



Universidade de Coimbra
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

ME-EERUF
UM SISTEMA DE DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE
REFLECTORES USANDO ULTRA-SONS

Fernando Domingues Moita

Licenciado em Engenharia Electrotécnica

Dissertação apresentada no âmbito do Mestrado em Sistemas e Automação, na especialidade em Automação Industrial, pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, sob orientação do Professor Doutor Urbano Nunes.

Coimbra
Dezembro de 2002

Agradecimentos

Para a realização desta tese, pude contar com o apoio e colaboração de algumas pessoas, sem as quais não teria sido possível ultrapassar mais esta etapa do meu percurso académico.

Quero, assim, agradecer, em primeiro lugar, ao Professor Doutor Urbano Nunes, – meu orientador de Mestrado –, pela sua contínua disponibilidade, estímulo e acompanhamento ao longo da realização desta dissertação.

Aos colegas e amigos Eng. Lino Marques e Eng. Cândido Santos, pelas críticas e motivação dadas para a concretização deste objectivo.

À Dr. Rita Rico agradeço as importantes sugestões que me deu para a revisão do texto.

A todos os outros colegas e amigos que de alguma forma me ajudaram na realização deste trabalho.

Agradeço à minha esposa Sandra, pela paciência demonstrada e encorajamento dado.

Não posso deixar também de agradecer às Instituições que me disponibilizaram os meios e as condições de trabalho necessárias ao desenvolvimento da tese aqui apresentada:

Ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, pelo facto de ter permitido compatibilizar o serviço docente com o meu trabalho de mestrado.

Ao Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da FCTUC e ao Instituto de Sistemas e Robótica, pelos meios laboratoriais disponibilizados.

À Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica (JNICT) pela bolsa que me concedeu durante uma parte significativa do desenvolvimento do trabalho.

Resumo

Nesta tese, é apresentado o desenvolvimento e modelação de uma configuração de sensores de ultra-sons com capacidade para detectar e identificar reflectores do tipo: plano, aresta e canto. É um sistema que pode ser facilmente aplicado e utilizado em novos robôs ou plataformas convencionais, e que vem tornar mais eficaz e fiável a avaliação da informação fornecida pelos sensores de ultra-sons. Este sistema não utiliza configurações complexas; dois sensores contíguos, e não necessariamente colineares, podem ser adaptados numa plataforma já existente, para implementarem o sistema proposto. Novas funcionalidades nos sensores permitem a recepção de múltiplos ecos e a sua combinação com o método EERUF [Borenstein and Koren, 1995], resulta num novo sistema designado por ME-EERUF (*Multi-Echo Error Eliminating Rapid Ultrasonic Firing*) [Moita and Nunes, 2001], capaz de efectuar medidas cruzadas sem interferência, aumentando as taxas de aquisição de dados e possibilitando a implementação de algoritmos de detecção e classificação de reflectores. Será proposto um sistema classificador de Bayes e serão apresentados resultados experimentais, através da construção de mapas de formas geométricas, integrados com mapas de grelhas.

Abstract

This thesis presents the study and development of sonar sensor configurations and processing methods with capability to detect and identify planes, edges and corners. The systems presented can be easily applied to settled robots or new platforms to improve the quality and quantity of ultrasonic data. No special configurations as arrays of sensors are used in this work, only standard configurations that can be found and applied in a great number of mobile robots. New multi-echo functionalities are introduced and combined with EERUF [Borenstein and Koren, 1995], providing a new ME-EERUF (Multi-Echo Error Eliminating Rapid Ultrasonic Firing) [Moita and Nunes, 2001] method that simultaneously increases the sonar acquisition rate and provides inter-sensor measurements, necessary to implement feature detection and identification algorithms. A Bayes pattern recognition system is modelled to classify reflectors and experimental results using data collected in a specular indoor environment are presented through feature-based and grid-based maps.

Lista de abreviaturas e termos em inglês

Bi-aural	Sistema de dois sensores
Crosstalk	Interferência por sinal externo
EERUF	<i>Error Eliminating Rapid Ultrasonic Firing</i>
GRO	<i>Growth Rate Operator</i>
HIMM	<i>Histogram In-Motion Mapping</i>
IID	<i>Intra-Aural Intensity Difference</i>
LAUN	<i>Local Area Ultrasonic Network</i>
LIN	<i>Local Interconnection Network</i>
LIN-BB	<i>LIN-Based Bus</i>
ME-EERUF	<i>Multi-Echo EERUF</i>
Multi-path	Interferência por sinal reflectido
R	Receptor
S	Sensor
T	Transmissor
TOF	<i>Time Of Flight</i>
T/R	Transmissor/Receptor
Tri-aural	Sistema de três sensores
T/V	<i>Transmitter and Vector Receiver</i>
VFF	<i>Virtual Force Field</i>
VFH	<i>Virtual Field Histogram</i>

Conteúdo

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de abreviaturas e termos em inglês	xi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Trabalho realizado	5
1.3 Organização da tese	5
2 O Sensor de Ultra-Sons	9
2.1 Modelo físico	10
2.2 Características dos sensores de ultra-sons	11
2.2.1 Principais vantagens	12
2.2.2 Principais desvantagens	13
2.3 O sensor da Polaroid	17
2.4 O módulo controlador da série 6500	18
3 Modelos de reflexão dos sensores de ultra-sons	21
3.1 Modelos pontuais	21
3.2 Modelos em arco	23

3.3	Modelos probabilísticos	29
4	Detecção e Classificação de Reflectores	35
4.1	Reflectores	36
4.2	Sistemas de sensores cooperantes	37
4.2.1	Sensor inteligente	37
4.2.2	Percepção activa	41
4.2.3	Célula T/V	43
4.2.4	Sistema tri-aural	46
4.2.5	Par activo	48
4.2.6	Sistema de dois pares	50
4.3	Sistemas baseados na combinação de informação	53
4.3.1	Sistema RCD	53
4.3.2	TBF	57
5	Mapas	61
5.1	Mapas métricos	63
5.1.1	Mapas de grelhas	63
5.1.2	Mapas geométricos	67
5.2	Métodos locais de detecção e desvio de obstáculos	72
5.2.1	Detecção de arestas	73
5.2.2	Campo de potencial	73
5.2.3	Campo de forças virtuais	73
5.2.4	Histograma do vector de campo	75
6	Modelação Experimental do Sensor	81
6.1	Modificações no módulo controlador	82
6.2	Sistema de aquisição de dados	83
6.3	Resultados experimentais	85
6.3.1	Definições	85

6.3.2	Repetibilidade das Medidas	86
6.3.3	Erro sistemático do sensor	91
6.3.4	Incerteza na orientação	96
6.4	Conclusões	96
7	O Novo Sistema ME-EERUF	101
7.1	Configuração dos sensores	102
7.2	Geometria dos reflectores	103
7.2.1	Geometria do plano	103
7.2.2	Geometria do canto	105
7.2.3	Geometria da aresta	106
7.3	LIN-BB rede local de comunicação	106
7.3.1	Módulos servidores	107
7.3.2	LIN-BB	109
7.4	Modelação experimental do sistema ME-EERUF	111
7.5	Métodos de comparação de leituras consecutivas	115
7.5.1	Método EERUF	117
7.5.2	O novo método ME-EERUF	118
7.6	Eficiência do método ME-EERUF	122
7.7	Conclusões	126
8	Classificação de Reflectores	129
8.1	Caracterização do problema	129
8.1.1	Aquisição de dados	131
8.1.2	Pré-processamento e selecção	131
8.1.3	Extracção de características	134
8.1.4	Módulo de classificação	137
8.2	Resultados experimentais	140
8.3	Conclusões	141

9 Conclusões e Trabalhos Futuros	145
Bibliografia	148

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Os sensores de ultra-sons, que utilizam o tempo decorrido desde a emissão de uma onda acústica até à recepção do eco¹, são muito usados em aplicações de robótica móvel que envolvam navegação e localização. Porém, nem sempre bem sucedidos, eles têm sido considerados incertos e pouco precisos, essencialmente porque a sua informação é muitas vezes usada de forma incorrecta e ineficiente.

Na natureza não, é difícil encontrar seres vivos que utilizam os ultra-sons e que são incomparavelmente mais eficazes do que os sonares inventados pelo Homem. Os morcegos, que constituem, actualmente, cerca de um quarto da população mundial de mamíferos, são um bom exemplo, pois, apesar de possuírem visão, a maioria das espécies desenvolveu também notáveis capacidades acústicas para se orientarem e caçarem na mais completa escuridão. Os ultra-sons emitidos² atingem os objectos, são reflectidos na forma de ecos e detectados pelo ouvido do morcego (Figura 1.1). Com base na informação trazida pelos ecos, eles conseguem discriminar objectos afastados por apenas 0.3 milímetros, avaliar o seu tamanho, a sua localização, velocidade, direcção de movimento e ainda a espessura. Os morcegos utilizam essas capacidades para perseguir e caçar insectos em cavernas escuras, partilhadas por milhares de outros morce-

¹Tempo-de-voo ou TOF (*Time of Fly*).

²Sinais acústicos com frequências entre 20 *kHz* e 130 *kHz*, acima do limite da capacidade auditiva humana.

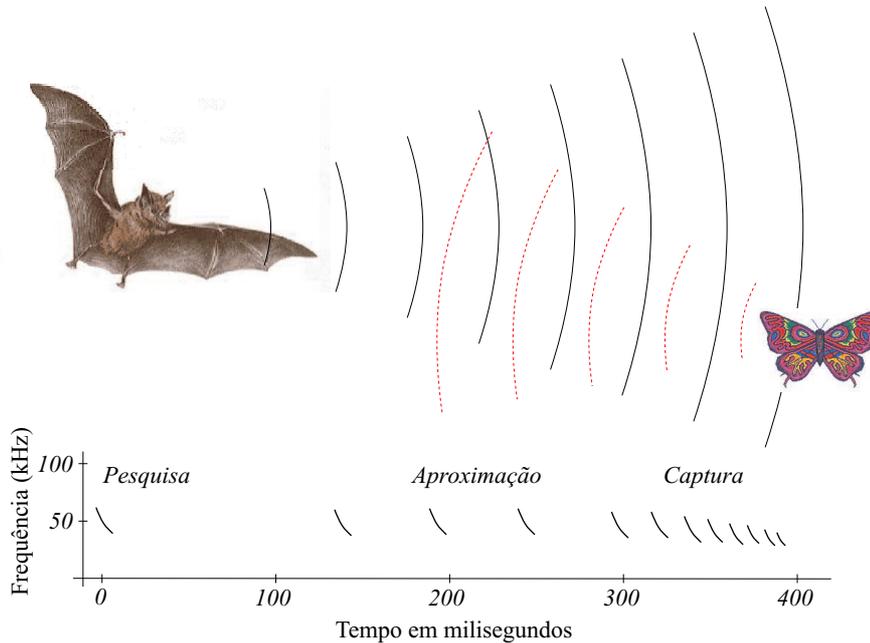


Figura 1.1: Morcego em perseguição da sua presa. Uma série rápida de guinchos e ecos dá-lhe a posição exacta do alvo, bastando aumentar o ritmo dos sons para se poder precipitar sobre a presa.

gos e pelos seus ecos, tudo isto sem colisão e a velocidades que podem exceder os 65 km/h [Simmons and Chen., 1989; Simmons et al., 1989, 1998].

Estes extraordinários talentos certamente convencerão os mais cépticos a aceitar as potencialidades dos sensores de ultra-sons. O sistema de eco-localização dos morcegos é bem mais sofisticado do que os correspondentes sistemas electrónicos desenvolvidos pelo homem, e uma prova inequívoca do sucesso deste sistema de localização.

O sucesso dos sensores de ultra-sons, em robótica móvel, está fortemente dependente da capacidade de se conseguir determinar a origem da informação. Devido a múltiplas reflexões e outras interferências, é muito frequente a recepção de falsas medidas, por isso, é muito importante a capacidade de seleccionar apenas a informação útil. Por outro lado, é do maior interesse detectar e identificar o tipo de reflectores que originaram a informação recebida pelos sensores, e que podem servir como importantes referências para a navegação e localização dos robôs móveis. Diversos investigadores têm procurado resolver este problema através de duas abordagens distintas:

- A primeira abordagem baseia-se, simplesmente, nos ecos resultantes das leituras sequenciais, onde apenas o TOF medido por cada sensor é utilizado. Considerando, somente, as leituras de um único sensor, a classificação de reflectores torna-se impossível, mas combinando várias leituras de vários sensores enquanto o robô se move, a situação torna-se diferente; é possível identificar geometrias simples, tais como segmentos, arcos ou pontos que podem representar reflectores, tais como: paredes, colunas ou arestas. A informação é, geralmente, representada num plano bidimensional, isolando-se os grupos de pontos que aparentam pertencer a um reflector comum. As restantes medidas podem ser rejeitadas ou consideradas como duvidosas.

Alberto Elfes foi um dos primeiros a propor a identificação dos contornos geométricos dos objectos, de modo a constituírem referências para a navegação e localização dos robôs [Elfes, 1987]. O seu método divide o ambiente do robô numa grelha de pequenas áreas, onde cada célula contém o grau de probabilidade de se encontrar ocupada. Este mapa de grelhas identifica os grupos de células ocupadas e determina os seus limites geométricos que são rotulados como objectos. Mais tarde, James L. Crowley sugeriu a utilização de segmentos, identificando as colinearidades nas medidas obtidas [Crowley, 1989]. Philip McKerrow foi um dos primeiros a usar segmentos extraídos dos mapas obtidos por um robô em movimento [McKerrow, 1993]. Os segmentos resultavam, fundamentalmente, de reflectores planos. Leonard e Durrant-Whyte utilizam leituras sequenciais para extraírem as Regiões de Profundidade Constante (RCDs) e, assim, identificarem reflectores, tais como planos, cantos ou cilindros [Leonard and Durrant-Whyte, 1991]. Muitos outros trabalhos seguiram o percurso desta primeira abordagem, partilhando uma complexa carga de informação com elevadas exigências computacionais.

- A segunda abordagem, que esta tese segue, baseia-se na utilização de grupos de sensores que colaboram nas medições. Não se consideram apenas os ecos individuais; um ou vários sensores transmitem os seus sinais e todos recebem e processam os ecos. Uma escolha selectiva do tipo de reflectores é importante neste tipo de aplicação, já que a diversidade de objectos a identificar determina a complexidade do processamento, assim

como os recursos necessários para a sua representação e caracterização. Uma correcta identificação do tipo de reflectores reduz a ambiguidade, aumentando a exactidão do sistema de localização. Planos verticais ou paredes, arestas e cantos são óptimos candidatos para serem identificados por este tipo de sistemas. Esta abordagem de investigação, que sugere a utilização de grupos de dois e mais sensores para diferenciar reflexões de paredes e cantos, usando para isso o processamento da amplitude do eco recebido, foi iniciada por Kuc [Kuc and Di., 1987; Barshan and Kuc, 1990]. Mais tarde, Sabatini [Sabatini, 1992b] utilizou um grupo de três receptores e um transmissor para classificar os três tipos básicos de superfícies reflectoras, processando também a amplitude dos ecos recebidos. Kleeman [Kleeman and Kuc, 1995] e Pires [Pires et al., 1996], entre muitos outros, começaram a utilizar grupos de vários sensores do tipo Transmissor/Receptor ³, processando apenas a informação TOF para classificar reflectores como planos, arestas, cantos e desconhecido.

Com as técnicas de processamento actuais, os objectos reflectores podem ser localizados com milímetros de precisão e classificados de acordo com a sua geometria, como plano, aresta ou canto. Todas as restantes leituras não incluídas nestas categorias podem ser desprezadas ou consideradas como não classificadas. Para permitir uma maior precisão na detecção e identificação dos diferentes tipos de reflectores, é necessário utilizar algum *hardware* específico que permita uma amostragem rápida dos ecos e facilite o processamento da informação. Nesta tese, será apresentado um novo *hardware*, desenvolvido para melhorar a eficácia no processamento da informação, novas modelações experimentais dos sensores e um novo sistema bi-aural. Por fim, será proposto um sistema classificador de Bayes e serão apresentados resultados experimentais da detecção e identificação de superfícies reflectoras em ambientes reais, recorrendo à construção de mapas.

³Sensores do tipo Transmissor/Receptor ou T/R, são sensores que podem funcionar alternadamente como transmissores ou receptores de ultra-sons.

1.2 Trabalho realizado

Neste trabalho, é proposta uma nova configuração de sensores e novos métodos de processamento – designados por ME-EERUF⁴–, com capacidade para localizar e classificar com elevada exactidão superfícies reflectoras do tipo plano, aresta e canto. O novo sistema consiste num simples par de sensores da Polaroid, alinhados colinearmente e que, sem efectuar movimentos, colaboram nas medições, utilizando simplesmente a informação de TOF.

Embora já existam outros sistemas que também utilizam vários sensores para identificar superfícies reflectoras, a configuração e métodos de processamento apresentados é inovadora na técnica de disparo dos sensores. Para além da sua simplicidade e da capacidade de identificar reflectores, este sistema permite taxas de aquisição livres de erros e interferências, muito superiores às obtidas pelos métodos vulgarmente utilizados.

Os resultados dos trabalhos científicos, desenvolvidos ao longo das várias fases desta tese, têm vindo a ser publicados em várias conferencias internacionais [Moita et al., 1994a,b,c; Pires et al., 1996; Moita and Nunes, 2001, 2003].

1.3 Organização da tese

Os primeiro cinco capítulos descrevem as características dos sensores de ultra-sons e o estado da arte relativamente aos diferentes sistemas e métodos de detecção e classificação de reflectores. Os capítulos finais apresentam já resultados do trabalho desenvolvido, desde a modelação experimental do sensor ao desenvolvimento do sistema ME-EERUF e seus resultados experimentais.

Os capítulos desta tese encontram-se organizados do seguinte modo:

Capítulo 2: Este capítulo contém uma breve descrição dos sensores de ultra-sons utilizados em robótica móvel, nomeadamente, o sensor da Polaroid. É apresentado um breve resumo do princípio de funcionamento e do modelo físico, essencial para uma correcta interpretação da informação fornecida por estes sensores. São dadas a conhecer ainda algumas vanta-

⁴Multi-Echo Error Eliminating Rapid Ultrasonic Firing, sistema apresentado e desenvolvido no capítulo 7.

gens e desvantagens mais evidentes. Realçam-se também algumas características técnicas relevantes para a utilização do sensor no sistema de identificação, e um breve resumo do funcionamento do módulo controlador.

Capítulo 3: A energia irradiada pelos sensores de ultra-sons não se concentra unicamente num raio perpendicular ao sensor. A localização do objecto reflector torna-se difícil de determinar e é uma das principais causas de erros. Como é um processo difícil de caracterizar, têm sido sugeridas várias aproximações. Neste capítulo, é, então, apresentado um resumo dos modelos de sensores mais utilizados em aplicações de robótica móvel.

Capítulo 4: Os sensores de ultra-sons são utilizados pelos robôs móveis para a percepção do meio ambiente; por isso, a velocidade de aquisição e o tipo de informação obtida desempenham um papel importante no sucesso destas aplicações. Assim sendo, este capítulo incide sobre alguns sistemas de sensores e métodos de detecção e identificação desenvolvidos por diversos investigadores.

Capítulo 5: O robô deve ter capacidade de interpretar o ambiente que o rodeia, assim como criar e gerir modelos que o representem, de forma a ser capaz de o explorar autonomamente e de se adaptar à sua dinâmica. Neste sentido, é elaborada, neste capítulo, uma breve descrição de métodos de construção de mapas mais comuns em aplicações de robótica móvel.

Capítulo 6: Além de uma breve descrição de algumas modificações feitas no sensor, com vista a melhorar o seu desempenho, este capítulo apresenta ainda uma descrição do sistema de aquisição de dados usado experimentalmente, e, por fim, uma análise minuciosa de todos os dados obtidos, com o objectivo final de propor um novo modelo experimental para o sensor.

Capítulo 7: Neste capítulo, são apresentadas e modeladas duas configurações de sensores, o par colinear e o par não-colinear. Uma nova técnica de aquisição de dados, que conjuga o modo ecos-múltiplos do sensor da Polaroid e o método EERUF, dá origem ao novo método ME-EERUF, modelado e testado neste capítulo. Com a utilização deste método,

estes sistemas são capazes de detectar e identificar os três tipos básicos de reflectores plano, aresta e canto. Para além desta vantagem, este método permite um ciclo de disparo muito mais pequeno, com uma elevada capacidade de rejeição de interferências e, conseqüentemente, uma mais rápida taxa de aquisição de dados.

Capítulo 8: Neste capítulo, são referidos os resultados experimentais relativos à detecção e identificação de reflectores, usando o novo sistema e métodos ME-EERUF. É proposto um sistema classificador de Bayes e são utilizados dois tipos de mapas métricos para representar o ambiente: um mapa de grelhas, em que a área de trabalho do robô é representada por uma grelha bidimensional de células quadradas com $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$, onde a informação dos sensores é fundida, usando regras de Bayes; um mapa de formas geométricas em que o ambiente que rodeia o robô é representado por uma lista contendo os reflectores planos, cantos e esquinas, identificados pelo sistema e as suas propriedades, localização, orientação e tamanho.

Capítulo 9: No último capítulo são tecidas as principais conclusões do trabalho desenvolvido nesta tese e algumas propostas para futuro desenvolvimento.

Capítulo 2

O Sensor de Ultra-Sons

O termo *ultra-som* é usualmente aplicado a ondas acústicas, cuja frequência está para além do limite de audibilidade humana, pois esta limita-se à gama de frequências, que se situa, aproximadamente, entre 20 Hz e 20 kHz . Os sensores de ultra-sons operam, normalmente, com frequências compreendidas entre os 20 kHz e alguns gigahertz para aplicações médicas e de caracterização de materiais através de testes não destrutivos (NDT).

Dentro de um amplo leque de aplicações que se pode encontrar para os ultra-sons, existe a medição de distâncias. Um dos princípios básicos que permite utilizar estes sensores como uma ferramenta de medição de distâncias é a medição do intervalo de tempo decorrido entre a emissão de uma onda ultra-sonora e a recepção da sua reflexão na superfície de um objecto. Esta técnica designa-se por *tempo de voo* ou *TOF*. Em robótica móvel, estes sensores são habitualmente utilizados para medir as distâncias desde o robô aos objectos que o rodeiam. Éssa informação é depois usada para determinar a sua posição ou desencadear as acções de controlo necessárias para a sua condução, evitando assim colisões indesejáveis com obstáculos estáticos ou em movimento.

O princípio de medição de pequenas distâncias, usando a propagação do som no ar, é um processo fácil de explicar (Figura 2.1): um pulso ultra-sonoro é transmitido no ar e, quando incide na superfície de um objecto, é total ou parcialmente reflectido (eco), podendo, depois, ser detectado pelo receptor. O tempo que decorre desde a transmissão até à recepção do eco - o TOF - pode, então, ser medido com sistemas electrónicos simples. Deste modo, a distância

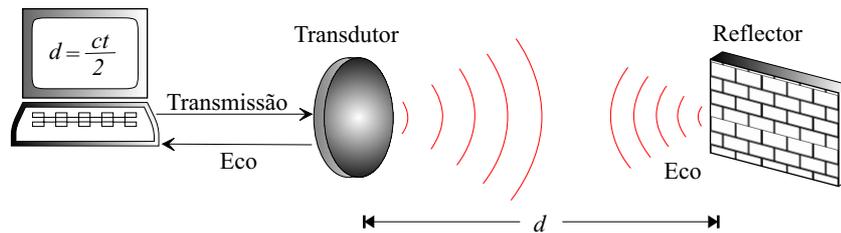


Figura 2.1: Funcionamento básico do sensor de ultra-sons.

d entre o transdutor e o objecto reflector pode ser calculada através do tempo t medido e da velocidade de propagação do som no ar, c .

$$d = \frac{c.t}{2} \quad (2.1)$$

2.1 Modelo físico

Os transdutores electrostáticos, como o da Polaroid, são modelados teoricamente como um pistão plano radiante [Kinsler, 1982]. Ao ser aplicada uma tensão eléctrica com uma frequência ultra-sónica aos seus terminais, é exercida uma força electrostática sobre a fina membrana de plástico (Kapton), revestida por uma fina película de ouro que gera uma pressão sonora, cuja amplitude $P(\theta)$ se distribui espacialmente de acordo com a equação

$$P(\theta) = \left| \frac{2J_1(k.a. \sin \theta)}{k.a. \sin \theta} \right| \quad (2.2)$$

onde ¹

J_1 é uma função de Bessel do 1º tipo, 1ª ordem;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ e λ é comprimento de onda ($\lambda = 6.95 \text{ mm}$);

a é o raio do transdutor;

θ é o ângulo com o eixo perpendicular ao transdutor.

Para o caso do transdutor da Polaroid, a distribuição da amplitude irradiada, caracterizada por $P(\theta)$, encontra-se representada no gráfico polar da Figura 2.2. Como se pode observar, as

¹Considerando como referência o transdutor electrostático, modelo 600, da Polaroid, com uma frequência de 49.9kHz e um raio de 19 mm e, considerando ainda, uma velocidade do som, à temperatura ambiente de 20°C, de 344 m/s

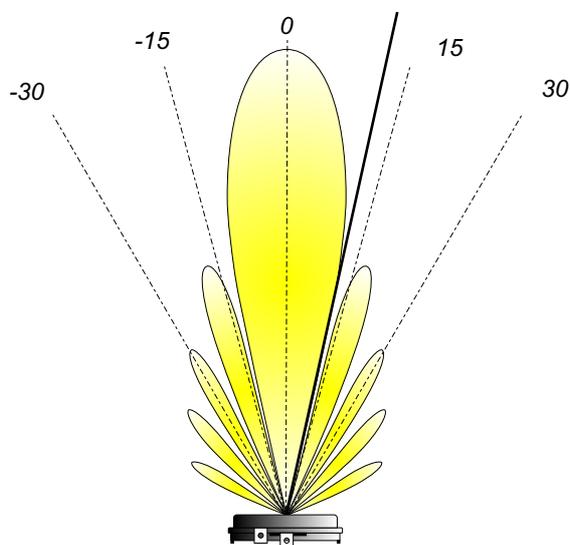


Figura 2.2: Forma polar da energia irradiada pelo transdutor da Polaroid (gráfico polar com escala logarítmica).

ondas ultra-sónicas são irradiadas em todas as direcções, com a sua amplitude distribuída por pequenos lóbulos. A abertura do lóbulo de irradiação principal, com mais energia, pode ainda ser aproximada pela equação

$$\theta_0 = \arcsin\left(\frac{0.61\lambda}{a}\right) \quad (2.3)$$

Para o transdutor da Polaroid em estudo, obtém-se uma abertura do lóbulo principal de $\theta_0 = 12.9^\circ$, verificando-se também que o lóbulo principal de emissão é tanto mais apertado, quanto maior for o raio do transdutor e mais elevada a frequência de emissão.

2.2 Características dos sensores de ultra-sons

Com um largo leque de aplicações, nomeadamente em aplicações de robótica móvel, os sensores de ultra-sons são muito utilizados na medição de distâncias e na detecção e identificação de objectos.

A Polaroid começou por usar estes sensores nas suas primeiras câmaras fotográficas com focagem automática, com o objectivo de medir a distância aos objectos. No entanto, esses sensores são muitas vezes utilizados em aplicações industriais, servindo, portanto, para a medição,

sem qualquer contacto, de pequenos objectos a longas distâncias, sempre que sensores ópticos ou indutivos sejam muito dispendiosos ou, simplesmente, não o permitam. Relativamente a outras alternativas, como por exemplo a visão artificial, os infravermelhos, lasers, odometria, etc., os ultra-sons poderão apresentar algumas vantagens em alguns aspectos, tais como a velocidade, a precisão e a simplicidade. Apesar disso, é importante ter em consideração que os outros sensores possuem vantagens em detalhes complementares, pelo que se tende a integrar diferentes tipos sobre um mesmo sistema, extraíndo-se de cada um deles os aspectos mais positivos.

2.2.1 Principais vantagens

As vantagens que um sensor pode apresentar estão, de algum modo, relacionadas com o tipo de aplicação. Eis alguns dos aspectos mais positivos da utilização de sensores de ultra-sons, quando utilizados em robótica móvel:

Custo: Uma das principais vantagens dos sensores de ultra-sons sobre outros sensores convencionais reside na sua relação custo/desempenho, mostrando assim, capacidade de resolução de problemas em diversas aplicações onde outros sensores se apresentam, por vezes, com preços proibitivos.

Alcance: Como se realizam medidas com grande alcance, tendo em conta as dimensões habituais dos robôs móveis, é necessário um emissor de ultra-sons com suficiente potência, de modo que a reflexão do feixe ultra-sónico, num obstáculo relativamente distante, devolva ao receptor uma potência sonora detectável. Estes sensores podem ter um alcance de cerca de 10 metros.

Medições sem contacto: Os sensores de ultra-sons permitem fazer medições sem contacto, livres das incómodas interferências externas, frequentemente encontradas em ambientes industriais, tais como vibrações, radiações, poeiras, etc.

Precisão: A precisão das medidas está dependente, entre outros factores, da temperatura ambiente ou do próprio sistema de aquisição. Ainda que neste tipo de aplicações possam ser perfeitamente toleráveis margens de erro na ordem dos milímetros, ou mesmo de

centímetros, é possível fazer medições sem contacto para grandes distâncias com erros inferiores a 1 %, havendo a possibilidade de ser ainda melhoradas se se recorrer a sistemas de aquisição mais sofisticados.

Direccionalidade: A direccionalidade do sensor é dada pelo ângulo de abertura, que determina a resolução horizontal (capacidade para distinguir obstáculos distintos) e que também está dependente do diâmetro do sensor. Existe um compromisso entre a resolução horizontal e a capacidade de detectar a presença de obstáculos pontuais. É lógico pensar que, se o feixe for muito estreito, haverá que fazer muitas medidas. Enquanto alguns sensores conseguem detectar objectos a grandes distâncias, numa área relativamente larga, isso não é possível sem a utilização de múltiplos sensores em simultâneo ou efectuando muitas medições.

Insensível ao tipo de materiais: Os sensores de ultra-sons – praticamente insensíveis ao tipo de materiais – conseguem detectar objectos de qualquer cor, transparentes, sólidos ou líquidos.

2.2.2 Principais desvantagens

Pela natureza do método de medida em si, a informação proveniente de um sensor pode ser bastante imprecisa devido a um grande número de factores internos e externos. Para além de algumas limitações intrínsecas dos sensores, também os sinais emitidos estão sujeitos a interferências enquanto se propagam no ar.

Os sensores de ultra-sons estão longe de ser ideais. Eis alguns dos aspectos menos positivos destes sensores, quando utilizados em robótica móvel:

Incerteza na posição: Muitas vezes, considera-se que a distância medida se refere a um objecto situado no eixo perpendicular ao sensor. Esta interpretação seria de facto a interpretação mais simples, mas estaríamos a esquecer-nos de pelo menos dois aspectos: a natureza especular da maioria dos objectos, que se encontra nos ambientes interiores, onde geralmente este tipo de sensores é usado, e a emissão espacial das ondas sonoras, muito diferente

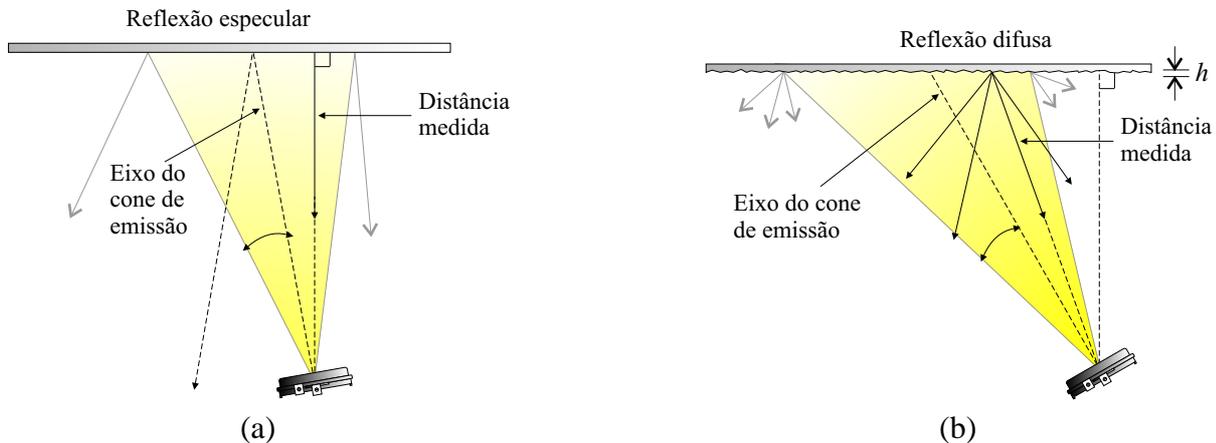


Figura 2.3: (a) Reflexão especular: as ondas ultra-sonoras são reflectidas como a luz num espelho. (b) Reflexão difusa: é necessário que h seja de dimensão superior a λ (comprimento de onda).

de um raio laser pontual. Objectos, como paredes, caixotes, pilares, tubos, móveis, etc., reflectem os ultra-sons tal como um espelho reflecte a luz (Figura 2.3-a); o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. Mais precisamente, esta reflexão, chamada de *especular*, acontece sempre que as superfícies desses objectos apresentam irregularidades com dimensões inferiores ao comprimento de onda do ultra-som, ou seja, $h < \lambda$ (Figura 2.3-b); caso contrário, a reflexão será do tipo *difusa*, mas, mesmo assim, o valor medido pode não ser igual à distância sobre o eixo de emissão.

No caso dos sensores da Polaroid, que emitem ondas de ultra-sons com uma frequência de 49.4 kHz [Polaroid, 1999b], e considerando uma velocidade do som de 344 m/s à temperatura ambiente de 20°C (Tabela 2.1), o comprimento de onda é de aproximadamente 7 mm . Exceptuando alguns casos particulares, podemos afirmar que a generalidade dos objectos é especular e, por isso, reflecte completamente os ultra-sons.

Tendo em conta todos estes factos, raramente o valor medido corresponde à distância entre o sensor e o objecto, ao longo do eixo de emissão. Só existe correspondência quando o eixo de emissão se encontra perpendicular à superfície reflectora. Por isso, os valores obtidos apresentam **incertezas**, não só na **distância** medida, mas também na posição **angular** do objecto reflector.

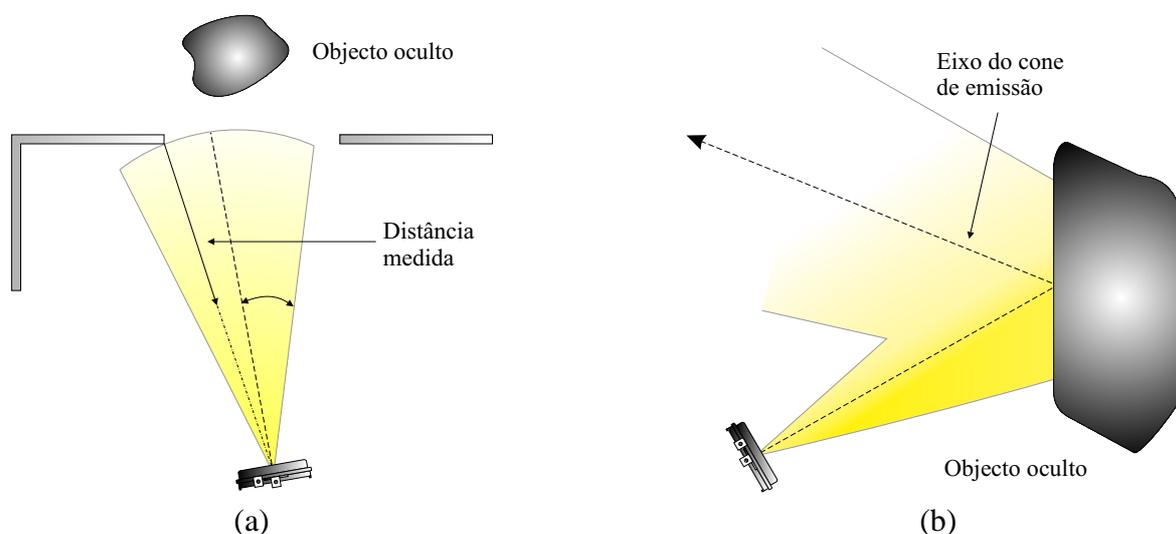


Figura 2.4: (a) Objecto oculto. Devido à largura do cone de emissão (θ), o objecto não é detectado. Se a largura do feixe for grande, relativamente à abertura, esta pode também não ser detectada. (b) Devido à reflexão especular dos ultra-sons e a um ângulo de incidência muito grande, não é reflectida nenhuma energia de volta ao sensor e o objecto não é detectado.

Objectos ocultos: Outra situação ocorre quando a largura do feixe limita a possibilidade de o sensor medir através de espaços estreitos, como no caso de portas (Figura 2.4-a), fazendo com que objectos mais distantes não sejam detectados e fiquem **ocultos** devido à largura do feixe de emissão. A própria abertura – porta ou janela– pode não ser detectada ou, antes, ser identificada como sendo uma passagem demasiado estreita para o robô passar.

Pode ainda ocorrer o facto de o feixe emitido incidir sobre a superfície do objecto com um ângulo demasiado elevado e a onda não ser reflectida de volta para o sensor (Figura 2.4-b). Neste caso, muitas vezes designado por **erro especular** devido à reflexão especular do sinal, o sensor não detecta o objecto, e o sistema de aquisição devolve um valor correspondente à gama máxima.

Velocidade de propagação: Outra das potenciais fontes de erro para os sistemas de medição TOF é a variação da velocidade de propagação do som que depende das condições ambientais do meio de propagação, neste caso o ar. A principal variável que afecta a velocidade de propagação é a temperatura.

Temperatura $^{\circ}C$	Velocidade do som (m/s)	Distância (cm)
-20	320	107.5
0	332	103.6
20	344	100.0
40	356	96.6

Tabela 2.1: Efeito da temperatura sobre a velocidade de propagação do som no ar, e a distância medida a um objecto, considerando a velocidade do som constante e igual a $344 m/s$.

A velocidade de propagação do som no ar é dada aproximadamente por

$$c \simeq 20.1\sqrt{\Theta_k} \text{ (m/s)} \quad (2.4)$$

onde Θ_c é a temperatura ambiente em graus centígrados e $\Theta_k = \Theta_c + 273^{\circ}C$, a temperatura em graus Kelvin. Num ambiente mais frio, as moléculas do ar movem-se mais lentamente, diminuindo, desta forma, a velocidade com que o som se propaga. Na Tabela 2.1, pode observar-se esse efeito na velocidade do som para diferentes temperaturas e a distância que seria medida para um objecto situado a um metro de distância, considerando-se a velocidade do som constante e igual a $344 m/s$. Como se pode concluir, o efeito da temperatura é significativo na variação da velocidade do som e uma variável a ter em conta em sistemas de medição, usando a propagação do som no ar.

Posição ou tipo de objecto: A posição ou tipo de objecto, pode ser também uma fonte de incerteza. A distância a que um objecto é detectado por um mesmo sensor, varia com o seu tamanho, com a sua orientação relativamente ao eixo de transmissão e também com o tipo de material. Estas características fazem variar a intensidade do sinal reflectido, fazendo com que os objectos menos reflectivos pareçam mais distantes.

Crosstalk: Este tipo de interferência ocorre quando um sensor recebe um sinal inesperado, causando uma falsa leitura. Esse sinal provém de outro sensor ou do próprio, depois de este sofrer várias reflexões.

O primeiro caso pode acontecer quando dois sensores são disparados com intervalos de tempo muito próximos. Se um sensor for disparado pouco tempo depois de outro, o sinal emitido pelo primeiro pode ainda ter energia suficiente para activar o receptor do segundo

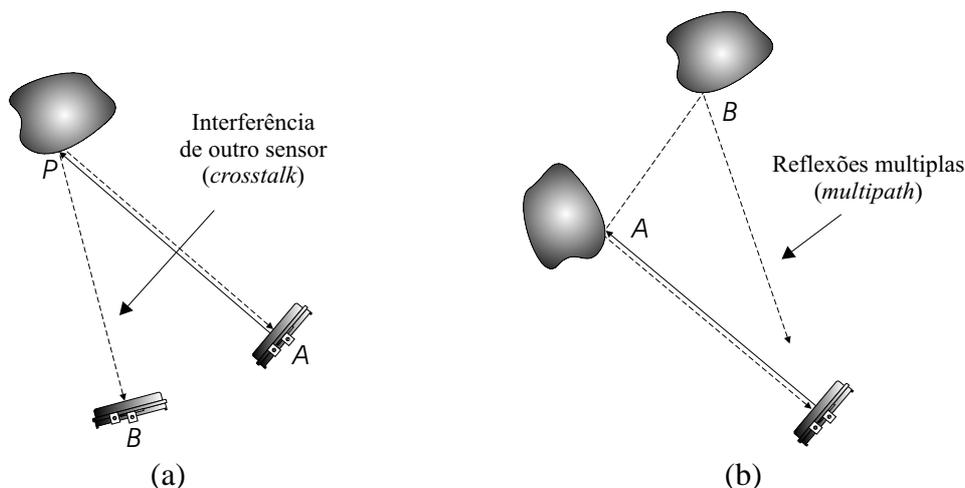


Figura 2.5: (a) O sensor **A** dispara e recebe o sinal reflectido no ponto **P**. O sensor **B** é activado logo em seguida, sem respeitar o período de transmissão (Tabela 2.2) e recebe ainda o sinal de **A**. Este tipo de interferência é designado por *crosstalk* (b). O sinal reflectido em **A** é novamente reflectido em **B** em direcção ao sensor. Este tipo de interferência, normalmente designado por *multipath*, dá origem a falsas leituras e ocorre frequentemente.

e, assim, resultar numa medida arbitrária e errada (Figura 2.5-a). O segundo caso pode resultar da reflexão múltipla de um sinal em vários objectos, activando inesperadamente o sensor (Figura 2.5-b). Nos dois casos, sempre que surgir um percurso crítico, a interferência por *crosstalk* ou *multipath* poderá repetir-se continuamente, provocando falsas leituras, até que o robô se mova para outra posição.

