores são acionados com interfaces tipo PWM.

7.2 - Resultados

O robô móvel assume posições distintas no ambiente adquirindo uma seqüência de imagens omnidirecionais. Para cada par de imagens constrói-se um mapa local, o qual será integrado ao mapa global.

Os resultados do processo de construção de mapas de ambiente são verificados através de simulações do algoritmo para duas situações: (1) caso virtual e (2) caso real. Os ambientes virtuais foram criados com o software de *Raytracing* Pov-ray [Pov-ray].

7.2.1 - Caso Virtual

Dois casos são simulados. No primeiro caso foram adquiridos 14 mapas de distâncias. O ambiente consta do robô, que se encontra na posição (0,0) [mm] e dois cubos, que se encontram nas posições (0,1000) [mm] e (600,1000) [mm] com relação ao robô. A Figura 7.2 mostra a trajetória realizada pelo robô para a aquisição das imagens omnidirecionais.

Figura 7.2 - Trajetória realizada pelo robô para a aquisição de imagens e composição dos mapas locais.

A Figura (7.3.a) mostra uma vista superior desse ambiente, gerada pelo simulador Pov-ray, e a Figura (7.3.b) apresenta a imagem omnidirecional desse ambiente adquirida pelo robô na posição inicial da trajetória. A Figura (7.3.c) mostra uma vista superior desse ambiente após o primeiro deslocamento do robô, que assume a posição (200,0). A Figura (7.3.d) apresenta a imagem omnidirecional adquirida na segunda posição da trajetória, (200,0).

Figura 7.3 - (a) Vista superior do ambiente, posição inicial; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô na posição inicial; (c) Vista superior do ambiente, segunda posição do robô; e (d) imagem omnidirecional adquirida pelo robô na segunda posição.

Ressalta-se que a imagem omnidirecional adquirida pelo robô é a imagem da projeção do ambiente no espelho hiperbólico. Por ser uma imagem gerada por um espelho é invertida em relação a imagem do ambiente.

A partir do processamento desse par de imagens omnidirecionais, pelo sistema de visão estéreo, obtêm-se o primeiro mapa de distâncias, mostrado na Figura 7.4.

Figura 7.4 - Primeiro mapa de distâncias.

Com a aquisição do primeiro mapa de distâncias inicia-se a construção do mapa global. Nota-se que a coordenada (0,0) da Figura 7.4 corresponde a posição (200,0) do robô. O referencial global é o referencial do primeiro mapa de distâncias obtido. A Tabela 7.1 apresenta as posições do robô ao longo da trajetória da Figura 7.2. Em cada nova posição o robô adquire uma imagem omnidirecional e, juntamente com a imagem anterior, calcula o mapa de distâncias. Para cada mapa de distâncias adquirido efetua-se a construção do mapa global.

Tabela 7.1 - Posições do robô ao longo da trajetória da Figura 7.2.

Posição	X [mm]	Y [mm]	Posição	X [mm]	Y [mm]
1	0	0	9	800	-400
2	200	0	10	600	-400
3	400	0	11	400	-400
4	600	0	12	200	-400
5	800	0	13	0	-400
6	1000	0	14	-200	-400
7	1000	-200	15	-400	-400
8	1000	-400	-	-	-

A Figura 7.5 apresenta, respectivamente, (a) a vista superior do ambiente, (b) a imagem omnidirecional adquirida pelo robô e (c) o mapa de distância correspondente, para a terceira posição do robô.

Figura 7.5 – (a) Vista superior do ambiente para a terceira posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

A seqüência seguinte de figuras ilustra as posições do robô descritas na Tabela 7.1.

Figura 7.6 - (a) Vista superior do ambiente para a quarta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.7 - (a) Vista superior do ambiente para a quinta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.8 - (a) Vista superior do ambiente para a sexta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.9 - (a) Vista superior do ambiente para a sétima posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.10 - (a) Vista superior do ambiente para a oitava posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.11 - (a) Vista superior do ambiente para a nona posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.12 - (a) Vista superior do ambiente para a décima posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.13 - (a) Vista superior do ambiente para a décima primeira posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.14 - (a) Vista superior do ambiente para a décima segunda posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.15 - (a) Vista superior do ambiente para a décima terceira posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.16 - (a) Vista superior do ambiente para a décima quarta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.17 - (a) Vista superior do ambiente para a décima quinta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Para cada mapa de distâncias adquirido efetuam-se os processos de alinhamento, correspondência e integração, para a obtenção do mapa global. No processo de correspondência, para admitir que um ponto do mapa local seja correspondente a um ponto do mapa global, é necessário que a variação máxima angular entre os pontos ($Dq_{máx}$), seja menor que um certo valor. Pontos que não estão dentro desse intervalo são admitidos como pontos novos e são incorporados ao mapa global. Para o mapa global construído, mostrado na Figura 7.18, considerou-se o valor de $Dq_{máx}$ igual a 3° . Nota-se que esse mapa apresenta as quinas dos objetos presentes no ambiente.

Considerou-se, para o mapa global construído, os pontos que foram atualizados mais que 3 vezes, esse valor é escolhido empiricamente. Essa consideração elimina a inclusão de ruídos, presentes na obtenção dos mapas de distâncias locais, no mapa global. Pontos espúrios (ruídos) não são visualizados em mapas subsequentes, sendo, portanto, caracterizados pelo pequeno número de atualizações.

A escolha do valor do número de atualizações é definida estabelecendo-se um compromisso entre a não inclusão de pontos reais ao mapa global, que em geral é caracterizado por um grande número de atualizações, e a inclusão de ruídos, que é caracterizada por um número pequeno de atualizações.