2.3 O sensor da Polaroid

O Sensor da Polaroid é um sensor que reúne boas características, a um preço acessível. Este sensor é comercializado pela Polaroid Ultrasonic Components Group, que disponibiliza um conjunto que combina o transdutor electrostático da série 600 (Figura 2.6) com o módulo controlador de sinal da série 6500 (Figura 2.7). O transdutor é do tipo electrostático, capaz de funcionar numa ampla gama de frequências (a maioria dos sensores empregados em aplicações com ultra-sons são piezoeléctricos e só são eficientes perto das suas frequências de ressonância). Com o transdutor de ultra-sons, que funciona como emissor ou receptor, pode adquirir-se o módulo controlador de sinal da série 6500, que incorpora uma etapa de potência para a actuação

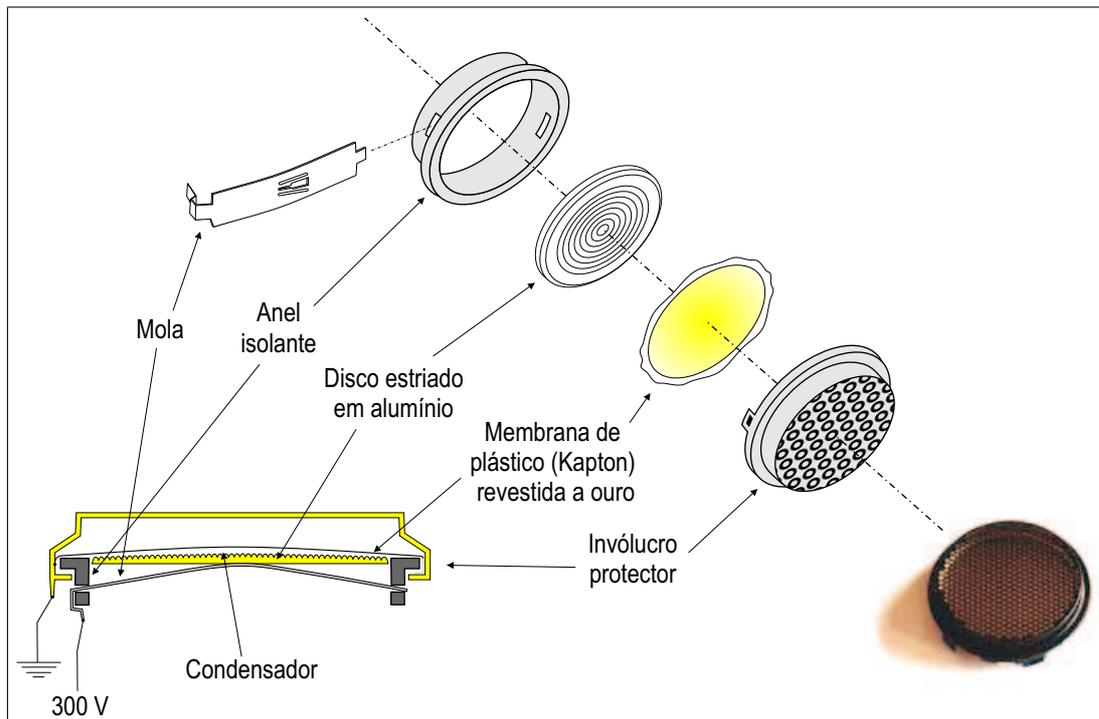


Figura 2.6: Transdutor Electrostático da Polaroid (600 Series Instrument Grade Electrostatic Transducer).

do transdutor, na emissão, e outra de recepção, quando se emprega o transdutor como receptor. Com o módulo controlador associado, este sensor permite realizar medidas que vão desde os 10 *cm* a mais de 10 metros, com uma resolução de $\pm 0,1\%$ (Tabela 2.2). É ainda de salientar, nestes sensores, a boa resposta, tanto em emissão, como em recepção; a extrema simplicidade deste conjunto transdutor/controlador; e ainda o seu baixo custo. O *hardware* necessário para se completar o sensor é um circuito capaz de medir o intervalo de tempo desde a transmissão até à recepção do eco. Esta função pode ser facilmente implementada por um contador digital ou recorrendo ao uso de um microcontrolador.

2.4 O módulo controlador da série 6500

O módulo da série 6500, representado na Figura 2.7, permite, com um simples interface e sem qualquer *hardware* adicional, controlar os sensores electrostáticos da Polaroid. Este módulo, cujo esquemático se apresenta na Figura 2.8, tem dois modos de funcionamento

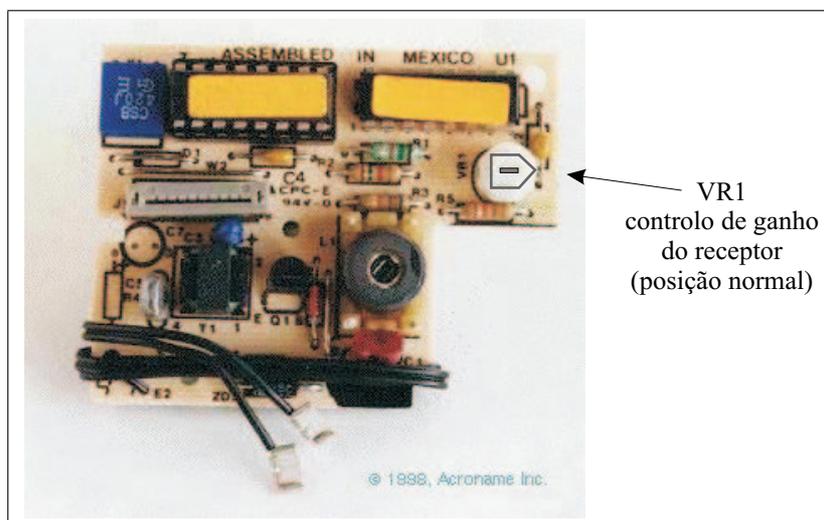


Figura 2.7: Módulo controlador da Polaroid (6500 Series Sonar Ranging Module).

Tensão de alimentação, V_{CC}	4.5 V – 6.8 V
Nível lógico alto à entrada, V_{IH}	2.1 V
Nível lógico baixo à entrada, V_{IL}	0.6 V
Tensão de polarização do transdutor na recepção	200 V
Tensão de saída na transmissão (pico-a-pico)	400 V
Nº de ciclos para a saída atingir 400 V	7 (142 μ s)
Intervalo de desactivação interna da recepção após <i>INIT</i>	2.38 ms
Frequência durante a transmissão dos 16 pulsos	49.4 kHz
Período de ciclo de transmissão (recomendado)	80 ms
Precisão	$\pm 0.1\%$
Consumo de corrente (normal)	100 mA
Consumo de corrente durante a transmissão	2000 mA

Tabela 2.2: Características relevantes do módulo 6500 a funcionar com o transdutor electrostático da Polaroid.

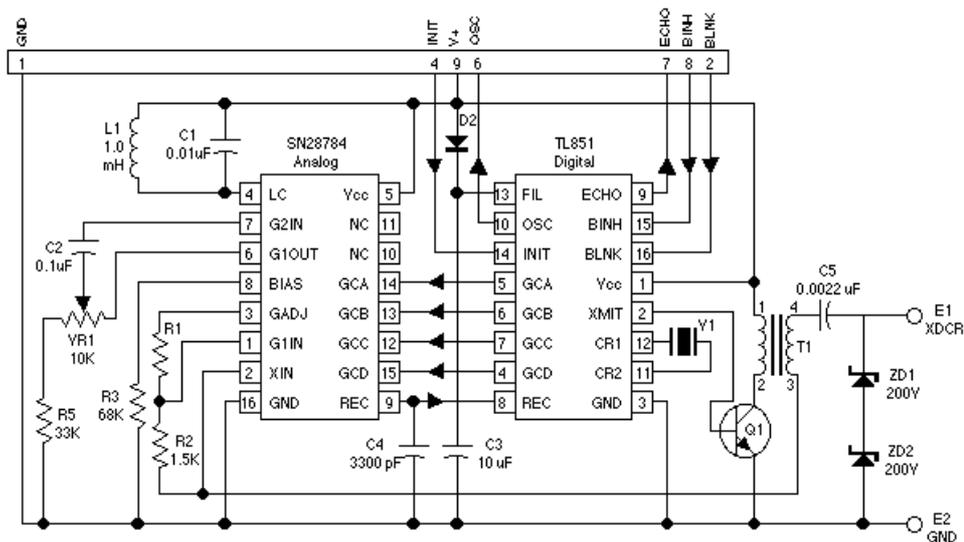


Figura 2.8: Esquemático do módulo controlador 6500 da Polaroid.

básicos: o modo *eco-simples* e o modo *ecos-múltiplos*. Em qualquer dos modos de funcionamento, o início da transmissão é feito activando a entrada *INIT* [Polaroid, 1999b]. Com a activação de *INIT*, é iniciada a transmissão de 16 pulsos a 49.4 kHz , com uma amplitude de 400 V . No final da transmissão, uma tensão de polarização de 200 V permanece entre os terminais do transdutor, sendo esta a tensão sugerida pelo fabricante para polarizar o receptor de modo a funcionar na sua máxima sensibilidade [Polaroid, 1999a]. Para impedir a interpretação indesejável de ecos – resultantes do próprio sinal transmitido, de reflexões muito próximas ou no próprio transdutor, ou, ainda de oscilações que permaneçam no transdutor após a transmissão, devido à inércia mecânica e eléctrica do sensor – é desactivada, internamente, a entrada do receptor (*REC*) durante 2.38 ms após o início da transmissão. Este intervalo impõe um limite inferior de 40 cm e, para aplicações que necessitem de medições mais curtas, esta limitação pode ser ultrapassada activando o sinal *BINH* alguns instantes depois de *INIT*, habilitando automaticamente a entrada do receptor e permitindo, assim, a detecção de objectos a distâncias mais pequenas. A transmissão dos 16 pulsos demora apenas 0.3 ms , e o transdutor fica sujeito a ressonâncias durante o período seguinte; por isso, é possível activar a recepção a partir dos 0.6 ms , habilitando a medição de distâncias até aproximadamente 10 cm .

Capítulo 3

Modelos de reflexão dos sensores de ultra-sons

Podemos modelar um processo físico através de leis físicas ou de modelos estatísticos. Alguns aspectos do processo podem ser previsíveis por leis físicas, porém, outros caem fora desse domínio, ou porque as suas leis não são ainda completamente conhecidas, ou porque o processo é tão complexo e incorpora tantas variáveis, que impossibilita uma modelação estritamente física. Nestes casos, é comum recorrer-se a modelos probabilísticos ou a modelos compostos.

O processo de medição de distâncias, usando a propagação do som através do ar, é claramente um processo difícil de modelar, pois está presente um grande leque de variáveis. A velocidade de propagação do som no ar pode ser afectada, entre outros, pela temperatura, pressão, humidade, turbulência, etc. Variáveis como a absorção dos diferentes materiais onde é reflectido, interferências provenientes de outras fontes sonoras (*crosstalk*) ou reflexões com diferentes percursos (*multi-path*), além de outras, fazem com que modelos estritamente físicos se tornem extremamente complexos e computacionalmente exigentes.

3.1 Modelos pontuais

Os modelos pontuais, também conhecidos por *ray-tracer*, consideram o feixe de ultra-sons como um raio fino perpendicular ao sensor e a distância medida, como resultante da intersecção

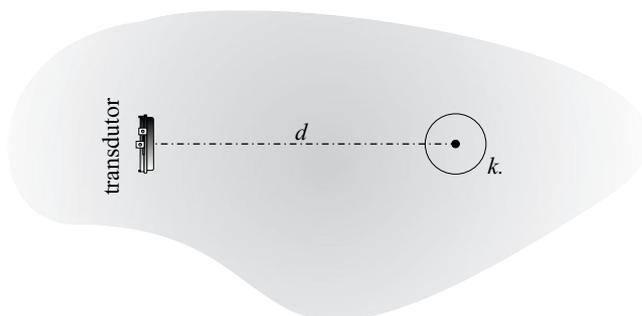


Figura 3.1: Modelo Pontual. O feixe de ultra-sons é, normalmente, representado pela linha do eixo acústico do sensor e a distância medida por um ponto. Por vezes, o ponto é complementado com informação da incerteza, delimitada por uma circunferência com raio proporcional ao desvio padrão da medida, nesse ponto.

desse eixo com o objecto, sendo representada como um ponto à distância d (Figura 3.1). Este modelo é visto como demasiado simplista, pois abstrai-se das regras da reflexão especular e da incerteza angular, inerentes a uma medição por ultra-sons. Embora este modelo tenha sido utilizado por diversos investigadores, tem vindo a ser substituído por outros modelos mais complexos ou complementado com alguns mecanismos estatísticos capazes de lidar com a informação ruidosa.

Modelo linear

A representação da distância medida só por um ponto localizado no eixo acústico do sensor foi usada por alguns autores que rapidamente detectaram as suas limitações [Nagatani et al.; Hakala et al., 1992]. A Figura 3.2, exemplifica uma das limitações mais evidentes – a oclusão (nem sempre o objecto reflector se encontra no eixo acústico do sensor, criando falsas interpretações do meio envolvente) –. Apesar de limitado, este modelo serviu como base para modelos mais complexos, como o proposto por Kuc, que recorre a técnicas de integração de pontos para detectar segmentos [Kuc, 1990; MacKenzie and Dudek, 1994; Lacroix and Dudek, 1997] (ver exemplos na Figura 4.13).

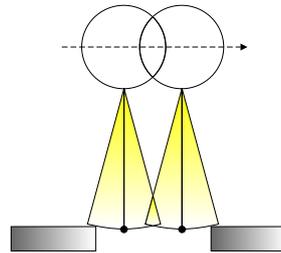


Figura 3.2: A localização de obstáculos é fortemente penalizada pela utilização do modelo pontual. Na figura, o robô não tentará transpor a passagem porque esta lhe parece demasiado estreita.

Modelo de incerteza

Ingemar J. Cox complementou o modelo linear com alguma informação estatística e representou cada ponto medido por uma região de incerteza, delimitada por uma circunferência com raio proporcional ao desvio padrão nessa distância [Cox, 1990] (Figura 3.1 e exemplo de aplicação na Figura 5.6).

Modelo dos histogramas

A utilização de modelos mais elaborados implicam maior necessidade de processamento, penalizando qualquer sistema que pretenda funcionar em tempo real. Borenstein e Koren [Borenstein and Koren, 1991a] utilizaram o modelo pontual para a construção de mapas em tempo real, usando grelhas de probabilidade. A probabilidade de as células que se encontram sob o eixo acústico estarem ocupadas é decrementada, e apenas a probabilidade da célula que está sob o ponto é incrementada (Figura 3.3). Embora pareça uma excessiva simplificação, a sua funcionalidade tem sido demonstrada em diversas aplicações, nomeadamente no método de construção de mapas em tempo real (HIMM - *Histogram In-Motion Mapping*), apresentado na secção 5.1.1.

3.2 Modelos em arco

Como o perfil acústico transmitido por um sensor de ultra-sons tem a sua maior amplitude num cone centrado no eixo perpendicular ao transdutor e com uma abertura definida pela

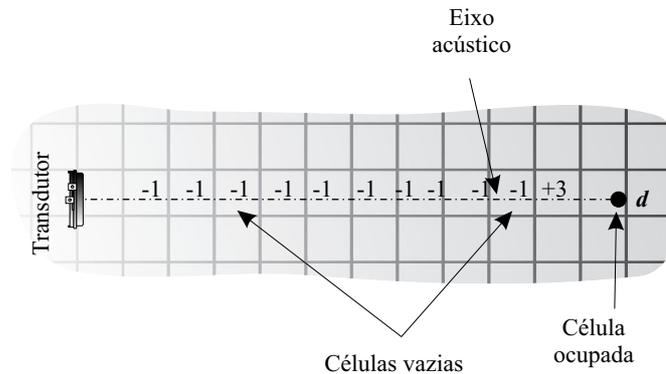


Figura 3.3: Modelo Pontual HIMM. A probabilidade de as células sob o eixo acústico estarem ocupadas é decrementada, enquanto a probabilidade da célula sob o ponto é fortemente incrementada.

equação 2.3, muitos autores procuraram modelar a resposta do sensor dentro desse cone e no arco de raio igual à distância medida. Estes modelos procuram caracterizar esse arco, recorrendo à análise de grandezas físicas do sensor, tais como tempo, amplitude, frequência e fase. Devido à abertura do feixe de ultra-sons emitido, o ponto de reflexão no arco não pode ser determinado com confiança. Essa incerteza na orientação é uma das principais fontes de erro que se pretende resolver com os modelos em arco.

Modelo de distribuição uniforme

O modelo de distribuição uniforme – a forma mais simples do modelo em arco – está representada na Figura 3.4, que considera que o eco pode vir de qualquer ponto de um arco com igual probabilidade; por isso, é, muitas vezes, designado como modelo de distribuição uniforme [Nagatani et al.]. A incerteza na orientação ou a abertura do cone de emissão θ_0 varia com a aplicação ou autor, e pode ser obtida experimentalmente ou, na maior parte dos casos, do modelo físico. A abertura do lóbulo de irradiação principal, com mais energia, determina a abertura do cone de emissão. Os valores experimentais de incerteza na orientação, para o transdutor da Polaroid, variam entre 11.25° [Nagatani et al.], 15° [Harris and Recce, 1998] ou 18° [Buchberger et al., 1993], entre outros. Estes valores apresentam grandes variações principalmente por inexistência de um modelo experimental adequado. Valores teóricos, determinados pela equação 2.3, para o transdutor da Polaroid em estudo, resultam numa abertura do lóbulo principal de

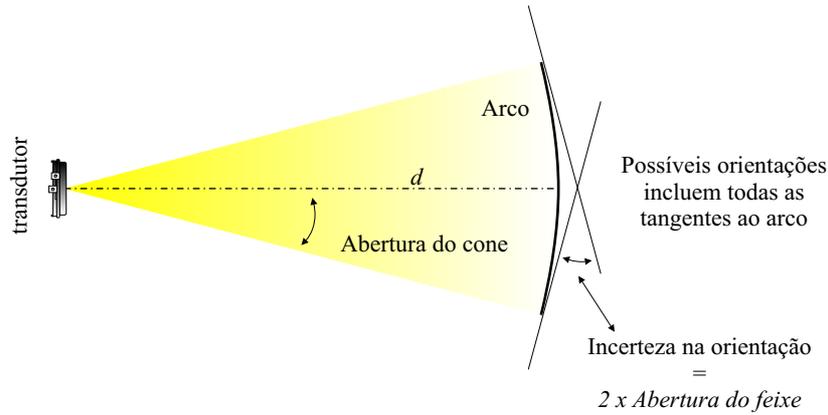


Figura 3.4: Neste modelo já se considera a natureza especular dos objectos. É considerado que o objecto reflector se encontra tangente a um ponto do arco. A incerteza dessa localização depende da abertura do cone de emissão.

$$\theta_0 = 12.9^\circ .$$

Modelo de amplitude

Este modelo em arco (Figura 3.5), estritamente físico, é utilizado por Kuc [Barshan and Kuc, 1990; Kuc and Viard, 1991] e baseia-se na equação da amplitude irradiada (Equação 2.2). Experimentalmente, pode ser demonstrado que a equação

$$p(\theta) = p_{max} \exp \frac{-2\theta^2}{\theta_0^2} \quad (3.1)$$

é uma boa aproximação para a amplitude do sinal transmitido por um sensor Polaroid dentro do cone $-10^\circ \leq \theta_0 \leq +10^\circ$ ¹. Como estes sensores funcionam inicialmente como transmissores e depois como receptores, a amplitude do eco recebido pode ser determinada pelo produto

$$A(\theta_1, \theta_2) = A_{max} \exp \frac{-2\theta_1^2}{\theta_0^2} \exp \frac{-2\theta_2^2}{\theta_0^2} \quad (3.2)$$

com a abertura do cone de emissão $\theta_0 = 10^\circ$. Assumindo que os sensores incluem um amplificador de ganho variável com o tempo, para compensar a atenuação do sinal no ar, o valor de A_{max} não depende da distância. Assumindo também que a orientação θ_1 do raio transmitido é

¹Kuc e Barshan [Barshan and Kuc, 1990] utilizaram um sensor Polaroid da série 7000 com uma frequência de emissão de $60kHz$, resultando numa abertura do cone de emissão de 10° .

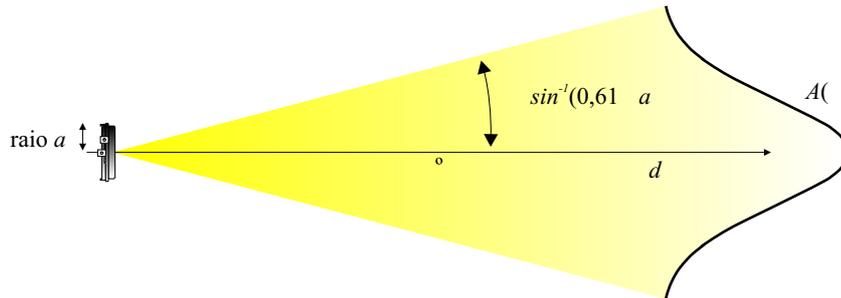


Figura 3.5: Conhecendo a amplitude máxima do eco $A_{max} = A(0^\circ)$, é possível saber a grandeza da orientação do reflector, mas não o sinal, já que $A(\theta) = A(-\theta)$.

igual à orientação θ_2 do raio recebido, obtém-se a equação final

$$A(\theta) = A_{max} \exp\left(\frac{-4\theta^2}{\theta_0^2}\right) \quad (3.3)$$

A_{max} é a amplitude observada quando o eixo de emissão se encontra perpendicular à superfície, verifica-se, assim que a amplitude diminui com o aumento do desvio θ , relativamente ao eixo de emissão.

Modelo espectral

Este modelo, desenvolvido por Yata, Kleeman e Yuta [Yata et al., 1998], permite estimar a orientação do reflector com base no desvio de frequência recebida pelo transdutor, em função da inclinação do ponto reflector. A amplitude do sinal é dependente da distância percorrida devido à dispersão e absorção no ar. No entanto, para curtas distâncias (1 a 2 m), não se verifica uma alteração significativa no espectro de frequências do eco. Quando o ângulo entre o eixo de emissão e a perpendicular ao reflector for θ , então a densidade espectral de potência do sinal recebido é

$$S_r(w) = S_0(w) \cdot H_\theta^2(w, \theta) \quad (3.4)$$

onde $S_0(w)$ é a densidade espectral de potência quando o reflector se encontra paralelo com o transdutor, e $H_\theta(w, \theta)$ é a transformada de Fourier de $h_\theta(t, \theta)$, função que descreve a transformação dos sinais eléctricos em oscilações acústicas e vice-versa.

$$h(t, \theta) = \begin{cases} \frac{4c \cos(\theta)}{\pi D \sin(|\theta|)} \sqrt{1 - \frac{2t^2}{t_w^2}} & , \left(-\frac{t_w}{2} < t < \frac{t_w}{2}\right) \\ 0 & , \text{ noutros casos} \end{cases} \quad (3.5)$$

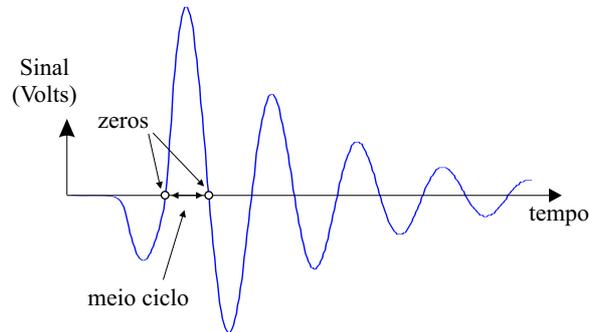


Figura 3.6: Zeros do eco e medição do primeiro meio-período.

sendo c a velocidade do som, D o diâmetro do transdutor e $t_w = \frac{D \sin \theta}{c}$ o tempo de propagação, ou de recepção, de uma onda acústica na superfície do transdutor.

Verifica-se, experimentalmente, que a amplitude varia fortemente com o tipo de objecto e a sua inclinação, mas que a distribuição de frequências na recepção apenas varia com a inclinação do ponto reflector. A densidade espectral de potência $S_r(w)$, calculada pela equação 3.4, em várias direcções de θ , mostra-se coerente com o modelo linearizado e a sua dependência com a orientação. Porém, o cálculo da densidade espectral de potência para cada eco é computacionalmente exigente, tornando o modelo pouco apelativo para medições rápidas em tempo real. Uma aproximação mais simples e rápida, conceptualmente semelhante à observação das variações da amplitude espectral, consiste na medição dos intervalos entre zeros do eco (Figura 3.6). Seleccionando os dois zeros consecutivos depois do pulso principal e medindo o seu afastamento, é possível através de uma tabela de relacionamento, obtida experimentalmente, estimar a orientação do objecto (Figura 3.7).

Devido à simetria dos transdutores, não é possível determinar o sinal da orientação do objecto reflector. Por isso, é proposta uma orientação de polarização θ_p , afastada do ponto de simetria, para que o sistema utilize apenas uma metade da tabela de relacionamento. Supondo que as variações na orientação não são muito bruscas, torna-se, assim, possível medir o sinal da orientação.

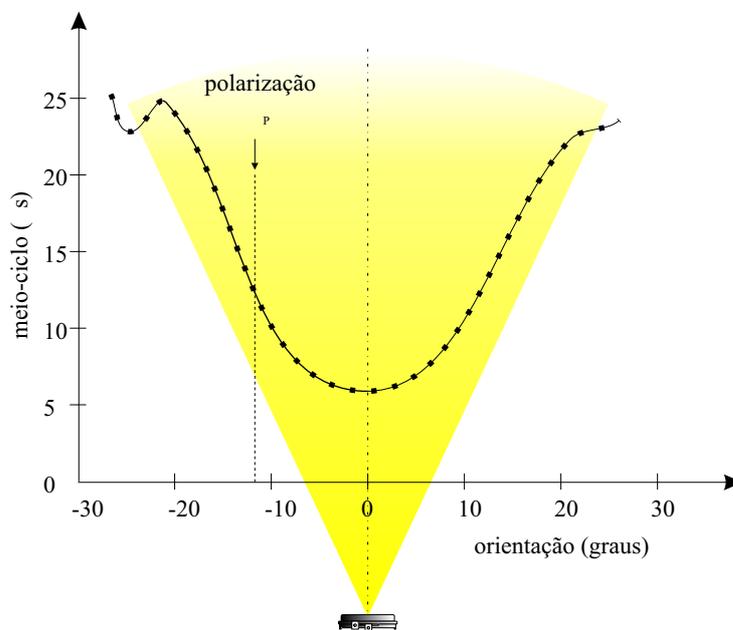


Figura 3.7: Exemplo de possível relação entre a orientação e o meio-período. O ângulo de polarização é utilizado para ultrapassar as limitações devido à simetria do sensor.

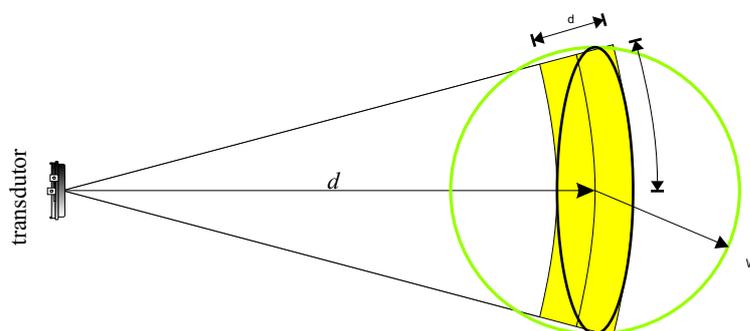


Figura 3.8: Modelo do sensor de ultra-sons e suas incertezas, proposto por Crowley [Crowley, 1989].

Modelo elipse de incerteza

James L. Crowley sugere, no seu trabalho [Crowley, 1989], um modelo para os sensores de ultra-sons, onde considera que um eco provém de uma área limitada por arcos, como se pode verificar na Figura 3.8. Aproximando esta área por uma elipse, o seu maior eixo seria σ_θ , a incerteza na orientação, e o seu menor eixo seria σ_d , a incerteza na posição perpendicular ao sensor. O autor considera que o mais importante é que a estimativa do erro seja maior do que qualquer erro real. Então, para simplificar a interpretação dos dados, maximiza as duas incertezas por uma única incerteza circular σ_W , determinada experimentalmente pela equação

$$\sigma_W = 0.10 + d \arctan(5^\circ) \quad (\text{metros}) \quad (3.6)$$

3.3 Modelos probabilísticos

Devido às incertezas do sensor, por vezes não é suficiente modelar os pontos sob o arco extremo ao cone de emissão. Torna-se necessário recorrer a funções probabilísticas e integrar a informação de vários sensores e de várias leituras, ao longo do tempo, em mapas de ocupação. Considerando que as medidas do sensor são corrompidas por ruído Gaussiano, muitos autores utilizam funções Gaussianas para caracterizar a probabilidade de ocupação. Outros, por questões de eficiência, utilizaram modelos lineares, simples linearizações dessas funções. Outros ainda optam por soluções intermédias.

Modelo Gaussiano

O Modelo Gaussiano inicialmente desenvolvido por Elfes [Elfes, 1990] é um modelo puramente probabilístico, que considera as incertezas na distância e na orientação dadas pelas variâncias σ_r^2 e σ_θ^2 respectivamente, e, que caracteriza o sensor por uma função densidade de probabilidade Gaussiana bivariada do tipo

$$p(r, \theta | d) = \frac{1}{2\pi\sigma_r\sigma_\theta} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(r-d)^2}{\sigma_r^2} + \frac{\theta^2}{\sigma_\theta^2} \right) \right] \quad (3.7)$$

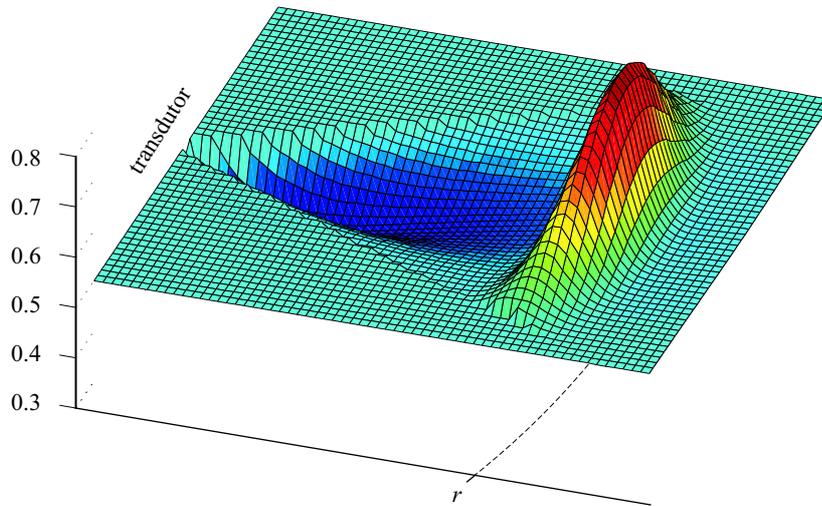


Figura 3.9: Perfil da probabilidade de ocupação Gaussiana para uma distância r . A probabilidade do objecto reflector se encontrar no eixo do cone de emissão à distância r é maior; por outro lado, a probabilidade de não existirem objectos dentro do cone é maior perto do sensor. A área subsequente ainda não foi observada e mantém-se desconhecida, por isso, mantém uma probabilidade de 0.5 .

Este modelo permite a combinação imediata da informação proveniente de diferentes fontes, utilizando, por exemplo, métodos de Bayes. Embora pareça ser um modelo probabilístico capaz de lidar com as grandes incertezas de um sensor de ultra-sons, poderá ser facilmente penalizado em aplicações que requeiram rapidez e eficiência, devido às elevadas exigências de processamento. Outros modelos, matematicamente mais simples, foram apresentados, sempre com o compromisso de obter mais eficiência, em detrimento de uma modelação menos abrangente.

Modelo de Elfes

Noutra modelação probabilística do sensor, Alberto Elfes divide o cone de percepção em duas zonas; uma dentro do cone, que define como provavelmente vazia, e outra sob o arco, que considera como ocupada [Elfes, 1987]. Cada uma dessas zonas é modelada por uma função densidade de probabilidade f_E e f_O , respectivamente. Essas funções definem a probabilidade de uma determinada localização dentro do cone de percepção estar vazia e de a incerteza sobre a localização do objecto no arco, na extremidade desse cone (Figura 3.10).

Os pontos dentro da região provavelmente vazia são delimitados por $\delta < (R - \epsilon)$ e $\theta \leq \frac{\Omega}{2}$ e

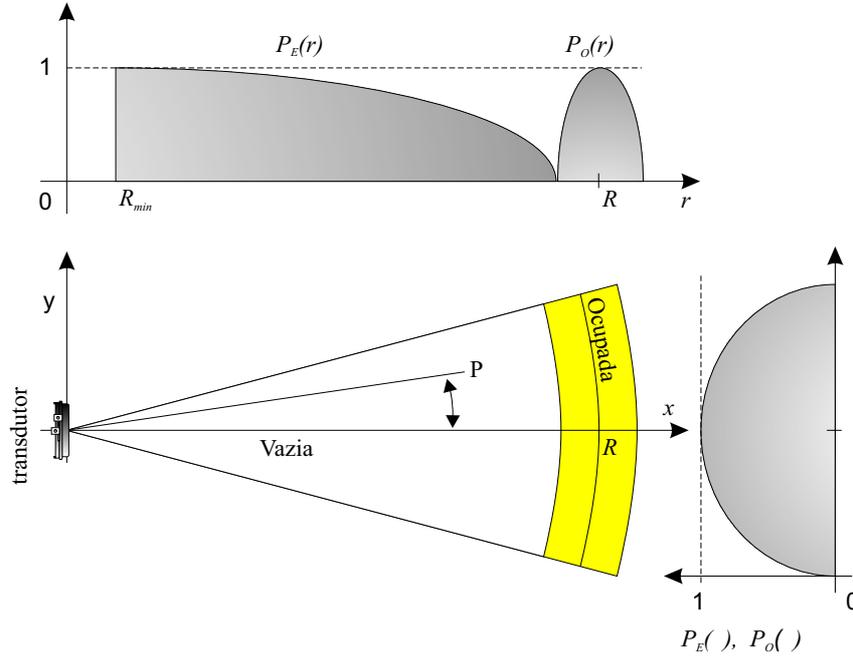


Figura 3.10: Modelo do sensor de ultra-sons e suas incertezas, proposto por Elfes.

têm uma probabilidade $P_E = f_E(\delta, \theta)$ de estar vazios. A região considerada como ocupada está delimitada por $\delta \in [R - \epsilon, R + \epsilon]$ e $\theta \leq \frac{\Omega}{2}$ e um ponto dentro dessa zona tem uma probabilidade de estar ocupado $P_O = f_O(\delta, \theta)$.

A função densidade de probabilidade para um ponto P, dentro da zona vazia, é dada por

$$P_E(x, y) = P[\text{ponto } (x, y) \text{ esta vazio}] = E_r(\delta) \cdot E_a(\theta) \quad (3.8)$$

onde

$$E_r(\delta) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{\delta - R_{min}}{R - \epsilon - R_{min}} \right)^2 & \text{para } \delta \in [R_{min}, R - \epsilon] \\ 0 & \text{para os restantes casos} \end{cases} \quad (3.9)$$

R	Valor medido pelo sensor	30 cm – 11.5 m
ϵ	Erro máximo do sensor	3.3 cm
ω	Abertura do cone de percepção	15°
Ω	Abertura do lóbulo principal	30°
δ	Distância do sensor a P	
θ	Ângulo entre o eixo principal e P	

Tabela 3.1: Parâmetros do modelo do sensor considerando um ponto $P = (x, y)$ pertencente ao cone de percepção do sensor (Figura 3.10).

e

$$E_a(\theta) = 1 - \left(\frac{2\theta}{\Omega}\right)^2 \text{ para } \theta \in [-\Omega/2, \Omega/2] \quad (3.10)$$

A função densidade de probabilidade para um ponto P, dentro da zona *ocupada*, é dada por

$$P_O(x, y) = P[\text{ponto } (x, y) \text{ esta ocupado}] = O_r(\delta) \cdot O_a(\theta) \quad (3.11)$$

onde

$$O_r(\delta) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{\delta-R}{\epsilon}\right)^2 & \text{para } \delta \in [R - \epsilon, R + \epsilon] \\ 0 & \text{para os restantes casos} \end{cases} \quad (3.12)$$

e

$$O_a(\theta) = 1 - \left(\frac{2\theta}{\Omega}\right)^2 \text{ para } \theta \in [-\Omega/2, \Omega/2] \quad (3.13)$$

Este modelo foi definido, essencialmente, para ser usado na construção de mapas de grelhas. Sempre que é feita uma medida, as probabilidades do modelo são calculadas para o novo valor R e projectadas numa grelha bidimensional.

Modelo probabilístico linear

Este modelo, representado na Figura 3.11, deriva, claramente, dos anteriores. Por questões de eficiência, o seu autor [Varveropoulos] aproximou as funções Gaussianas por funções lineares, cujas exigências computacionais são diminutas. A função densidade de probabilidade da zona ocupada é definida por uma função triangular $P_O(\theta)$ e uma função rectangular $P_O(r)$. A função de probabilidade da zona vazia $P_E(r)$ é simplesmente uma aproximação do primeiro grau dos modelos anteriores para toda a amplitude do cone.

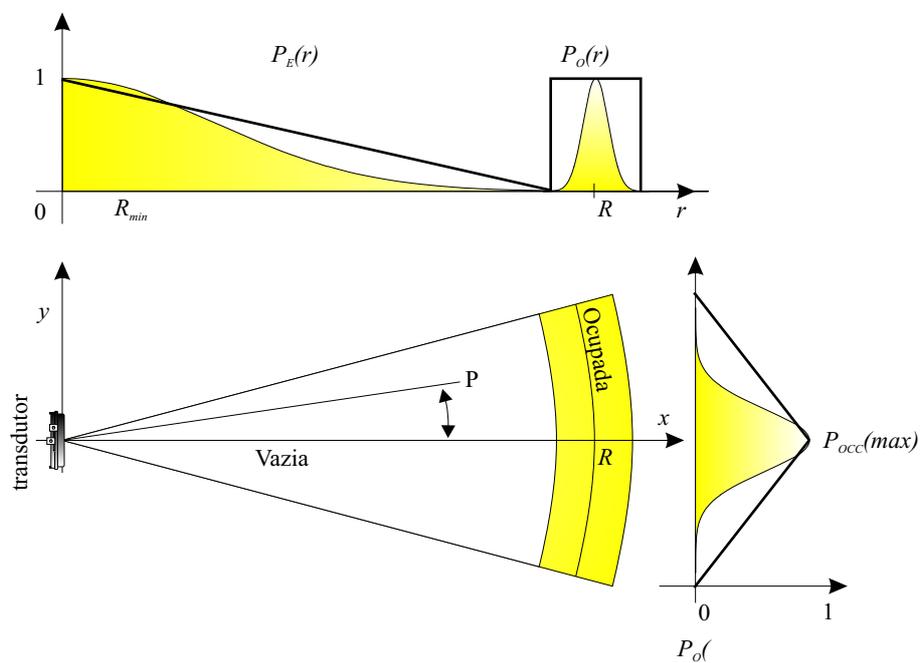


Figura 3.11: A probabilidade de ocupação dentro do arco é dada por uma função linear que decresce desde o seu valor máximo, no eixo do cone de emissão, até ao valor mínimo, nas extremidades. A probabilidade da área vazia varia, inversamente, com a distância do transdutor ao sensor.

Capítulo 4

Detecção e Classificação de Reflectores

Embora alguns modelos apresentados no capítulo anterior consigam estimar a orientação dos objectos reflectores, é impossível, apenas com um transdutor numa posição fixa, identificar o tipo de reflector. Em robótica móvel, as vantagens em conhecer o tipo de reflector pode ser muito importante em aplicações, tais como:

- Navegação e planeamento de trajectórias: Os reflectores podem ser vistos como faróis, permitindo ao robô identificar as regiões por onde pode navegar livremente ou identificar certos objectos que podem constituir uma referência (como os planos no seguimento de paredes).
- Localização: Correção da posição ou posicionamento do robô num ambiente com marcas pré-estabelecidas (atracar em portos de recarga de baterias).
- Construção de mapas dos ambientes que rodeiam os robôs: O reconhecimento do tipo de objecto oferece vantagens (uma actualização mais adequada das células ocupadas).

A detecção e a identificação do tipo de reflectores, usando sensores de ultra-sons, podem ser feitas, basicamente, de duas maneiras:

1. **Sistemas de sensores cooperantes:** Grupos de sensores com uma configuração específica que colaboram nas medições, permitindo a detecção e identificação imediatas do tipo de reflector.

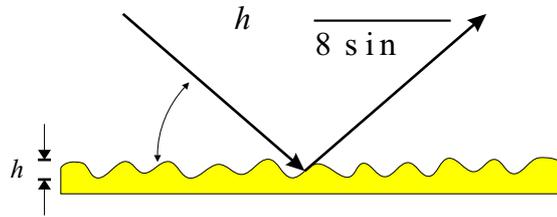


Figura 4.1: Reflexões especulares requerem superfícies com rugosidades h na ordem de grandeza do comprimento de onda.

2. **Combinação de informação:** Grupos de dados resultantes de sucessivas leituras de um ou vários sensores enquanto o robô se move e, sob os quais, são aplicados à posteriori, algoritmos de processamento com capacidade que extraem agrupam os dados e identificam o tipo de reflector.

4.1 Reflectores

O principal objectivo de detectar e identificar reflectores no meio envolvente ao robô é a sua utilização como referências em tarefas de navegação e localização. Por isso, o tipo de reflectores seleccionado deve ser abundante e fácil de detectar com ultra-sons. Nos ambientes domésticos e industriais compostos por paredes lisas, secretárias, cadeiras, estantes, armários, etc, predominam os reflectores básicos do tipo plano, canto, aresta e cilindro. Para identificar e detectar este tipo de reflectores no meio ambiente, é preciso conhecer a interacção dos ultra-sons com os objectos. A física dessa interacção é, por vezes, complexa e dependente do tipo de objectos, o que torna a sua modelação quase sempre impossível. A alternativa é criar modelos mais simples, introduzindo algumas restrições e suposições. Em particular, neste tipo de aplicações, assume-se que todos os objectos, no ambiente do robô, são especulares para os ultra-sons e que obedecem ao critério de Rayleigh (Figura 4.1); reflectem as ondas ultra-sonoras de forma especular, como um espelho reflecte a luz.

Os tipos de reflectores mais comuns, usados pela maioria dos autores e também nesta tese, encontram-se simbolicamente representados na Figura 4.2 e são:

Plano: Representa todas as superfícies planas verticais, tais como paredes, portas, superfícies

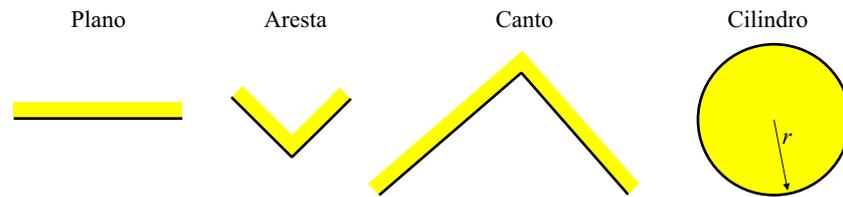


Figura 4.2: Representação simbólica dos reflectores básicos.

de caixas, etc.

Canto: São todos os objectos côncavos resultantes da intersecção de dois planos verticais, bem como intersecção de duas paredes, armário com parede, porta aberta com parede, etc.

Aresta: Refere-se a todos os objectos convexos com pequeno raio de curvatura, como, por exemplo, esquinas, tubos finos, arestas de móveis, topos de portas, calhas verticais, etc.

Cilindro: Abrange todos os objectos convexos com grande raio de curvatura r , como colunas circulares, bidões, robôs circulares, etc.

Os reflectores planos e arestas podem ser considerados extremos do reflector cilindro, quando $r \rightarrow \infty$ e $r \rightarrow 0$, respectivamente.

4.2 Sistemas de sensores cooperantes

A informação fornecida apenas por um sensor de ultra-sons tem pouca resolução angular e não é suficiente para diferenciar reflectores. A capacidade de identificação e classificação dos sensores de ultra-sons pode ser melhorada utilizando sistemas de sensores: grupos de sensores com uma configuração específica, que cooperam nas medições e utilizam a informação do TOF, amplitude e frequência para localizar e identificar planos, arestas, cantos e cilindros.

4.2.1 Sensor inteligente

Um dos primeiros sistemas de sensores, desenvolvido por Billur Barshan e Roman Kuc, é capaz de diferenciar apenas entre planos e cantos com inclinações entre -10° a $+10^\circ$ e de determinar a sua orientação [Barshan and Kuc, 1990]. Este sistema baseia-se nos modelos físicos

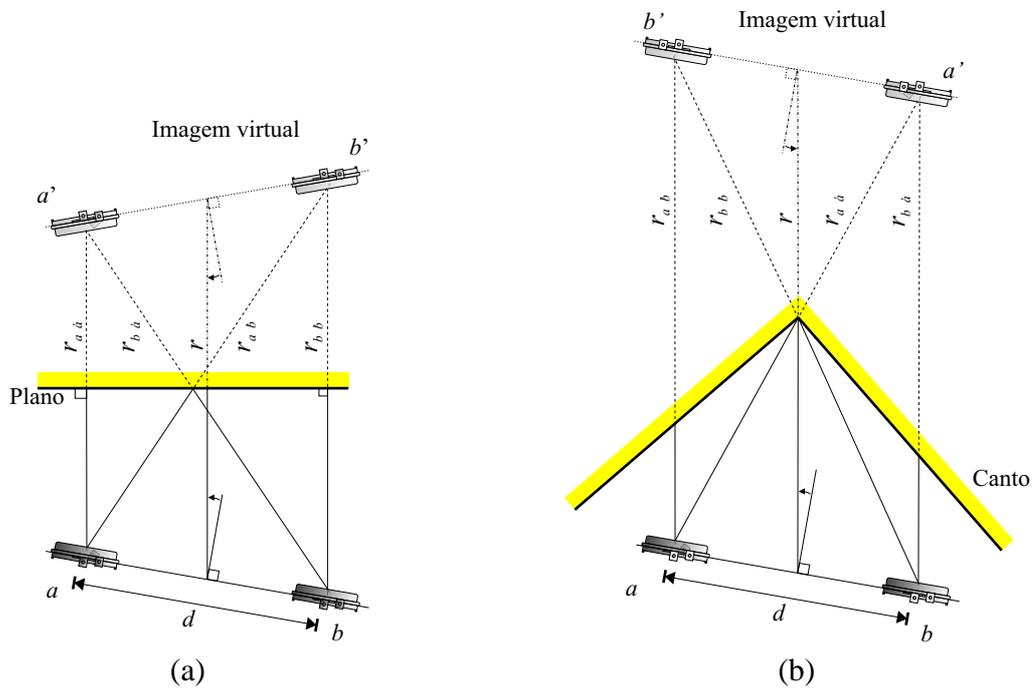


Figura 4.3: (a) Geometria de reflexão do Sensor Inteligente com uma orientação θ relativamente ao plano. (b) Geometria de reflexão no canto.

de amplitude (Secção 3.2) e necessita de utilizar a informação de amplitude juntamente com o TOF para discriminar os dois tipos de reflectores. A sua configuração consiste, basicamente, em dois sensores colineares separados por uma distância $d = 80 \text{ mm}$. Para a implementação do algoritmo de diferenciação, é necessário caracterizar a amplitude recebida para cada tipo de reflector em função da sua inclinação. Como a orientação é estimada a partir dos TOFs, também é necessária uma análise geométrica.

Geometria dos reflectores

Considerando um reflector plano com uma orientação θ relativamente ao sistema, como representado na Figura 4.3-a, e recorrendo ao modelo de amplitude apresentado na Secção 3.2, onde a resposta em amplitude é aproximada pela forma Gaussiana, obtêm-se as seguintes equações para o plano:

$$A_{aa'}(\theta) = A_{bb'}(\theta) = A_{max} \exp \frac{-4\theta^2}{\theta_0^2} \quad (4.1)$$

$$A_{ab'}(\theta) = A_{ba'}(\theta) = \underbrace{\left(A_{max} \exp \frac{-4\theta_s^2}{\theta_0^2} \right)}_{A'_{max}} \exp \frac{-4\theta^2}{\theta_0^2} \quad (4.2)$$

onde $\theta_s = \tan^{-1} \frac{d}{2r}$ e A'_{max} é a amplitude máxima que acontece quando $\theta = 0$. Para determinar a orientação θ , usam-se as seguintes equações, que resultam da análise geométrica da figura:

$$R_{aa'plano} = R - \frac{d}{2} \sin(\theta) \quad (4.3)$$

$$R_{bb'plano} = R + \frac{d}{2} \sin(\theta) \quad (4.4)$$

$$R_{ab'plano} = R_{ba'plano} = \sqrt{R^2 + \frac{d^2}{4} - Rd \sin(\theta)} \quad (4.5)$$

Considerando agora um canto com uma orientação θ relativamente ao sistema, como representado na Figura 4.3-b, obtêm-se as seguintes equações de amplitude:

$$A_{aa'}(\theta) = A_{max} \exp \frac{-4(\theta - \theta_s)^2}{\theta_0^2} \quad (4.6)$$

$$A_{bb'}(\theta) = A_{max} \exp \frac{-4(\theta + \theta_s)^2}{\theta_0^2} \quad (4.7)$$

$$A_{ab'}(\theta) = A_{ba'}(\theta) = A_{max} \exp \frac{-4\theta^2}{\theta_0^2} \quad (4.8)$$

E da análise geométrica, resulta:

$$R_{aa'canto} = \sqrt{R^2 + \frac{d^2}{4} - Rd \sin(\theta)} \quad (4.9)$$

$$R_{bb'canto} = \sqrt{R^2 + \frac{d^2}{4} + Rd \sin(\theta)} \quad (4.10)$$

$$R_{ab'canto} = R_{ba'canto} = R \quad (4.11)$$

Método de classificação dos reflectores

Para transdutores simétricos, a função dada pela equação 3.3 é par, ou seja, $A(\theta) = A(-\theta)$; por isso, os planos e cantos não podem ser diferenciados com um simples sensor. Para diferenciar estes dois reflectores, é necessário identificar o sinal da orientação θ (ver Figura 4.3). As amplitudes medidas A são usadas para fazer a classificação entre reflectores, e as distâncias

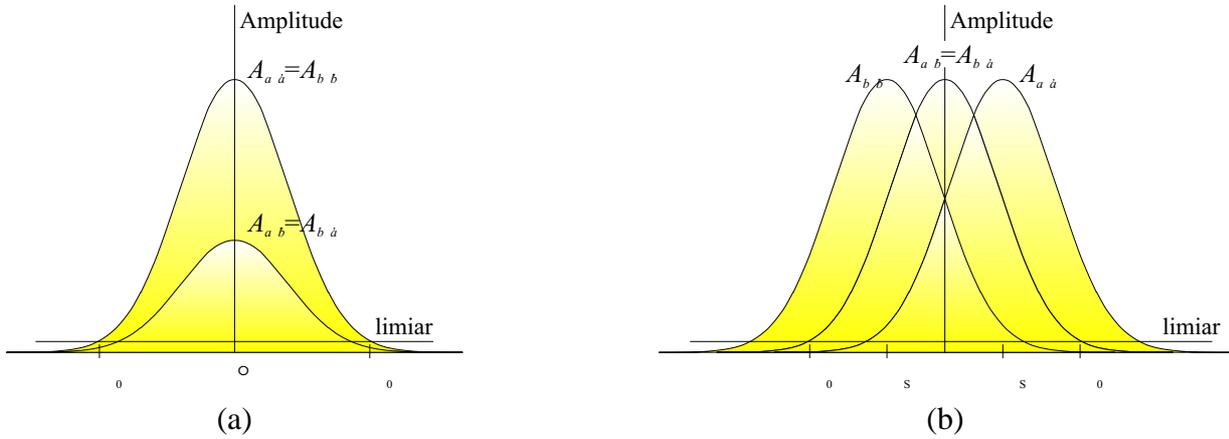


Figura 4.4: (a) Curvas de amplitude para a reflexão no plano. (b) Curvas de amplitude para a reflexão no canto.

r para determinar a inclinação θ . Para o plano, todas as amplitudes são simétricas, relativamente a $\theta = 0$ (Figura 4.4-a), e, para o canto, todos os sinais têm a mesma amplitude máxima (A_{max}), mas que ocorre para orientações diferentes que dependem de $\theta_s = \tan^{-1} \frac{d}{2r}$ (Figura 4.4-b). Considerando um comportamento Gaussiano, os autores determinaram, experimentalmente, uma estimativa para o desvio padrão σ , que mostrou ser cerca de 2% da amplitude máxima e independente da distância.

A classificação dos reflectores faz-se pela comparação das amplitudes dos quatro ecos através das equações 4.12. Por uma questão de robustez, uma amplitude só é considerada maior do que a outra se a sua diferença for maior do que 6σ . Assim, e de acordo com a Figura 4.4, as condições de diferenciação são:

$$\begin{aligned}
 \text{PLANO} : & \quad A_{aa'}(\theta) - A_{ab'}(\theta) > 6\sigma \quad e \quad A_{bb'}(\theta) - A_{ab'}(\theta) > 6\sigma \\
 \text{CANTO} : & \quad A_{ab'}(\theta) - A_{aa'}(\theta) > 6\sigma \quad \text{ou} \quad A_{ab'}(\theta) - A_{bb'}(\theta) > 6\sigma
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

Para estimar a orientação θ , utilizam-se os quatro TOFs e as equações geométricas dos reflectores. Para o plano, o valor de θ obtido corresponde, efectivamente, à sua orientação, enquanto, para o canto, essa orientação define apenas a posição do seu ponto de origem.

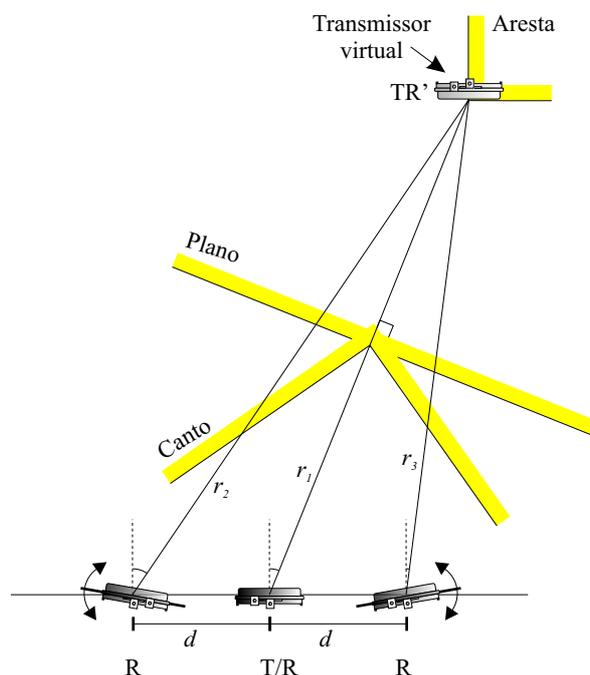


Figura 4.5: Modelo geométrico do sistema de Sabatini. A geometria de reflexão para o plano, canto e aresta são semelhantes e baseadas no conceito de um transmissor virtual.

4.2.2 Percepção activa

Este sistema, proposto por Angelo Sabatini [Sabatini, 1992b,a], pretende detectar reflectores, processando, simultaneamente, a informação do tempo de voo e da amplitude do eco. Representado na Figura 4.5, este sistema consiste num conjunto de três sensores Polaroid alinhados e separados a uma distância $d = 15 \text{ cm}$. O sensor central funciona como transmissor/receptor (T/R) e os laterais funcionam apenas como receptores (R). Os sensores laterais são rotativos, e um algoritmo de orientação acústica recorre a filtros de Kalman para prever a orientação dos reflectores com o robô em movimento, e, assim, orientar activamente estes receptores para a sua máxima sensibilidade. É esta interactividade entre a percepção do ambiente e o movimento dos sensores que caracteriza este sistema.

Geometria dos reflectores

A caracterização geométrica dos reflectores é feita com base numa análise teórica da Figura 4.5, assumindo que, em cada instante, apenas um tipo de reflector está presente no campo de

percepção do sistema. Considerando a representação virtual do transmissor T/R de acordo com o modelo apresentado e sabendo que $r_i = c.t_i$, onde c é a velocidade do som e t_i os vários TOFs medidos, respectivamente, por cada sensor, define-se a função do plano:

$$A_{plano}(t) = t_2^2 + t_3^2 - 2(t_1^2 + t_0^2) = 0 \quad (4.13)$$

com $t_0 = \frac{d}{c}$.

Também a orientação do plano pode ser determinada pela equação:

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{r_2^2 + r_1^2}{4dr_1}\right) \quad (4.14)$$

De acordo com o modelo virtual da Figura 4.5, os TOFs para o canto relacionam-se do mesmo modo que para o plano, resultando que $A_{plano}(t) = A_{canto}(t) = 0$. Deste modo, e segundo o autor, torna-se impossível fazer a discriminação entre estes dois tipos de reflectores com base apenas em relações geométricas. A relação que se obtém para a orientação de um canto é exactamente igual à obtida para o plano, referindo-se, esta agora, à orientação do eixo do canto. Para ultrapassar esta limitação e fazer a discriminação entre estes dois reflectores, recorre-se ao que se chama de IID (*Intra-Aural Intensity Difference*), caracterizada por:

$$IID = \frac{1}{4} \ln\left(\frac{A_2}{A_3}\right) \quad (4.15)$$

onde A_2 e A_3 , que se caracterizam por um modelo físico de amplitude semelhante ao apresentado na secção 3.2, são as amplitudes dos ecos recebidos pelo receptor esquerdo e direito, respectivamente.

Para a aresta, a reflexão não é especular, como nos casos anteriores, e todos os pontos de reflexão coincidem com o reflector. Analisando a geometria da aresta da Figura 4.5, obtém-se as seguintes relações:

$$A_{aresta}(t) = t_2^2 + t_3^2 - 2(t_1^2 + t_0^2) - t_1(t_2 + t_3 - 2t_1) = 0 \quad (4.16)$$

E para a orientação, resulta:

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{(r_2 - r_3)(r_2 + r_3 - r_1)}{4dr_1}\right) \quad (4.17)$$

Método de classificação dos reflectores

Apenas com o processamentos dos TOFs, o autor consegue discriminar entre pequenos reflectores (arestas) e grandes reflectores (planos e cantos). Numa segunda fase, recorrendo ao processamento dos IIDs, é possível fazer a discriminação entre planos e cantos. Os filtros de Kalman – aplicados aos dados obtidos – proporcionam-lhe um sistema mais robusto, livre de falsas leituras, e com uma evidente melhoria na fidelidade do sistema.

4.2.3 Célula T/V

Lindsay Kleeman e Roman Kuc apresentam um sistema [Kleeman and Kuc, 1995] que utiliza dois transmissores e dois receptores estrategicamente posicionados, o qual consideram ser o mínimo necessário para se poder identificar e discriminar reflectores do tipo: plano, aresta, canto ou indefinido. Utilizando o método da Máxima Verosimilhança, conseguem estimar o tipo de reflector, a sua posição e orientação.

Um par transmissor/receptor (T/R) e um receptor (R) são combinados numa célula a que o autor designa de Vector Transmissor/Receptor (T/V - *Transmitter and Vector Receiver*) (Figura 4.6-a). Esta célula serve, basicamente, para determinar a orientação θ do sistema com a superfície reflectora.

Geometria dos reflectores

Considerando a geometria do plano representada na Figura 4.6-b, a orientação α do plano pode ser determinada em função da orientação θ obtida pela célula T/V, e a distância r_2 calculada em função de r_1 e θ . Uma análise geométrica da figura leva às seguintes equações:

$$r_{2plano}(r_1, \theta) = \sqrt{r_1^2 - 2r_1b \sin \theta + b^2} \quad (4.18)$$

$$\beta_{plano} = \arctan \left(\frac{b \cos \theta}{r_1 - b \sin \theta} \right) \quad (4.19)$$

Combinando β_{plano} com θ obtém-se, então, a orientação do plano:

$$\alpha_{plano}(r_1, \theta) = \theta + \beta_{plano} \quad (4.20)$$

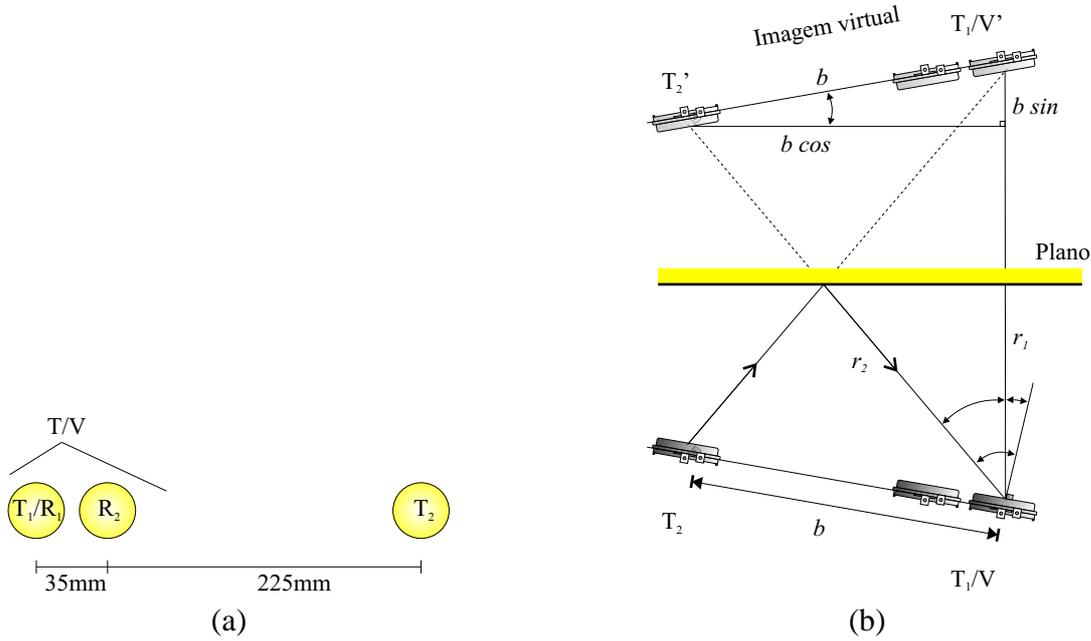


Figura 4.6: (a) Configuração do sistema T/V usado por Kleeman e Kuc. (b) Geometria do plano com imagem virtual reflectida.

A imagem virtual do sistema num canto consegue-se reflectindo, consecutivamente, os sensores em ambos os planos do canto. Isto dá origem a uma reflexão simétrica relativamente ao ponto de intersecção dos dois planos, como se pode verificar na Figura 4.7-a. A situação é similar à do plano, só que, agora, como o sistema virtual aparece invertido, o ângulo β tem sinal oposto, ou seja:

$$\beta_{canto} = -\beta_{plano} \quad (4.21)$$

Um reflector convexo, com um raio de curvatura muito pequeno, caracteriza uma aresta. Neste caso, o ponto de reflexão é aproximadamente o mesmo e independente da posição dos sensores. Consequentemente, as orientações α e θ são agora iguais. A geometria da aresta resume-se a:

$$\alpha_{aresta}(r_1, \theta) = \theta \quad (4.22)$$

$$r_{2aresta}(r_1, \theta) = \frac{r_1 + \sqrt{r_1^2 + 4b^2 - 4r_1b \sin \theta}}{2} \quad (4.23)$$

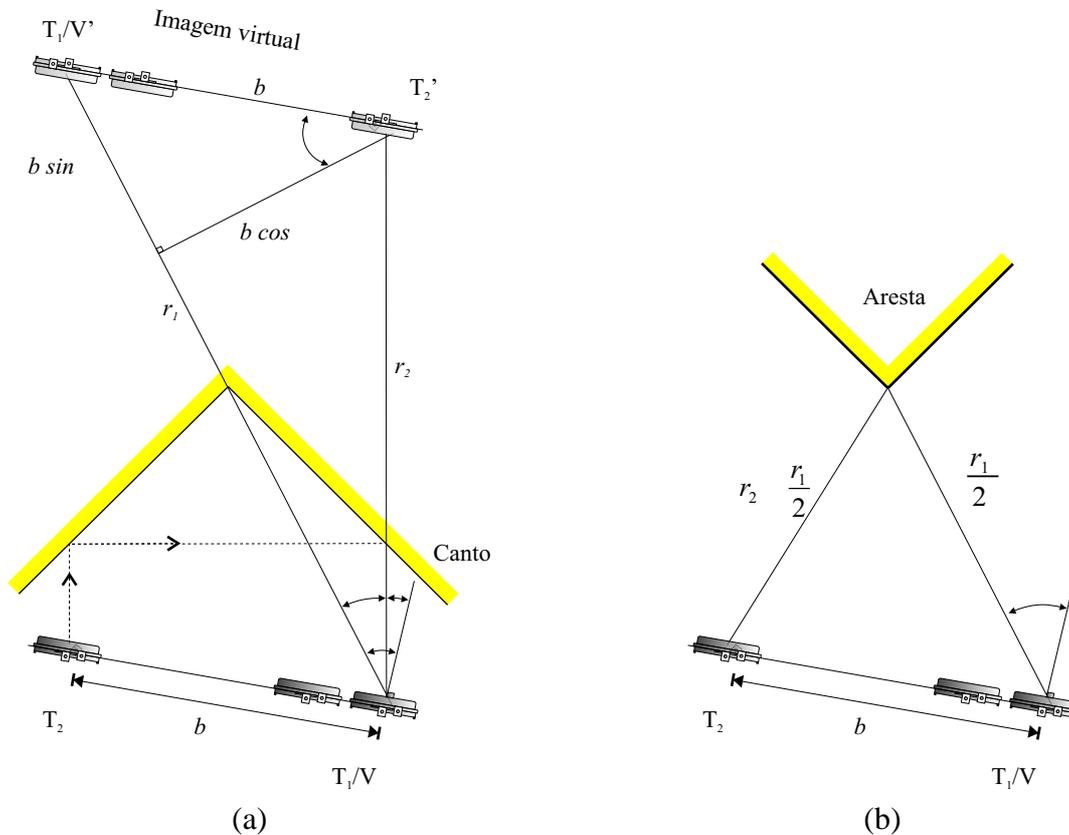


Figura 4.7: (a) Geometria do canto com imagem virtual reflectida. (b) Geometria da aresta.

Método de classificação dos reflectores

A classificação dos reflectores plano, aresta ou canto faz-se comparando as respectivas orientações β e as distâncias r_2 . A orientação permite diferenciar os três tipos de reflectores, já que para o plano é β_{plano} , para o canto $-\beta_{plano}$ e para a aresta 0. Porém, para se fazer a identificação do reflector, é necessário recorrer à informação dos TOFs. Pela geometria dos reflectores, considerando distâncias muito maiores do que o afastamento entre sensores b , é fácil verificar que, para a aresta, $r_1 = r_2$, para o plano, r_1 é sempre menor do que r_2 e para o caso do canto, r_1 é sempre maior do que r_2 . Recorrendo ao método da Máxima Verosimilhança e a estatísticas Chi-Quadrado, é atribuída uma estimativa da confiança associada a cada reflector. Se, pelo menos, dois tipos de reflectores não obtiverem uma estimativa de confiança aceitável, não existe classificação.

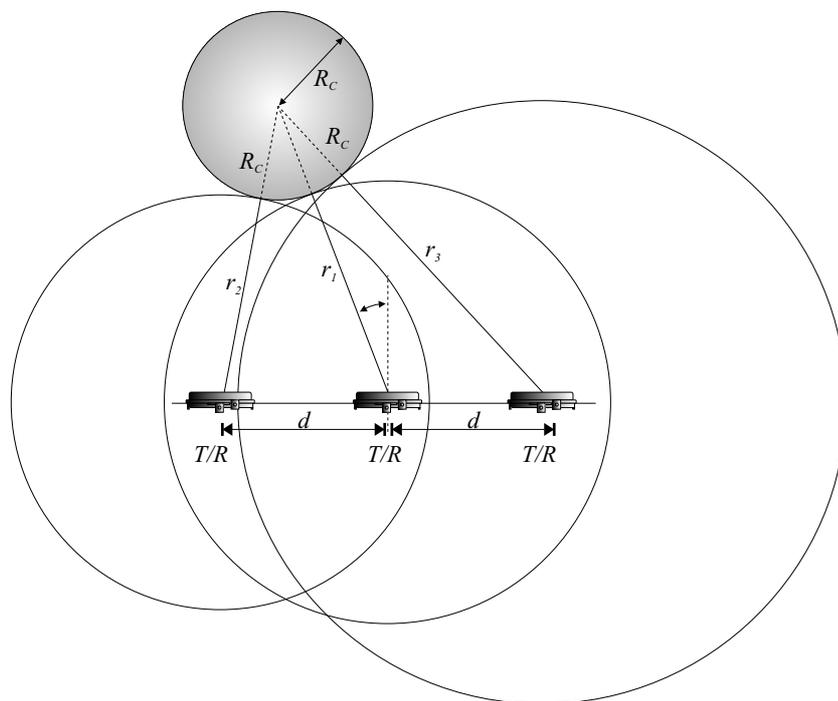


Figura 4.8: Geometria do sistema Tri-Aural. O objecto reflector aproxima-se de um plano quando $R_C \rightarrow \infty$ e de uma aresta quando $R_C \rightarrow 0$.

4.2.4 Sistema tri-aural

O sistema tri-aural, desenvolvido na Universidade de Coimbra, é constituído por três sensores colineares da Polaroid e propõe identificar todo o tipo de reflectores convexos, determinando o seu raio de curvatura [Pires et al., 1996]. Os reflectores planos e pontuais (arestas) definem os limites deste domínio com raios infinito e zero, respectivamente. Este sistema, com boa precisão, demonstrou ser capaz de identificar cantos, arestas e todos os reflectores intermédios (cilindros). O sistema utiliza apenas a informação dos TOFs e diferencia-se dos restantes sistemas, principalmente, pela sua capacidade de medir a curvatura dos reflectores, o que pode constituir uma mais valia quando utilizado em ambientes específicos e ricos em objectos cilíndricos, não só para localização, como para identificação.

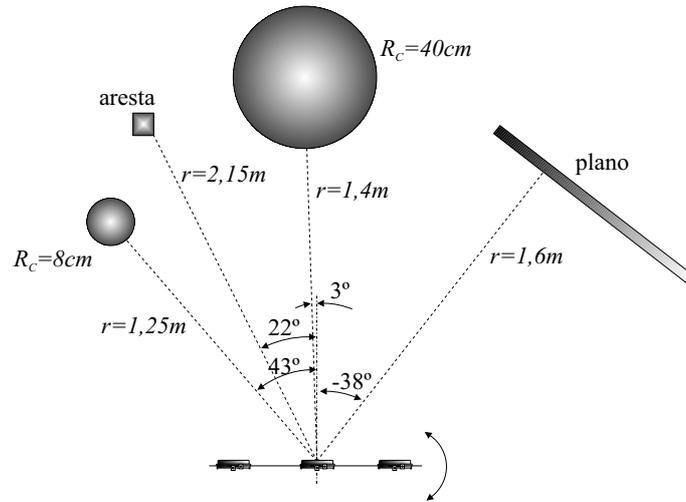


Figura 4.9: Mapa dos reflectores numa experiência cujos resultados se encontram na Tabela 4.1.

Geometria dos reflectores

Os três sensores do tipo transmissor/receptor (T/R) encontram-se separados por uma distância $d = 15 \text{ cm}$ e são disparados sequencialmente para obterem os respectivos TOFs: r_1, r_2 e r_3 . Considerando a geometria da Figura 4.8, os valores para R_C e θ podem ser obtidos pelas seguintes equações:

$$R_C = \frac{2r_1^2 - r_2^2 - r_3^2 + 2d^2}{2(r_2 + r_3 - 2r_1)} \quad (4.24)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{r_3^2 - r_2^2}{4dr_1}\right) \quad (4.25)$$

Experimentalmente, verificou-se uma elevada proximidade entre os resultados obtidos e os valores reais para diferentes reflectores dentro do intervalo $\theta \in [-10^\circ; +10^\circ]$. A Tabela 4.1 reúne os resultados de uma experiência levada a cabo com diferentes tipos de reflectores, dispostos como se representa na Figura 4.9. Pode verificar-se a conformidade dos resultados, excepto no caso da aresta que, embora bem localizada, não foi possível identificá-la como tal. Este sistema apresenta grande simplicidade e, como já foi referido, demonstra ter grandes potencialidades para algumas aplicações específicas.

Reflector	Distância	Orientação	R_C medido	θ medido	r medido
Circular($R_C = 8 \text{ cm}$)	125 <i>cm</i>	43°	12 <i>cm</i>	43°	126.9 <i>cm</i>
Aresta	215 <i>cm</i>	22°	125 <i>cm</i>	21°	217.2 <i>cm</i>
Circular($R_C = 40 \text{ cm}$)	140 <i>cm</i>	3°	35 <i>cm</i>	3°	144.4 <i>cm</i>
Plano	160 <i>cm</i>	-38°	1006 <i>cm</i>	-37°	164.4 <i>cm</i>

Tabela 4.1: Objectos detectados no exemplo da Figura 4.9

4.2.5 Par activo

Araújo e Grupen propuseram um sistema activo, com fundamentos biológicos, que ajusta a sua configuração para otimizar o seu desempenho de acordo com a localização e o tipo de reflector. É, portanto, composto por dois sensores Polaroid ¹ modificados para funcionarem como transmissor/receptor (T/R) ou apenas como receptor (R), tendo capacidade para localizar e identificar reflectores do tipo plano, aresta e canto, [Araujo and Grupen, 1998, 2000] e usando, unicamente, medidas TOF. Encontram-se montados num sistema 3-DOF ² que permite rodar os dois sensores, individualmente, e/ou todo o sistema. As equações das orientações e posições dos reflectores são derivadas da geometria da reflexão a partir de r_1 e r_2 , considerando as propriedades especulares dos ultra-sons.

Geometria dos reflectores

A Figura 4.10-a mostra a geometria dos ultra-sons quando reflectidos num plano, tendo em conta as imagens virtuais de T/R e R. Nestas circunstâncias, α – o ângulo entre o plano e o sistema – é dado por:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{d^2 + r_1^2 - r_2^2}{2dr_1}\right) \quad (4.26)$$

vem então para r_2 :

$$r_2 = \sqrt{r_1^2 - 2r_1d \sin(\alpha) + d^2} \quad (4.27)$$

O ângulo β entre r_1 e r_2 é dado por:

$$\beta = -\arctan\left(\frac{d \cos(\alpha)}{r_1 - d \sin(\alpha)}\right) \quad (4.28)$$

¹Sensor Polaroid com Ttransdutor da série 600 e módulo de controle da série 6500.

²3 Degree Of Freedom.

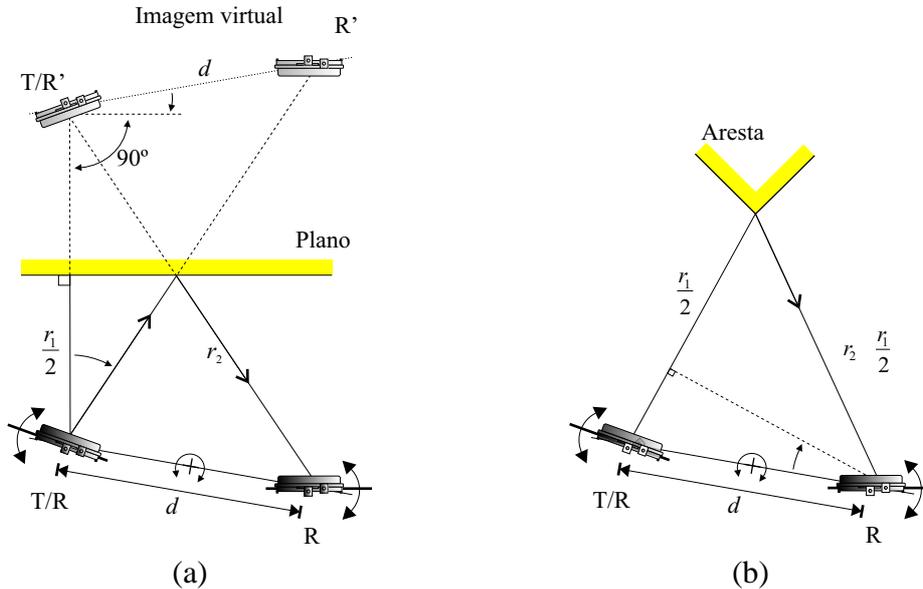


Figura 4.10: (a) Geometria de reflexão do Par Activo no plano. (b) Geometria de reflexão do Par Activo na aresta.

No canto, as imagens virtuais dos sensores obtêm-se reflectindo o sistema, sucessivamente, nos dois planos. Obtém-se, assim, uma imagem virtual simétrica relativamente ao ponto de intersecção do canto. A Figura 4.11 mostra a geometria dos ultra-sons reflectidos num canto. O ângulo α e a distância r_2 são obtidos como no plano; apenas o ângulo β entre r_1 e r_2 aparece agora invertido.

No caso das arestas, o ponto de reflexão é independente da posição dos sensores, por isso, as reflexões são modelizadas como difusas, não se podendo recorrer às imagens virtuais. A Figura 4.10-b mostra as reflexões típicas numa aresta, de onde se extraem as novas relações:

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{d^2 + r_1 r_2 - r_2^2}{d r_1} \right) \tag{4.29}$$

$$r_2 = \frac{r_1}{2} + \sqrt{\frac{r_1^2}{2} + d^2 - r_1 d \sin(\alpha)} \tag{4.30}$$

O ângulo β entre as linhas de r_1 e r_2 é, agora, zero.

Método de classificação dos reflectores

A informação dos sensores é, inicialmente, filtrada para eliminar inconsistências do tipo $|r_2 - r_1| \geq d$. Cada par (r_1, r_2) que cumpra com os critérios de consistência é transforma-

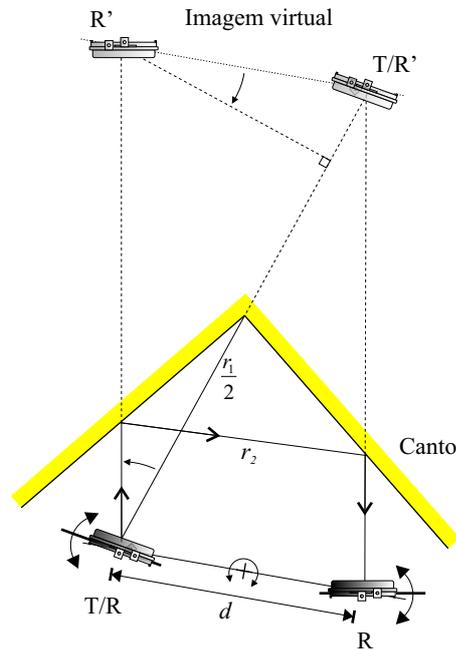


Figura 4.11: Geometria de reflexão do Par Activo no canto.

do nas localizações dos três reflectores, de acordo com os seus modelos geométricos. Essas localizações são associadas às respectivas incertezas e é calculado um grau de confiança para cada reflector. Um reflector só é classificado quando o seu grau de confiança for suficientemente alto, ou seja, maior 0.2 do que o segundo.

4.2.6 Sistema de dois pares

O sistema proposto por Jesús Ureña e pelos seus colegas [Ureña et al., 1999, 1998] tem a capacidade de detectar os três reflectores básicos (planos, cantos e arestas), usando um sistema de 4 transdutores Polaroid (Figura 4.12). Os transdutores laterais podem funcionar como transmissor/receptor (T/R) e os restantes apenas como receptores (R). Apenas um transmissor é disparado em simultâneo e, logo em seguida, todos os quatro receptores ficam em modo recepção para medirem os respectivos TOF. Ureña propõe a utilização de dois pares de sensores para poder determinar, simultaneamente, os ângulos de recepção em ambos os extremos (θ_1 e θ_4). Este sistema, basicamente uma duplicação da célula T/V do sistema Vector Sensor 4.2.3, foi modelado com a suposição de que todos os sinais são emitidos pelo transmissor virtual no

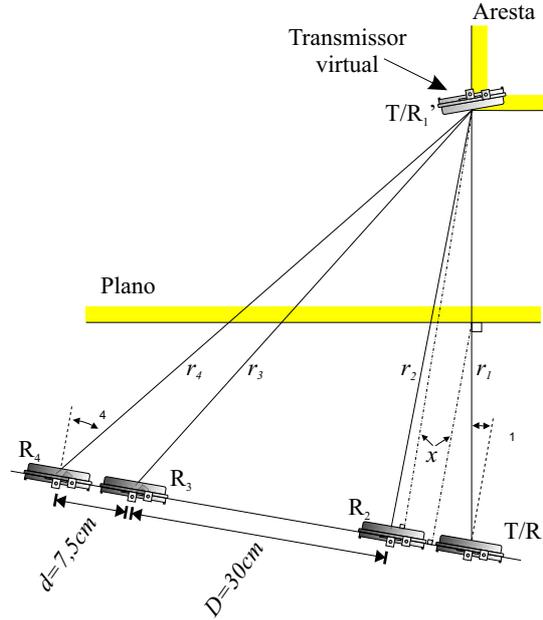


Figura 4.12: Geometria do plano e aresta para o sistema de Dois Pares. Dois pares de sensores permitem determinar, simultaneamente, os dois ângulos de chegada laterais.

ponto P. Apenas no caso da aresta, esse ponto coincide com a posição da mesma. Os ângulos extremos de chegada, θ_1 e θ_4 , são dados, respectivamente, pelas equações:

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{r_2^2 - r_1^2 - d^2}{2dr_1}\right) \quad (4.31)$$

$$\theta_4 = \arcsin\left(\frac{r_4^2 - r_3^2 + d^2}{2dr_4}\right) \quad (4.32)$$

Da geometria do sensor e dos valores TOF medidos, podem ser retiradas as relações para os diferentes reflectores.

Geometria dos reflectores

Da análise geométrica da Figura 4.12 para o plano, pode facilmente deduzir-se a seguinte relação:

$$r_4^2 + r_1^2 - r_3^2 - r_2^2 = 2d(D + d) \quad (4.33)$$

sabendo que $r_i = c.t_i$, sendo c a velocidade do som no ar e t_i os respectivos TOFs, vem:

$$t_4^2 + t_1^2 - t_3^2 - t_2^2 = \frac{2d(D + d)}{c^2} = K \quad (4.34)$$

O valor $K = \frac{2d(D+d)}{c^2}$ é uma constante que depende apenas da geometria do sistema e da velocidade do som. A partir daqui, define-se uma função para o plano, tal que:

$$f_{plano} = t_4^2 + t_1^2 - t_3^2 - t_2^2 = \frac{2d(D+d)}{c^2} \quad (4.35)$$

Duma análise semelhante à anterior, chega-se directamente à função da aresta, sendo K a constante já definida:

$$f_{aresta} = t_4^2 - t_3^2 - t_2^2 + t_1(t_2 + t_3 - t_4) = K \quad (4.36)$$

Os autores consideram haver ambiguidade entre a geometria do plano e do canto, por isso, adoptaram uma estratégia diferente para identificar os cantos. Para levar a cabo esse procedimento, precisaram de caracterizar uma função discriminante para o canto. Essa função f_{disc} é definida em função dos ângulos de recepção, da distância x perpendicular ao sistema como representado nas Figuras 4.12, e pela restante geometria do sistema a partir da seguinte equação:

$$f_{disc} = \tan \theta_4 - \tan \theta_1 = \frac{D+2d}{x} \quad (4.37)$$

Porém, como os valores dos ângulos em causa são muito pequenos, esta igualdade pode ser aproximada por:

$$f_{disc} = \theta_4 - \theta_1 = \frac{D+2d}{x} \quad (4.38)$$

Método de classificação dos reflectores

Em primeiro lugar, é determinada a correspondência entre as quatro leituras, de modo a garantir que a diferença entre cada par de leituras não seja maior do que $\frac{d}{2} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$, onde d é a separação entre sensores e α o ângulo de abertura do cone de emissão, que, neste caso, é de 30° . Depois de calculadas as funções dos reflectores, procede-se à classificação de acordo com as seguintes condições:

$$\begin{aligned} \text{Plano : } f_{aresta} &\geq \frac{3K}{4} \text{ ou } f_{plano} \geq \frac{3K}{2} \\ \text{Aresta : } f_{aresta} &< \frac{3K}{4} \text{ ou } f_{plano} < \frac{3K}{2} \end{aligned} \quad (4.39)$$

Se for determinado que o reflector é um plano, é repetido igual procedimento, transmitindo, agora, o sensor S_4 . Se depois desta segunda leitura o reflector for novamente classificado como

plano, procede-se, então, à discriminação entre plano e canto, usando a equação 4.38. É fácil perceber que, no caso do plano, θ_1 e θ_4 são iguais. De acordo com esta análise, a discriminação pode ser feita pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned} \text{Plano : } f_{disc} &= \theta_4 - \theta_1 = 0 \\ \text{Canto : } f_{disc} &= \theta_4 - \theta_1 = \frac{D+2d}{x} \end{aligned} \quad (4.40)$$

4.3 Sistemas baseados na combinação de informação

Outra abordagem utilizada para a identificação de reflectores no meio ambiente, consiste na combinação da informação proveniente de vários sensores de ultra-sons, em vários locais e ao longo do tempo. Esses dados são combinados e guardados em mapas ou noutras estruturas, para serem processados e analisados por algoritmos de identificação com capacidade de detectar padrões de dados que caracterizam os diferentes tipos de reflectores. Estes métodos de identificação e caracterização de reflectores constituem uma alternativa aos sistemas apresentados anteriormente, e, embora mais complexos e computacionalmente exigentes, podem apresentar algumas vantagens quando se trata de fundir informação proveniente de diferentes tipos de sensores, como ultra-sons, visão, laser, etc.