Figura 7.18 – Mapa global, $Dq_{m\acute{a}x} = 3^\circ$.

Nota-se que a posição (0,0) da Figura 7.18 corresponde ao referencial do mapa global (posição (200,0) do robô) e por isso as medidas das coordenadas x dos pontos do mapa global estão defasadas em ± 200 mm com relação a Figura 7.2 .

As coordenadas dos pontos do mapa global são dadas pela Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Coordenadas dos pontos do mapa global.

Ponto	X [mm]	Y [mm]
1	-70	905
2	-192	833
3	385	1032
4	419	828
5	530	878

Ao se considerar um maior valor para $Dq_{máx}$, aumenta-se o número de pontos candidatos para correspondência, assim, a possibilidade de um ponto ser correspondido aumenta, enquanto que a possibilidade de ser considerado um ponto novo diminui. Portanto, maiores valores de $Dq_{máx}$ resultam em mapas globais com menos pontos. A Figura 7.19 mostra um mapa global obtido, considerando-se $Dq_{máx}$ igual a 10° .

Figura 7.19 - Mapa global, $Dq_{máx} = 10^\circ$.

Observa-se que, com o aumento de $Dq_{máx}$, o ponto de coordenadas (385,1032) deixou de ser incluído no mapa global.

No processo de integração, cada ponto é atualizado utilizando-se a média da medida. O mapa global construído contém a informação das coordenadas dos pontos, sendo esta medida atualizada pelo valor da média. A média é obtida para o número de atualizações ocorridas na medida. Para ilustrar o resultado do processo de integração as Figuras 7.20 a 7.24 mostram a curva do desvio padrão de cada ponto da Tabela 7.2.

Figura 7.20 - Desvio padrão do ponto de coordenada (530,878).

Figura 7.21 – Desvio padrão do ponto de coordenada (419,828).

Figura 7.22 – Desvio padrão do ponto de coordenada (-70,905).

Figura 7.23 – Desvio padrão do ponto de coordenada (-192,833).

Figura 7.24 – Desvio padrão do ponto de coordenada (385,1032).

A Tabela 7.3 apresenta a posição de todos os pontos reais do ambiente e todos os pontos do mapa global obtidos através da metodologia desenvolvida, incluindo os desvios padrão, para $Dq_{máx}$ igual a 3°.

Tabela 7.3 – Coordenadas e desvios padrão dos pontos do mapa global para $Dq_{máx}$ igual a 3°.

Ponto	Posição real dos pontos		Posição calculada dos pontos	
	X [mm]	Y [mm]	X [mm]	Y [mm]
1	-200	1000	-192±25	833±25
2	-50	1000	-70±45	905±180
3	-200	1150	Ponto não visualizado	
4	-50	1150	Ponto não visualizado	
5	400	1000	419±200	828±65
6	550	1000	530±25	878±60
7	400	1150	385±40	1032±70
8	550	1150	Ponto não visualizado	

Nas coordenadas x dos pontos reais da Tabela 7.3 foi subtraído 200 mm para considerar a mudança de coordenadas entre o ambiente e o sistema do mapa global.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 7.3, observa-se que a menos de alguns casos, para a coordenada y , as posições reais dos pontos estão no intervalo de $\pm$ um desvio padrão das posições dos pontos calculados no mapa global. Esse resultado mostra a eficiência do processo desenvolvido de construção de mapas.

O segundo caso foi analisado com a aquisição de 17 mapas de distância. Esse ambiente virtual contém quatro objetos. Os objetos estão dispostos nas posições $(-100,5000)$, $(1200,2500)$, $(3000,2000)$ e $(-1000,-3000)$ do ambiente, conforme mostra a Figura 7.25, que apresenta um esquema do ambiente virtual com os objetos nas respectivas posições e a trajetória efetuada pelo robô. O robô se encontra na posição inicial $(200,800)$, marcada pelo triângulo.

Figura 7.25 - Trajetória realizada pelo robô: ponto inicial indicado pelo triângulo.

A Figura (7.26.a) mostra uma vista superior desse ambiente, gerada pelo simulador Pov-ray, e a Figura (7.26.b) apresenta a imagem omnidirecional desse ambiente adquirida pelo robô na posição inicial da trajetória. A Figura (7.26.c) mostra uma vista superior desse ambiente após o primeiro deslocamento do robô, que assume a posição (0,600). A Figura (7.26.d) apresenta a imagem omnidirecional adquirida na segunda posição da trajetória, (0,600).

Figura 7.26 - (a) Vista superior do ambiente, posição inicial do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô na posição inicial; (c) Vista superior do ambiente, segunda posição do robô; e (d) imagem omnidirecional adquirida pelo robô.

A partir do processamento desse par de imagens omnidirecionais, obtêm-se o primeiro mapa de distâncias, mostrado na Figura 7.27.

Figura 7.27 - Primeiro mapa de distâncias.

Com a aquisição do primeiro mapa de distâncias, obtido com relação a posição (0,600) do robô, inicia-se a construção do mapa global. O referencial global é o referencial do primeiro mapa de distâncias obtido. As posições das coordenadas x e das quinas desse mapa estão defasadas em ± 600 mm. A Tabela 7.4 apresenta as posições do robô, nas quais são adquiridas as imagens omnidirecionais para a obtenção dos mapas de distância, correspondente a trajetória da Figura 7.25.

Tabela 7.4 - Posições do robô ao longo da trajetória da Figura 7.25.