4.3.1 Sistema RCD

O sistema RCD é um método desenvolvido por John Leonard e Durrant-Whyte [Leonard and Durrant-Whyte, 1991, 1992; Nehmzow, 2000]. Na sua essência, este método utiliza o modelo linear 3.1 e representa todas as distâncias medidas por um ponto no eixo do cone de emissão [Kuc, 1990; Kuc and Viard, 1991]. Como se pode ver na Figura 4.13, à medida que o sensor percorre todo o ambiente que o rodeia, esses pontos são avaliados e, se um grupo de pontos tiver entre si diferenças inferiores a um dado limiar (δ_R), essa região angular é definida como uma Região de Profundidade Constante (*Region of Constant Depth, RCD*)(ver Figura 4.14-a). A largura β da RCD é definida pela diferença angular entre a leitura mais à esquerda e leitura mais à direita. As RCDs podem ser usadas para detectar diferentes tipos de reflectores. Utilizando-se pelo menos dois varrimentos em posições diferentes [Leonard and Durrant-Whyte, 1992;

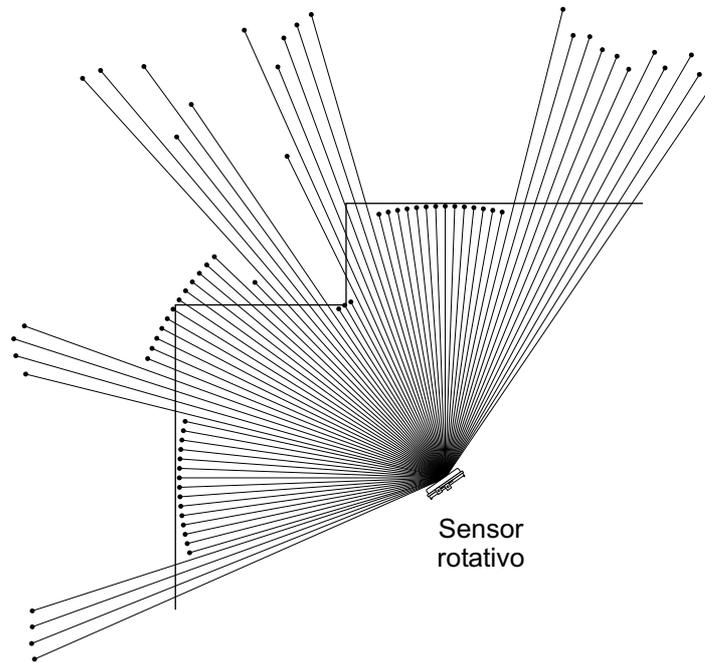


Figura 4.13: Mapa com representação pontual das medidas resultantes de uma sondagem rotativa do sensor de ultra-sons.

Lacroix and Dudek, 1997] (Figura 4.14-b), se os pontos permanecerem relativamente fixos e a largura β das RCD for pequena, provavelmente, o robô está perante uma esquina ou aresta; se os arcos se intersectarem, o robô está, provavelmente, perante um canto; e se forem tangenciais, então, poderá estar perante uma parede.

Tendo em conta a explicação anterior, o procedimento básico para a classificação de reflectores é feita com base em dois testes simples:

1. *Teste de tangência.*

O teste de tangência verifica se as RCDs são tangentes a planos ou cilindro, ou ainda se, se intersectam num ponto, correspondente a um canto ou esquina.

Usam-se duas RCDs para definir duas circunferências centradas nos respectivos sensores e com raios z_1 e z_2 dados pelas distâncias das RCDs, como se mostra na Figura 4.15. É definido um sistema de coordenadas local com origem num sensor e outro situado à distância d sobre o eixo dos xx . O problema generaliza-se na determinação de uma terceira circunferência com raio R , tangente às duas circunferências definidas pelas RCDs.

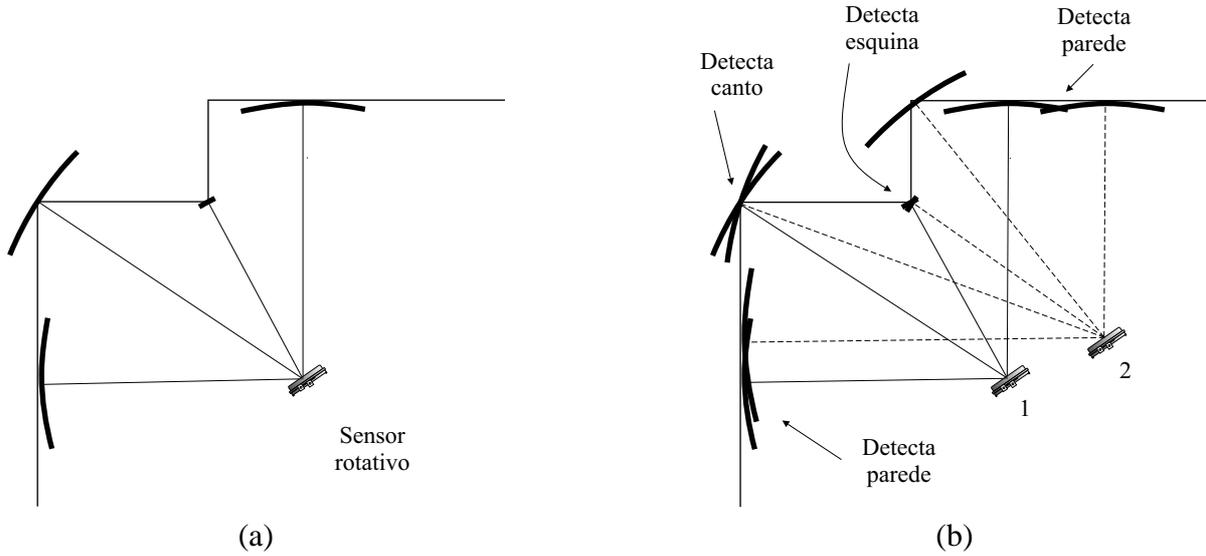


Figura 4.14: (a) Regiões de profundidade constante (RCD) retiradas do mapa anterior. (b) Regiões de profundidade constante (RCD) utilizadas para diferenciar tipos de reflectores. Com dois varrimentos (nas posições 1 e 2), é possível identificar vários reflectores.

Os casos especiais de rectas e pontos tangentes podem ser determinados recorrendo aos limites $R \rightarrow \infty$ e $R \rightarrow 0$.

Sejam ϕ_c, ϕ_l e ϕ_p , a orientação de uma circunferência, de uma recta e de um ponto tangente, relativamente ao sistema de coordenadas local, respectivamente. ϕ_c pode ser determinado recorrendo à regra dos co-senos e para as circunferências tangentes de raio R , obtém-se a seguinte equação:

$$\cos(\phi_c) = \frac{(z_1 + R)^2 - (z_2 + R)^2 + d^2}{2d(z_1 + R)} \quad (4.41)$$

Determinando o limite desta equação quando $R \rightarrow \infty$, obtém-se o resultado de ϕ_l para uma recta tangente:

$$\cos(\phi_l) = \frac{(z_1 - z_2)}{d} \quad (4.42)$$

Analogamente, para um ponto tangente, quando $R = 0$, vem:

$$\cos(\phi_p) = \frac{(z_1^2 - z_2^2 + d^2)}{2dz_1} \quad (4.43)$$

No caso das circunferências e dos pontos tangentes, o centro (x_c, y_c) é dado por:

$$x_c = (z_1 + R) \cos(\phi) \quad (4.44)$$

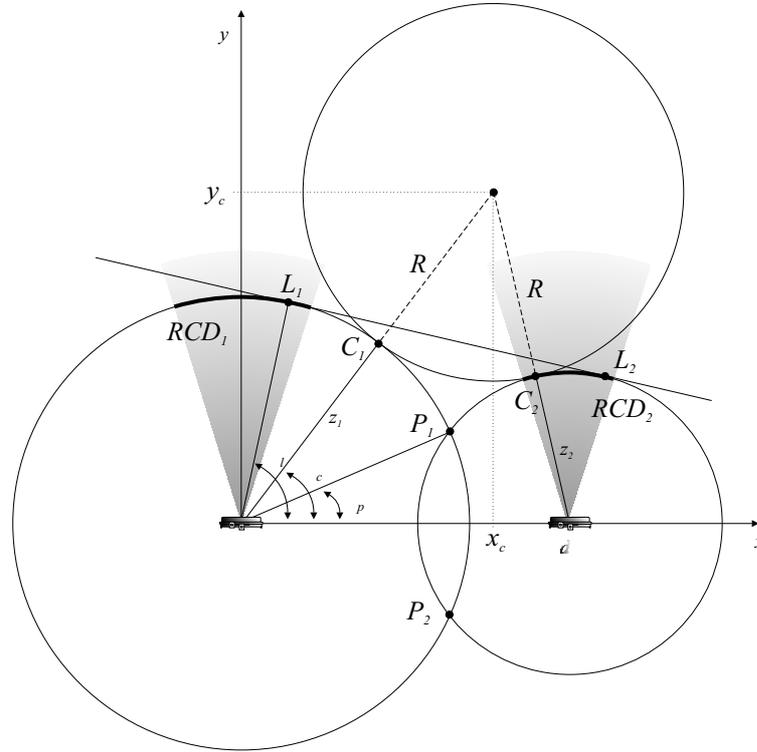


Figura 4.15: Correspondência entre duas RCDs. Hipoteticamente, três tipos de reflectores poderão ter dado origem aos dois RCDs. Porém, a circunferência tangente em C_1 e C_2 não é tangente à RCD_1 , o ponto P_1 não pertence a nenhuma das RCDs, apenas o reflector plano tem os pontos tangente L_1 e L_2 incluídos nas duas RCDs. Existe, assim, a hipótese de o reflector ser um plano.

$$y_c = (z_1 + R) \sin(\phi) \quad (4.45)$$

Cada par de RCDs pode definir zero, um, dois ou três hipotéticos reflectores. Veja-se o exemplo da Figura 4.15, onde os pontos C_1 e C_2 podem definir um reflector cilíndrico de raio R e orientação ϕ_c ; os pontos L_1 e L_2 podem definir um reflector plano com orientação ϕ_l ; o ponto P_1 pode definir um reflector pontual (canto ou esquina) com orientação ϕ_p .

2. Teste de inclusão.

O teste de inclusão verifica se, entre os prováveis reflectores, os seus pontos de tangência se encontram dentro dos limites angulares das RCDs.

Veja-se o exemplo da Figura 4.15: O ponto C_1 encontra-se fora dos limites da RCD_1 , por isso, o reflector não deverá ser um cilindro. O ponto P_1 apresenta-se fora das duas RCDs,

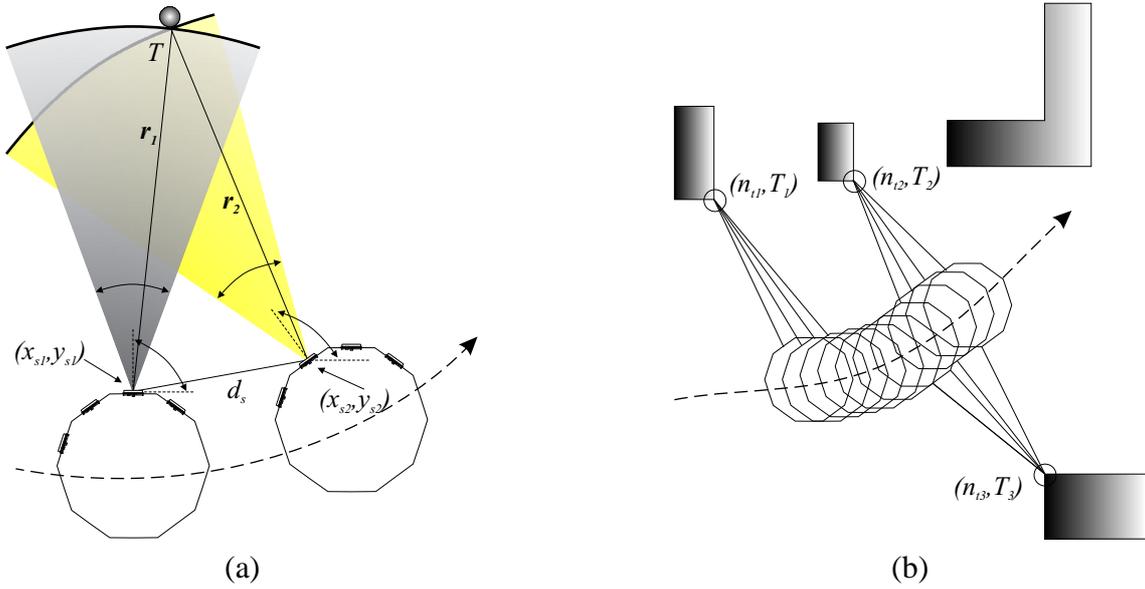


Figura 4.16: (a) Princípio básico de triangulação. A intersecção dos dois arcos dá-nos a posição do reflector T . (b) O método TBF procura identificar e agrupar as reflexões que são originadas pelo mesmo reflector pontual. A média das triangulações de todas essas medidas resulta numa estimativa do ponto reflector (\bar{x}_T, \bar{y}_T) , designado por *ponto de triangulação* e representado por (n_{t_j}, T_j) , onde n_{t_j} representa o número de pontos agrupados para obter a estimativa.

logo o reflector também não deverá ser um canto ou esquina. Porém, os pontos L_1 e L_2 encontram-se dentro dos limites das RCDs, ou seja, por isso o reflector desconhecido poderá ser um reflector plano.

4.3.2 TBF

O método TBF (Triangulation Based Fusion) desenvolvido por Olle Wijk e Henrik I. Christensen [Wijk et al., 1998; Wijk and Christensen, 1999, 2000], tem como objectivo detectar apenas os reflectores pontuais, esquinas ou arestas. O princípio básico é simples: consideram-se duas leituras obtidas em posições diferentes, enquanto o robô se move, e representam-se, respectivamente, pelo modelo de distribuição uniforme 3.2, com uma abertura $\delta = 25^\circ$ (Figura 4.16-a). Assumindo que ambas as reflexões são originadas por um objecto pontual, a sua posição $T = (x_T, y_T)$ pode ser determinada pela intersecção dos dois arcos, resolvendo as seguintes equações:

$$(x_T - x_{s_i})^2 + (y_T - y_{s_i})^2 = r_i^2, \quad i = 1, 2 \quad (4.46)$$

$$\arctan\left(\frac{y_T - y_{s_i}}{x_T - x_{s_i}}\right) \in \left[\gamma_i - \frac{\delta}{2}, \gamma_i + \frac{\delta}{2}\right], \quad i = 1, 2 \quad (4.47)$$

onde (x_{s_i}, y_{s_i}) representa as posições dos sensores, r_i as respectivas distâncias, γ a orientação dos sensores e δ a abertura do cone de emissão.

O conjunto de soluções (\hat{x}_T, \hat{y}_T) é dado por:

$$\hat{x}_T = x_{s_1} + \frac{1}{d_s^2} \left(d_{x_s} d_r^2 \pm |d_{y_s}| \sqrt{r_2^2 d_s^2 - d_r^4} \right) \quad (4.48)$$

$$\hat{y}_T = y_{s_1} + \frac{1}{d_s^2} \left(d_{y_s} d_r^2 \pm |d_{x_s}| \sqrt{r_2^2 d_s^2 - d_r^4} \right) \quad (4.49)$$

onde

$$d_{x_s} = x_{s_1} - x_{s_2}$$

$$d_{y_s} = y_{s_1} - y_{s_2}$$

$$d_s^2 = d_{x_s}^2 + d_{y_s}^2$$

$$d_r^2 = \frac{r_1^2 - r_2^2 - d_s^2}{2}$$

Depois de removidas as falsas intersecções por 4.47, a solução $T = (x_T, y_T)$ constitui uma primeira estimativa da posição do reflector. Utilizando mais leituras, filtrando e determinando simplesmente as médias das consecutivas triangulações, surge uma melhor estimativa da posição T . Deste modo, obtêm-se os chamados *pontos de triangulação*

$$(n_{t_j}, T_j) \quad (4.50)$$

onde n_{t_j} é o número de triangulações que contribui para a posição estimada T_j (Figura 4.16-b).

O algoritmo TBF pode ser usado para gerar mapas de grelhas, actualizando as células segundo o algoritmo que se segue:

1. Todas as células são iniciadas com o valor zero.
2. Quando um novo ponto de triangulação (n_{t_j}, T_j) é gerado, a célula correspondente (\bar{x}_T, \bar{y}_T) é actualizada com o valor n_{t_j} . Se a célula correspondente já tiver um valor diferente de zero, é usado o maior dos dois valores.

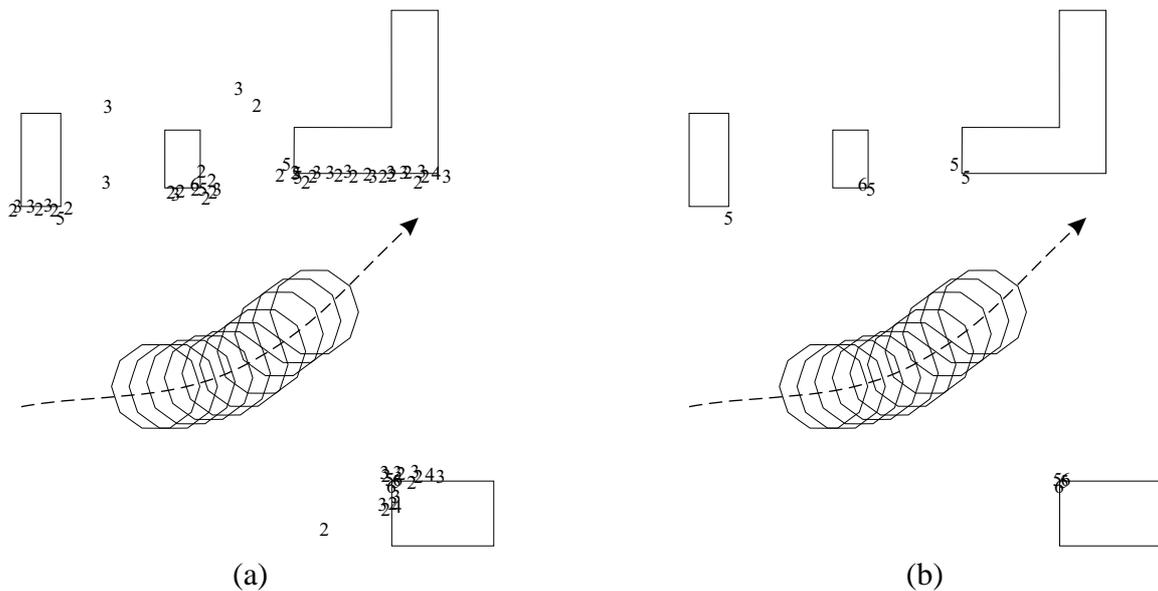


Figura 4.17: (a) Exemplo da construção de um mapa de grelhas, aplicando o algoritmo de actualização sugerido. (b) Os melhores pontos de triangulação do mapa da esquerda. Todos eles correspondem a arestas ou esquinas e podem servir como referências para a localização e navegação de robôs.

3. Células na linha entre (\bar{x}_T, \bar{y}_T) e a posição do sensor (x_{s_i}, y_{s_i}) são colocadas a zero.

Na Figura 4.17-a, está representado um exemplo de construção de um mapa usando esta técnica. Os algarismos representam n_{t_j} .

Uma interessante aplicação proposta para este método é a detecção de referências topográficas para navegação e localização de robôs. As células mais votadas, – com maior n_{t_j} –, resultam dos reflectores mais visíveis, que, neste método, são as esquinas e arestas, e podem constituir importantes referências para navegação e localização (Figura 4.17-b).

Capítulo 5

Mapas

Uma das questões que se apresenta em muitas das aplicações com robôs móveis é a detecção e identificação do espaço envolvente na sua área de trabalho, de modo a que o robô possa localizar-se, definir a sua trajectória e desviar-se de obstáculos. Este processo de controlo é, normalmente, implementado em duas fases: primeiro o robô usa os seus sensores para construir um mapa ou modelo do ambiente que o rodeia e, depois, utiliza esse mapa para planear e executar as suas acções. A utilização de mapas torna também o comportamento do robô mais robusto, uma vez que a informação previamente armazenada pode servir para o robô interpretar e validar os dados sensoriais, visando, por exemplo, localizar e identificar objectos.

Todavia, existem muitas incertezas, quer nos sistemas de aquisição de dados, quer no espaço que envolve um robô. Os sensores de distância não são ideais, o ambiente não é estático e, muitas vezes, não pode ser delimitado. Um bom modelo deve, portanto, ser capaz de lidar com todas as incertezas de um mundo dinâmico, e ser capaz de actualizar as suas estruturas.

Este capítulo faz, pois, uma breve descrição dos mapas mais utilizados em aplicações de robótica móvel e que podem ser classificados em quatro categorias ordenadas de acordo com a sua robustez, ou seja, com a quantidade de informação geométrica que pode ser guardada e extraída desse mapa [Lee, 1996].

Pontos de referência: O reconhecimento de pontos de referência é uma habilidade fundamental dos humanos. Todas as pessoas utilizam pontos de referência quando procuram os seus

caminhos no meio de uma cidade. Este tipo de mapas consiste numa lista de localizações que pode ser facilmente reconhecida pelo robô. Se um robô for capaz de reconhecer um ponto de referência, ele pode aproximar-se e executar diversas acções (por exemplo, ligar-se ele próprio a uma tomada eléctrica).

Mapas topológicos: Se um robô precisa de encontrar um ponto de referência que não está visível, ele tem de planear uma trajectória por entre pontos de referência intermédios, isto é, necessita de saber quais são os locais por onde se pode deslocar livremente. Como poderá, então, o robô ter acesso a essa informação ? Através de um mapa topológico que, além dessa informação, pode ainda ajudar a identificar pontos anteriormente interditos.

Mapas topológicos métricos: Aos mapas topológicos é muitas vezes adicionada alguma informação métrica, tipicamente os comprimentos e orientação dos percursos entre pontos de referência. Os benefícios desta informação podem ser:

- Um planeamento de trajectórias melhor e mais eficiente, já que, com este conhecimento métrico, o robô pode escolher, de entre as várias trajectórias possíveis, a mais curta.
- Esta informação pode servir para eliminar ambiguidades, tornando possível discriminar pontos recorrendo às distâncias aos pontos de referência.

Mapas métricos: Os objectos e o espaço livre são completamente descritos num mapa Cartesiano. Estes mapas podem descrever o ambiente subdividindo-o em dois modos:

- Grelhas, em que o ambiente é dividido num número finito de regiões tipicamente quadradas e de igual dimensão, designadas por células. Cada célula apresenta frequentemente uma medida da probabilidade de esse espaço estar ocupado por um objecto.
- Formas geométricas, em que o ambiente que rodeia o robô é representado por uma lista de formas geométricas (planos, cantos, esquinas, cilindros, etc) e as suas propriedades (localização, orientação, tamanho, cor, etc).

Todos os robôs móveis possuem algum modo de evitar colisões, desde simples algoritmos que detectam um obstáculo e param o robô para evitar a colisão, até algoritmos mais sofisticados que detectam os obstáculos e se desviam para os contornar, retomando a trajetória previamente definida. Neste último caso, torna-se necessário não só a detecção de um possível obstáculo, mas também a realização de medidas pertinentes que permitam obter as suas dimensões para se poder efectuar os devidos cálculos para o contornar. Outros algoritmos procuram as zonas livres entre os diversos objectos para conseguirem atingir um objectivo, alterando as trajetórias previstas.

Ao falar-se em mapas, tem-se, à partida, a ideia da representação espacial da área de trabalho do robô. Contudo, essa não é sempre a principal função dos mapas quando usados por robôs móveis. A sua principal função é, na maioria das vezes, armazenar, combinar e modelar estatisticamente a informação, por vezes pouco fiável, de diversos sensores num mapa, de modo a fornecer, eficiente e rapidamente, informação do ambiente que rodeia o robô às aplicações integradas de detecção de obstáculos. Esses algoritmos de detecção de obstáculos utilizam a informação guardada nos mapas para conduzirem o robô em direcção a um determinado objectivo sem que exista choque com objectos indesejáveis. Alguns dos métodos apresentados nas secções seguintes não produzem só mapas, produzem também informação para os algoritmos de detecção e desvio de obstáculos.

5.1 Mapas métricos

5.1.1 Mapas de grelhas

Os modelos baseados em grelhas discretizam o ambiente numa matriz de pequenas células que retém a hipótese probabilística de esta estar ocupada. Esse valor probabilístico é actualizado recorrendo a diversos modelos de sensores e a várias técnicas de fusão de dados, tais como Bayes, Dempster-Shafer, Fuzzy, etc. Diferentes combinações destas duas variáveis caracterizam os métodos apresentados nesta secção.

Grelha de certeza

Os pioneiros na utilização de métodos probabilísticos para a representação de obstáculos em mapas de grelhas foram Moravec e Elfes, da Universidade de Carnegie-Mellon [Moravec and Elfes, 1985; Elfes, 1987]. A primeira representação, chamada *Grelha de Certeza*, tornou-se apropriada para reunir dados de múltiplos sensores e, especialmente, de sensores muito imprecisos, como os dados de distância provenientes dos sensores de ultra-sons.

Neste modo de representação, a área de trabalho do robô é representada por uma grelha bidimensional de células quadradas. Cada célula contém um valor de certeza CV (*Certainty Value*) entre zero e um, que indica a medida de confiança de que um obstáculo ocupa essa célula. Neste método, os valores CV actualizam-se por meio de uma função de probabilidade heurística que tem em conta as características específicas dos sensores. No caso dos ultra-sons, estes possuem um campo de percepção cónico e, por isso, a distância que se obtém indica com alguma precisão o afastamento do obstáculo, mas não o ângulo em que se encontra. Assim, uma distância medida d pode resultar de qualquer ponto dentro da área A (Figura 5.1). É lógico pensar-se que, na vizinhança do eixo acústico, a probabilidade de encontrar obstáculos é maior. Por esta razão, neste método usa-se uma função probabilística em que se incrementa mais o CV das células próximas ao eixo acústico, em comparação com as da periferia. Se um eco é recebido de um objecto a uma distância d supõe-se, logicamente, que o sector B, entre o sensor e a área A, esteja livre de objectos. Isto é expresso aplicando uma função de probabilidade negativa às células nesta zona.

Com este método, o robô móvel permanece estacionário enquanto realiza um varrimento panorâmico dos seus sensores. As células são actualizadas aplicando-se a função probabilística para cada sensor. O robô muda de localização, pára e, em seguida, repete o procedimento. Simultaneamente, é feito um novo planeamento da trajectória em função das alterações que o mapa sofreu. Uma vez cumprida a tarefa inicialmente prevista, o mapa de grelhas resultante apresenta uma aceitável representação dos contornos da sala.

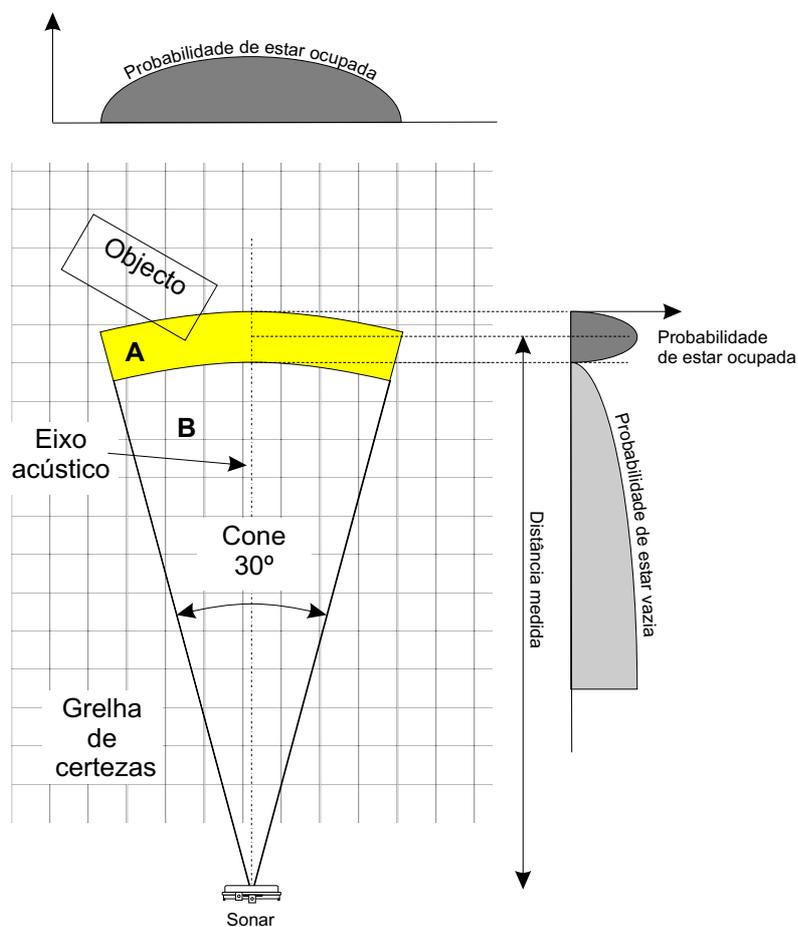


Figura 5.1: Projecção bi-dimensional do cone de percepção de um sensor de ultra-sons. A medida de uma distância d indica a presença de um objecto na região A e a ausência no sector B.

Grelha de ocupação

O método *Grelha de Ocupação* é um método mais recente, desenvolvido por Elfes [Elfes, 1989], semelhante às Grelhas de Certeza, mas com modelos Gaussianos para os sensores e técnicas de actualização mais rigorosas. A informação dos sensores é fundida nos mapas de grelhas, usando regras de Bayes ou Dempster-Shafer [Pagac et al., 1996].

Grelha de inferência

O método *Grelha de Inferência*, que estima também a probabilidade da existência de outras propriedades na célula, para além da ocupação, tais como acessibilidade, cor, brilho, etc, é uma

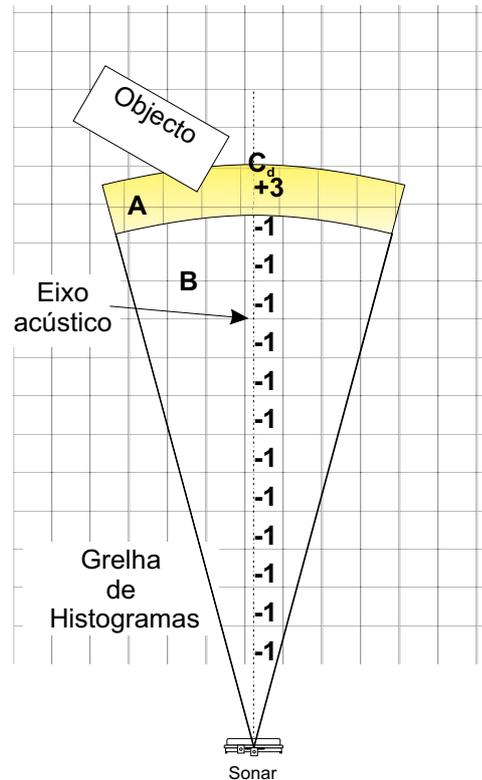


Figura 5.2: Modelo simplificado do sensor: considera-se que o objecto medido se encontra à distância d no eixo acústico do cone de emissão. As células sob o eixo acústico na região B são decrementadas (-1), e apenas a célula C_d é incrementada (+3).

generalização do método *Grelha de Ocupação* [Matthies and Elfes, 1988].

Histograma em movimento - HIMM

O método *Histograma em Movimento* (HIMM - *Histogram In-Motion Mapping*) é um método para a construção de mapas em tempo real com o robô em movimento. Este método modela o sensor na sua forma mais simples, considerando que o objecto medido se encontra à distância d , no eixo acústico do cone de emissão (Figura 5.2), e utiliza um histograma para actualizar as probabilidades das células. À semelhança dos métodos anteriores, em cada célula é armazenado o valor de medida de certeza de ocupação, mas, agora, é utilizado um valor discreto entre 0 e 15; daí a designação de histograma.

Este método, com o objectivo principal de fornecer informação aos sistemas de detecção de obstáculos, tem como vantagem a rápida actualização dos mapas e a necessidade de poucos re-

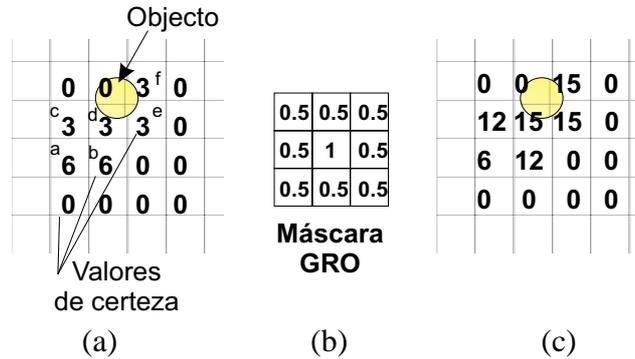


Figura 5.3: (a) A leitura dos sensores em movimento resulta num esbatimento dos valores de certeza em torno do objecto. (b) GRO, o operador de crescimento, é uma máscara 3×3 . (c) A aplicação do operador para a mesma sequência em (a) resulta num maior contraste.

curso computacionais. Porém, devido em parte às limitações do modelo de sensor usado, o seu sucesso tem sido relativo. Como as células são actualizadas com o robô em movimento, apenas uma célula é incrementada em cada leitura e, devido também às imprecisões do sensor, tem-se como resultado um esbatimento adverso dos níveis de evidência na existência de obstáculos. Como o robô reage mais drasticamente às fortes probabilidades, e como esses valores se encontram esbatidos, o robô estaria frequentemente a executar manobras de desvio de obstáculos que não existem. Borenstein e Koren [Borenstein and Koren, 1991a], os autores deste método, introduziram, então, um operador de crescimento (GRO - *Growth Rate Operator*) para fazer crescer mais rapidamente as células com valores CV altos nas vizinhanças. Este operador consiste, basicamente, numa máscara 3×3 , aplicada em cada leitura à célula C_d , incrementada com +3:

$$CV'_{i,j} = CV_{i,j} + 3 + \sum_{\substack{p,q=1 \\ p,q=-1}} (W_{p,q} CV_{i+p,j+q}) \quad (5.1)$$

O efeito do operador GRO encontra-se bem exemplificado na Figura 5.3. Esta optimização permite ao método HMM construir mapas de elevado contraste apenas com algumas leituras.

5.1.2 Mapas geométricos

O ambiente que rodeia o robô, nestes mapas, é representado por uma lista de formas geométricas (planos, cantos arestas e cilindros) e as suas propriedades (localização, orientação, dimensão, etc).

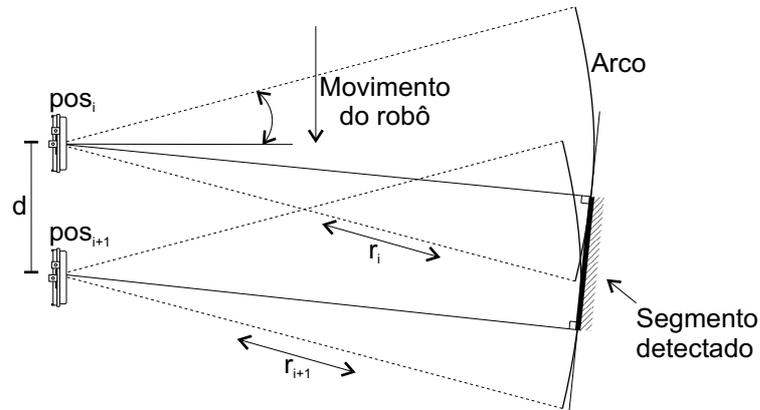


Figura 5.4: Geometria de uma tangente a dois arcos.

Mapa de segmentos

Neste modelo, McKerrow procura construir um mapa do ambiente, detectando pequenos segmentos dos objectos [McKerrow, 1993]. Para obter um mapa do ambiente, o robô move-se de forma intermitente, parando depois de cada movimento. Considerando o modelo de percepção cónico, a informação fornecida por uma leitura do sensor na posição i define um arco de raio r_i e amplitude 2β (Figura 5.4). Ao mover o robô para outra posição $(i + 1)$, é feita nova leitura do sensor e é obtido outro arco de raio r_{i+1} . Se as duas reflexões forem originadas por uma superfície plana, é possível calcular uma tangente comum entre os dois arcos, desde que a seguinte relação se verifique:

$$|r_{diff}| \leq d \cdot \cos(\beta) \quad (5.2)$$

sendo

r_{diff} a diferença entre duas medidas consecutivas;

d a distância entre medidas;

β metade da amplitude do arco.

Em caso afirmativo, é identificado um novo segmento entre os dois pontos de tangência. Se o mapa do ambiente for representado com arcos, facilmente se obtém uma grande complexidade de elementos. Calculando os segmentos tangentes entre arcos consecutivos, simplifica-se a

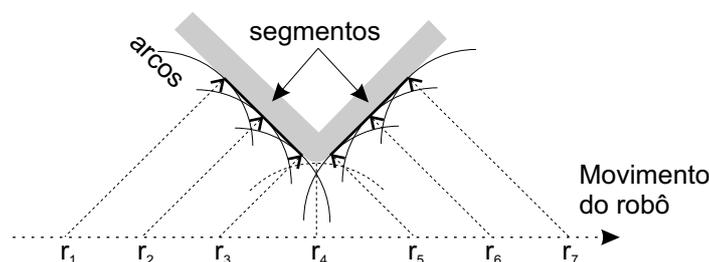


Figura 5.5: Exemplo do mapeamento de uma aresta depois de alguns movimentos do robô.

representação dos objectos e rapidamente as superfícies planas se começam a tornar evidentes (Figura 5.5).

Mapa local composto

Neste modelo, James L. Crowley procura representar o ambiente local, envolvente ao robô, por segmentos de recta [Crowley, 1989]. Cada segmento é identificado testando o alinhamento de três pontos. Se os três pontos se encontrarem alinhados a menos de uma tolerância, dependente de σ_W dada pelo modelo do sensor (Secção 3.2), é criado um segmento, unindo esses três pontos. Cada segmento armazena consigo um conjunto de dados métricos (posição, comprimento, orientação), caracterizados por uma estimativa e respectiva precisão. São ainda rotulados com um factor de confiança CF, que é incrementado até um máximo de 5, sempre que um novo conjunto de dados apresente alguma correspondência, enquanto os outros CF são decrementados. Um segmento com o seu CF menor que zero é retirado do mapa. O processo de criação de segmentos é aplicado, sucessivamente, no sentido indirecto de rotação, anexando novos pontos ou criando novos segmentos. A informação resultante deste processo é fundamental para a detecção de espaços livres, onde o robô se possa movimentar, sem colidir com obstáculos, e também para a sua localização e identificação do espaço envolvente. Na Figura 5.6, está representada a detecção de um segmento a partir de várias leituras de um sensor.

Mapa global de formas geométricas

O algoritmo do Mapa Global de Formas Geométricas foi inicialmente desenvolvido por Chong e Kleeman [Chong and Kleeman, 1996]. Neste método, o ambiente que rodeia o robô é

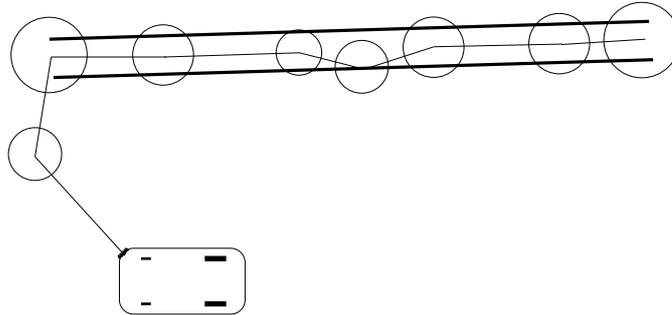


Figura 5.6: Exemplo de um robô a detectar um segmento. No topo, mostra-se um conjunto de pontos onde foi detectado um segmento de recta. Cada leitura i do sensor é representada por uma circunferência de raio σ_{W_i} de acordo com o modelo do sensor (Secção 3.2). O segmento detectado é representado por duas linhas paralelas em $\pm\sigma_c$ (a incerteza em posição perpendicular ao segmento).

representado por uma lista de formas geométricas: planos, cantos e arestas. Os parâmetros dos planos, as coordenadas Cartesianas dos cantos e arestas, as coordenadas do robô, a orientação e velocidade do som, juntamente com as matrizes de covariância entre formas, são colectivamente designadas por *estado* do mapa. Quando é feita uma nova medida¹, são testadas as colinearidades da nova forma geométrica detectada com as formas existentes no mapa. A nova forma deve passar por testes χ^2 e Filtros de Kalman para ser fundida no mapa ou ser integrada como um novo elemento. Por fim, toda a lista de parâmetros é actualizada e expandida, e são criadas as novas matrizes de covariância entre a nova forma e todas as outras existentes (Figura 5.7).

Utilizando o mapa previamente construído, o robô utiliza grupos de pelo menos duas medidas para se localizar. Se o mapa existente for razoavelmente completo, os algoritmos de correspondência conseguem localizar a posição do robô no ambiente sem qualquer conhecimento prévio da sua localização. Contudo, se existirem posições diferentes, no mapa, que produzam medidas similares para os sensores, o algoritmo de correspondência pode falhar devido às ambiguidades encontradas. Na prática, o robô deve ter uma ideia aproximada da sua posição (utilizando por exemplo a odometria) para poder orientar o processo de localização.

Os dois maiores inconvenientes que afectam este método são os elevados recursos de memória e o exigente processamento requerido pelo algoritmo, principalmente em mapas de grande di-

¹Este sistema utiliza um conjunto de sensores de ultra-sons para identificar e classificar formas geométricas do tipo: planos, cantos e arestas. Uma *medida* neste sistema está associada à identificação de uma destas formas geométricas e aos seus parâmetros posição, orientação, etc.