Posição	X [mm]	Y [mm]	Posição	X [mm]	Y [mm]
1	200	800	10	400	-800
2	0	600	11	600	-800
3	-200	400	12	800	-800
4	-400	200	13	1000	-800
5	-600	0	14	1200	-600
6	-400	-200	15	1400	-600
7	-200	-400	16	1600	-400
8	0	-600	17	1800	-200
9	200	-800	18	2000	0

A seqüência seguinte de figuras ilustra as posições do robô descritas na Tabela 7.4.

Figura 7.28 - (a) Vista superior do ambiente para a terceira posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.29 - (a) Vista superior do ambiente para a quarta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.30 - (a) Vista superior do ambiente para a quinta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.31 - (a) Vista superior do ambiente para a sexta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.32 - (a) Vista superior do ambiente para a sétima posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.33 - (a) Vista superior do ambiente para a oitava posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.34 - (a) Vista superior do ambiente para a nona posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.35 - (a) Vista superior do ambiente para a décima posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.36 - (a) Vista superior do ambiente para a décima primeira posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.37 - (a) Vista superior do ambiente para a décima segunda posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.38 - (a) Vista superior do ambiente para a décima terceira posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.39 - (a) Vista superior do ambiente para a décima quarta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.40 - (a) Vista superior do ambiente para a décima quinta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.41 - (a) Vista superior do ambiente para a décima sexta posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.42 - (a) Vista superior do ambiente para a décima sétima posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

Figura 7.43 - (a) Vista superior do ambiente para a décima oitava posição do robô; (b) imagem omnidirecional adquirida pelo robô; (c) Mapa de distâncias.

A partir do método de construção de mapas desenvolvido, obtém-se o mapa global do ambiente apresentado na Figura 7.44. Na construção desse mapa foram considerados o valor de 3° para a variação máxima angular entre os pontos ($Dq_{máx}$) e 3 para o número de atualizações do ponto.

Figura 7.44- Mapa global, $Dq_{máx} = 3^\circ$.

As Figuras 7.45 a 7.49 mostram o comportamento do desvio padrão de alguns pontos do mapa global, cujas coordenadas são descritas pela Tabela 7.5.

Tabela 7.5 – Coordenadas de alguns pontos do mapa global.

Ponto	X [mm]	Y [mm]
1	-286	-3368
2	567	4025
3	1115	2264
4	2888	1340
5	3631	22

Figura 7.45 - Desvio padrão do ponto (-286,-3368)

Nota-se que a quina (-286,-3368) do quarto cubo da Figura 7.25, contado no sentido horário, foi atualizada até o oitavo mapa local. A partir do nono mapa o valor do desvio padrão do ponto se mantém constante, indicando a convergência da medida decorrente do processo de atualização implementado.

Figura 7.46 - Desvio padrão do ponto (567,4025)

O ponto de coordenadas (567,4025) se refere ao primeiro cubo da Figura 7.25 e sofre grandes alterações até a aquisição do décimo mapa local, devido a mudanças de direção do robô. A medida de distância desse ponto tende a convergir após o décimo mapa, como mostra o histórico do desvio padrão.

Figura 7.47 - Desvio padrão do ponto (1115,2264)

Figura 7.48 - Desvio padrão do ponto (2888,1340)

Nota-se que o ponto (2888,1340) foi incorporado ao mapa global na integração do sétimo mapa local, indicando em que posição da trajetória o robô passou a visualizar esse ponto.

Figura 7.49 - Desvio padrão do ponto (3631,22)

Para o valor de $Dq_{máx}$ igual a 10° obteve-se o mapa global ilustrado na Figura 7.50.

Figura 7.50 - Mapa global, $Dq_{máx} = 10^\circ$.

O número de atualizações considerados é igual a 3, ou seja, o mapa ilustra os pontos do mapa global que foram atualizados mais que 3 vezes.

Nota-se que, diferentemente do caso anterior, o aumento do intervalo angular máximo ($Dq_{máx}$) não resulta em um mapa global com menos pontos. Isso mostra que há um compromisso entre o aumento de $Dq_{máx}$ e o número de atualizações do ponto a ser considerado para a inclusão no mapa global.

A Tabela 7.6 apresenta as coordenadas de posição de todos os pontos reais do ambiente e as coordenadas e desvios padrão de todos os pontos do mapa global obtidos através da metodologia desenvolvida, obtidos para $Dq_{máx}$ igual a 3° .

Tabela 7.6 - Coordenadas e desvios padrão dos pontos do mapa global para $Dq_{máx}$ igual a 3° .

Ponto	Posição real dos pontos		Posição calculada dos pontos	
	X [mm]	Y [mm]	X [mm]	Y [mm]
1	-100	4050	-51±301	3587±1477
2	600	4050	567±173	4025±391
3	-210	4400	Ponto não visualizado	
4	600	4400	Ponto não visualizado	
5	1200	500	1666±462	303±374
6	1900	500	1895±32	553±77
7	1200	1900	1115±212	2264±777
8	1900	1900	Ponto não visualizado	
9	3000	0	2961±331	23±228
10	3700	0	3632±304	23±141
11	3000	1400	2888±221	1340±77
12	3700	1400	Ponto não visualizado	
13	-1000	-3600	-924±71	-3216±192
14	-300	-3600	-286±63	-3368±276
15	-1000	-5000	Ponto não visualizado	
16	-300	-5000	-265±70	-4245±514

Nas coordenadas y dos pontos reais da Tabela 7.6 foi subtraído 600 mm para considerar a mudança de coordenadas entre o ambiente e o sistema do mapa global.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 7.6, observa-se que a menos de dois casos, para a coordenada y , as posições reais dos pontos estão no intervalo de $\pm$ um desvio padrão das posições dos pontos calculados no mapa global. Esse resultado mostra a eficiência do processo desenvolvido de construção de mapas.

7.2.2 - Caso Real

Para o caso real foram adquiridos 21 mapas locais. Foram dispostos alguns objetos na proximidade do robô, cujas dimensões e posições estão descritas na Figura 7.51.

Figura 7.51 - Trajetória realizada pelo robô: ponto inicial indicado pelo triângulo.

A Tabela 7.7 apresenta as posições do robô nas quais são adquiridas as imagens omnidirecionais para a obtenção dos mapas.

Tabela 7.7 - Posições do robô ao longo da trajetória da Figura 7.51.

Posição	X [mm]	Y [mm]	Posição	X [mm]	Y [mm]
1	0	0	12	2200	0
2	200	0	13	2400	0
3	400	0	14	0	200
4	600	0	15	0	400
5	800	0	16	0	600
6	1000	0	17	0	800
7	1200	0	18	0	1000
8	1400	0	19	0	1200
9	1600	0	20	0	1400
10	1800	0	21	0	1600
11	2000	0	22	0	1800

As figuras seguintes mostram as imagens omnidirecionais adquiridas em algumas posição da trajetória.

Figura 7.52 – Primeira imagem adquirida pelo robô, posição inicial (0,0).

Figura 7.53 - Imagem adquirida pelo robô na segunda posição da trajetória.

Figura 7.54 – Imagem adquirida pelo robô na sexta posição da trajetória.

Figura 7.55 - Imagem adquirida pelo robô na oitava posição da trajetória.

Figura 7.56 - Imagem adquirida pelo robô na décima posição da trajetória.

Figura 7.57 - Imagem adquirida pelo robô na décima terceira posição da trajetória.

Figura 7.58 - Imagem adquirida pelo robô na décima quarta posição da trajetória.

Figura 7.59 - Imagem adquirida pelo robô na décima quinta posição da trajetória.

Figura 7.60 - Imagem adquirida pelo robô na décima sétima posição da trajetória.

Figura 7.61 - Imagem adquirida pelo robô na vigésima primeira posição da trajetória.

Figura 7.62 - Imagem adquirida pelo robô na vigésima segunda posição da trajetória, última posição.

A Figura 7.63 mostra o mapa construído para o ambiente real considerando o valor de 3° para a variação máxima angular entre os pontos ($Dq_{máx}$) e 3 para o número de atualizações do ponto.

Figura 7.63 - Mapa global, $Dq_{máx} = 3^\circ$, número de atualizações igual a 3.

A Figura 7.64 mostra as coordenadas dos pontos que foram atualizados mais que 7 vezes para o mesmo valor de $Dq_{máx}$, igual a 3° .

Figura 7.64 - Mapa global, $Dq_{máx} = 3^\circ$, número de atualizações igual a 7.

A Figura 7.65 mostra as coordenadas dos pontos que foram atualizados mais que 9 vezes para o valor de $Dq_{m\acute{a}x}$ igual a 3° . A Figura 7.66 mostra as coordenadas dos pontos que foram atualizados mais que 4 vezes para o valor de $Dq_{m\acute{a}x}$ igual a 10° . Nota-se a influencia do aumento de $Dq_{m\acute{a}x}$ e do valor de atualizações do ponto a ser considerado no mapa global.

Figura 7.65 - Mapa global, $Dq_{m\acute{a}x} = 3^\circ$, número de atualizações igual a 9.

Figura 7.66 - Mapa global, $Dq_{m\acute{a}x} = 10^\circ$, número de atualizações igual a 4.

A Figura 7.67 e a Figura 7.68 mostram o desvio padrão para os pontos $(-136,280)$ e $(-92,120)$.

Figura 7.67 - Desvio padrão do ponto $(-136,280)$

Figura 7.68 - Desvio padrão do ponto $(-92,120)$

Verifica-se, para alguns casos analisados, que o valor do desvio padrão decresce com subseqüentes atualizações do mapa global. Esse decréscimo indica que as hipóteses, as restrições e os critérios utilizados para a construção do mapa global, são satisfatórios. Assim, mesmo sem considerar o erro de medida das distâncias proveniente do sistema de visão estéreo, obtêm-se bons resultados com a metodologia desenvolvida.

Em alguns casos observa-se que ocorre aumento do desvio padrão na incorporação das medidas de um dado mapa local. Analisando-se o comportamento do desvio padrão, percebe-se que os aumentos ocorrem nas posições onde o robô muda de orientação.

CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES

Robôs móveis são projetados para navegarem em ambientes e enquanto navegam podem construir modelos do ambiente, os quais podem ser utilizados para futuras tarefas de robôs autônomos.

Nesse trabalho implementou-se um sistema de visão estéreo omnidirecional composto por uma câmera e um espelho hiperbólico, de forma a obter visão em 360° ao redor do robô.

O ambiente no qual o robô é inserido para realizar a navegação é estruturado, conseqüentemente é possível a extração das características geométricas necessárias para a construção do mapa do ambiente. Com a aquisição de um par de imagens estéreo, obtidas com um pequeno deslocamento do robô entre o par de imagens, efetuam-se os processos de estéreo para a obtenção de distâncias. As características extraídas no par de imagens omnidirecionais são as quinas dos objetos presentes no ambiente. A correspondência das características no par de imagens é efetuada segundo a restrição da curva epipolar e é realizada diretamente sobre as imagens omnidirecionais, sem que essas sejam retificadas. Com a obtenção das distâncias dos objetos ao redor do robô, proveniente do sistema estéreo omnidirecional, dispõem-se as posições das quinas dos objetos em um mapa plano, denominado mapa de distâncias.