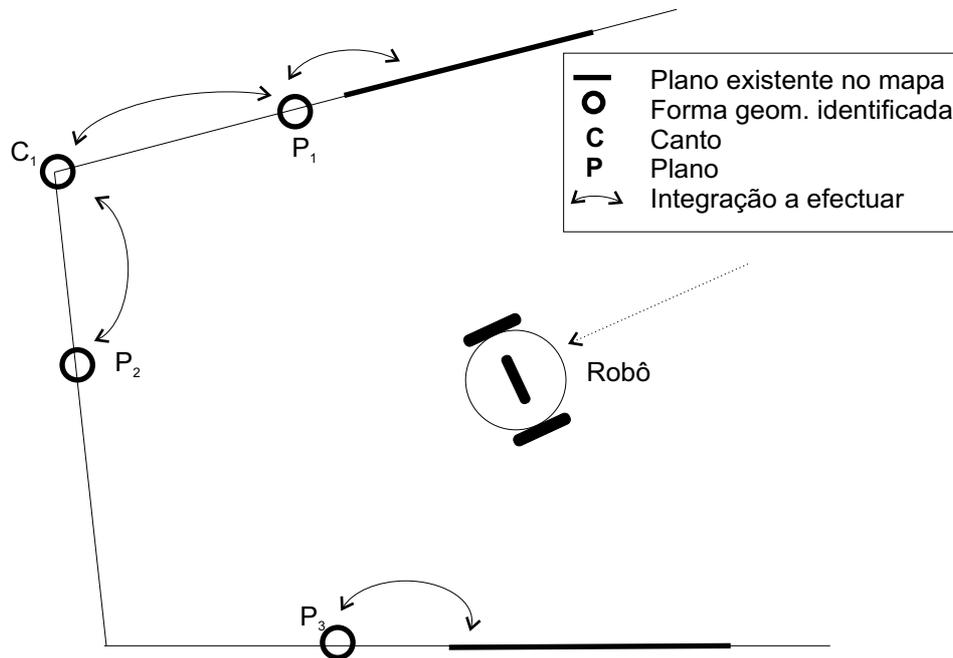


Figura 5.7: Instantâneo do mapa e fusão dos dados no estágio $k + 1$. O robô deslocou-se para uma nova posição e identificou novas formas geométricas. Utiliza algumas para se posicionar no mapa já existente (P_1, P_3) e integra as restantes no mapa. Para além dos planos P_1 e P_2 serem logicamente integrados nos segmentos já existente, o algoritmo de integração também detecta o alinhamento existente entre os dois planos P_1 e P_2 e o canto C_1 .

mensão e com muitos objectos, podendo comprometer a sua utilização em aplicações em tempo-real.

Mapa local de formas geométricas

No método anterior, todo o ambiente onde se movimenta o robô é representado geometricamente num mesmo mapa global. Dependendo da complexidade e da dimensão desse espaço, pode haver a necessidade de grandes recursos de memória e processamento. Por outro lado, quando uma forma geométrica é actualizada, a estimativa de uma outra forma afastada no mapa não é significativamente melhorada pela sua correlação. Por isso, não há qualquer razão para se guardar as suas matrizes de correlação, poupando-se na utilização de memória e reduzindo-se os tempos de processamento. Foi basicamente esta ideia que levou Chong e Kleeman [Chong and Kleeman, 1999] a desenvolverem uma nova estratégia local.

O novo *Mapa Local* proposto reparte o ambiente global numa topologia de regiões locais

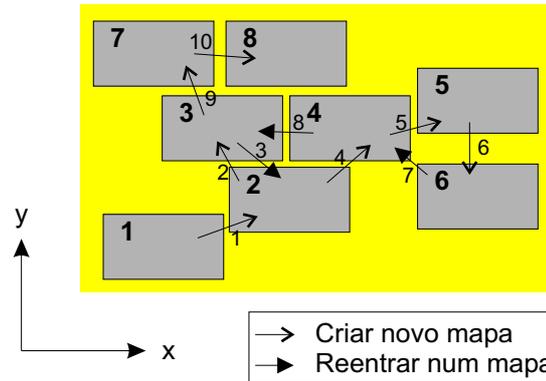


Figura 5.8: Representação de um grande ambiente por um conjunto de mapas locais interligados. Cada mapa local pode ser visto como um *nodo* de um grafo, ligados por arcos, indicando a sequência das visitas.

(Figura 5.8), mantendo apenas a covariância entre formas locais e a covariância entre mapas locais. As formas e parâmetros guardadas instantaneamente em memória são as mesmas que no método anterior, só que são menos, pois só os objectos do mapa local estão presentes. Sempre que o robô entra numa nova região, é carregado em memória o novo mapa. Com este novo conceito, apenas um mapa local está em memória em cada instante, disponibilizando mais memória para o processamento. O robô executa exactamente as mesmas rotinas de correspondência e de localização, preservando-se os detalhes estatísticos e reduzindo-se a acumulação de erros sempre que se visita um novo mapa local.

5.2 Métodos locais de detecção e desvio de obstáculos

Nesta secção, são apresentados alguns exemplos de diferentes métodos empregues para detecção e desvio de obstáculos. Estes métodos recorrem normalmente aos sistemas de construção de mapas anteriormente apresentados, para com eles, e sem o conhecimento absoluto do meio envolvente, planificar a trajectória a efectuar, tendo em conta as probabilidades da presença de obstáculos, da sua posição e do possível conhecimento prévio de alguns elementos fixos.

5.2.1 Detecção de arestas

Método bastante popular, que consiste na medição de distâncias em volta do robô e tem como objectivo determinar as projecções verticais das arestas dos obstáculos, sendo a linha que une duas arestas identificada como uma das faces do objecto. O robô é, então, conduzido de modo a contornar uma dessas arestas.

5.2.2 Campo de potencial

O método Campo de potencial, inicialmente sugerido por Khatib [Khatib, 1986], baseia-se na ideia de forças a actuar sobre o robô. Por um lado, os obstáculos exercem uma força repulsiva sobre o robô, enquanto o ponto objectivo exerce uma força de atracção. A força total resultante é um vector R , que compreende a soma de uma força atractiva em direcção ao alvo e as forças repulsivas dos obstáculos. Esta resultante é determinada para cada posição do robô e determina o caminho a seguir. Com R como força de aceleração actuando sobre o robô, calcula-se a nova posição para um dado intervalo de tempo, e o algoritmo é repetido. As forças de repulsão dos obstáculos dependem da distância a que se encontra o robô.

5.2.3 Campo de forças virtuais

O método de *Campo de Forças Virtuais* (VFF - *Virtual Force Field*) é um método proposto por Borenstein e Koren [Borenstein and Koren, 1989] para evitar obstáculos em tempo real, com movimentos rápidos e contínuos sem a necessidade de paragens, como nos métodos anteriores.

O método VFF utiliza, à semelhança do método das Grelhas de Certeza, uma grelha bi-dimensional para mapeamento dos obstáculos. Cada célula na posição (i, j) contém um valor $c_{i,j}$ que representa a medida de confiança que prova que um obstáculo ocupa essa célula. O método anterior projecta um perfil de probabilidades num vasto conjunto de células de acordo com o modelo do sensor, tornando o processo computacional demasiado pesado quando se pretende reacções em tempo real. Contudo, o método VFF incrementa o CV só numa célula para cada leitura, criando uma distribuição de probabilidades muito mais simples e rápida de calcular. A célula actualizada é aquela que se encontra a uma distância d no eixo acústico

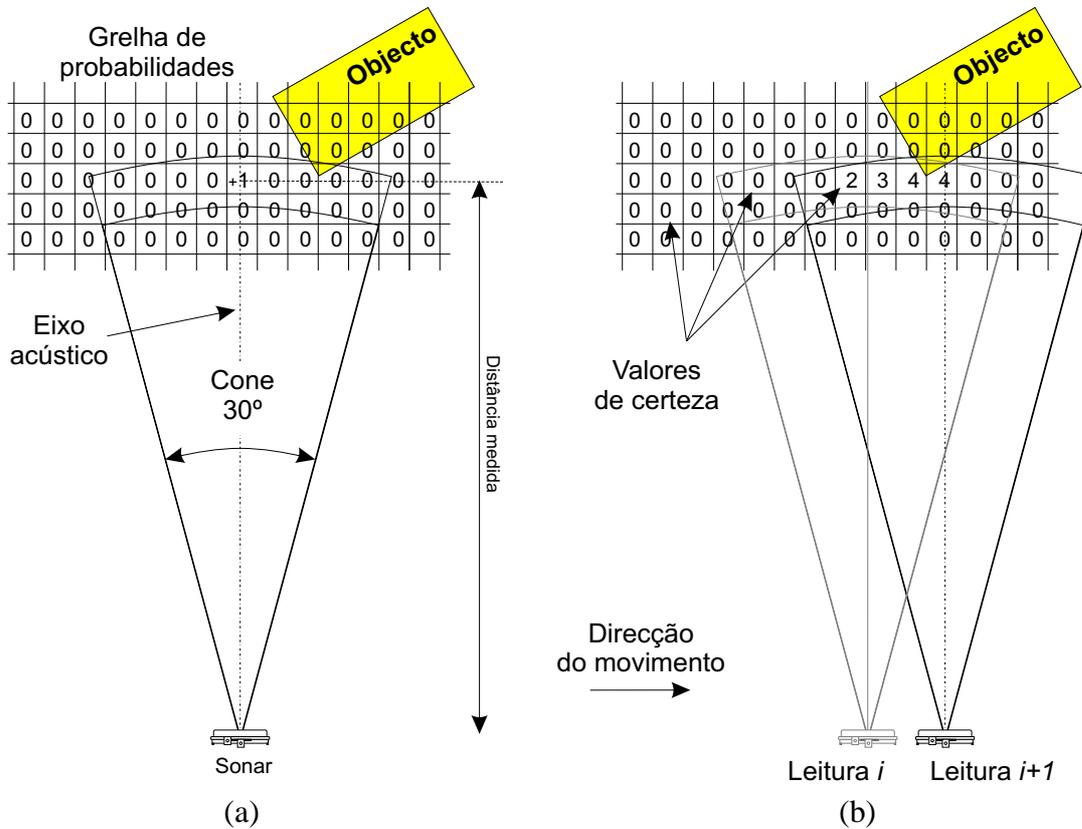


Figura 5.9: (a) Só uma célula é incrementada em cada leitura. Nos sensores de ultra-sons, esta célula encontra-se sobre o eixo acústico à distância d . (b) Uma distribuição de probabilidades é obtida com uma contínua e rápida amostragem dos sensores, enquanto o robô se move.

do feixe de ultra-sons (Figura 5.9 (a)). Esta aproximação pode ser vista como uma excessiva simplificação, no entanto, é obtida uma distribuição probabilística com uma elevada taxa de amostragem dos sensores. O resultado é um grupo de células com valores de certeza mais altos perto do obstáculo (Figura 5.9 (b)).

Em seguida, é aplicado o conceito de Campo de Potencial apenas a um conjunto de células compreendidas dentro de uma janela rectangular $W_s \times W_s$ que se movimenta com o robô. Cada célula exerce uma força repulsiva F_{ij} , em direcção ao robô, proporcional ao valor da certeza c_{ij} e inversamente proporcional à distância do robô à célula. Simultaneamente, uma força virtual atractiva F_t é exercida pelo alvo, como atraindo o robô para o objectivo final. A soma das diversas forças repulsivas F_r e da força atractiva é calculada em cada iteração, resultando num vector R (Figura 5.10).

Ao combinar os dois conceitos, anteriores referidos, em tempo real, os dados dos sensores exercem uma influência imediata no controlo do movimento do robô, pois este método actualiza, de forma rápida, os valores das células, permitindo, assim, o cálculo do vector R em cada iteração, isto é, obtém-se uma resposta rápida aos obstáculos que apareçam subitamente.

5.2.4 Histograma do vector de campo

O método VFF revelou claramente a sua mais evidente deficiência: uma excessiva e drástica redução de dados. A informação de centenas de células é conjugada em apenas duas componentes: direcção e amplitude do vector F_r . Consequentemente, toda a detalhada informação relativa à posição e dimensão dos obstáculos é menosprezada.

Para solucionar estes inconvenientes, Borenstein e Koren [Borenstein and Koren, 1991b] desenvolveram um novo método: o método *Histograma do Vector de Campo* (VFH - *Vector Field Histogram*), uma continuação do método VFF. O conceito deste novo método resume-se a três níveis de representação dos dados:

1. No nível mais alto, é guardada informação detalhada relativa ao ambiente que rodeia o robô. Uma grelha bi-dimensional de probabilidades é continuamente actualizada em tempo real com informação de distância proveniente dos sensores. Este processo é idêntico no método VFF.
2. No nível intermédio, é construído um *histograma polar* H de uma dimensão em redor de cada posição instantânea do robô. O histograma polar H é conseguido através da divisão da janela activa ($W_s \times W_s$) em sectores angulares. A cada sector ($1..k..n$) é atribuído um valor h_k , que corresponde a uma densidade polar de obstáculos na direcção do respectivo sector. A Figura 5.11, representa a forma de obter os valores do histograma polar, onde cada valor armazena a informação referente a um dos sectores. Na Figura 5.12 (a) está representado um possível histograma obtido a partir de uma janela activa, como mostra a Figura 5.12 (b), onde algumas células têm valores de certeza diferentes de zero. Observe-se que os picos do histograma correspondem às direcções em que se encontram os obstáculos.

3. No nível mais baixo, é obtida a saída do algoritmo VFH: os valores de referência para a velocidade e direcção do robô. Para escolher a direcção que deve seguir, o robô num determinado momento terá de localizar os vales do histograma polar. Concretizando, poderá, então, localizar o vale mais próximo na direcção do objectivo final, mantendo a velocidade dentro de limites aceitáveis em função da proximidade do robô ao obstáculo. A velocidade poderá estar inversamente relacionada com a densidade polar de obstáculos no sector frontal ao robô.

No método VFH, os valores de distância resultantes dos sensores ficam de imediato disponíveis para a condução do robô através da grelha de probabilidades. Tendo em conta a informação relativa a leituras anteriormente guardadas nessa grelha, é dado maior peso às leituras repetidas e menor às leituras ocasionais. Assim, este método torna-se mais robusto e insensível a leituras erradas do que os métodos anteriores, permitindo movimentos rápidos e contínuos do robô, sem necessidade de paragens para se desviar de obstáculos.

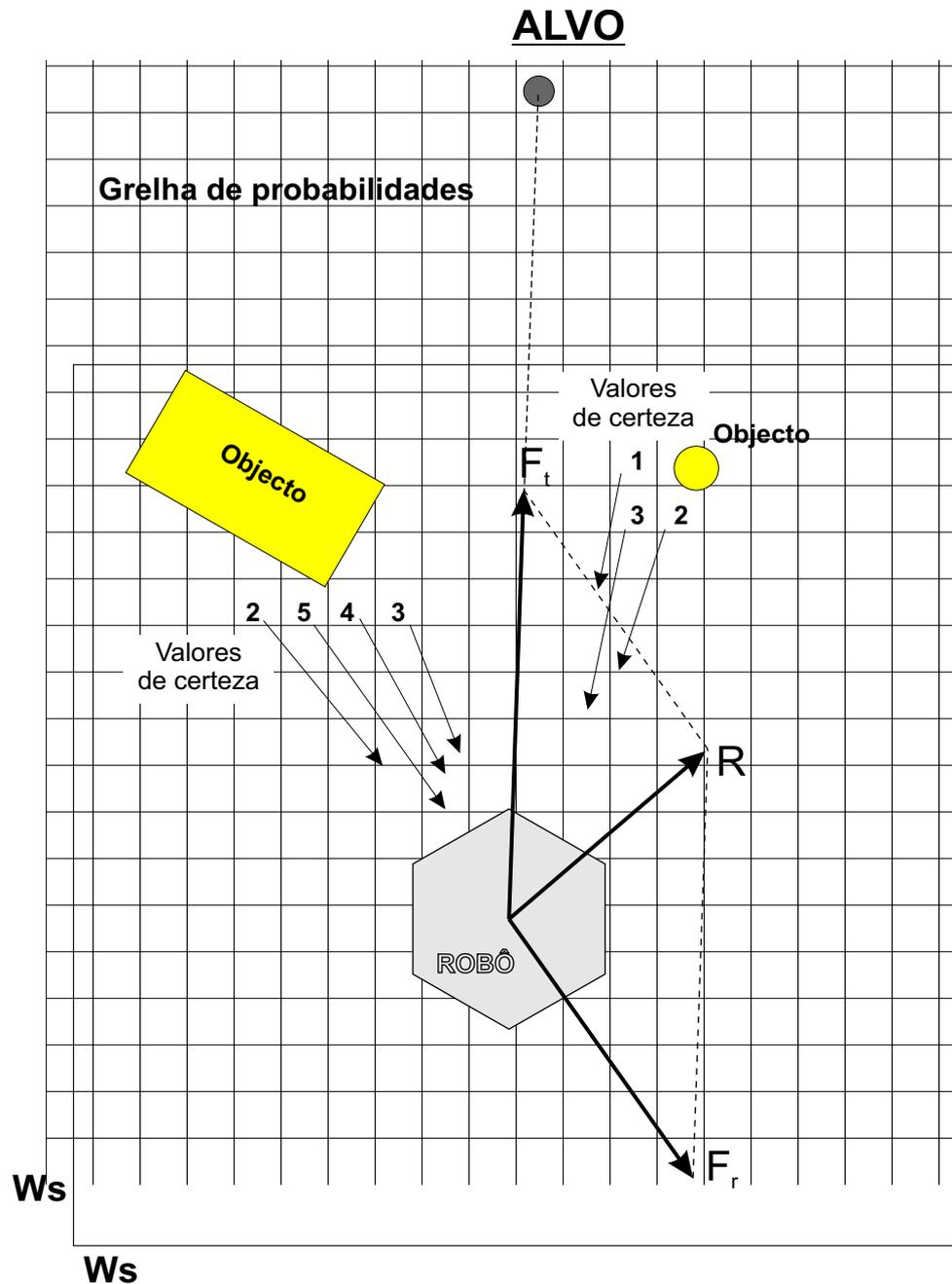


Figura 5.10: (Representação do Campo de Forças Virtuais (VFF)). As células ocupadas exercem uma força repulsiva sobre o robô, enquanto o alvo exerce uma atracção. O robô movimenta-se no sentido da força resultante R .

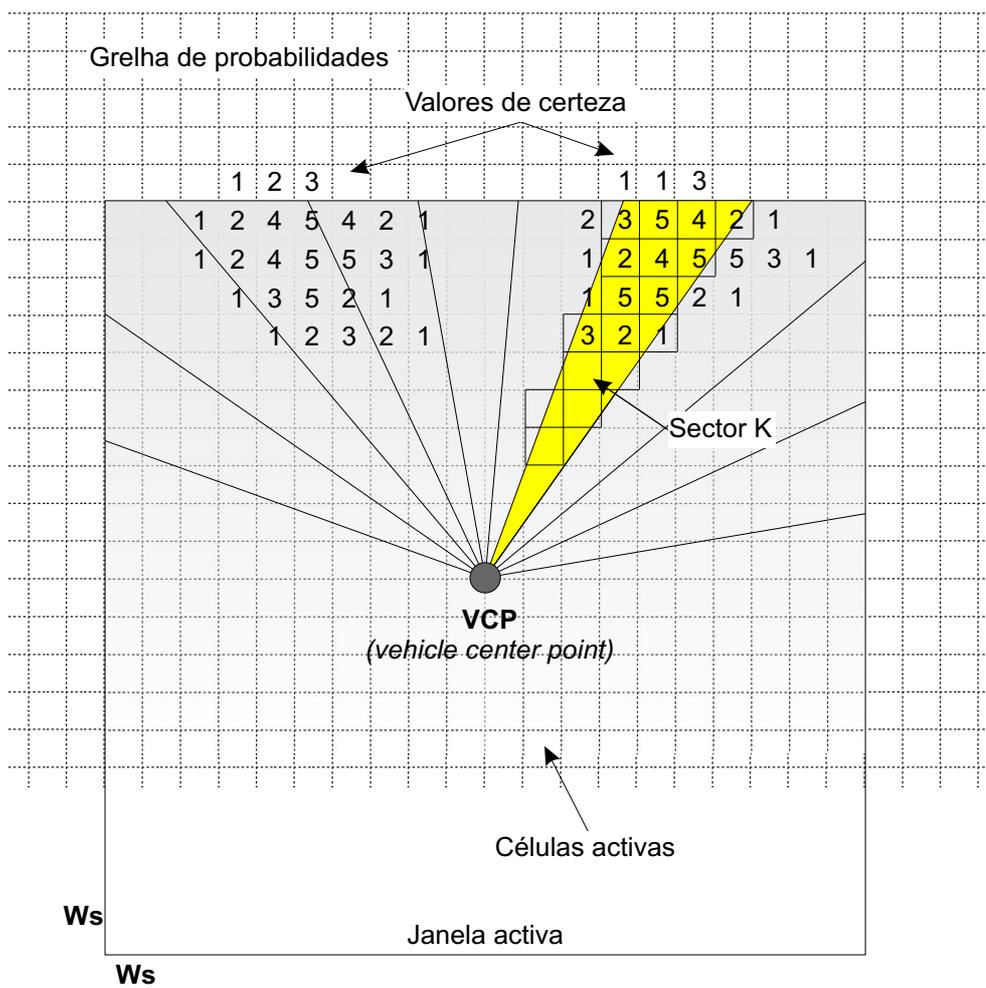


Figura 5.11: Mapa de células activas para o cálculo do histograma polar.

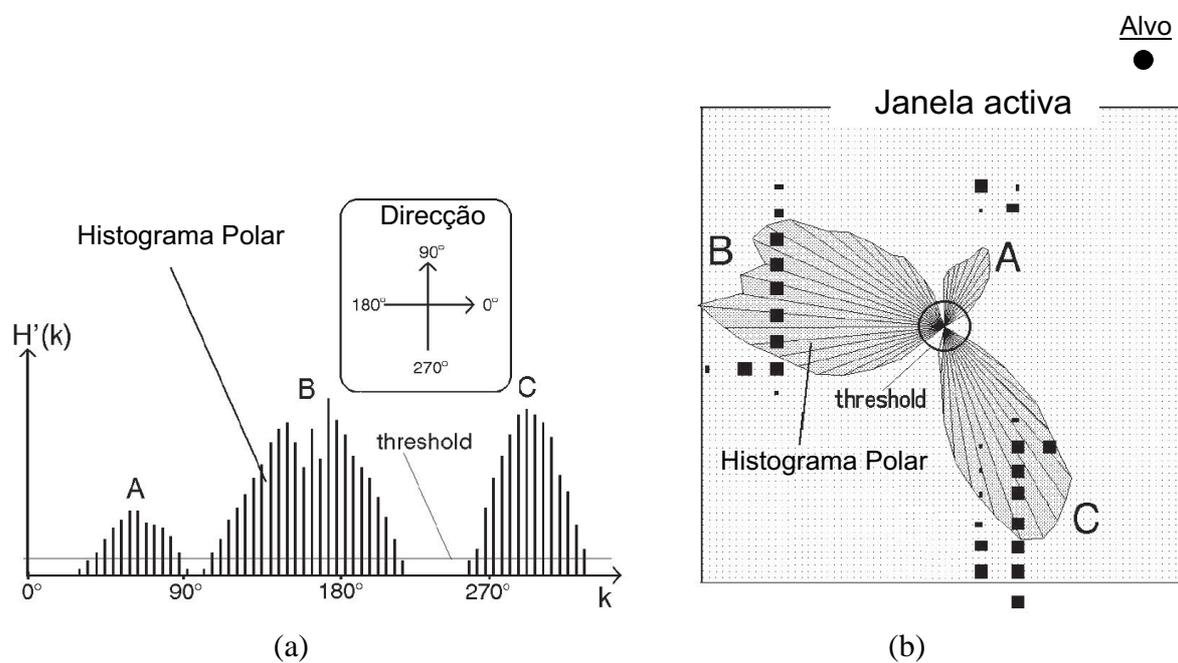


Figura 5.12: Exemplo de possível histograma. (a) Densidade polar de obstáculos $H(k)$ relativamente à posição central do robô (VCP). (b) representação polar do histograma H

Capítulo 6

Modelação Experimental do Sensor

Utilizado nas mais diversas aplicações, sempre que é necessário fazer medição de distâncias, localização, navegação ou construção de mapas, os sensores de ultra-sons podem fornecer informação precisa, mas nem sempre fácil de interpretar. Alguns autores consideram que a distância medida pelo sensor provém de um cone estreito [Borenstein and Koren, 1991a; Harris and Recce, 1998], cuja abertura está relacionada com a abertura do lóbulo de emissão principal e é dado pela equação 2.3. Quando um objecto é detectado, este pode encontrar-se em qualquer ponto do arco limitado pelo cone de emissão. Esta pode ser considerada uma boa aproximação, mas como se verificou experimentalmente, continua a ser falível quando se efectuam medições a distâncias relativamente curtas. A pouca distância, a radiação sonora emitida pelos lóbulos laterais é suficiente para gerar ecos detectáveis pelo receptor. Para distâncias inferiores a 3.5 metros, o cone de percepção do sensor, deve, pelo menos, incluir também os primeiros lóbulos laterais.

Como todo o trabalho desenvolvido nesta tese se baseia na utilização do sensor de distância da Polaroid, e apesar de se conhecer o modelo matemático do sinal emitido (Equação 2.2 e Figura 2.2), existe a necessidade de se fazer um minucioso estudo experimental para avaliar a resposta do sensor num ambiente real, com diferentes objectos e geometrias, de modo a se poder caracterizar devidamente todas estas particularidades. Como já foi referido, a maioria dos objectos em ambientes interiores apresentam, maioritariamente, características especulares, por isso, este capítulo centra-se apenas no estudo do sensor e na sua caracterização, considerando

apenas reflectores especulares planos. No próximo capítulo, será, então, apresentado outro estudo experimental, considerando diferentes reflectores, tais como cantos e esquinas.

O presente capítulo está organizado da seguinte forma: uma breve descrição de algumas modificações feitas no sensor, com vista a melhorar o seu desempenho; descrição do sistema de aquisição de dados usado experimentalmente; por fim, análise minuciosa de todos os dados obtidos, com o objectivo final de propor um modelo experimental para o sensor.

6.1 Modificações no módulo controlador

O módulo da série 6500, apresentado anteriormente na secção 2.4, é frequentemente apontado como responsável pela inexactidão do sensor. Na prática, verifica-se que, mesmo usando o intervalo de 2.38 ms , internamente pré-definido para desactivar a recepção e impedir a detecção das ressonâncias do transdutor após a transmissão, a saída *ECHO* é activada muitas vezes de forma errada e inconsistente. Na verdade, verifica-se que, apesar de se desactivar o receptor neste período inicial, como o transdutor absorve uma corrente muito elevada durante a transmissão (Tabela 2.2), o circuito fica sujeito a um ruído e a uma instabilidade tão elevada que pode activar o receptor e originar um falso *ECHO*. Para eliminar este inconveniente e melhorar o desempenho do sensor, foi adicionado ao módulo controlador da Polaroid um pequeno circuito (Figura 6.1) que, para além de permitir ajustar e activar o sinal de *BINH*, activa, simultaneamente, o sinal *BLNK* durante o mesmo período. Deste modo, a entrada do receptor fica inactiva e a saída *ECHO* é forçada a ficar no nível lógico zero, garantindo uma maior imunidade às interferências durante todo o período de transmissão. Também o sinal *BINH* pode agora ser encurtado até 0.6 ms sem se detectar qualquer interferência, o que possibilita a medição de objectos a 10 cm de distância, aproximadamente.

Depois da detecção de um *ECHO*, é necessário fazer a sua reposição ao nível lógico zero para permitir a detecção de um novo *ECHO*, activando-se, para isso, o sinal *BLNK* durante um curto período de tempo. Este circuito permite controlar automaticamente o sinal *BLNK*, que possibilita o funcionamento em modo *ecos-múltiplos* de forma autónoma e simplifica o controlo do sensor. O intervalo t_1 , representado na Figura 6.2, é controlado por um simples circuito *RC*

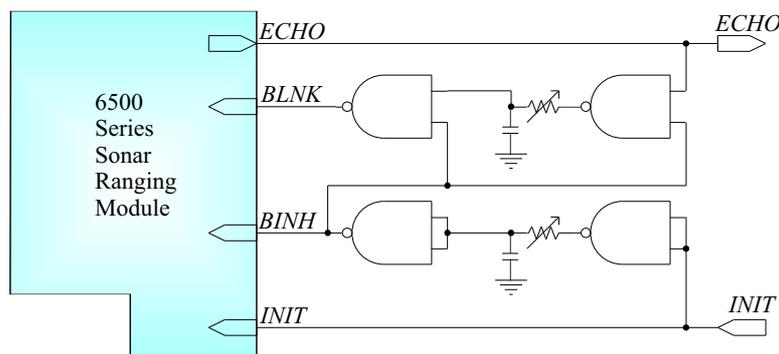


Figura 6.1: Esquemático do circuito adicional ao módulo 6500 da Polaroid.

e, tendo em conta a duração dos 16 pulsos e mais alguns atrasos de *hardware*, não pode ser inferior a 0.44 ms . Estas restrições fazem com que este sistema no modo *ecos-múltiplos* fique limitado a detectar objectos separados, no mínimo, por aproximadamente 7.5 cm .

É importante referir também que o módulo controlador possui um potenciómetro, designado por VR1 (Figuras 2.7 e 2.8), que permite ajustar o ganho do amplificador de entrada. Como o limiar de comparação do sinal na recepção é fixo e de 1.2 V , este ajuste permite alterar o nível de detecção, variando o ganho na entrada. A sua posição por defeito (Figura 2.7) garante um ganho aceitável para a generalidade das aplicações. É também com este ganho que se vai caracterizar experimentalmente o sensor.

6.2 Sistema de aquisição de dados

Para este estudo experimental, foi utilizado um robô móvel da Robosoft [ROBOSOFT, 1992b], rectangular e equipado com um anel de 24 sensores ultra-sónicos da Polaroid. Estes sensores estão integrados numa rede ultra-sónica local (LAUN¹) [ROBOSOFT, 1992a], sendo controlados individualmente ou por grupos. Um dos sensores foi retirado do robô e colocado num sistema de posicionamento Newport, representado na Figura 6.3. Este sistema permite, posicionar o sensor ao longo de um eixo perpendicular à superfície de reflexão (r), com uma resolução de 0.1 mm , e também orientá-lo em qualquer direcção (θ) com uma resolução angular de 0.001° . O sistema de posicionamento é controlado directamente por um PC, enquanto o sis-

¹Local Area Ultrasonic Network.

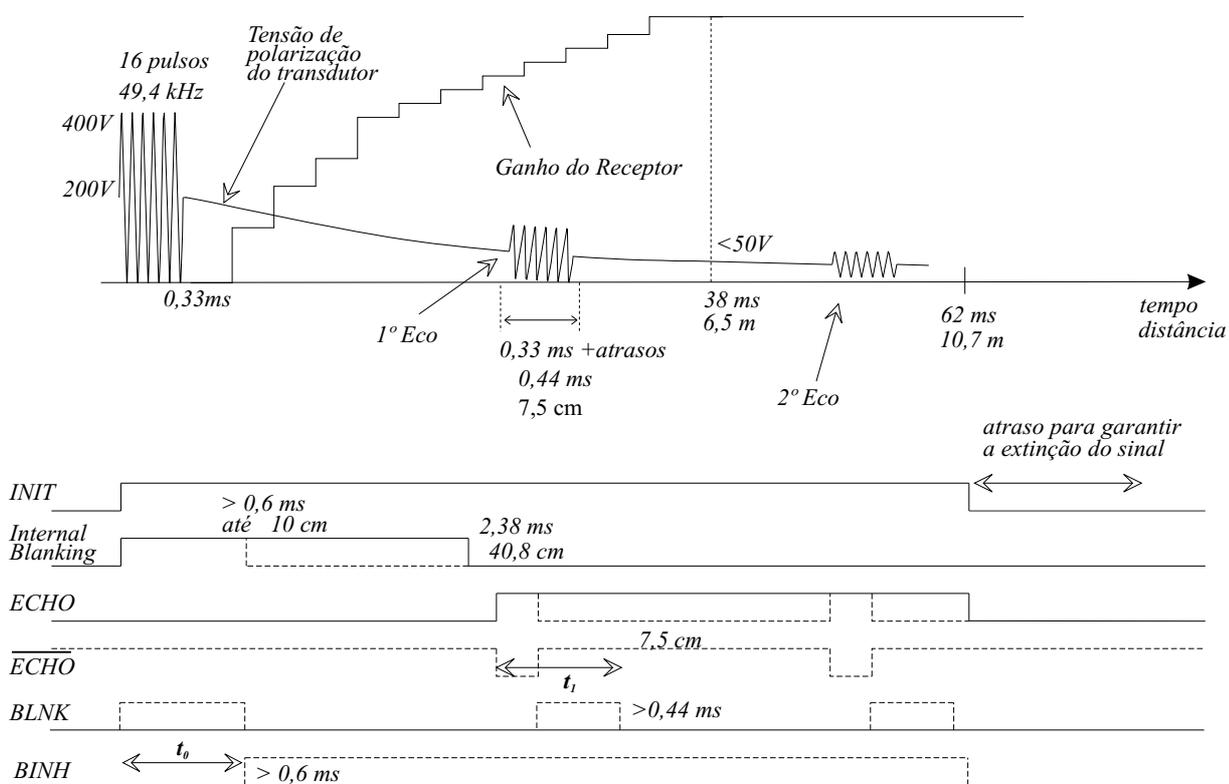


Figura 6.2: Exemplo de um ciclo de leitura no modo *eco-simples* (traço contínuo) e no modo *ecos-múltiplos* (tracejado).

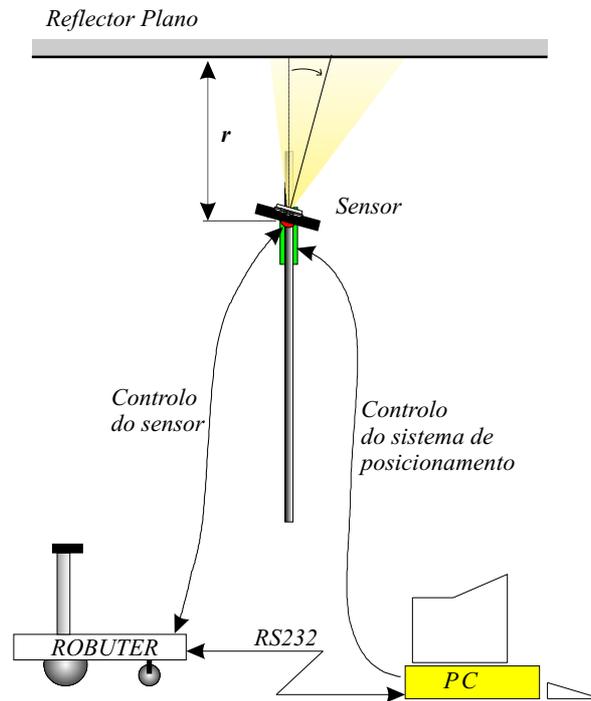


Figura 6.3: Sistema de posicionamento para aquisição de dados.

tema de medida é controlado pelo Robuter que, por sua vez, envia toda a informação ao PC via RS232. Os dados recebidos são posteriormente processados e armazenados no PC. O sistema é totalmente automatizado e garante toda a repetibilidade e reprodutibilidade necessárias para a validade do método experimental. O sensor está colocado a uma distância de 1.3 m do solo, de modo a evitar reflexões produzidas por este, e é disparado sobre uma superfície reflectora especular, vertical e plana, com as dimensões de 5×1 metros.

6.3 Resultados experimentais

6.3.1 Definições

Sendo r a distância real (em metros) do sensor ao plano e θ a orientação (em graus) do sensor com a perpendicular ao plano, o par (r, θ) define uma posição do sensor, no sistema de domínio $\mathfrak{R} \times \mathfrak{S}$, com $r \in \mathfrak{R}$ sendo $\mathfrak{R} = \{0.12; 0.3; 0.5; 1; 1.5; 2; 2.5; 3; 3.5; 4; 4.5; 5; 5.5; 6\}$, e $\theta \in \mathfrak{S}$, sendo $\mathfrak{S} = \{-40^\circ; -39^\circ \dots + 39^\circ; +40^\circ\}$. Em cada posição (r, θ) , foram feitas 100

leituras estatisticamente independentes no tempo e no espaço. O tamanho da amostra é grande e as leituras foram feitas em intervalos de tempo suficientemente largos para garantir que não houvesse interferências entre leituras consecutivas. Representa-se por $x_i(r, \theta)$ cada medida feita na posição (r, θ) , com $i = 1..100$. Para cada conjunto de medidas, o *valor médio* e o *desvio padrão* são definidos, respectivamente, por

$$\overline{x(r, \theta)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(r, \theta) \quad (6.1)$$

$$\sigma(r, \theta) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(x_i(r, \theta) - \overline{x(r, \theta)} \right)^2} \quad (6.2)$$

A temperatura ambiente registada no local onde foram feitos os testes foi de $22^\circ C$ durante toda a experiência. Assim, de acordo com a equação 2.1, a velocidade do som era de $c = 345.2 \text{ m/s}$.

Quanto ao tipo de informação fornecida pelo Robuter, este devolve o número de ciclos do tempo de voo da onda ultra-sonora, com base num contador interno de 820 kHz ($T = \frac{1}{820 \text{ kHz}} \simeq 1.2 \mu s$). O tempo de voo t pode ser calculado pela seguinte equação

$$t = \frac{n^\circ \cdot \text{ciclos}}{820 \text{ kHz}} \text{ (s)} \quad (6.3)$$

e a resolução do sistema, que depende da frequência do contador, é de aproximadamente 0.2 mm .

Todos os dados adquiridos foram processados, recorrendo ao uso do *software* MATLAB.

6.3.2 Repetibilidade das Medidas

Nas Figuras 6.4 a 6.6, estão representados os resultados obtidos para as distâncias de 0.12, 2 e 5 metros, respectivamente. Na Figura 6.7, podem visualizar-se, em formato 3D, os resultados da experiência para todas as distâncias, assim como os respectivos desvio padrão.

Depois deste primeiro passo, foi feita uma análise pormenorizada de todos os dados obtidos, numa tentativa de retirar dessa informação algumas conclusões importantes. Analisou-se a repetibilidade das medidas para cada posição θ , determinando o desvio padrão máximo, para todo o $r \in \mathfrak{R}$ e também para $r \leq 3$, ou seja, primeiro para todos os dados obtidos entre 0.12 m e

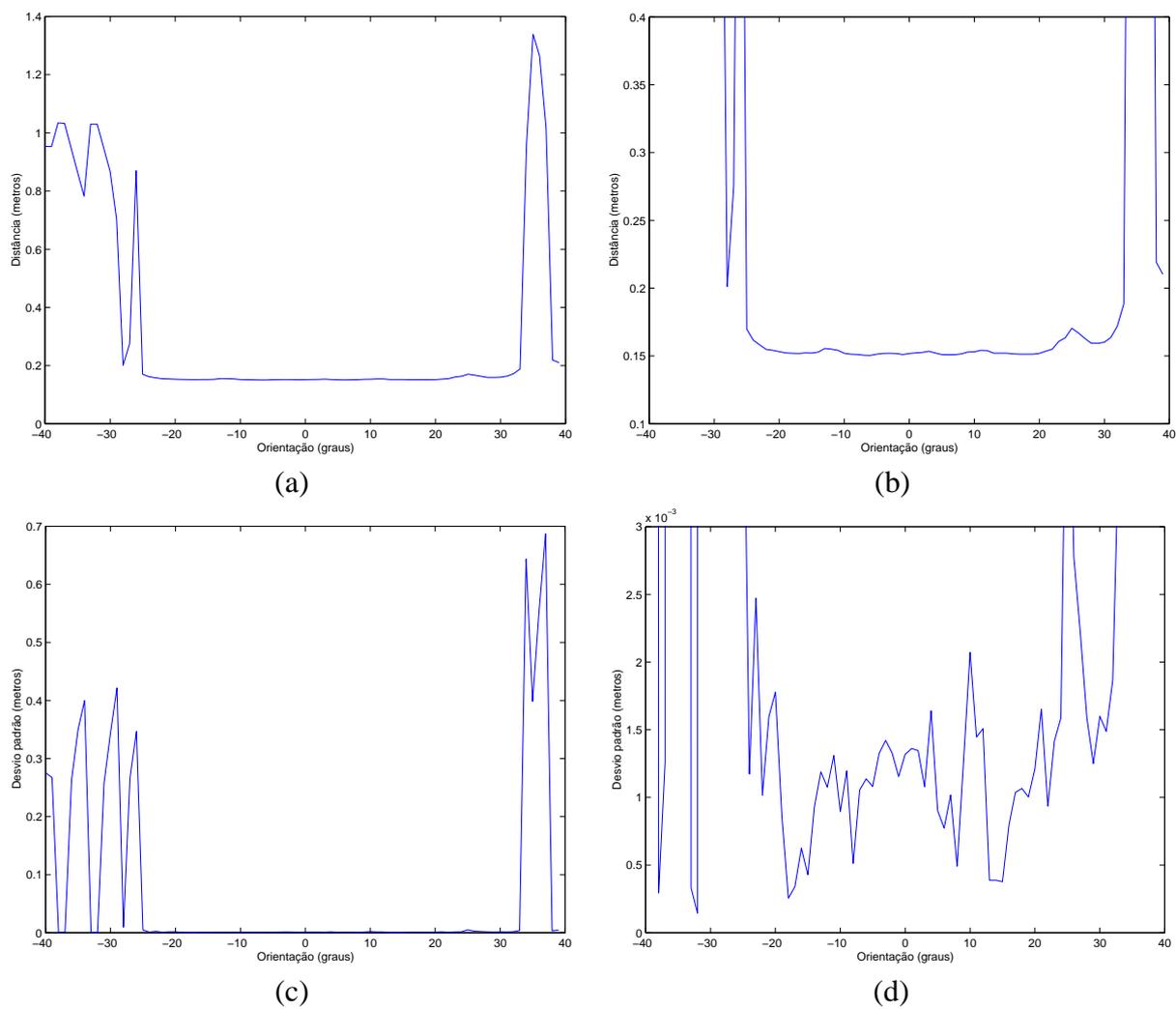


Figura 6.4: Resultados para $r = 0.12 \text{ m}$. (a) Valores médios, $\overline{x(0.12, \theta)}$. (b) Perspectiva ampliada. (c) Desvio padrão, $\sigma(0.12, \theta)$. (d) Perspectiva ampliada.

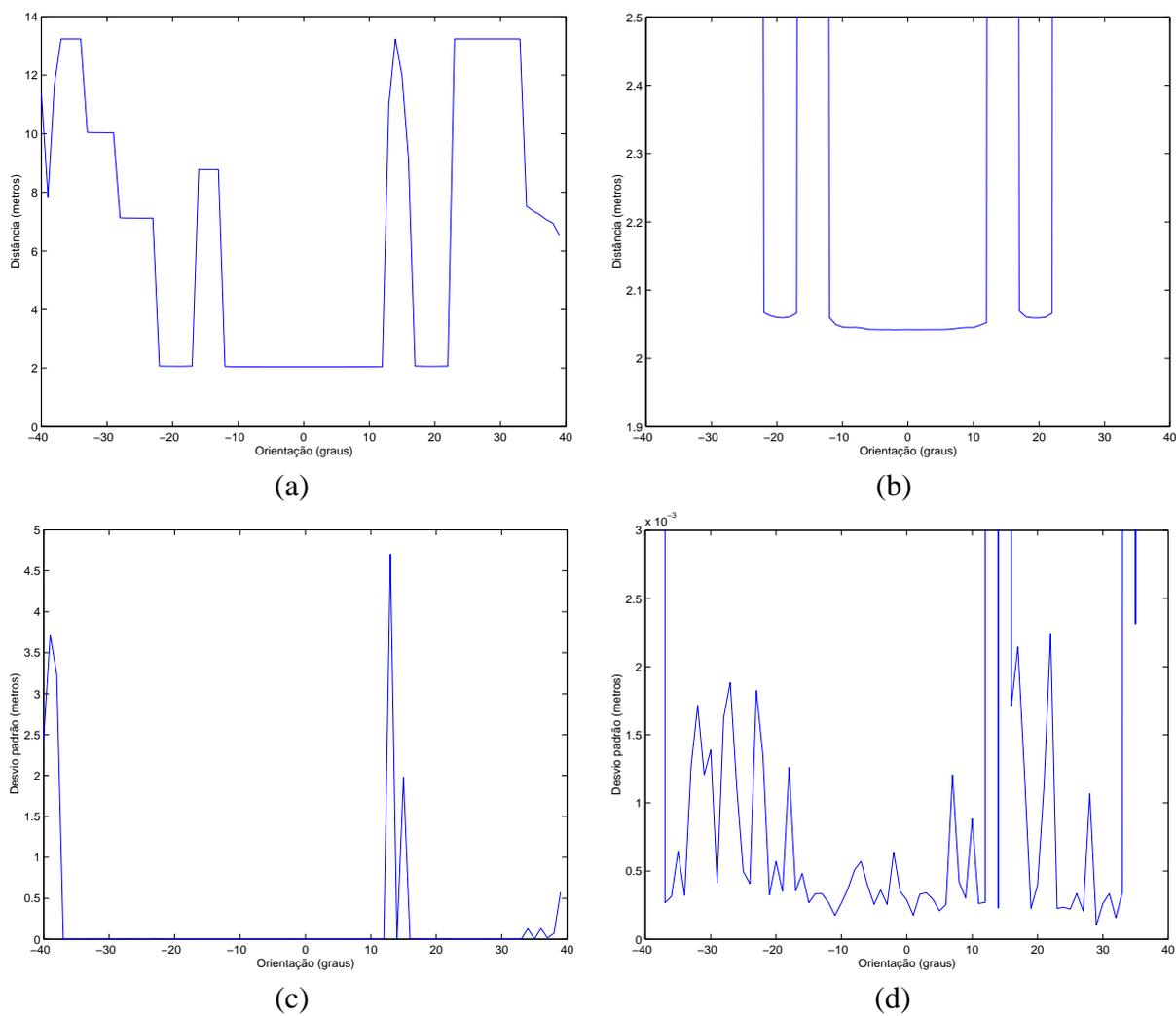


Figura 6.5: Resultados para $r = 2 \text{ m}$. (a) Valores médios, $\overline{x(2, \theta)}$. (b) Perspectiva ampliada. (c) Desvio padrão, $\sigma(2, \theta)$. (d) Perspectiva ampliada.

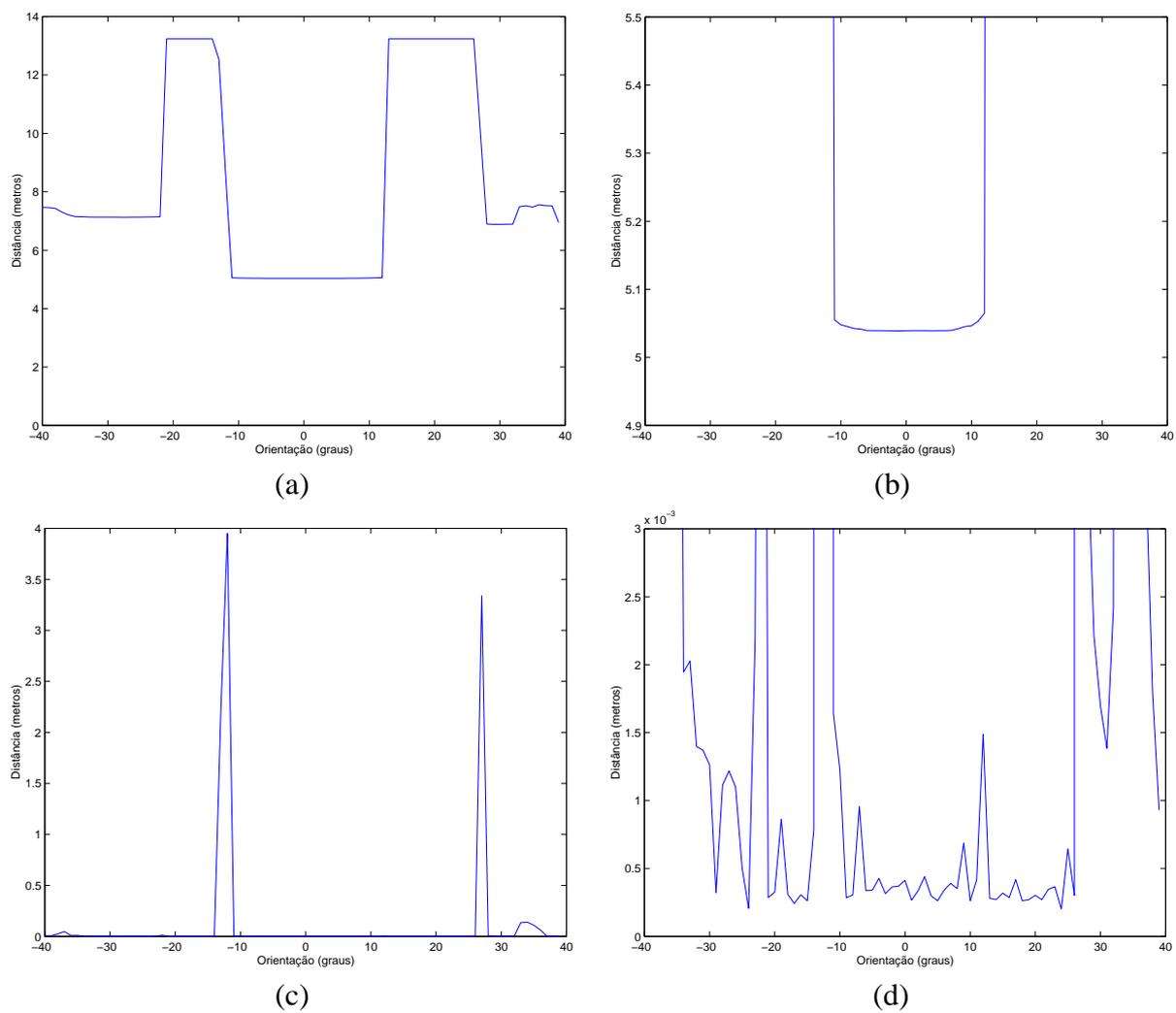


Figura 6.6: Resultados para $r = 5 \text{ m}$. (a) Valores médios, $\overline{x(5, \theta)}$. (b) Perspectiva ampliada. (c) Desvio padrão, $\sigma(5, \theta)$. (d) Perspectiva ampliada.

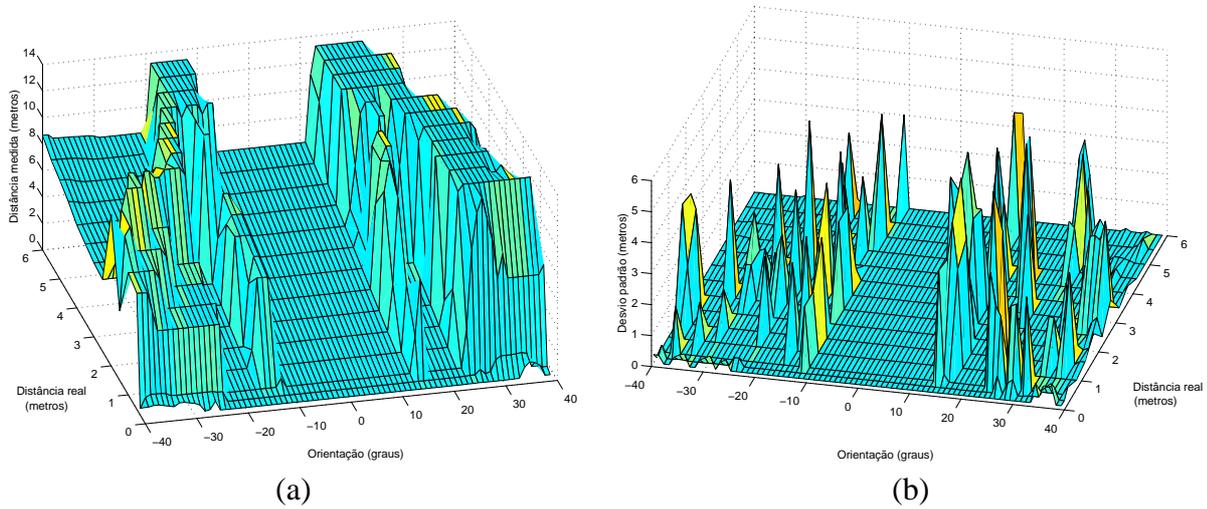


Figura 6.7: Vista 3D de todos os resultados. (a) Médias. (b) Desvios padrão.

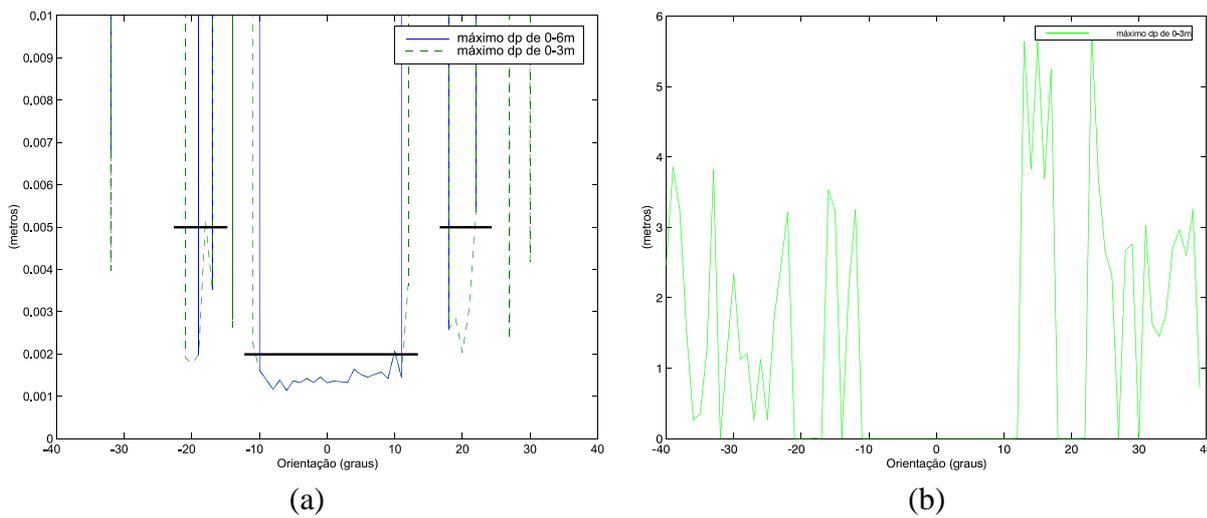


Figura 6.8: Máximo desvio padrão. (a) Perspectiva ampliada de $\sigma_{max}(\theta)$ e $\sigma_{max0-3}(\theta)$. (b) Apenas $\sigma_{max0-3}(\theta)$.

6 m e depois, apenas para os dados obtidos até 3 metros. Definiu-se, portanto, o máximo desvio padrão, segundo θ , pelas equações

$$\sigma_{max}(\theta) = \max\{\sigma(r, \theta)\}_{\forall r \in \mathbb{R}} \quad (6.4)$$

$$\sigma_{max0-3}(\theta) = \max\{\sigma(r, \theta)\}_{\forall r \leq 3} \quad (6.5)$$

Os resultados obtidos, em vista ampliada, estão representados na Figura 6.8-a. Como se pode concluir pela sua observação, existe um “corredor central” onde o desvio padrão $\sigma_{max}(\theta)$ é sempre menor que 2 mm, semelhante aos intervalos RCD² caracterizados por John J. Leonard e Durrant-Whyte [Leonard and Durrant-Whyte, 1992]. Da análise da mesma Figura, para o desvio padrão máximo dentro da gama de 0 a 3 metros, observam-se também medições com um desvio padrão inferior a 5 mm em dois “corredores laterais” centrados em $\pm 20^\circ$.

Estes valores de desvio padrão não foram escolhidos ao acaso. Partindo da Figura 6.8-b, onde estão representados os desvios padrão máximos apenas de 0 a 3 metros, torna-se evidente que, fora destes intervalos, existe um aumento abrupto do desvio padrão, indicando, claramente, que não existe repetibilidade entre leituras consecutivas, logo esses valores não podem ser considerados válidos. À semelhança das RCDs, caracterizadas por conjuntos de medidas com amplitude menor do que 1 cm, aqui consideram-se apenas os conjuntos de medidas com um desvio padrão inferior a 5 mm, obtendo-se o conjunto de dados representados na Figura 6.9. Esta Figura apresenta uma vista 3D de todos esses dados e uma representação polar da energia irradiada pelo sensor. Assim sendo, facilmente se associam as áreas de detecção laterais às reflexões especulares relacionadas com os lóbulos secundários.

6.3.3 Erro sistemático do sensor

A análise feita atrás está relacionada com a repetibilidade das medidas, ou seja, com as variações aleatórias em torno de uma determinada posição. Os resultados obtidos foram de 2 mm no corredor central e de 5 mm nos dois corredores laterais, já mencionados. Considerando o erro sistemático, isto é, a diferença entre os valores reais e os valores médios medidos,

²Regiões de Profundidade Constante.

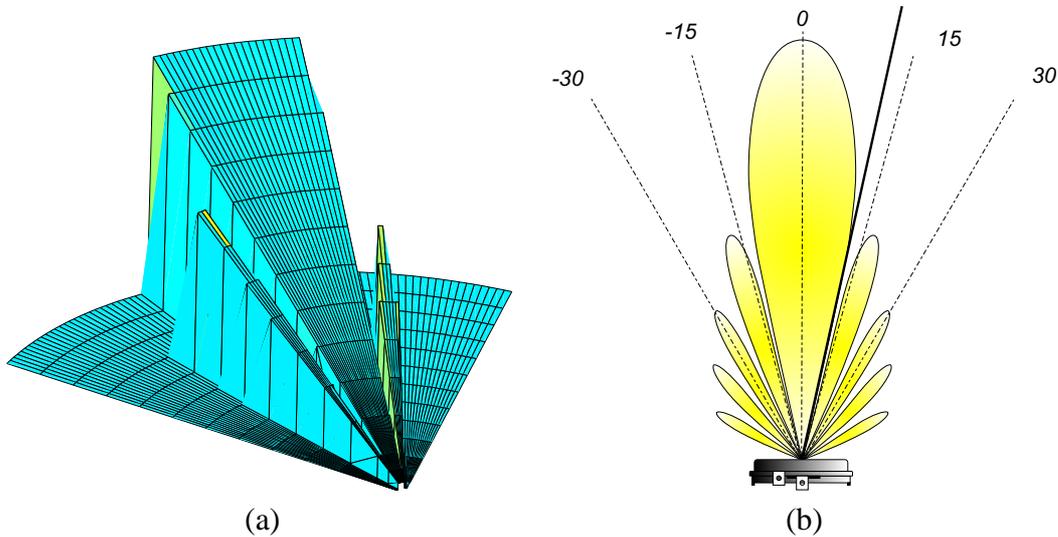


Figura 6.9: (a) Vista 3D dos dados adquiridos com uma repetibilidade igual ou inferior a 5 mm. O padrão destes resultados facilmente se assemelha ao padrão do espectro de irradiação do transdutor. (b) Forma polar da energia irradiada. A energia irradiada pelos lóbulos laterais permite a detecção de reflectores que se encontram com orientações maiores do que 15°, aumentando a incerteza angular para curtas distâncias.

é possível calcular estas diferenças para cada posição. Neste seguimento, define-se o erro sistemático médio e o desvio padrão segundo θ a partir das seguintes equações

$$e_s(\theta) = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} (\overline{x(r_i, \theta)} - r_i) \quad (6.6)$$

$$\sigma_s(\theta) = \sqrt{\frac{1}{14-1} \sum_{i=1}^{14} (e_s(\theta) - (x(r_i, \theta) - r_i))^2} \quad (6.7)$$

O gráfico de barras de erros da Figura 6.10 apresenta os erros sistemáticos médios segundo θ juntamente com o seu desvio padrão $\sigma_s(\theta)$. Idealmente, seria de esperar um erro constante para qualquer orientação do sensor, porém, como se pode verificar, à medida que o sensor se afasta da perpendicular, a distância medida aumenta, seguindo, inversamente, a geometria da radiação emitida. A potência emitida é maior na posição zero, mas diminui com o aumento da inclinação. Para o receptor, um sinal mais fraco resulta num tempo de amostragem maior, visto este ter de atingir um limiar para ser detectado. Por isso, para sinais mais fracos, é introduzido,

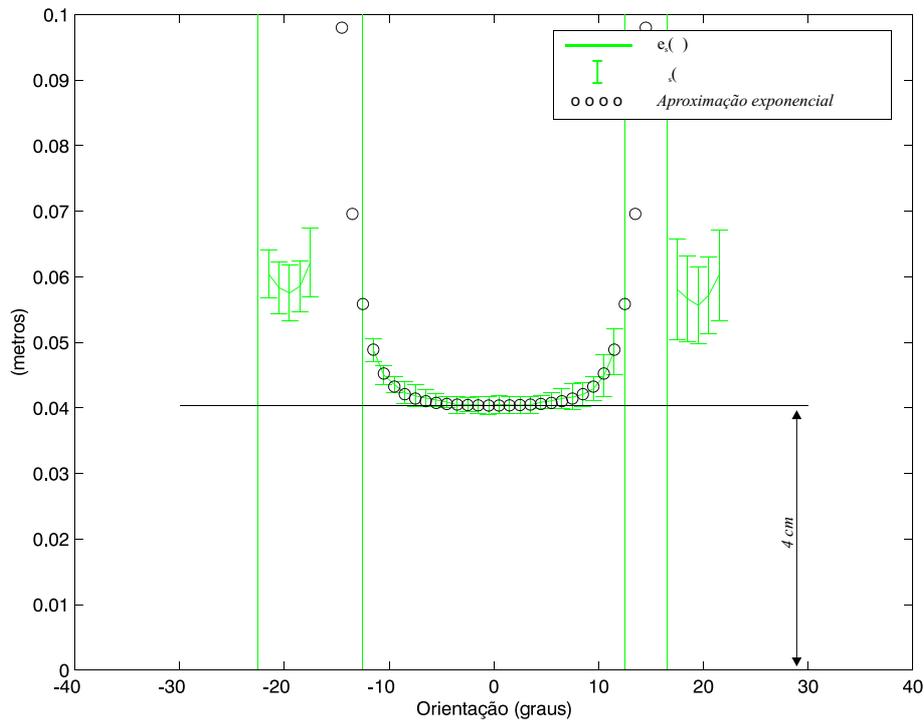


Figura 6.10: Barras de erros da exactidão média, segundo θ . As barras verticais representam a repetibilidade dada pela Equação 6.7

para além do atraso na transmissão referido mais adiante, um outro atraso no tempo de voo que varia contrariamente com a intensidade do sinal emitido, resultando em distâncias sobre-dimensionadas, que aumentam com a orientação do sensor relativamente ao alvo.

Esta dependência com a orientação está, sem dúvida, relacionada com a intensidade do sinal irradiado que diminui com a orientação, de acordo com a equação de amplitude, já anteriormente sugerida por Kuc, no seu modelo descrito no capítulo 3.2.

$$A(\theta) = A_{max} \exp \frac{-4\theta^2}{\theta_0^2} \quad (6.8)$$

Considera-se $\theta_0 = 12.9^\circ$ – a abertura do lóbulos principal do cone de emissão, calculada através da equação 2.3 que deriva do modelo físico do sensor – e $A_{max} = 2700$ – a amplitude máxima, quando $\theta = 0^\circ$ e determinada experimentalmente –. A equação

$$E_s(\theta) = \frac{1}{A(\theta)} + 0.04 = \frac{1}{2700 \exp \frac{-4\theta^2}{12.9^2}} + 0.04 \quad (metros) \quad (6.9)$$

determinado experimentalmente e representada na Figura 6.10 por pequenas circunferências, dá

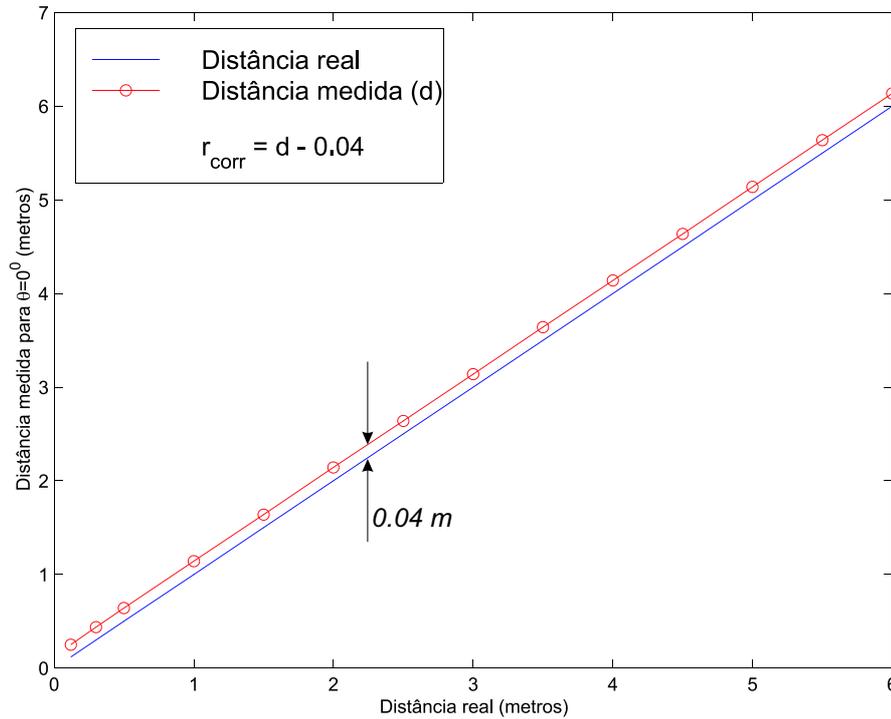


Figura 6.11: Resposta do sensor na perpendicular ao reflector, $\theta = 0^\circ$.

uma estimativa do erro sistemático do sensor. Pode observar-se uma elevada correspondência entre este modelo e os valores reais $e_s(\theta)$.

Considerando a estimativa do erro sistemático $E_s(\theta)$, dada pela equação anterior, dentro do cone principal de emissão, obtém-se uma função de correcção para os valores d , medidos pelo sensor

$$r_{corr}(\theta) = d - \frac{1}{2700 \exp \frac{-4\theta^2}{12.9^2}} - 0.04 \quad (\text{metros}) \quad (6.10)$$

Esta correcção só poderá ser aplicada se for conhecido o valor da orientação θ . Utilizando os vários sistemas de detecção e identificação de reflectores descritos anteriormente, ou o sistema desenvolvido nesta tese, é possível estimar o valor de θ e, consecutivamente, corrigir os erros dependentes da orientação. Caso contrário, pode considerar-se apenas o erro sistemático quando $\theta = 0^\circ$. Da equação 6.10, vem:

$$r_{corr}(0^\circ) = d - 0.04 \quad (\text{metros}) \quad (6.11)$$

Na Figura 6.11, podem visualizar-se os valores obtidos para uma orientação perpendicular à

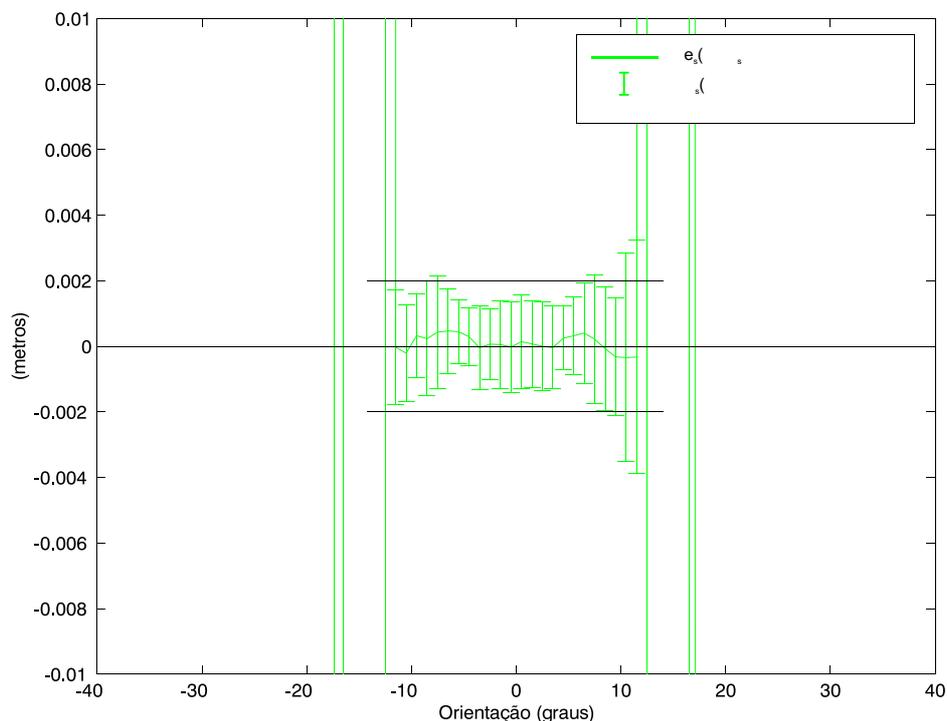


Figura 6.12: Medidas corrigidas pela equação 6.10.

superfície reflectora e verificar-se que o erro sistemático se mantém constante com a distância r . O erro sistemático, ou desvio dos valores reais, da ordem dos 4 cm , poderá estar relacionado com pequenos atrasos internos que se somam invariavelmente ao TOF medido pelo sensor. Na transmissão, o sinal demora 7 ciclos para atingir o seu máximo de 400 V (ver Tabela 2.2). Este pequeno atraso de $142\ \mu\text{S}$ introduz um erro de aproximadamente 25 mm . Adiciona-se também um erro de aproximadamente 5 mm ao considerar-se como origem do sensor o invólucro exterior, quando, na realidade, a membrana do transdutor se encontra por detrás desse invólucro. Estes dois erros, aliados a alguns pequenos atrasos internos, poderão justificar perfeitamente o erro sistemático encontrado experimentalmente.

Depois de aplicada a função de correcção a todas as medidas, obtém-se o novo gráfico de erros, representado na Figura 6.12. Como se pode verificar, os valores corrigidos aproximam-se de zero, demonstrando, assim, a conformidade da função proposta.

6.3.4 Incerteza na orientação

Resta, por último, fazer uma análise da incerteza na orientação. Como foi referido no início deste capítulo, muitos autores consideram que o eco recebido provém de reflectores que se encontram na linha do eixo de emissão ou apenas de um arco limitado pelo lóbulo principal de emissão correspondente ao “corredor central”. Todavia, a realidade é bem diferente. Como já foi verificado anteriormente pelas Figuras 6.9, existem intervalos de recepção mais amplos e que estão relacionados com os sinais emitidos pelos primeiros lóbulos laterais, que têm ainda em algumas circunstâncias, energia suficiente para activar o receptor do sensor.

De modo a maximizar estes intervalos de incerteza, eliminaram-se todas as medidas com repetibilidade inferior a 5 *mm*, que é a repetibilidade das medidas nos lóbulos laterais. Os restantes valores determinam os limites máximos de percepção do sensor, representados na Figura 6.13. Esta figura apresenta ainda um modelo simplificado, capaz de maximizar as incertezas de orientação.

Considerando todo o cone de percepção do sensor, incluindo os lóbulos laterais, a incerteza na orientação é definida por

$$\begin{cases} [-22^{\circ}; +22^{\circ}] & \forall \text{ distâncias} \leq 3.5 \text{ metros} \\ [-13^{\circ}; +13^{\circ}] & \forall \text{ distâncias} > 3.5 \text{ metros} \end{cases} \quad (6.12)$$

Tendo em conta apenas a recepção no lóbulo principal, a incerteza na orientação é definida por

$$[-13^{\circ}, +13^{\circ}] \quad \forall \text{ distâncias} \quad (6.13)$$

6.4 Conclusões

Neste capítulo, foi feito um estudo experimental bastante exaustivo do sensor da Polaroid, com o objectivo de construir um modelo simples que completasse algumas lacunas deixadas por outros modelos existentes. A geometria do modelo teórico (Figura 6.9-b) permite antecipar alguma complexidade na resposta experimental do sensor. Sempre que um eco é detectado não

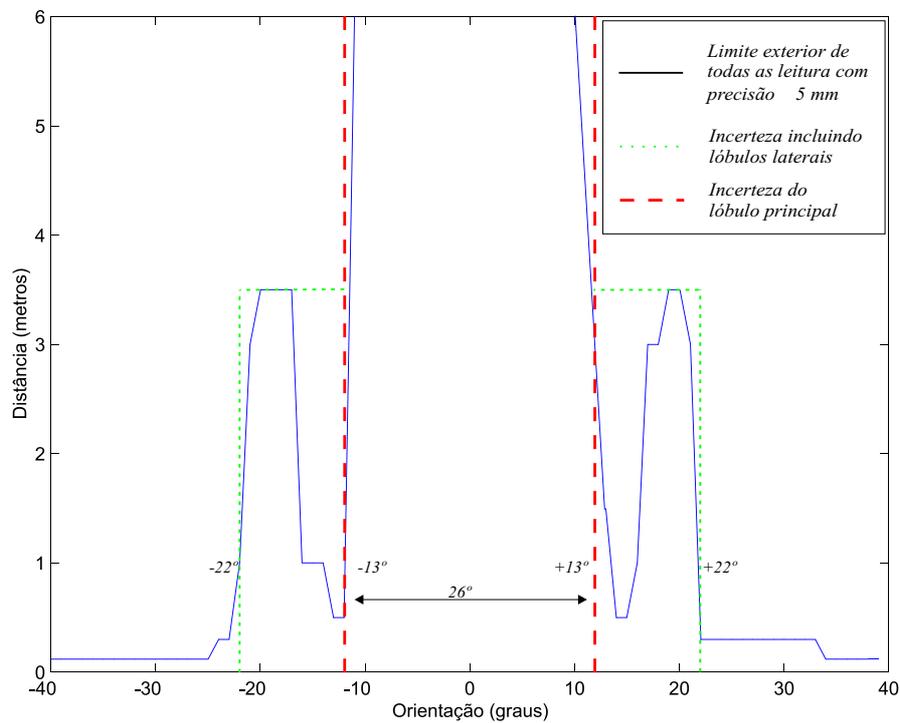


Figura 6.13: Modelo da incerteza na orientação. Se também forem considerados os lóbulos secundários, a incerteza na orientação pode ser maximizada por 44° , aproximadamente, até 3.5 metros, e 26° para distâncias maiores. Considerando apenas o lóbulo principal, pode ser maximizada por 26° .

se pode, com uma simples leitura, identificar a sua origem. Pode ter sido reflectido por um objecto, algures num arco de 44° de amplitude, como demonstram os resultados experimentais obtidos. Esta incerteza é considerada a principal fonte de erros do sensor de ultra-sons, mas é fundamental para a implementação do nosso sistema de detecção, desenvolvido no capítulo seguinte.

Quanto à repetibilidade das medidas – $\sigma(\theta)$ –, este sensor apresenta valores muito satisfatórios, sendo igual a 2 mm no corredor central e 5 mm nos dois corredores laterais.

Relativamente aos erros de distância, estes podem ser da ordem dos centímetros, o que, para a generalidade das aplicações na área da robótica móvel, não é muito significativo. Verificou-se que o erro sistemático do sensor – e_s –, não é constante com a orientação e que pode ser aproximado pela Equação 6.10.

Em resumo, propõe-se um modelo para o sensor electrostático da Polaroid, caracterizado pelas Equações 6.14 e representado nas Figuras 6.13 e 6.14.

$$\begin{aligned}
 \text{Erro Sistemático ou Exactidão: } E_s(\theta) &= \frac{1}{2700 \exp \frac{-4\theta^2}{12.9^2}} + 0.04 \quad (\text{metros}) \\
 & \text{(só no corredor central)} \\
 \text{Erro Aleatório ou Repetibilidade: } \sigma_r &= \begin{cases} 2\text{ mm} & \text{corredor central} \\ 5\text{ mm} & \text{corredores laterais} \end{cases} \\
 \text{Incerteza na Orientação: } \sigma_\theta &= \begin{cases} 44^\circ & \forall r \leq 3.5\text{ m} \\ 26^\circ & \forall r > 3.5\text{ m} \end{cases} \\
 & \text{(incluindo lóbulos laterais)} \\
 \text{Incerteza na Orientação: } \sigma_\theta &= 26^\circ \quad \forall r \\
 & \text{(só lóbulo principal)}
 \end{aligned} \tag{6.14}$$

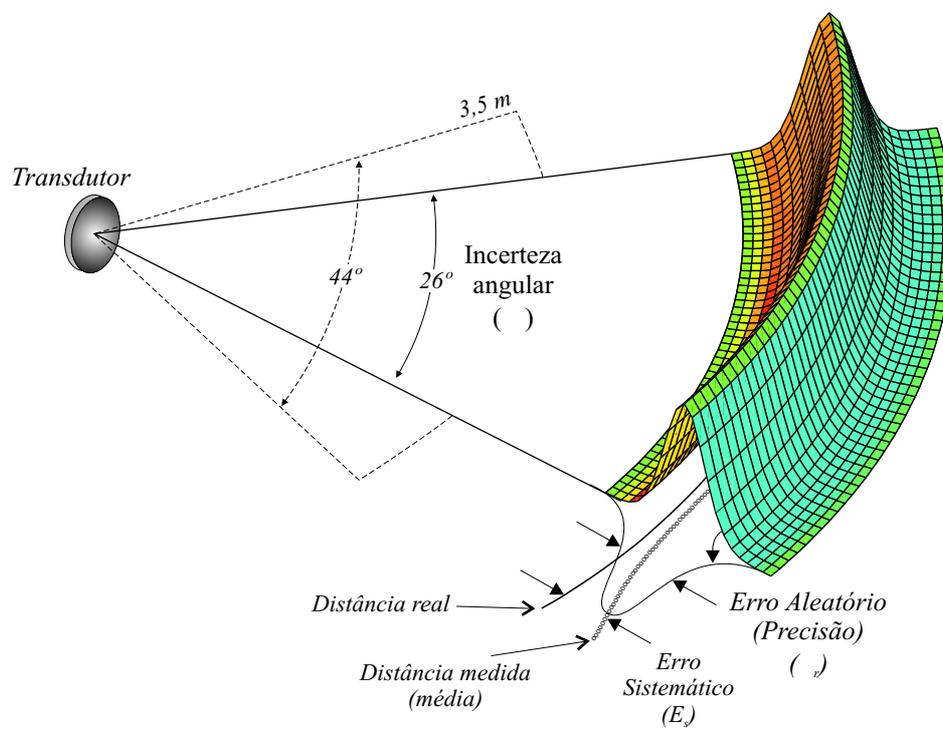


Figura 6.14: Modelo proposto para o sensor electrostático da Polaroid.

Capítulo 7

O Novo Sistema ME-EERUF

Para conseguirem detectar e identificar reflectores, os sistemas de sensores, apresentados na secção 4.2, utilizam dois, três, quatro e mais sensores agrupados, rodam os sensores, monitorizam a amplitude e a frequência do sinal recebido, efectuam vários ciclos de medições e fazem leituras sequenciais. Embora estes sistemas sejam eficazes, tornam-se, em algumas circunstâncias, pouco eficientes, complexos e volumosos. Não é prático apetrechar um robô com complexas configurações ou agrupamentos de sensores que, por sua vez, necessitam também de muitos recursos de *hardware* e complicadas técnicas de processamento. A maioria dos robôs comerciais existentes – rectangulares e circulares – já vem equipados com sensores de ultra-sons preparados para funcionar isoladamente. Por exemplo, a plataforma Robuter é uma plataforma rectangular com 24 sensores, alguns distribuídos colinearmente nas laterais e outros de forma circular nos cantos; outro exemplo é a plataforma NOMAD, uma plataforma circular com 16 sensores uniformemente distribuídos; também algumas cadeiras de rodas vêm equipadas com vários sensores de ultra-sons, distribuídos de forma mista.

O sistema bi-aural, proposto nesta tese, com uma configuração muito simples, pode facilmente ser implementado numa destas plataformas. O método inovador de controlo dos sensores, que permite taxas de aquisição muito elevadas, permitirá ao sistema portador reagir mais eficientemente ao dinamismo do meio envolvente, enquanto a capacidade de detectar e identificar reflectores lhe dá a possibilidade de se situar e localizar num ambiente conhecido.

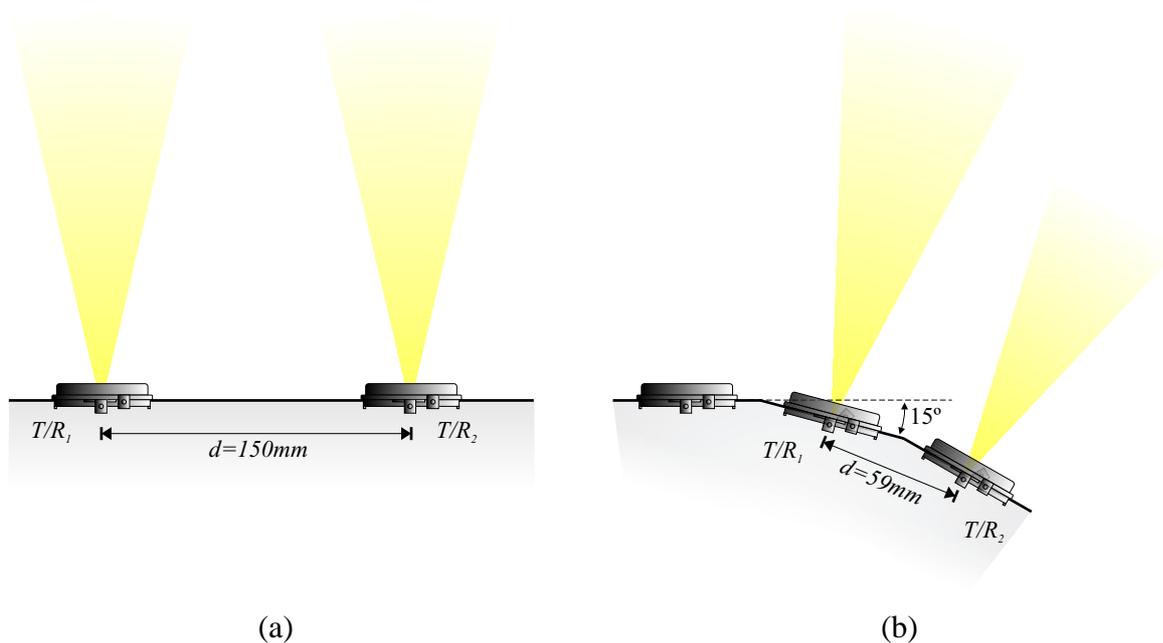


Figura 7.1: (a) Sistema com par de sensores colineares. (b) Sistema com par de sensores não-colineares.

7.1 Configuração dos sensores

Configurações análogas às sugeridas na Figura 7.1 podem ser facilmente encontradas em plataformas correntes. A primeira pode ser formada por quaisquer dois sensores adjacentes e colineares, separados por uma distância d , e a segunda configuração pode ser formada por dois sensores adjacentes não-colineares, como por exemplo os de uma plataforma circular.

Foram efectuadas experiências com as duas configurações, tal como ilustradas na Figura 7.1; o par colinear, com os sensores afastados por uma distância de 150 mm , e o par não-colinear, com os sensores desfasados de 15° e com um afastamento entre o centro dos dois sensores de 59 mm . Os dois sensores Polaroid da série 600 funcionam sempre como T/R¹ e é utilizada apenas a informação dos TOFs. Os dois sensores são disparados, quase em simultâneo, no modo ecos-múltiplos e usando a nova técnica ME-EERUF descrita nas secções seguintes. Com um disparo por cada sensor, obtém-se informação suficiente para se detectar e identificar os três tipos básicos de reflectores: plano, aresta e canto. Porém, o novo método ME-EERUF permite

¹Transmissor/Receptor.

fazer dois ciclos de leituras, de forma a poder utilizar um algoritmo de eliminação de *crosstalk*, que, por sua vez, possibilita um ciclo de disparo muito mais pequeno e, conseqüentemente, uma mais rápida taxa de aquisição de dados.

7.2 Geometria dos reflectores

O comprimento de onda do sensor da Polaroid é inúmeras vezes maior do que os padrões de rugosidade das superfícies envolventes. Por isso, pode assumir-se que as superfícies são suficientemente lisas para reflectirem especularmente os ultra-sons, tal como um espelho reflecte a luz. Esta suposição permite utilizar o conceito de imagem virtual para caracterizar, geometricamente, as reflexões do sistema nos diversos reflectores. Os reflectores a ter em linha de conta, neste trabalho, são os básicos: plano, aresta e canto, descritos na secção 4.1, que podem ser geometricamente caracterizados, utilizando apenas a informação dos TOFs relativos às distâncias R_0 , R_1 e R_2 , dadas pela equação

$$R_i = \frac{c \cdot TOF_i}{2}, \quad i = 0, 1, 2; \quad (7.1)$$

Sendo c a velocidade do som no ar, R_0 e R_1 correspondem às distâncias medidas pelos sensores T/R_0 e T/R_1 , respectivamente, enquanto R_2 corresponde a metade da distância inter-sensorial resultante de um eco enviado por T_1 e recebido em R_0 ou enviado por T_0 e recebido por R_1 .