Com a aquisição de subseqüentes mapas de distâncias, adquiridos com a movimentação do robô, efetuam-se os processos para a construção do mapa global. O mapa global contém as informações de posições das quinas de todos os objetos visualizados no decorrer da navegação do robô.

As etapas que constituem o processo de construção de mapas do ambiente são: alinhamento, correspondência e integração.

Nesse trabalho o alinhamento é realizado descrevendo os pontos do mapa global no sistema de referência do mapa local. Com a descrição dos pontos do mapa global no

referencial local pontos que estão na mesma direção com relação ao referencial do mapa global são descritos por diferentes ângulos no referencial local. Isso favorece a correspondência entre pontos, que é realizada pelo critério de mínimo ângulo. Além disso, ao longo do processo de construção de mapas, em cada vez que um ponto do mapa global é descrito no sistema de referência do mapa local, está se considerando o valor atualizado da medida de posição desse ponto. Isso favorece a correspondência que utiliza a informação de um ponto do mapa local com a informação atualizada do ponto do mapa global.

A metodologia desenvolvida nessa tese utiliza dois critérios para a correspondência entre pontos, além de uma restrição e algumas condições que, em conjunto, tornam a correspondência de pontos eficiente e toda a metodologia de construção de mapas robusta.

A primeira consideração utilizada é a de restrição do espaço de pontos, em cada mapa local adquirido são considerados somente os pontos mais próximos ao robô. Essa consideração torna possível uma estimativa inicial de espaço livre de navegação.

Os critérios utilizados para a correspondência são primeiramente a proximidade entre os ângulos azimutais e em segundo a proximidade de distância entre os pontos. A proximidade da distância é verificada quando ocorrem múltiplas correspondências. As condições de unicidade e ordem crescente monotônica garantem a correspondência única entre pontos, tornando o algoritmo eficiente e robusto.

Na correspondência entre pontos é considerado um intervalo angular máximo, ou seja, para corresponder um ponto do mapa local a um ponto do mapa global verifica-se se a mínima diferença dos ângulos azimutais está dentro de um intervalo angular máximo. Através desse intervalo angular está se levando em consideração a existência de um pequeno erro de odometria. O fator que contribui para que o erro de odometria seja pequeno em deslocamentos pequenos é que o acionamento do robô é do tipo *sincrodrive* onde o robô possui tração e rotação nas suas três rodas

simultaneamente, o que reduz problemas de escorregamento no ambiente ao qual é inserido.

Através da consideração do intervalo angular máximo limita-se o espaço de pontos candidatos à correspondência e o número de pontos candidatos estarão dentro desse intervalo. Conclui-se que grandes valores do intervalo angular máximo ($\Delta\theta_{\text{máx}} = 10^\circ$) conduzem a obtenção de mapas globais com menos pontos, isso porque aumenta-se o espaço de pontos candidatos a correspondência. No entanto, para grandes valores de $\Delta\theta_{\text{máx}}$ aumenta-se a possibilidade de falsas correspondências. Para pequenos valores do intervalo angular máximo ($\Delta\theta_{\text{máx}} = 3^\circ$) obtêm-se mapas globais com mais pontos, pois se restringe o espaço de pontos candidatos à correspondência, favorecendo a inclusão de novos pontos. Com menores valores de $\Delta\theta_{\text{máx}}$ diminui-se a possibilidade de falsas correspondências.

Outro fator que influencia a obtenção do mapa global é o número de atualizações de um ponto. Um ponto é incluído no mapa global se este foi atualizado mais que um mínimo número de vezes. Nesse trabalho foram analisados mapas globais construídos considerando os pontos que foram atualizados mais que 3 vezes, alguns exemplos consideraram o valor 4, 7 e 9. Pontos atualizados poucas vezes (menos que 3) são considerados como espúrios e não são incluídos no mapa global.

Há um compromisso entre o aumento do número de atualizações do ponto, com o subsequente aumento da inclusão de pontos espúrios no mapa global e a diminuição do número de atualizações do ponto, com a subsequente desconsideração de pontos reais no mapa global.

Na etapa de integração, pontos não correspondidos são considerados como novos, e portanto são incluídos no mapa global. Pontos correspondidos têm a informação de posição atualizada segundo a médias das medidas.

Os resultados obtidos com o método desenvolvido mostram que os critérios de mínima diferença angular e mínima distância entre pontos utilizados em conjunto conduzem a resultados satisfatórios. Nesse trabalho utilizou-se a restrição de espaço

de pontos, o ordenamento e a unicidade para a construção de um mapa denso em informações. Com tais métricas e considerações obtêm-se um mapa global preciso. A análise do histórico do desvio padrão das medidas de posição dos pontos mostra que os resultados convergem com a metodologia desenvolvida.

Pode-se, a partir do mapa global obtido, implementar tarefas de navegação, tais como planejamento de trajetória e a implementação simultânea da localização do robô durante a navegação, de forma que o robô se localiza enquanto constrói o mapa global (SLAM).

Ressalta-se que para a construção de mapas a partir do sistema de visão estéreo omnidirecional nenhuma informação inicial ou conhecimento do ambiente (mapa inicial) é fornecido ao robô.