A orientação dos sensores não tem influência na geometria da reflexão, afecta apenas o campo de visão, como se pode concluir dos resultados experimentais apresentados na secção 7.4. Os dois sistemas anteriormente apresentados podem ser simplesmente considerados como dois T/R pontuais, afastados por uma distância d .

7.2.1 Geometria do plano

De acordo com a geometria da reflexão no plano, a orientação α_P entre a perpendicular ao plano reflector e a linha que une os dois sensores pode ser facilmente deduzida. Da Figura 7.2, conclui-se que

$$\sin \beta = \frac{R_1 - R_0}{d} \quad (7.2)$$

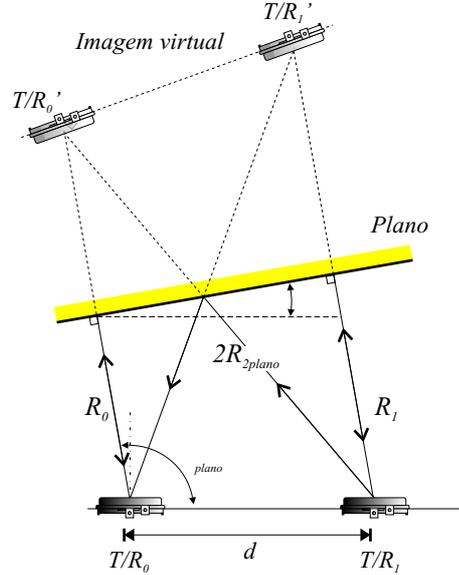


Figura 7.2: Imagem virtual do sistema, quando reflectido num plano.

e, como $\alpha_{plano} = 90 + \beta$, vem:

$$\cos \alpha_{plano} = -\sin \beta \quad (7.3)$$

Logo, das equações 7.2 e 7.3 resulta que:

$$\alpha_{plano} = \cos^{-1} \frac{R_0 - R_1}{d} \quad (7.4)$$

Fazendo uso da imagem virtual e de uma simples regra de co-senos, surge para R_2

$$(2R_2)^2 = (2R_0)^2 + d^2 - 2(2R_0)d \cos \alpha_{plano} \quad (7.5)$$

Substituindo $\cos \alpha_{plano}$, vem

$$(2R_2)^2 = (2R_0)^2 + d^2 - 2(2R_0)d \frac{R_0 - R_1}{d} \quad (7.6)$$

Da equação 7.6 obtém-se R_{2plano} , metade da distância inter-sensorial – $2R_{2plano}$ – medida pelo sistema num reflector plano.

$$R_{2plano} = \sqrt{R_0 R_1 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (7.7)$$

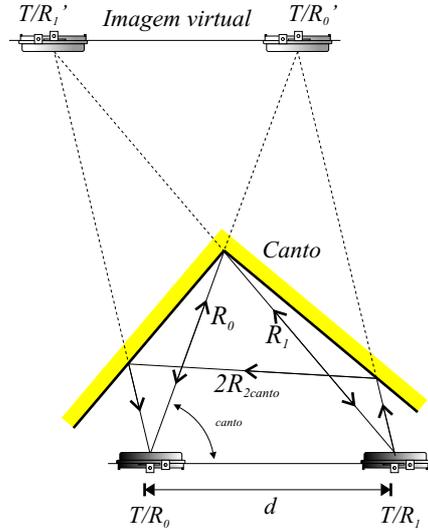


Figura 7.3: Imagem virtual do sistema, quando reflectido num canto.

7.2.2 Geometria do canto

Pela geometria da reflexão no canto, representada na Figura 7.3, e fazendo uso de uma simples regra de co-senos,

$$R_1^2 = R_0^2 + d^2 - 2R_0d \cos \alpha_{canto} \quad (7.8)$$

resulta que a orientação α_{canto} , entre o ponto de intersecção dos dois planos do canto e a linha que une os dois sensores, é dada por

$$\alpha_{canto} = \cos^{-1} \left(\frac{R_0^2 - R_1^2 + d^2}{2dR_0} \right) \quad (7.9)$$

Mais uma vez, fazendo uso da imagem virtual e de uma simples regra de co-senos, obtém-se a expressão

$$(2R_2)^2 = (2R_0)^2 + d^2 - 2(2R_0)d \cos \alpha_{canto} \quad (7.10)$$

na qual, substituindo 7.9 e simplificando, se obtém R_{2canto} metade da distância inter-sensorial medida pelo sistema num canto.

$$R_{2canto} = \sqrt{\frac{R_0^2}{2} + \frac{R_1^2}{2} - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (7.11)$$

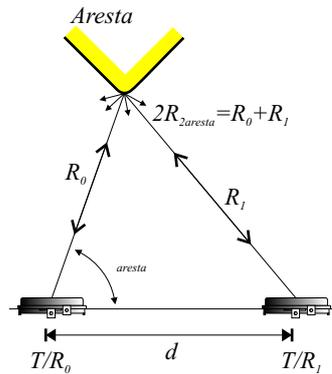


Figura 7.4: Geometria de reflexão na aresta.

7.2.3 Geometria da aresta

Uma aresta direccionada para o transdutor corre o risco de não ser detectada se o seu raio de curvatura for muito inferior ao comprimento de onda do ultra-som. Porém, quando é detectada, a sua elevada curvatura faz com que o feixe de ultra-sons seja reflectido em todas as direcções (difracção), devolvendo, ao sensor, amplitudes muito pequenas e, por vezes, difíceis de detectar. Este tipo de reflexão torna a geometria da aresta independente da sua posição e impossibilita a utilização dos reflectores virtuais anteriormente considerados. A Figura 7.4 representa a geometria de reflexão de uma aresta. A orientação α_{aresta} obtém-se de forma semelhante à orientação do canto, sendo dada por

$$\alpha_{aresta} = \cos^{-1} \left(\frac{R_0^2 - R_1^2 + d^2}{2dR_0} \right) \quad (7.12)$$

Duma análise geométrica da Figura 7.4, conclui-se directamente que, a distância inter-sensorial é dada por:

$$R_{2aresta} = \frac{R_0 + R_1}{2} \quad (7.13)$$

7.3 LIN-BB rede local de comunicação

O módulo de controlo do transdutor da Polaroid é versátil e eficiente. Todavia, pelos motivos já apresentados no capítulo 6.1, tornou-se necessário fazer alterações no *hardware* para contornar algumas limitações existentes e retirar maior partido da informação disponibilizada

pelo transdutor. Além disso, este novo sistema proposto implica a implementação de algoritmos de disparo mais complexos, assim como processamento adicional e paralelo. As vantagens propostas para este novo sistema seriam anuladas se o sistema central de controlo dos ultra-sons existente tivesse de lidar com esta nova estratégia, perdendo precioso tempo de processamento. Por estas razões, desenvolveu-se um novo sistema, simples, facilmente integrável e que permite um pré-processamento local e em paralelo de toda a informação necessária para implementar estes novos algoritmos. Na Figura 7.5, está representado, em diagrama de blocos, o sistema desenvolvido.

7.3.1 Módulos servidores

O módulo de controlo do transdutor da Polaroid, está agora ligado a um novo módulo equipado com um pequeno Micro-Controlador da Microchip (PIC 12C672) que funciona à velocidade de $1MHz$. Este novo módulo é capaz de:

1. Implementar todas as funcionalidades e aperfeiçoamentos sugeridos na secção 6.1 e implementados pelo módulo discreto da Figura 6.1, nomeadamente o controlo adequado de um ciclo de leitura, de acordo com o diagrama temporal da Figura 6.2, nos dois modos de funcionamento: *eco-simples* e *ecos-mútiplos*;
2. Controlar os ciclos de transmissão com os atrasos $a_{k,x}$ definidos pelo Mestre, de modo a implementar algoritmos de leitura: simples, EERUF ou ME-EERUF;
3. Comunicar localmente com o seu par, através de uma rede LIN-BB de 1 fio, para se sincronizar, transferir dados e efectuar, localmente, os cálculos do algoritmo ME-EERUF;
4. Funcionar em modo automático, fornecendo ao Mestre a informação mais recente, sempre que requerida;
5. Comunicar com o sistema principal de controlo (Mestre), através da rede de 1 fio LIN-BB, recebendo instruções e fornecendo informação sempre que solicitada.

Na Figura 7.6, está representado um fluxograma do algoritmo de disparo executado por cada um dos módulos. Com um contador de 16 *bits* e um relógio interno de $1MHz$, estes módulos

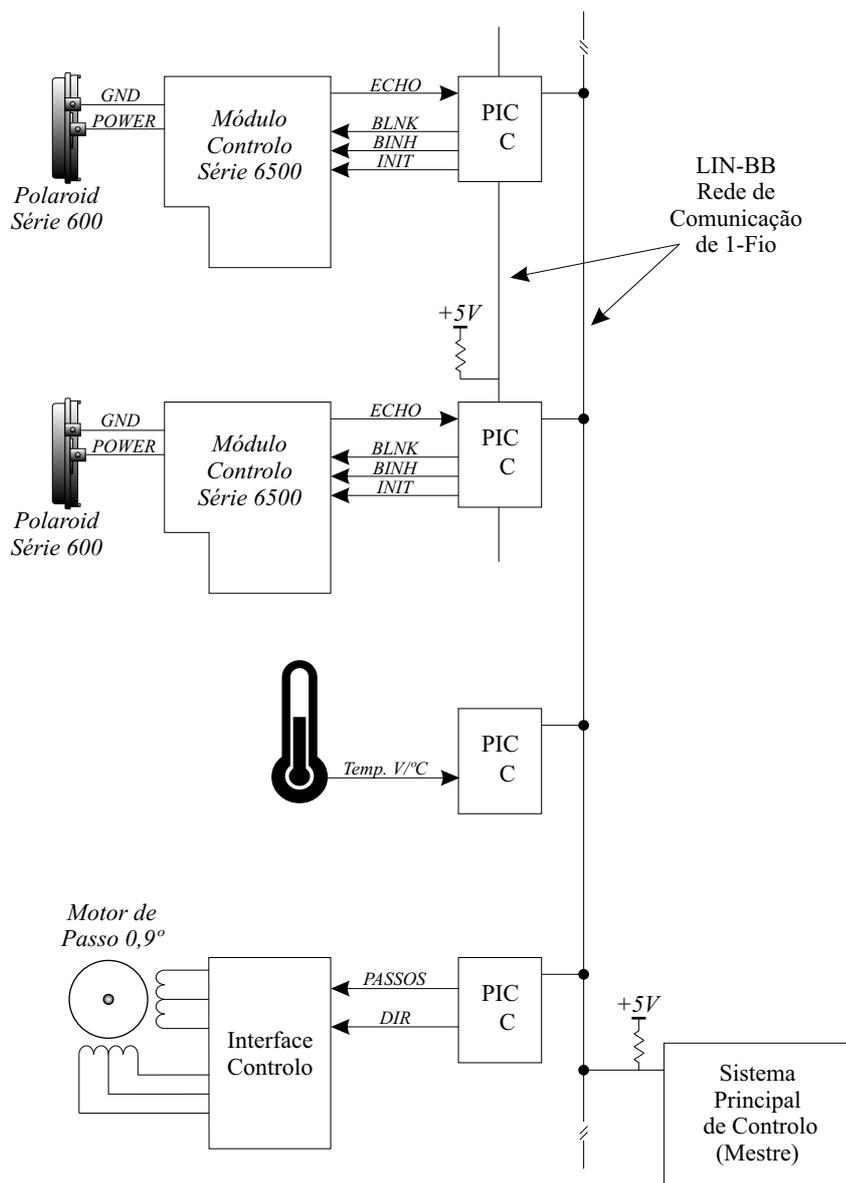


Figura 7.5: Diagrama de blocos do sistema de controlo e comunicação.

permitem medir distâncias a mais de 10 metros, com resoluções inferiores a dois décimos de milímetro².

Existem ainda dois outros módulos: um apenas para medir a temperatura ambiente, de forma a garantir uma velocidade do som c adequada à temperatura e o outro para comandar o motor de passo, usado para rodar o sistema nas nossas experiências.

7.3.2 LIN-BB

Esta rede local de comunicação, de apenas um fio, permite uma ligação dos diferentes módulos com o sistema principal de controlo, numa organização do tipo Mestre/Servidor. Todos os módulos se encontram em alta impedância, e junto ao Mestre a linha é ligada a +5V por uma resistência. Todas as comunicações começam quando o Mestre força a linha ao nível lógico zero e transmite em seguida, um pacote de bits com o formato série 16200 – 8N1³, compatível com a norma física RS232. Esta compatibilidade permite que este sistema possa ser facilmente controlado através de qualquer porto série, com um simples adaptador de níveis lógicos TTL/RS232.

A rede LIN-BB, foi inspirada na rede LIN⁴ [von der Wense, 2000; Audi et al., 2000] desenhada por um consórcio Europeu de construtores de automóveis e destinada a ser utilizada em curtas distâncias e a baixas velocidades, para controlar sensores e pequenos sistemas nos automóveis. Foi aqui adaptada para controlar sensores de ultra-sons em aplicações de robótica móvel, derivando, daí, a designação de LIN-BB (*LIN Based Bus* ou Rede Baseada no LIN). As baixas taxas de aquisição dos ultra-sons permitem que esta rede seja utilizada à velocidade de 16200 b/s para comprimentos inferiores a 10 m , sem quaisquer problemas de reflexões na linha ou necessidade de terminadores.

Este sistema torna-se facilmente configurável e flexível, podendo ser utilizados, até 255, módulos servidores. Entre módulos vizinhos pode também ser estabelecida uma linha de comunicação, que funciona com o mesmo protocolo do LIN-BB e que permite a comunicação

²Uma descrição mais pormenorizada destes módulos e do seu *software* é feita no manual técnico [Moita, 2002].

³Taxa de transmissão de 16200 *bits* por segundo, pacotes de 8 *bits* de dados, sem paridade, 1 *start bit*, 1 *stop bit*.

⁴Local Interconnected Network.

dos dois sensores pertencentes à mesma célula ME-EERUF. Um dos sensores é, inicialmente, configurado como Mestre local da célula e assume o comando da comunicação entre os dois sensores ⁵.

7.4 Modelação experimental do sistema ME-EERUF

Foram efectuadas experiências com as duas configurações de sensores apresentadas, na presença de reflectores planos, arestas e cantos. O objectivo foi modelar cada um dos sistemas na presença dos diferentes reflectores, identificando os campos de visão, ou seja, os limites até onde cada sistema consegue reconhecer o respectivo reflector, adquirindo as três distâncias – R_0 , R_1 e R_2 – com uma precisão aceitável.

As duas configurações foram montadas no sistema rotativo com resolução de $0,9^\circ$ e posicionadas, individualmente, em frente a cada um dos reflectores. Para cada reflector, foram exploradas todas as orientações entre -30° e $+30^\circ$ para três distâncias: 50 cm, 100 cm e 150 cm. A distância inter-sensorial R_2 , é normalmente, a mais sujeita a erros. O seu sinal está dependente de duas reflexões, no caso do canto, e tem ângulos de transmissão e recepção mais afastados do eixo do sensor, resultando numa amplitude de recepção sempre mais pequena. As Figuras 7.7 e 7.8 representam vistas 3D dos resultados experimentais para R_2 e do respectivo desvio padrão.

A Tabela 7.1 apresenta um sumário de toda a informação recolhida. Fazendo uma avaliação dos resultados da tabela, se for feita a intersecção dos campos de visão das três distâncias, pode verificar-se que o sistema não-colinear tem um campo de visão nulo para as arestas. Como este tipo de reflectores devolve sinais com menos amplitude que os outros, o cone de recepção é muito inferior aos 26° caracterizados no capítulo anterior e, além disso, a divergência dos dois sensores ainda piora essa situação.

Resumindo, não é possível identificar reflectores tipo aresta com o sistema.

Quanto ao modelo colinear, verifica-se, pela tabela, que se pode detectar os três reflectores básicos com um campo de visão relativamente grande para todos eles.

⁵À semelhança do *hardware*, uma descrição mais pormenorizada desta nova rede e protocolo de comunicação é apresentada no manual técnico [Moita, 2002].

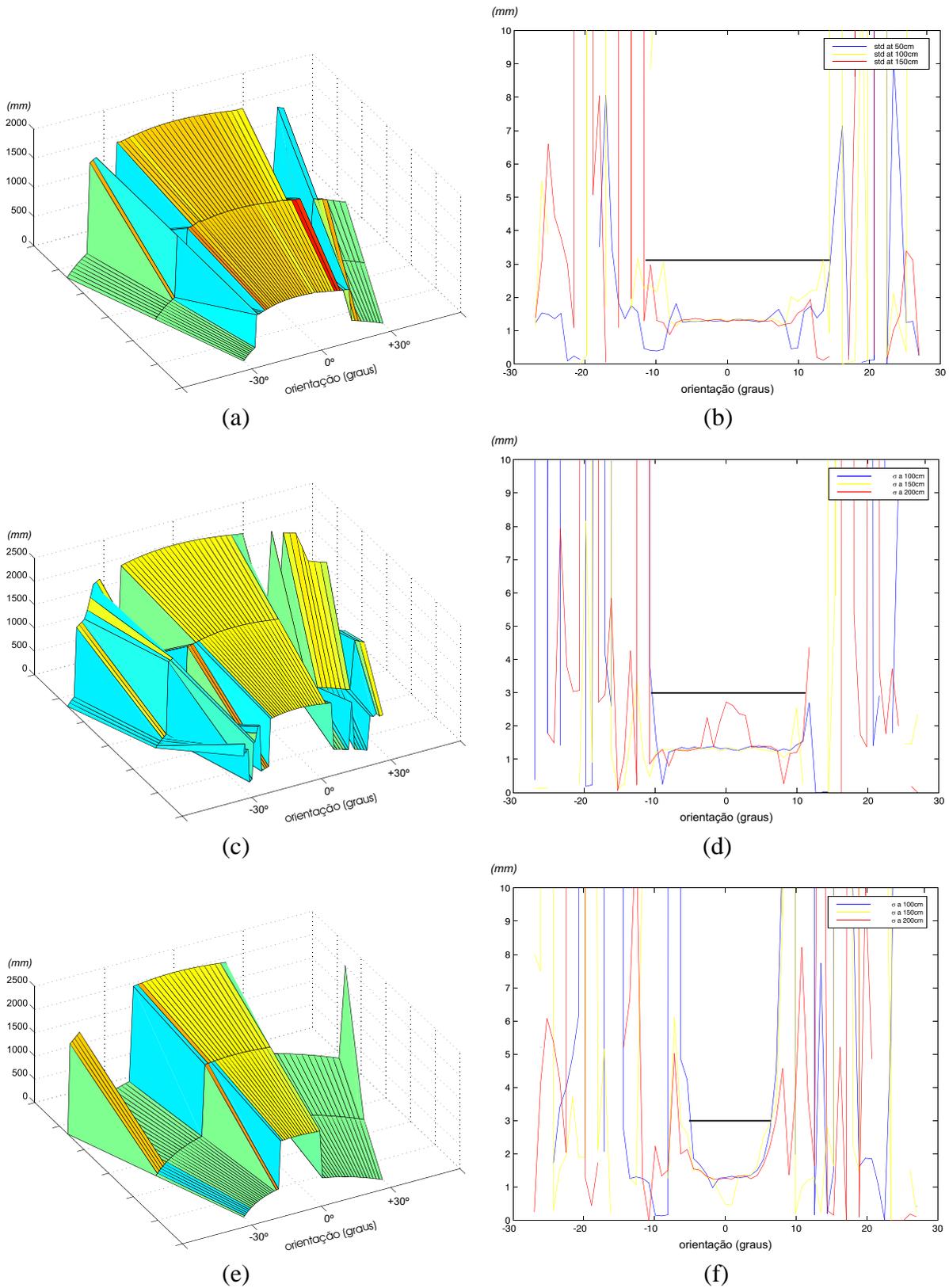


Figura 7.7: Resultados de R_2 para o sistema colinear. (a) Vista 3D da reflexão no Plano. (b) Desvio padrão de R_2 no Plano. (c) Vista 3D da reflexão no Canto. (d) Desvio padrão de R_2 no Canto. (e) Vista 3D da reflexão na Aresta. (f) Desvio padrão de R_2 na Aresta.

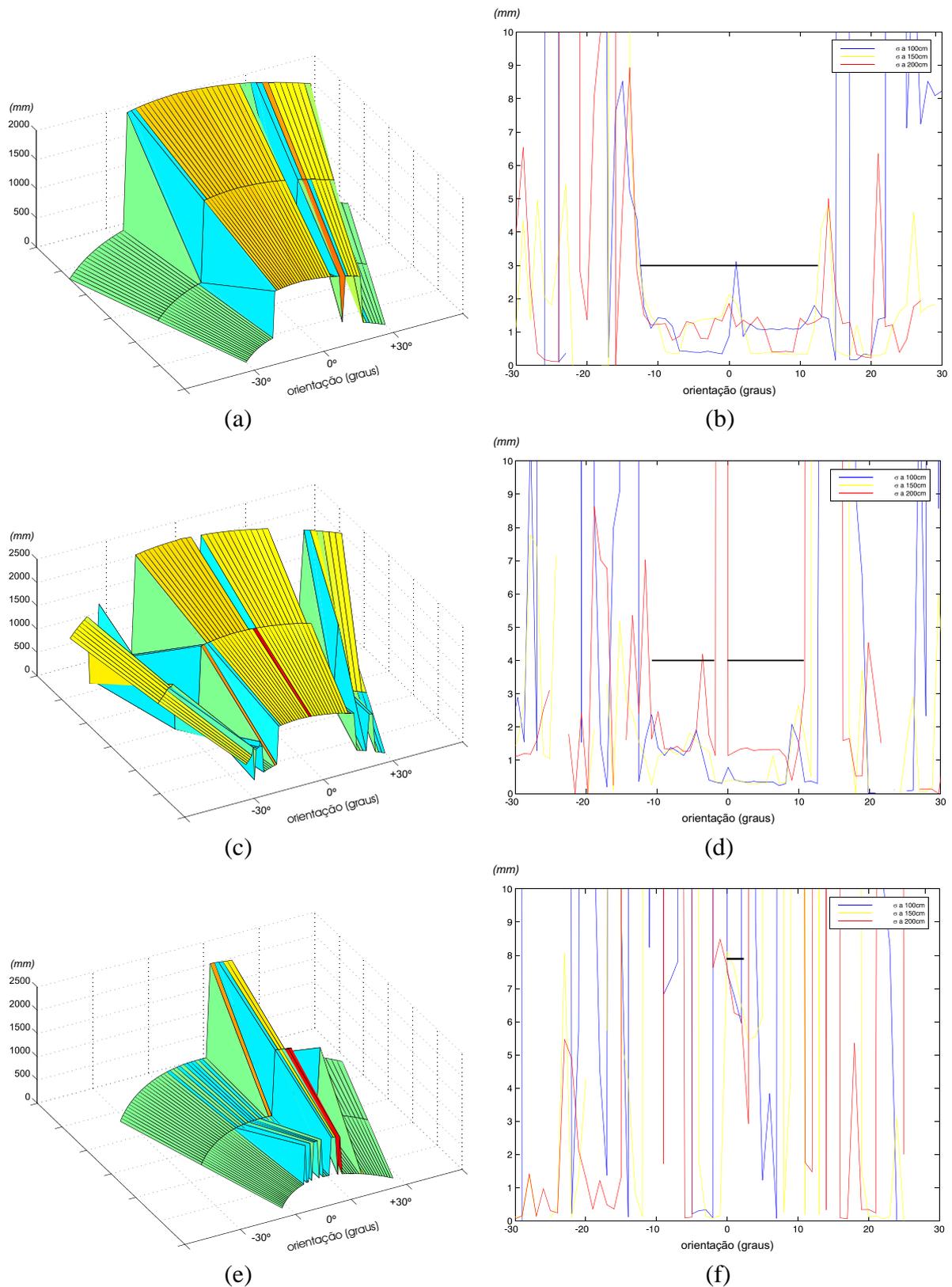


Figura 7.8: Resultados de R_2 para o sistema não-colinear. (a) Vista 3D da reflexão no Plano. (b) Desvio padrão de R_2 no Plano. (c) Vista 3D da reflexão no Canto. (d) Desvio padrão de R_2 no Canto. (e) Vista 3D da reflexão na Aresta. (f) Desvio padrão de R_2 na Aresta.

Sistema	Reflector	Medida	Campo de Visão (graus)		Max. Std (mm)
Singular	Plano	R	-13.0	+13.0	2
		R_0	-12.6	+13.5	1
		R_1	-13.5	+13.5	1
		R_2	-13.5	+13.5	3
Colinear $d = 150mm$	Plano	Campo de Visão	-12.6	+13.5	
		R_0	-11.7	+9.9	2
		R_1	-8.1	+10.8	2
		R_2	-10.8	+10.8	3
	Canto	Campo de Visão	-8.1	+9.9	
		R_0	-8.1	+8.1	1.5
		R_1	-9.9	+5.4	1.5
		R_2	-6.3	+8.1	3
	Aresta	Campo de Visão	-6.3	+5.4	
		R_0	-4.5	+20.0	1
		R_1	-17.0	+8.0	2.5
		R_2	-12.4	+12.4	3
Não-Colinear $d = 59mm$	Plano	Campo de Visão	-4.5	+8.0	
		R_0	0.0	+19.8	2
		R_1	-13.5	+6.3	5
		R_2	-11.7	-1.8	0.0 + 10.8
	Canto	Campo de Visão	0, 0	+6, 3	
		R_0	+1.8	+19.8	1.5
		R_1	-13.5	0.0	1.5
		R_2	0.0	+1.8	7.5
	Aresta	Campo de Visão	0	0	

Tabela 7.1: Resultados experimentais dos sistemas ME-EERUF.

7.5 Métodos de comparação de leituras consecutivas

Os sensores de ultra-sons, como qualquer outro tipo de sensor, estão sujeitos a ruído de várias origens: de origem intrínseca, provocado por variações no meio de propagação dos sinais, ou ainda pelas diferentes características dos reflectores, introduzindo variações aleatórias nos sinais recebidos, e conseqüentemente, nas distâncias medidas. Eles estão também sujeitos a interferências (sinais externos que se interpõem entre os verdadeiros), resultantes de reflexões múltiplas originadas por outros sensores locais ou externos e que causam falsas leituras. É raro haver fontes externas de ultra-sons em ambientes ocupados por robôs móveis, porém, estes robôs móveis estão equipados com vários sensores e produzem as suas próprias interferências – um fenómeno também designado por *crosstalk*. Uma situação semelhante pode acontecer quando vários robôs operam em simultâneo no mesmo ambiente, causando entre eles repetidas interferências que podem ser muito mais incómodas que os normais erros aleatórios de precisão. Este tipo de interferências diminui drasticamente a eficiência de todo o sistema. Para garantir leituras livres de interferências, seria necessário disparar um sensor de cada vez, com grandes intervalos de tempo. Esta situação, no entanto, seria impraticável em condições reais, com os robôs a moverem-se rapidamente entre obstáculos, que precisam de ser detectados e identificados em tempo real, de modo a evitar colisões e a determinar trajectórias. Uma amostragem ainda mais rápida, numa tentativa de compensar as interferências, é inexequível, já que são introduzidas ainda mais interferências que dão origem a mais falsas leituras. Torna-se necessário, então, utilizar técnicas de processamento que permitam eliminar as leituras corrompidas.

Uma técnica muito usada para eliminar os ocasionais erros aleatórios é a comparação de leituras consecutivas. Se o TOF entre duas leituras consecutivas for inferior a um pequeno Δt é, pois, provável que essas leituras sejam credíveis e que não tenham sido afectadas por grandes variações ruidosas. Porém, é comum que em sistemas de sensores de robôs móveis se utilizem algoritmos de disparo escalonados, em que os diferentes sensores são disparados periodicamente em instantes de tempo predefinidos. Neste tipo de sistemas, a posição do robô combinada com a geometria do ambiente, determina a ocorrência de *crosstalk* (Figura 7.9). Enquanto uma destas duas condições não se alterar significativamente, o mesmo tipo de interferência pode

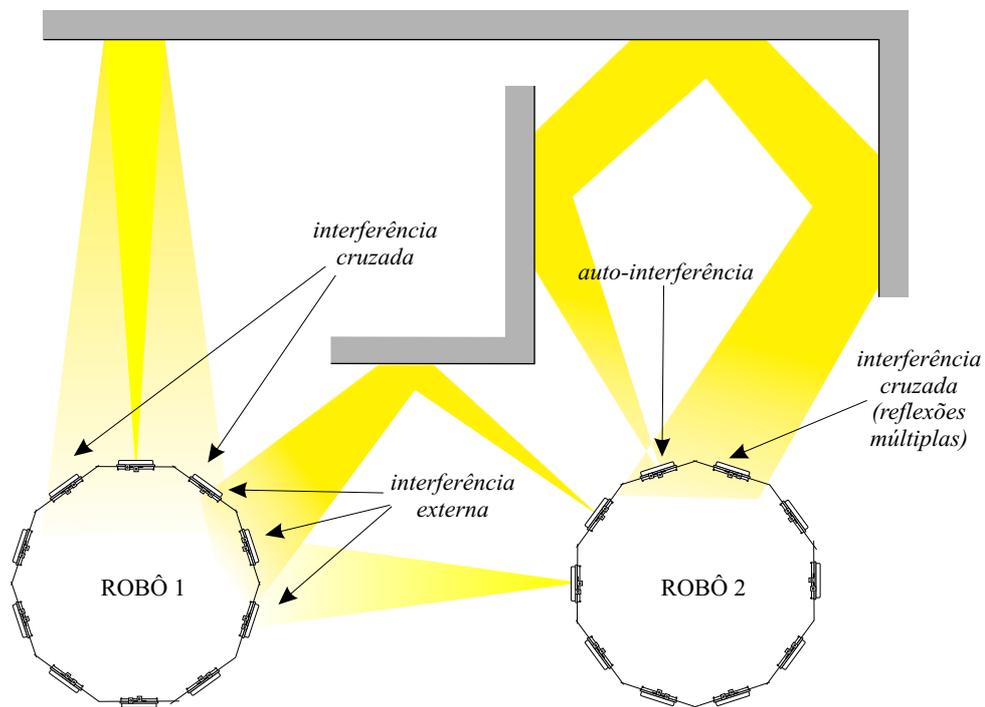


Figura 7.9: Existem várias fontes de interferência ou *crossstalk*. Se um sensor estiver a efectuar uma sequência repetitiva de medições, pode estar a introduzir falsas leituras, de forma sistemática, no próprio sensor (auto-interferência), noutros sensores do mesmo robô (interferência cruzada) ou até noutro robô (interferência externa).

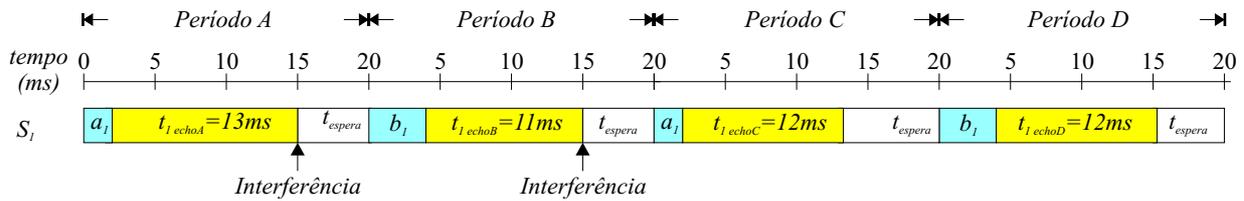


Figura 7.10: Exemplo de cronograma do método EERUF com atrasos alternados e disparos escalonados.

afectar repetidamente o mesmo sensor, invalidando a comparação das medidas consecutivas.

7.5.1 Método EERUF

Para ultrapassar os problemas referidos na secção anterior, Borenstein e Koren desenvolveram um método capaz de aumentar a taxa de amostragem dos sensores, ao mesmo tempo que reduz os erros por interferência [Borenstein and Koren, 1995]. No método designado por EERUF⁶, cada sensor S_i é disparado com um atraso alternado a_i e b_i (Figura 7.10). As interferências sistemáticas e repetitivas são “enganadas” pelos atrasos alternados e facilmente detectadas, sem deixar de se identificar também os erros causados por ruído aleatório. Na Figura 7.10, encontra-se exemplificado um cronograma do método com a detecção de uma falsa leitura, corrompida por interferência externa. Os primeiros dois ciclos são afectados por algumas interferências externas que surgem sempre aos 15 ms, mas como o sensor é disparado com atrasos alternados, esse erro é detectado logo após o 2º período, já que $|t_{1\text{echo}A} - t_{1\text{echo}B}| < \Delta t$ é falso ($\Delta t \simeq 0$), concluindo-se, portanto, que os ecos têm origem em diferentes objectos ou diferentes sensores. Os últimos ciclos não estão sujeitos a interferências, por isso, $|t_{2\text{echo}A} - t_{2\text{echo}B}| < \Delta t$ é verdadeiro e, consequentemente, estas leituras são consideradas credíveis.

Com este método, os erros causados por interferência e ruído aleatório podem ser facilmente eliminados, permitindo uma taxa de aquisição mais elevada, o que se reflecte num vasto conjunto de vantagens nas aplicações de robótica móvel: uma maior eficiência e robustez na detecção e desvio dos obstáculos; uma maior rapidez na deslocação em ambientes com muitos obstáculos; a possibilidade de vários robôs operarem em simultâneo, no mesmo ambiente, sem

⁶Error Eliminating Rapid Ultrasonic Firing.

interferência entre sensores ⁷.

7.5.2 O novo método ME-EERUF

Contrariamente ao método anterior, este método não exclui todos os ecos corrompidos por interferências. Os dois sensores vizinhos são disparados quase em simultâneo para causarem uma interferência cruzada. Utilizando o modo *ecos-múltiplos*, cada sensor recebe o próprio eco e uma interferência. Como ambos os sensores são disparados com um pequeno atraso, é possível identificar a interferência e a sua origem. Um segundo ciclo, com diferentes atrasos, permite eliminar interferências externas ao par de sensores.

No sistema em estudo, as interferências cruzadas causadas por sensores vizinhos são fundamentais para se conseguir medir a distância inter-sensorial R_2 (ver Figuras 7.2, 7.3 e 7.4), necessária para a detecção e identificação dos reflectores básicos. Além de medir a distância inter-sensorial, é necessário reconhecer a origem dos ecos. Em alguns sistemas anteriormente apresentados, esta distância é medida à custa de alterações no *hardware* ou de selectivas e lentas sequências de disparos. Enquanto um sensor funciona apenas como transmissor, outro funciona apenas como receptor e todos os restantes sensores permanecem silenciados para evitar interferências indesejáveis.

Neste trabalho, propõe-se desenvolver um sistema que traga benefícios evidentes para os robôs móveis, quer em termos de informação, quer em velocidade de aquisição. O método EERUF foi desenvolvido para obter taxas de aquisição mais rápidas do que os métodos convencionais de medida e eliminar as interferências. Embora baseado no método anterior, o novo método, adaptado às necessidades do nosso sistema e designado por ME-EERUF⁸, não rejeita todas as interferências, ou seja, apenas rejeita as interferências indesejáveis e aproveita as interferências cruzadas provenientes dos sensores adjacentes e que caracterizam as distâncias inter-sensoriais necessárias para os algoritmos de detecção e identificação. Com o novo sistema desenvolvido nesta tese, consegue-se obter maior velocidade, maior imunidade ao ruído e capacidade para medir e identificar as distâncias inter-sensoriais sem grandes alterações de

⁷Uma pormenorizada descrição deste método pode ser encontrada em [Borenstein and Koren, 1995].

⁸*Multi-Echo Error Eliminating Rapid Ultrasonic Firing.*

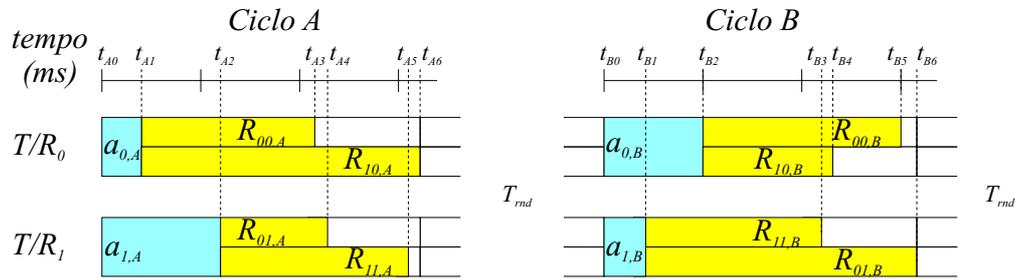


Figura 7.11: Exemplo de cronograma de disparos e ecos recebidos pelo sistema ME-EERUF.

hardware.

O disparo de dois sensores T/R adjacentes, ao mesmo tempo, pode dar origem a interferências indesejadas e a problemas de identificação da origem dos ecos. Porém, a introdução de pequenos atrasos controlados em ambos os sensores resolve estas duas questões. Considerando o exemplo da reflexão no plano da Figura 7.2 e a Tabela 7.2 de notações, a sequência de disparos do sistema ME-EERUF, representada pelo diagrama da Figura 7.11, tem a seguinte cronologia:

instante Ciclo A:

-
- t_{A0} **Início do ciclo A**
- t_{A1} T/R_0 é disparado depois de um atraso $a_{0,A}$;
- t_{A2} T/R_1 é disparado depois de um atraso $a_{1,A}$;
- t_{A3} O sinal transmitido por T/R_0 é reflectido no plano e, em primeiro, lugar recebido pelo próprio, com um TOF de $R_{00,A}$;
- t_{A4} Por outro percurso, o mesmo sinal interfere com T/R_1 , ainda antes de este receber o seu próprio eco, dando origem a um TOF de $R_{01,A}$;
- t_{A5} O sinal transmitido por T/R_1 é, então, recebido pelo próprio, com um TOF de $R_{11,A}$;
- t_{A6} Por outro percurso, o sinal transmitido por T/R_1 interfere com T/R_0 , depois de este receber o seu próprio eco, dando origem a um TOF de $R_{10,A}$;
- t_{A6} Assim que todos os quatro ecos são recebidos, é introduzido um atraso aleatório T_{rnd} , antes de iniciar o ciclo B , para reduzir as interferências indesejáveis entre ciclos consecutivos.

Ciclo B:

-
- t_{B0} **Início do ciclo B**
- t_{B1} T/R_1 é disparado depois de um atraso $a_{1,B}$;
- t_{B2} T/R_0 é disparado depois de um atraso $a_{0,B}$;
- t_{B3} O sinal transmitido por T/R_1 é reflectido no plano e, em primeiro, lugar recebido pelo próprio, com um TOF de $R_{11,B}$;
- t_{B4} Por outro percurso, o mesmo sinal interfere com T/R_0 , ainda antes de este receber o seu próprio eco, dando origem a um TOF de $R_{10,B}$;
- t_{B5} O sinal transmitido por T/R_0 é, então, recebido pelo próprio, com um TOF de $R_{00,B}$;
- t_{B6} Por outro percurso, o sinal transmitido por T/R_0 interfere com T/R_1 , depois de este receber o seu próprio eco, dando origem a um TOF de $R_{01,B}$;
- t_{B6} Assim que todos os quatro ecos são recebidos, é introduzido, novamente, um atraso aleatório T_{rnd} , enquanto se procedem aos cálculos para validar as leituras.

T/R_k	Sensor Transmissor/Receptor k , $k = \{0, 1\}$
C_x	Ciclo de disparos x , $x = A, B$
$a_{k,x}$	Atraso no disparo do sensor k no ciclo x
T_{rnd}	Atraso aleatório entre ciclos.
$R_{kj,x}$	TOF do sinal transmitido pelo sensor k e recebido pelo sensor j , no ciclo x , $j = \{0, 1\}$

Tabela 7.2: Notações do método ME-EERUF.

	Ciclo A		Ciclo B	
	1º eco	2º eco	1º eco	2º eco
T/R_0	$R_{00,A}$	$R_{10,A}$	$R_{00,B}$	$R_{10,B}$
T/R_1	$R_{01,A}$	$R_{11,A}$	$R_{01,B}$	$R_{11,B}$

Tabela 7.3: TOFs medidos após concluído o processo de leituras no método ME-EERUF

Depois dos dois ciclos terminados, cada sensor recebeu quatro TOFs (Tabela 7.3). Comparando as leituras consecutivas e tolerando apenas pequenas diferenças (Δt), isto é, medidas muito próximas, consegue-se eliminar as falsas leituras e identificar as leituras credíveis.

1.

$$Se \quad |R_{00,A} - R_{00,B}| < \Delta t, \quad \text{então,} \quad R_0 = R_{00} = \frac{R_{00,A} - R_{00,B}}{2} \quad (7.14)$$

2.

$$Se \quad |R_{11,A} - R_{11,B}| < \Delta t, \quad \text{então,} \quad R_1 = R_{11} = \frac{R_{11,A} - R_{11,B}}{2} \quad (7.15)$$

3.

$$Se \quad |(R_{10,A} - (a_{1,A} - a_{0,A})) - (R_{10,B} - (a_{1,B} - a_{0,B}))| < \Delta t, \\ \text{então,} \quad R_{10} = \frac{(R_{10,A} - (a_{1,A} - a_{0,A})) - (R_{10,B} - (a_{1,B} - a_{0,B}))}{2} \quad (7.16)$$

4.

$$Se \quad |(R_{01,A} - (a_{0,A} - a_{1,A})) - (R_{01,B} - (a_{0,B} - a_{1,B}))| < \Delta t, \\ \text{então,} \quad R_{01} = \frac{(R_{01,A} - (a_{0,A} - a_{1,A})) - (R_{01,B} - (a_{0,B} - a_{1,B}))}{2} \quad (7.17)$$

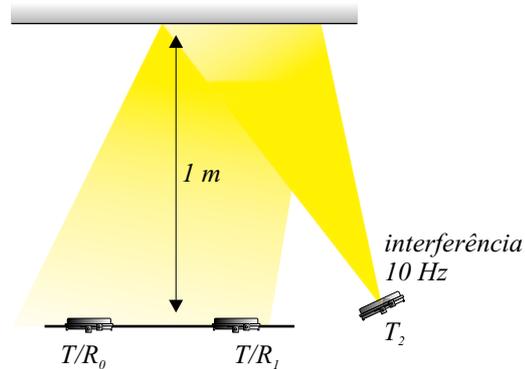


Figura 7.12: O sensor T_2 transmite, repetidamente, a uma frequência de 10 Hz , sinais de ultrassom para interferirem com o sistema de dois sensores.