CAPÍTULO 9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BADAL, 1994 BADAL, S.; RAVELA, S.; DRAPER, B.; HANSON, A “A Practical Obstacle Detection and Avoidance System” – Proceedings of the 2nd Workshop on Applications of Computer Vision, p.97 – 104, Dec. 1994.
- BAKER, 1998 BAKER, S.; NAYAR, S. K. “A Theory of Catadioptric Image Formation” – Sixty International Conference on Computer Vision - ICCV’98, p. 35 – 42, 1998.
- BESL, 1992 BESL, P. J.; MCKAY, N. D. “A Method for Registration of 3-D Shapes”. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14 (2), p.239 – 256, 1992.
- BORESTEIN, 1996 BORESTEIN, J.; EVERETT, H. R.; FENG, L. “Where am I? – Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning”. March 1996. – <http://www.eecs.umich.edu/~johannb/pos96rep.pdf>.
- BORN, 1975 BORN, M; WOLF, E. "Eletromagnetic Theory of Propagation, Interference and a Diffraction of Light", 1975.
- BROWN, 2003 BROWN, M. Z.; BURSCHKA, D.; HAGER, G. D. “Advances in Computational Stereo” – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 25, n° 8, p. 993 – 1008, 2003.
- BROOKS, 1986 BROOKS, R. A. “A Robust Layared Control System for a Mobile Robot” – IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 2, n° 1, p. 14 – 23, 1986.
- CHAHL, 1997 CHAHL, J. S.; SRINIVASAN, M. “Reflective Surfaces for Panoramic Imaging” – Applied Optics, vol. 36, n° 31, p.8275 – 8285, Nov. 1997.
- CHETVERIKOV, 2002a CHETVERIKOV, D.; SVIRKO, D.; STEPANOV, D; KRSEK, P.. “The Trimmed Iterative Closest Point Algorithm”. Proceeding of ICPR’02, 2002.

- CHETVERIKOV, 2002b CHETVERIKOV, D.; STEPANOV, D. "Robust Euclidean Alignment of 3D Point Sets". First Hungarian Conference on Computer Graphics and Geometry, Budapest, p.70 – 75, 2002.
- CONROY, 1999 CONROY, T. L.; MOORE, J. B. "Resolution Invariant Surfaces for Panoramic Vision Systems" – International Conference on Computer Vision – ICCV'99, p. 392 – 397, 1999.
- CORRÊA, 2003 CORRÊA, F.R.; DECCÓ, C. C. G. ; OKAMOTO, J. "Obtaining Range Information with an Omnidirectional Vision System". 17th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM2003, ID0621, São Paulo, Brasil, Nov. 2003.
- DECCÓ, 2001 DECCÓ, C. C. G. ; GASPAR, J.; WINTERS, N.; SANTOS-VICTOR, J. "OMNIVIEWS Mirror Design and Software Tools". Technical Report of the Omniviews Project. Instituto Superior Técnico – IST – Lisboa, Portugal. Sep. 2001.
- DELAHOUCHE, 1997 DELAHOUCHE, L.; PÉGARD, C.; MARHIC, B.; VASSEUR, P. "A Navigation System Based on an Omnidirectional Vision Sensor". Proceeding of the IEEE Conference on Robotics and Systems, IROS'97, 1997.
- DESOUZA, 2002 DESOUZA, G. N.; KAK, A. C. "Vision for Mobile Robot Navigation: A Survey" – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence – vol. 24, p. 237 – 267, Feb. 2002.
- DORAI, 1997 DORAI, C; WENG, J.; JAIN, A K. "Optimal Registration of Object Views Using Range Data". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 19, nº 10, p.1131 – 1138, 1997.
- ELFES, 1989 ELFES, A "Occupancy Grids: A Probabilistic Framework for Robots Perception and Navigation". Tese de doutoramento, Carnegie Mellon University, MIT, 1989.
- FAUGERAS, 1993 FAUGERAS, O. "Three-Dimensional Computer Vision - A Geometric Viewpoint". MIT Press.

- GÄECHTER, 2001 GÄECHTER, S. “ Mirror Design for an Omnidirecional Camera with a Uniform Cylindrical Projection when Using the SVAVISCA Sensor”. Technical Report, n° CTU – CMP – 2001 – 03. Jan. 2001. Disponível em <http://cmp.felk.cvut.cz/cmp/omniviews>.
- GASPAR, 1999 GASPAR, J.; SANTOS-VICTOR, J. “Visual Path Following with a Catadioptric Panoramic Camera”. International Symposium on Intelligent Robotic System, SIRS’99, Coimbra, Portugal, July 1999.
- GASPAR, 2000 GASPAR, J.; WINTERS, N; SANTOS-VICTOR, J. “Vision-based Navigation and Environmental Representations with an Omnidirectional Camera”. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 16, n° 6, Dec. 2000.
- GASPAR, 2002 GASPAR, J.; DECCÓ, C. C. G.; OKAMOTO, J.; SANTOS-VICTOR, J.- "Constant Resolution Omnidirectional Cameras" – OMNIVIS’02 Workshop on Omni-directional Vision, Copenhagen, Denmark, June 2002.
- GEYER, 2000 GEYER, C.; DANIILIDIS, K. “Equivalence of Catadioptric Projections and Mappings of the Sphere”. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision – OMNIVIS’00, p. 91 - 96, 2000.
- GIACHETTI, 1998 GIACHETTI, A.; CAMPANI, M.; TORRE, V. “The Use of Optical Flow for Road Navigation”. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 14, n° 1, p.34-48, 1998.
- GOLDBERG, 2002 GOLDBERG, S. B.; MAIMONE, M. W.; MATTHIES, L. “Stereo Vision and robber navigation software for planetary exploration”. IEEE Aerospace Conference Proceedings. vol.5, p. 2025-2036, March 2002.
- GROSS, 2001 GROSS, H-M.; BOEHME, H-J.; WILHELM, T. “A Contribution to Vision-Based Localization, Tracking and Navigation Methods for an Interactive Mobile Service-Robot”. Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Tucson, p. 672 - 677, 2001.

- HICKS, 1999 HICKS, R. A.; BAJCSY, R. "Refletive Surfaces as Computational Sensors", Workshop on Perception for Mobile Agents at CVPR'99, p. 82-86, Colorado, USA, June 1999; disponível em <http://www.cs.yorku.ca/~jenkin/wpma2/pdf/hicks.pdf>
- HICKS, 2000 HICKS, R. A.; BAJCSY, R.. "Catadioptric Sensors that Approximate Wide-angle perspective Projections", IEEE Workshop on Omnidirectional Vision - OMNIVIS'00, p: 97-103, June 2000.
- ISHIGURO, 1990 ISHIGURO, H.; YAMAMOTO, M.; TSUJI, S. "Omnidirectional Stereo for Making Global Map", Proceeding Third International Conference on Computer Vision, p. 540 – 547, Dec.1990.
- JANKOWSKA, 2002 JANKOWSKA, K.; KRZYZYNSKI, T.; SANTOS-VICTOR, J. A. "Fusion of 3D Models Constructed on the Basis of Omnidirectional Images". Third International Workshop on Robotic Motion and Control, p.363 – 368, Nov. 2002.
- KHOROS <http://www.khoral.com/khoros>.
- KIM, 1996 KIM, H.; LEE, K.; LEE, S.; PARK, M.. "Obstacle Avoidance Navigation using a Local Path Planning Method". Proceedings of the 35th Conference on Decision and Control. Kobe, Japan, p. 869-874, Dec. 1996.
- KOYASU, 2002 KOYASU, H.; MIURA, J.; SHIRAI, Y. "Recognizing Moving Obstacles for Robot Navigation using Real-time Omnidirectional Stereo Vision". Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 14, n° 2, p. 147-156, 2002.
- KUIPERS, 1991 KUIPERS, B.; BYUN, Y-T. "A Robot Exploration and Mapping Strategy Based on a Semantic Hierarchy of Spatial Representations". Robotics and Autonomous Systems, vol. 8, p. 47-63, 1991.
- KUMANO, 2000 KUMANO, M.; OHYA, A.; YUTA, S. "Obstacle Avoidance of Autonomous Mobile Robot using Stereo Vision Sensor". Proceedings of the 2nd International Symposium on Robotics and Automation, p.497 – 502, Nov. 2000.

- LEONARD, 1991 LEONARD, J. J.; DURRANT-WHYTE, H. F. "Simultaneous Map Building and Localization for an Autonomous Mobile Robot". Proceeding of the IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, IROS'91, p.1442 – 1447, 1991.
- LITTLE, 1998 LITTLE, J. J.; LU, J.; MURRAY, D. R. "Selecting Stable Image Features for Robot Localization Using Stereo". Proceeding of the IEEE Conference on Robotics and Systems, IROS'98, 1998.
- MANESSIS, 2003 MANESSIS, A. "Overview of Related work on Scene Modelling".
http://www.dai.ed.ac.uk/Cvonline/LOCAL_COPIES/MANESSIS/liter.
- MATSUMOTO, 1999 MATSUMOTO, Y.; IKEDA, K.; INABA, M.; INOUE, H. "Visual Navigation using Omnidirectional View Sequence". Proceeding of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, p. 317-322, 1999.
- MATSUMOTO, 2000 MATSUMOTO, Y.; IKEDA, K.; INABA, M.; INOUE, H. "Exploration and Navigation in Corridor Environment Based on Omni-View Sequence". Proceeding of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, p. 1505-1510, 2000.
- MINGUEZ, 2001 MINGUEZ, J.; MONTANO, L.; SIMEON, T.; ALAMI, R. "Global Nearness Diagram Navigation (GND)". IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA, 2001.
- MURRAY, 1997 MURRAY, D.; JENNINGS, C. "Stereo Vision Based Mapping and Navigation for Mobile Robots". Proceeding of the IEEE Conference on Robotics and Automation, May 1997.
- MURRAY, 1998 MURRAY, D.; LITTLE, J. "Using Real-Time Stereo Vision for Mobile Robot Navigation". Workshop on Perception for Mobile Agents at CVPR'98, 1998.
- NACCACHE, 2001 NACCACHE, F. F.; HACHIYA, R. K. "Visão estéreo a partir de seqüências de imagens geradas por uma câmera panorâmica central com

espelho hiperbólico”. Trabalho de formatura, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.

NAKAMURA, 2002 NAKAMURA, T.; ISHIGURO, H. “Automatic 2D Map Construction using a Special Catadioptric Sensor”. Proceeding of the IEEE Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, Oct. 2002.

NAYAR, 1997 NAYAR, S. K. ‘Catadioptric Omnidirectional Camera’. Proceeding of the IEEE Int. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, p. 482 – 488, Jun. 1997.

OHYA, 1997 OHYA, A.; KOSAKA, A.; KAK, A. “Vision-Based Navigation of Mobile Robot with Obstacle Avoidance by Single Camera Vision and Ultrasonic Sensing”. Proceeding of the IEEE Conference on Robotics and Systems, IROS’97, vol. 1, 1997.

OLLIS, 1999 OLLIS, M.; HERMAN, H.; SINGH, S. “Analysis and Design of Panoramic Stereo Vision Using Equi-Angular Cameras”, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, CMU-RI-TR-99-04, Jan. 1999.

PRESS, 1988 PRESS, W. H.; FLANNERY, B. P.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T. “Numerical Recipes in C - The Art of Scientific Computing “, 1988.

REKLEITIS, 1999 REKLEITIS, I. M.; DUJMOVIC, V. “Efficient Topological Exploration”, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, Michigan, p. 676-681, May. 1999.

RODRIGUES, 2002 RODRIGUES, M. A.; LIU, Y. “Registering two Overlapping Range Images Using a Relative Registration Error Histogram”, Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing ICIP, vol. 3, p. 841-844, 2002.

SANTOS, 1998 SANTOS, V.; CASTRO, J.; RIBEIRO, M. I. “Navigation Architecture for the Resolv Mobile Robot”, Proceedings of the 3 rd Portuguese Conference on Automatic Control, Coimbra, Portugal, Set. 1998.

- SANTOS-VICTOR, 1994 SANTOS-VICTOR, J. "Visual Perception for Mobile Robots: From Percepts to Behaviours". PhD Thesis, Nov. 1994. Disponível em <http://vislab.isr.ist.utl.pt/>.
- SANTOS-VICTOR, 1995 SANTOS-VICTOR, J.; SANDINI, G.; CUROTTO, F.; GARIBALDI, S. "Divergent Stereo in Autonomous Navigation: From Bees to Robots". International Journal of Computer Vision, 14, p. 159-177, Boston, 1995.
- SANTOS-VICTOR, 1997 SANTOS-VICTOR, J.; SANDINI, G. "Embedded Visual Behaviors for Navigation". Robotics and Autonomous Systems, 19, p. 299-313, 1997.
- SVOBODA, 1997 SVOBODA, T., PAJDLA, T., HLAVÁČ, V. "Central Panoramic Cameras: Geometry and Design". Technical Report N° K335/97/147, Czech Technical University, Department of Control Engineering, Dec. 1997
- SVOBODA, 1998 SVOBODA, T.; PAJDLA, T.; HLAVÁČ, V. "Epipolar Geometry for Panoramic Cameras". Computer Vision, ECCV'98, Freiburg, Germany, July 1998.
- TAYLOR, 1993 TAYLOR, C. J.; KRIEGMAN, D. J. "Exploration Strategies for Mobile Robots". Proceedings of the IEEE Robotics and Automation, p. 248-253, May 1993.
- THRUN, 1997 THRUN, S. "Learning Maps for Indoor Mobile Robot Navigation". Disponível em http://www-2.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/user/thrun/public_html.
- THRUN, 2002 THRUN, S. "Robot Mapping: A Survey". CMU-CS-02-111, Feb. 2002. Disponível: http://www-2.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/user/thrun/public_html.
- VAN DER ZWAAN, 2001 VAN DER ZWAAN, S.; SANTOS-VICTOR, J. A. "Real-Time Vision-Based station Keeping for Underwater Robots".

- MTS/IEEE Conference on Exhibition OCEANS. Vol.2, p. 1058-1065. Nov. 2001.
- VASSALLO, 1998 VASSALLO, R. F.; SCHNEEBELI, H. J.; SANTOS-VICTOR, J. "Visual Navigation: Combining Visual Servoing and Appearance based Methods". 6th International Symposium on Intelligent Robotic System, SIRS'98, Edinburg, Scotland, July, 1998.
- WANG, 1996 WANG, J.H.; HSIAO, C.P. "Stereo Matching by Neural Network that uses Sobel Feature Data". IEEE International Conference on Neural Network, vol. 3, p. 1801 – 1806, June 1996.
- WINTERS, 1999a WINTERS, N.; SANTOS-VICTOR, J. "Omni-directional Visual Navigation". International Symposium on Intelligent Robotic System, SIRS'99, Coimbra, Portugal, July 1999.
- WINTERS, 1999b WINTERS, N.; SANTOS-VICTOR, J. "Mobile Robot Navigation using Omni-directional Vision". Proceedings of the third Irish Machine Vision and Image Processing Conference, IMVIP'99, Dublin, Ireland, Sep. 1999.
- WINTERS, 2000 WINTERS, N.; GASPAR, J.; LACEY, G.; SANTOS-VICTOR, J.; "Omni-directional Vision for Robot Navigation". IEEE Workshop on Omnidirectional Vision, OMNIVIS'00, p. 21-28, 2000.
- WINTERS, 2001 WINTERS, N.; GASPAR, J.; GROSSMANN, E.; SANTOS-VICTOR, J. "Experiments in Visual-based Navigation with an Omnidirectional Camera". ICAR'01 Workshop on Omnidirectional Vision Applied to Robotic Orientation and Nondestructive Testing, Budapest, Hungary, Aug. 2001.
- YAGI, 1994 YAGI, Y.; KAWATO, S.; TSUJI, S. "Real-Time Omnidirectional Image Sensor (COPI) for Vision-Guided Navigation". IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 10, n. 1, Feb. 1994.

- YAGI, 1995 YAGI, Y.; NISHIZAWA, Y.; YACHIDA, M. "Map-Based Navigation for a Mobile Robot with Omnidirectional Image Sensor COPIS". IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 11, n. 5, Oct. 1995.
- YAGI, 1999 YAGI, Y. "Omnidirectional Sensing and Its Applications". IEICE Trans. Inf. & Syst., Vol. E82-D, n.3, March 1999.
- YAMAUCHI, 1997 YAMAUCHI, B. "A Frontier-Based Approach for Autonomous Exploration". In Proceeding of the 1997 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, 146-151, 1997.
- YAMAZAWA, 1995 YAMAZAWA, K.; YAGI, Y.; YACHIDA, M. "Obstacle Detection with Omnidirectional Image Sensor HyperOmni Vision". In Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 1, p. 1062-1067, 1995.
- ZHANG, 2002 ZHANG, C. "A Survey on Stereo Vision for Mobile Robots". Disponível em: www.andrew.cmu.edu/~czhang/course/stereosurvey.pdf, 2002.