5.

$$\text{Se } R_{01} \text{ e } R_{10} \text{ forem válidos, então, } R_2 = \frac{R_{01} + R_{10}}{2} \quad (7.18)$$

6.

$$\text{Se } R_{01} \text{ é válido e } R_{10} \text{ é inválido, então, } R_2 = R_{01} \quad (7.19)$$

7.

$$\text{Se } R_{01} \text{ é inválido e } R_{10} \text{ é válido, então, } R_2 = R_{10} \quad (7.20)$$

7.6 Eficiência do método ME-EERUF

Nos métodos convencionais, sensores adjacentes não podem ser disparados em simultâneo devido às interferências cruzadas, sendo necessário esperar algum tempo antes de iniciar novo ciclo, de forma a garantir a extinção total de todo o sinal e evitar que este venha a provocar auto-interferência depois de múltiplas reflexões. Uma leitura convencional tem um período de disparo aconselhado de 80 ms (Tabela 2.2), o que corresponde, aproximadamente, a 10 leituras por segundo, em condições ideais.

Para testar o comportamento do sistema ME-EERUF com ciclos muito inferiores ao convencional, efectuou-se a experiência representada na Figura 7.12. Um sistema colinear de dois

sensores foi colocado a um metro de um reflector plano, tendo sido efectuadas leituras com os dois sensores, disparados repetidamente em intervalos entre 30 *ms* e 80 *ms*, e utilizando três métodos: o método convencional, em que cada sensor é disparado sequencialmente; o método EERUF, com os sensores a serem disparados sequencialmente, mas com atrasos variáveis de $a_1 = 5 \text{ ms}$, $b_1 = 7 \text{ ms}$, $a_2 = 6 \text{ ms}$ e $b_2 = 4 \text{ ms}$ (ver Figura 7.10); e o novo método ME-EERUF, em que os sensores são disparados quase em simultâneo, dentro do mesmo ciclo, mas com pequenos atrasos de $a_{0,A} = 5 \text{ ms}$, $a_{0,B} = 0 \text{ ms}$, $a_{1,A} = 0 \text{ ms}$, $b_{1,A} = 3 \text{ ms}$ e ainda um atraso aleatório entre ciclos T_{rnd} , com os valores de 4, 5 ou 6 *ms*. Seguidamente, foi introduzido um terceiro sensor, direccionado para o mesmo reflector e a disparar com uma cadência de 10 *Hz*, de modo a provocar interferências directamente nos dois sensores do sistema. Foram efectuados 1000 ciclos para cada método, com e sem interferências. Os resultados obtidos encontram-se resumidos na Tabela 7.4. É evidente, logo à partida, a vantagem do método ME-EERUF, pois, para o mesmo número de ciclos, consegue adquirir quatro vezes mais leituras do que os outros métodos. A coluna das interferências detectadas representa a percentagem de leituras rejeitadas pelo teste de comparação de leituras consecutivas com um Δ_t correspondente a 4σ , o que conduz à aceitação de 95% das leituras credíveis. Considerando os resultados do capítulo anterior, a precisão das leituras quando um sensor se encontra perpendicular ao plano é de, aproximadamente, $\sigma = 2 \text{ mm}$. Logo, à temperatura ambiente de 20°C, 4σ corresponde a um TOF de cerca de $\frac{4 \times 2 \text{ mm} \times 2}{344 \text{ m/s}} = 46.5 \mu\text{s}$, por isso, foi utilizado $\Delta_t = 50 \mu\text{s}$. A coluna da taxa de aquisição fornece o número de leituras, devolvido pelo sistema, por segundo, excluindo as leituras rejeitadas, enquanto a coluna dos erros representa a percentagem das leituras que o sensor considerou correctas, mas que foram rejeitadas depois de comparadas com os valores reais, considerando o mesmo intervalo de aceitação de 95%.

A grande vantagem do método EERUF evidencia-se quando são introduzidas interferências no sistema, diminuindo ligeiramente a sua taxa de aquisição, mas mantendo um nível baixo de erros. Por outro lado, o método convencional, que não faz qualquer teste de comparação, atinge níveis de ruído proibitivos para as aplicações de robótica móvel. Os resultados experimentais demonstram claramente o sucesso do algoritmo ME-EERUF na rejeição de interferências indesejáveis. Com o mesmo tempo de ciclo, este sistema consegue taxas de aquisição quatro vezes

Método	Ciclo (ms)	Sem Interferência			Com Interferência 10 Hz		
		% interf. detectadas	Taxa de aquisição	% erros	% interf. detectadas	Taxa de aquisição	% erros
Convenc. 1000 <i>leituras</i>	30	0,0	33,2	58	0,0	33,2	59,6
	35	0,0	28,6	23,2	0,0	28,6	21,4
	40	0,0	25	7,1	0,0	25	22,4
	50	0,0	20	0,7	0,0	20	21,3
	60	0,0	16,6	0,4	0,0	16,6	22,7
	70	0,0	14,2	0	0,0	14,2	19,2
	80	0,0	12,4	0	0,0	12,4	20,6
EERUF 1000 <i>leituras</i>	30	1,6	32,8	0	52,6	15,8	0
	35	0,0	28,6	0	41,9	16,6	0
	40	0,0	25	0	37,6	15,6	0
	50	0,0	20	0	25,0	15	0,5
	60	0,4	16,6	0	38,8	10,2	0,3
	70	0,6	14,2	0	48,2	7,4	0
	80	0,8	12,4	0	40,8	7,4	0,3
ME EERUF 4000 <i>leituras</i>	30	62,8	49,6	25,8	71,8	37,6	23,4
	35	23,0	88	3,6	47,7	59,8	5,9
	40	16,4	83,6	2,4	38,0	62	4,3
	50	1,3	79	0	24,8	60,2	0
	60	0,1	66,6	0	24,7	50,2	0,8
	70	0,1	57,1	0	29,0	40,6	0,6
	80	0,0	50	0	22,4	38,8	0,3

Tabela 7.4: Resultados experimentais dos três métodos de aquisição, sem interferência e com interferência.

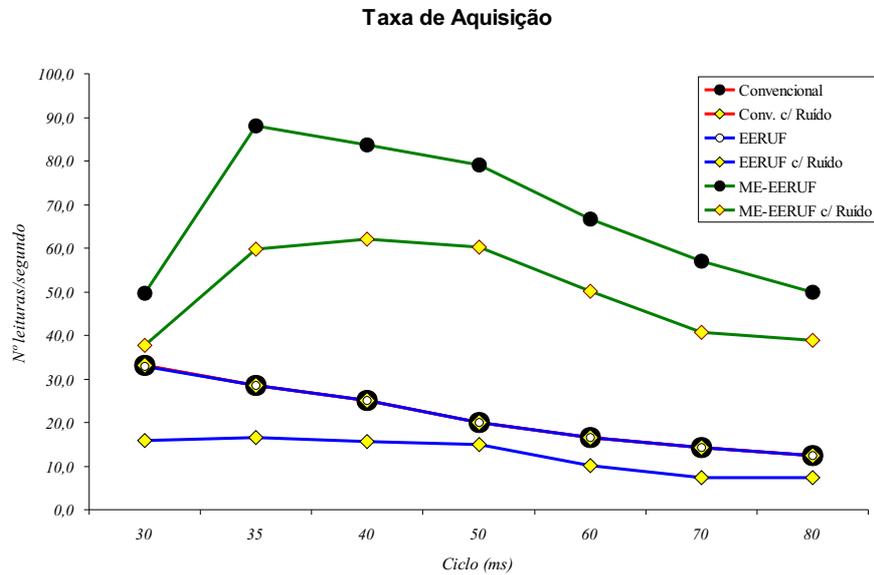


Figura 7.13: Número de leituras, por segundo, sem interferência, efectuadas pelo sistema de dois sensores.

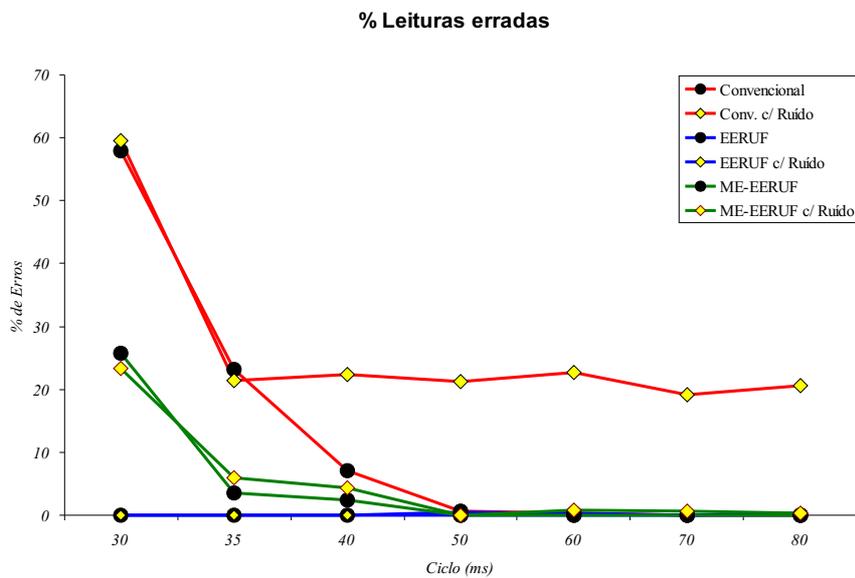


Figura 7.14: Percentagem de leituras incorrectamente consideradas válidas pelos sistemas e que não correspondem à distância real de 1 metro.

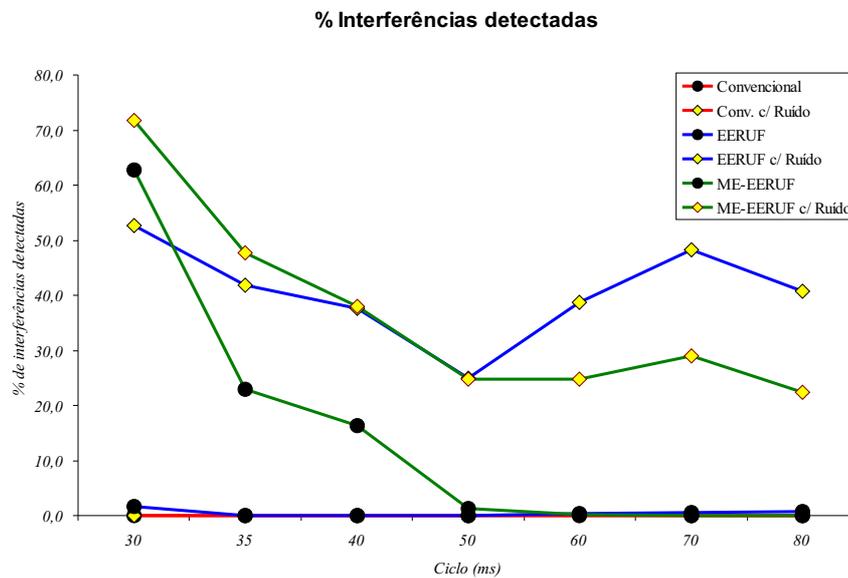


Figura 7.15: Percentagem de leituras corrompidas por interferência, que foram detectadas e rejeitadas.

superiores aos outros sistemas, com uma elevada taxa de rejeição de interferências e mantendo um baixo nível de erros.

7.7 Conclusões

Neste capítulo, foram propostas duas configurações de sensores para detectarem e classificarem reflectores. Depois de caracterizadas matematicamente as geometrias de reflexão desses sistemas perante os vários reflectores, foi levado a cabo um estudo experimental com o objectivo de modelar as suas respostas na presença dos mesmos. Com os resultados desta experiência – resumidos na tabela 7.1 – chega-se à conclusão de que a resposta do sistema não-colinear não é muito satisfatória. Pela análise dos resultados, verifica-se que esta configuração não tem capacidade para detectar reflectores do tipo aresta e apresenta dificuldades na detecção de cantos. Tudo isto se justifica porque a amplitude dos sinais transmitidos e a capacidade de recepção variam inversamente com a orientação em relação ao eixo do sensor, e as distâncias inter-sensoriais R_2 efectuem percursos oblíquos. Além disso, estes sinais são enfraquecidos pelas duas reflexões consecutivas no canto ou pela difracção nas arestas. A divergência de 15° entre os sensores

é ainda uma agravante adicional. Por outro lado, o sistema colinear demonstra claramente ter capacidade para detectar todo o tipo de reflectores com largo campo de visão.

Para se conseguir medir as distâncias inter-sensoriais, recorreu-se ao modo ecos-múltiplos do sensor da Polaroid, associado ao método EERUF. Esta combinação deu origem ao novo método ME-EERUF, apresentado neste capítulo. Para avaliar a eficiência deste novo método, foram efectuadas experiências de aquisição num ambiente conhecido e corrompido com ruído ultra-sónico. Os resultados resumidos na Tabela 7.4 e Figuras 7.13, 7.14 7.15, demonstram a eficiência do novo método. Para além da capacidade de detectar eficientemente as distâncias entre sensores (R_2), necessárias para a detecção e caracterização de reflectores, o novo método apresenta uma taxa de aquisição de dados aproximadamente quatro vezes superior aos outros métodos, mantendo, ainda assim, um baixo nível de erros.

Capítulo 8

Classificação de Reflectores

Um dos objectivos propostos consiste em detectar e identificar reflectores básicos do tipo plano, aresta ou canto, utilizando os dados obtidos pelo sistema e pelos métodos ME-EERUF apresentados no capítulo anterior. Este tipo de identificação resume-se, basicamente, a um problema de reconhecimento de padrões onde um sistema classificador associa a cada conjunto de medidas a respectiva classe ou tipo de reflector que lhe deu origem. Embora existam diferentes abordagens para se efectuar o reconhecimento de padrões, a abordagem estatística é uma das mais populares e o melhor classificador é o de Bayes, porque minimiza a probabilidade de erros de classificação [Fukunaga, 1990].

Neste capítulo, será proposto um sistema classificador de Bayes e serão apresentados resultados experimentais da detecção e identificação de reflectores em ambientes reais, recorrendo a dois mapas de grelhas para representar a área de trabalho do robô. Um mapa regista a probabilidade de existência de objectos e o outro mantém uma lista dos reflectores identificados pelo sistema e pelas suas propriedades: localização, orientação e dimensão.

8.1 Caracterização do problema

Pretende-se testar o sistema ME-EERUF num ambiente laboratorial equipado com mesas, armários, cadeiras, etc. Nestes ambientes, onde predominam os reflectores básicos do tipo plano, aresta e canto, podem considerar-se todas as superfícies especulares para os ultra-sons.

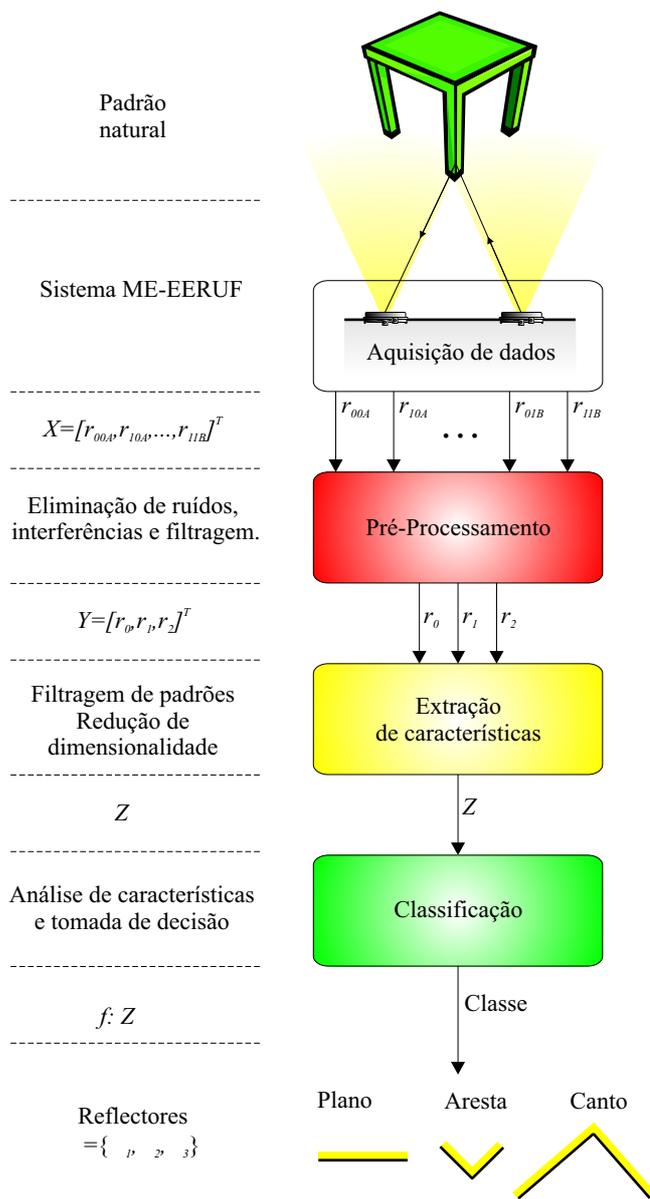


Figura 8.1: Módulos funcionais do sistema de classificação.

Considera-se imóvel o sistema de sensores ME-EERUF e todo o ambiente que o rodeia durante o instante da aquisição. Para uma dada posição, cada conjunto de medidas obtidas pelo sistema ME-EERUF é expresso por um vector X e parte-se do pressuposto que cada vector só pode ter origem num reflector, e somente num, de entre os possíveis no conjunto $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3\} = \{Plano, Aresta, Canto\}$. Assim, a classificação de reflectores consiste em associar a cada entrada X do sistema a respectiva classe $\omega_i \in \Omega$. O sistema de reconhecimento de reflectores, ou classificador que se propõe desenvolver, auxiliado por pré-processamento, extracção e selecção de características, é constituído pelos módulos funcionais, representados na Figura 8.1, e que se descrevem nas secções seguintes.

8.1.1 Aquisição de dados

O módulo de aquisição é composto pelo sistema de sensores que extrai informação do meio ambiente. O sistema ME-EERUF gera, como entrada do sistema de reconhecimento de reflectores, um vector, contendo todas as medidas feitas pelo sistema num ciclo completo de leituras (ver Tabela 7.3). Cada uma dessas medidas – r – pode ser considerada uma variável aleatória contínua, com distribuição normal e valor esperado $R = E(r)$. O conjunto das medidas r é representado pelo vector X na forma

$$X = [r_{00A}, r_{10A}, r_{01A}, r_{11A}, r_{00B}, r_{10B}, r_{01B}, r_{11B}]^T \quad (8.1)$$

8.1.2 Pré-processamento e selecção

Neste módulo, são seleccionadas as variáveis mais relevantes, eliminam-se ruídos, interferências externas, informação redundante e pontos espúrios.

Variáveis relevantes, eliminação de ruído e interferências

O vector X , observado pelo sistema de aquisição, contém elementos redundantes que servem apenas para facilitar aos algoritmos de pré-processamento a detecção e eliminação de leituras ruidosas ou corrompidas. Para isso, é utilizado o algoritmo de comparação de leituras con-

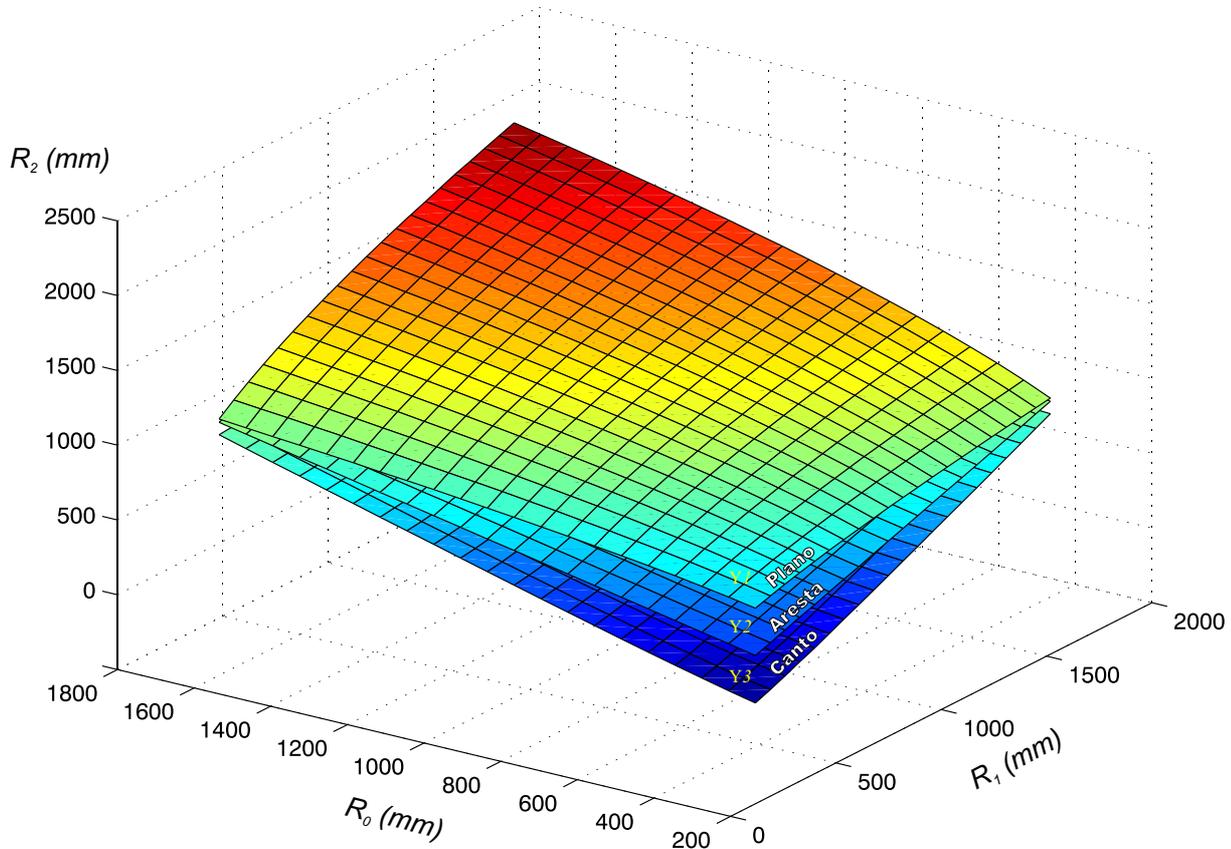


Figura 8.2: Espaço de padrões. Cada superfície representa o valor esperado para um vector Y condicionado à classe ω_i , $\mu_{Y_i} = E(Y|\omega_i)$.

secutivas, descrito anteriormente em 7.5. Desse processo, resulta uma selecção da informação mais relevante para a classificação dos reflectores, representada por novos vectores na forma

$$Y = [r_0, r_1, r_2]^T \quad (8.2)$$

que definem um conjunto de padrões num novo espaço tridimensional.

As superfícies na Figura 8.2, representadas no espaço de padrões em \mathbb{R}_+^3 , e caracterizadas pelas equações de reflexão 7.7, 7.11 e 7.13, apresentam os valores esperados de Y para cada classe, ou seja,

$$\mu_{Y_i} = E(Y|\omega_i) \quad (8.3)$$

Um dado padrão Y , com origem num reflector $\omega_i \in \Omega$, não é mais do que um ponto no espaço \mathbb{R}_+^3 , normalmente distanciado da respectiva superfície.

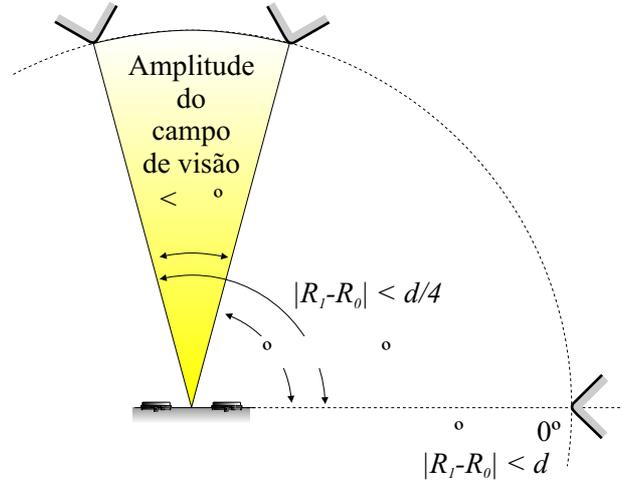


Figura 8.3: Limites geométricos e experimentais para a detecção de reflectores.

Espaço de medidas e pontos espúrios

Geometricamente, o espaço bidimensional de detecção de reflectores limita-se aos dois quadrantes em frente ao sistema de sensores (ver Figura 8.3). Para qualquer reflector $\omega_i \in \Omega$, a orientação α , dada pelas equações 7.4, 7.8 e 7.12, só pode estar compreendida entre 0 e 180 graus, o que obriga às seguintes restrições

$$\left| \frac{R_0 - R_1}{d} \right| < 1 \quad (8.4)$$

$$\left| \frac{R_0^2 - R_1^2 + d^2}{2dR_0} \right| < 1 \quad (8.5)$$

Para $R_0 > d$ e $R_1 > d$, estas duas inequações resultam na mesma relação

$$|R_0 - R_1| < d \quad (8.6)$$

Mas verificou-se experimentalmente que a capacidade de percepção do sistema bi-aural é limitada (ver capítulo anterior). A amplitude angular de percepção não ultrapassa os $\pm 13^\circ$ para o plano, $\pm 10^\circ$ para o canto e $\pm 6^\circ$ para a aresta (confrontar tabela 7.1). Por uma questão de simplicidade, podem maximizar-se os limites experimentais de percepção de todos os reflectores por $\pm 15^\circ$, já que

$$105^\circ > \alpha > 75^\circ \Rightarrow |\cos(\alpha)| \lesssim \frac{1}{4} \quad (8.7)$$

Estas restrições experimentais, aplicadas às equações de reflexão geometricamente obtidas, impõem as seguintes limitações

$$|R_0 - R_1| < \frac{d}{4} \quad (8.8)$$

$$|R_2 - R_0| < \frac{d}{4} \quad (8.9)$$

$$|R_2 - R_1| < \frac{d}{4} \quad (8.10)$$

Para o sistema de classificação, interessa considerar apenas os padrões que possam ter sido originados por um único reflector de $\omega_i \in \Omega$. Porém, em muitos casos, o vector Y pode ser originado por outros tipos de reflectores ou, ainda, por vários reflectores em simultâneo. Este tipo de padrões, considerados espúrios, podem ser, na sua maioria, facilmente detectados e filtrados pelas condições anteriormente apresentadas.

8.1.3 Extracção de características

A extracção de características consiste, basicamente, em mapear as medidas originais num espaço de representação diferente ou de menor dimensionalidade, de modo a evidenciar as diferenças entre classes e tornar a sua identificação mais efectiva e eficiente.

As equações características 7.7, 7.11 e 7.13 relacionam, geometricamente, os três elementos do vector Y . Utilizando essas relações, podem definir-se as novas variáveis aleatórias f , unidimensionais e condicionadas à respectiva classe ω_i .

$$f(Y|Plano) = r_2^2 - r_0 r_1 - \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (8.11)$$

$$f(Y|Aresta) = r_2^2 - \left(\frac{r_0 + r_1}{2}\right)^2 \quad (8.12)$$

$$f(Y|Canto) = r_2^2 - \frac{r_0^2}{2} - \frac{r_1^2}{2} + \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (8.13)$$

Pelas regras de combinação de variáveis aleatórias independentes [Mood et al., 1974], pode provar-se que, para cada classe $\omega_i \in \Omega$, f é também uma variável aleatória normal e unidimensional em \mathbb{R} e que apresenta valores esperados nulos, ou seja,

$$E(f|\omega_i) = 0, \forall \omega_i \in \Omega \quad (8.14)$$

Manipulando 8.11 e 8.13, vem

$$f(Y|Plano) = r_2^2 - \left(\frac{r_0 + r_1}{2}\right)^2 - \left[\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{r_1 - r_0}{2}\right)^2\right] \quad (8.15)$$

$$f(Y|Canto) = r_2^2 - \left(\frac{r_0 + r_1}{2}\right)^2 + \left[\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{r_1 - r_0}{2}\right)^2\right] \quad (8.16)$$

Define-se A e K , respectivamente, por

$$A = r_2^2 - \left(\frac{r_0 + r_1}{2}\right)^2 \quad (8.17)$$

$$K = \left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{r_1 - r_0}{2}\right)^2 \quad (8.18)$$

Como todos os dados foram anteriormente filtrados pelo módulo de pré-processamento, é fácil provar que $K > \frac{15}{16} \left(\frac{d}{2}\right)^2 > 0$, $\forall r_1, r_0 > d$. Pode, então, substituir-se A em todas as funções anteriores e dividir por K , para obter novas variáveis aleatórias z , condicionadas a cada classe $\omega_i \in \Omega$.

$$z(Y|Plano) = \frac{A}{K} - 1 \quad (8.19)$$

$$z(Y|Aresta) = \frac{A}{K} \quad (8.20)$$

$$z(Y|Canto) = \frac{A}{K} + 1 \quad (8.21)$$

A e K são duas variáveis aleatórias que resultaram da combinação de r_0 , r_1 e r_2 . Recorrendo novamente às regras de combinação de variáveis aleatórias [Mood et al., 1974], sabe-se que a média da divisão entre variáveis aleatórias pode ser aproximada por

$$E(z|\omega_i) = \frac{E(f|\omega_i)}{E(K)} - \frac{C((f|\omega_i), K)}{E(K)^2} + \frac{E(f|\omega_i)V(K)}{E(K)^3} \quad (8.22)$$

onde E representa a média, V a variância e C a covariância. Sabe-se também que $E(F|\omega_i) = 0$, $\forall \omega_i \in \Omega$, $E(K) > \frac{15}{16} \left(\frac{d}{2}\right)^2 > 0$ e $C((F|\omega_i), K) = 0$, $\forall \omega_i \in \Omega$, porque todas as variáveis são independentes, então, simplificando a equação 8.22, facilmente se conclui que

$$E(z|\omega_i) = 0, \forall \omega_i \in \Omega \quad (8.23)$$

Na sequência dos resultados anteriores, se for tomada a relação condicional

$$z(Y|\omega_i) = \frac{A}{K}, \quad \forall \omega_i \in \Omega, \quad (8.24)$$

facilmente se conclui que

$$\mu_1 = E(z|Plano) = 1 \quad (8.25)$$

$$\mu_2 = E(z|Aresta) = 0 \quad (8.26)$$

$$\mu_3 = E(z|Canto) = -1 \quad (8.27)$$

independentemente da distância e orientação a que se encontrem os reflectores.

A equação 8.24 projecta o espaço de padrões tridimensional, caracterizado pelo vector Y e representado na Figura 8.2, num espaço de características unidimensional, caracterizado pelas variáveis aleatórias z com distribuição Gaussiana, tal que

$$z(Y|\omega_i) : Y \in \mathbb{R}^3 \rightarrow z \in \mathbb{R} \quad (8.28)$$

e

$$p(z|\omega_i) \rightsquigarrow N(\mu_i, \sigma_i) \quad (8.29)$$

Assim como para a média, também é possível determinar estimativas aproximadas para a variância σ_i . Pelas regras de combinação de variáveis aleatórias [Mood et al., 1974], pode determinar-se as variâncias $V(z|\sigma_i)$ em função da combinação das variâncias de r_0 , r_1 e r_2 , dada, aproximadamente, por

$$\begin{aligned} \sigma(z|\omega_i)^2 = & \sigma_0(r_0|\omega_i)^2 \left(\frac{\partial z(Y|\omega_i)}{\partial r_0} \right)^2 + \\ & + \sigma_1(r_1|\omega_i)^2 \left(\frac{\partial z(Y|\omega_i)}{\partial r_1} \right)^2 + \sigma_2(r_2|\omega_i)^2 \left(\frac{\partial z(Y|\omega_i)}{\partial r_2} \right)^2 \end{aligned} \quad (8.30)$$

Devido à estreita amplitude de percepção dos sensores (ver equações 8.8, 8.9 e 8.10), e porque em situações normais as distâncias medidas são sempre muito maiores do que d , a diferença entre distâncias r é pequena. Para simplificar a determinação da variância, toma-se uma das três distâncias e faz-se $R = r_0 = r_1 = r_2$. Efectuando as derivadas parciais e fazendo

a aproximação sugerida, obtém-se o seguinte resultado:

$$\begin{aligned}\sigma(z|\omega_i)^2 &= \sigma_0(r_0|\omega_i)^2 \left(\frac{4R}{d^2}\right)^2 + \sigma_1(r_1|\omega_i)^2 \left(\frac{4R}{d^2}\right)^2 + \sigma_2(r_2|\omega_i)^2 \left(\frac{8R}{d^2}\right)^2 = \\ &= (\sigma_0(r_0|\omega_i)^2 + \sigma_1(r_1|\omega_i)^2 + 4\sigma_2(r_2|\omega_i)^2) \left(\frac{4R}{d^2}\right)^2\end{aligned}\quad (8.31)$$

8.1.4 Módulo de classificação

O módulo de classificação tem como objectivo analisar um padrão desconhecido z e identificar o reflector que o originou.

Regra de classificação de Bayes

A regra de classificação de Bayes é um dos métodos estatísticos mais usados porque minimiza a probabilidade de erros de classificação. Este método parte do pressuposto de que as funções de probabilidade de cada classe ω_i , denotadas por $p(z|\omega_i)$, são conhecidas e de que existe também algum conhecimento prévio das probabilidades de cada classe, designado por probabilidade à *priori* e denotada por π_i . Para um dado valor de z , estas probabilidades combinam-se segundo a regra de Bayes, resultando na probabilidade à *posteriori* $P(\omega_i|z)$, caracterizada por

$$P(\omega_i|z) = \frac{\pi_i p(z|\omega_i)}{\sum_{i=1}^3 \pi_i p(z|\omega_i)}\quad (8.32)$$

A regra de classificação de Bayes é uma extensão natural do cálculo da probabilidade à *posteriori* e consiste basicamente em associar ao padrão z a classe com maior probabilidade à *posteriori*, ou seja,

$$\text{Escolher } \omega_i \text{ se } P(\omega_i|z) > P(\omega_j|z) \forall j \neq i\quad (8.33)$$

Para se estimar as funções densidade de probabilidade, utilizaram-se duas abordagens: uma que recorre às propriedades geométricas dos padrões z e outra que utiliza um conjunto de dados experimentais de treino.

Estimativas geométricas

As variáveis de entrada do sistema são grandezas físicas, contínuas, que podem ser consideradas independentes e com distribuição normal. As operações sugeridas nas secções anteriores transformam os padrões multi-dimensionais de entrada numa grandeza uni-dimensional z , com distribuição normal.

Os valores médios já se encontram estimados pelas equações 8.25, 8.26 e 8.27, faltando estimar a variância condicionada para cada reflector. Para isso, utiliza-se a equação 8.31, deduzida anteriormente, e os resultados experimentais da tabela 7.1. Para o sistema colinear com $d = 150 \text{ mm}$, vem, respectivamente, para cada reflector:

$$\sigma(z|plano) = \sqrt{(1^2 + 1^2 + 4 \times 3^2) \left(\frac{4R}{150^2}\right)^2} \simeq 0.001R \quad (mm) \quad (8.34)$$

$$\sigma(z|aresta) = \sqrt{(1.5^2 + 1.5^2 + 4 \times 3^2) \left(\frac{4R}{150^2}\right)^2} \simeq 0.0011R \quad (mm) \quad (8.35)$$

$$\sigma(z|canto) = \sqrt{(2^2 + 2^2 + 4 \times 3^2) \left(\frac{4R}{150^2}\right)^2} \simeq 0.0012R \quad (mm) \quad (8.36)$$

onde R é a distância desde o sistema bi-aural ao reflector e que pode ser aproximada por qualquer uma das três distâncias R_i , medidas pelo sistema. Assim classificadas, as variâncias ficam dependentes da distância e as funções densidade de probabilidade podem ser caracterizadas pelas seguintes distribuições normais:

$$p(z|Plano) \approx N(1, 0.001R) \quad (8.37)$$

$$p(z|Aresta) \approx N(0, 0.0011R) \quad (8.38)$$

$$p(z|Canto) \approx N(-1, 0.0012R) \quad (8.39)$$

Partindo do pressuposto que os três reflectores básicos existem em igual quantidade no ambiente de detecção, a probabilidade do sistema bi-aural detectar um dado reflector está empiricamente dependente do seu campo de visão. Assim, representando o campo de visão por CV e recorrendo novamente à tabela 7.1, vem:

$$\pi_{plano} = \frac{CV_{plano}}{CV_{plano} + CV_{aresta} + CV_{canto}} = \frac{26.1}{26.1 + 11.7 + 18} \simeq 0.47 \quad (8.40)$$

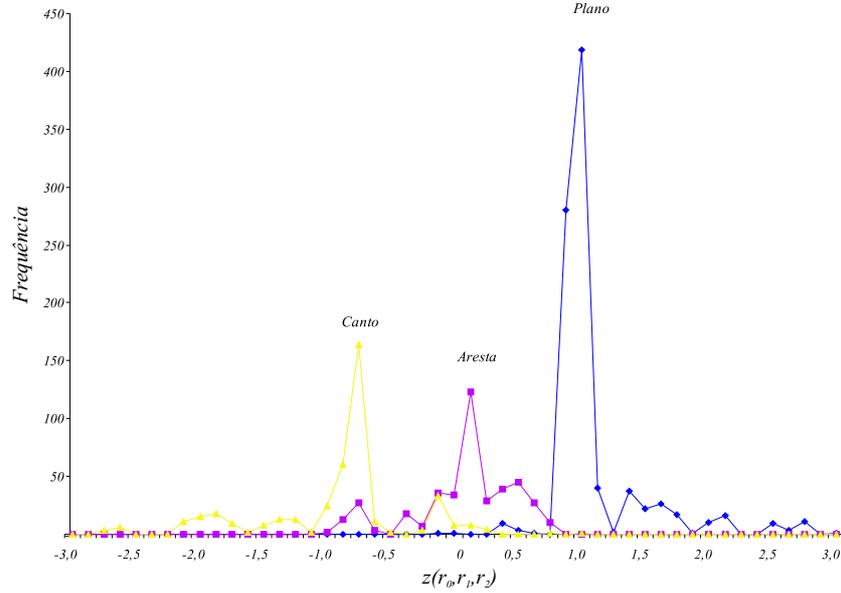


Figura 8.4: Dados experimentais de treino.

$$\pi_{aresta} = \frac{CV_{aresta}}{CV_{plano} + CV_{aresta} + CV_{canto}} = \frac{11.7}{26.1 + 11.7 + 18} \simeq 0.21 \quad (8.41)$$

$$\pi_{canto} = \frac{CV_{canto}}{CV_{plano} + CV_{aresta} + CV_{canto}} = \frac{11.7}{26.1 + 11.7 + 18} \simeq 0.32 \quad (8.42)$$

Estimativas experimentais

Para cada reflector de ω_i , foram efectuadas 900 aquisições com o sistema ME-EERUF, às distâncias de 0.5, 1 e 1,5 metros e com orientações a variar entre -30° e $+30^\circ$. Na Figura 8.4, encontram-se representados os histogramas de frequência de cada padrão z , para um dado reflector. Esses resultados foram utilizados para estimar experimentalmente as densidades de probabilidade de cada reflector, obtendo-se como resultado

$$p(z|Plano) \approx N(1.0879, 0.3775) \quad (8.43)$$

$$p(z|Aresta) \approx N(0.0898, 0.3937) \quad (8.44)$$

$$p(z|Canto) \approx N(-0.7993, 0.5011), \quad (8.45)$$

e as probabilidades *à priori* foram empiricamente estimadas pela seguinte fórmula:

$$\pi_i = \frac{\# \text{ resultados na classe } \omega_i}{\text{Total } \# \text{ de amostras}} \quad (8.46)$$

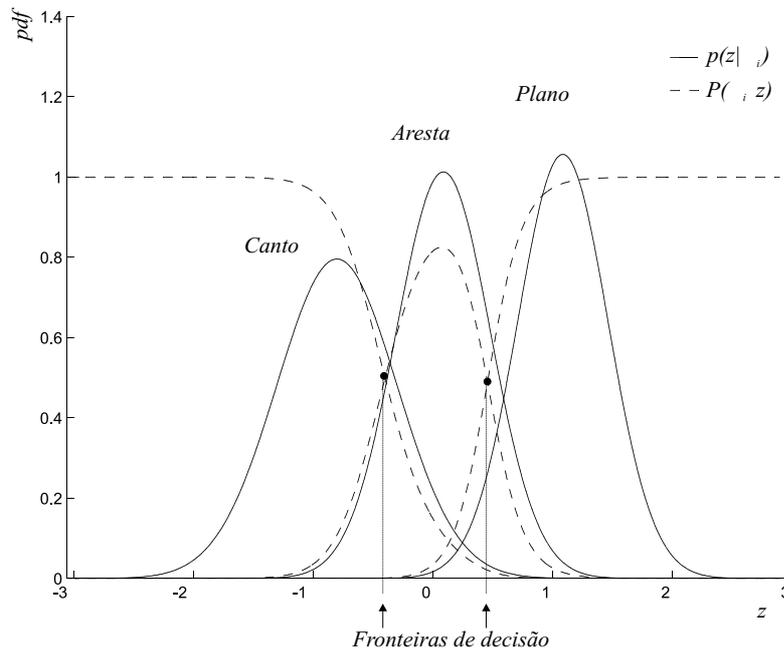


Figura 8.5: Funções densidade de probabilidade determinadas experimentalmente pelos dados representados na Figura 8.4. Pode observar-se o efeito que exercem as probabilidades à priori $p(z|\omega_i)$ sobre as probabilidade à posteriori $P(\omega_i|z)$.

$$\pi_{plano} = 0.1901 \quad (8.47)$$

$$\pi_{aresta} = 0.2326 \quad (8.48)$$

$$\pi_{canto} = 0.5773 \quad (8.49)$$

A regra de Bayes tem como efeito escalar a densidade de probabilidade, ou seja: se for observado um dado padrão z , com probabilidade $p(z|\omega_i)$ de pertencer à classe ω_i , essa probabilidade será maior se a respectiva probabilidade à priori π_i for grande, ou menor se for pequena. Veja-se o exemplo da Figura 8.5, onde se encontram representadas as funções densidade de probabilidade, estimadas experimentalmente, e o efeito das probabilidades à priori atrás determinadas.

8.2 Resultados experimentais

Para validar experimentalmente o nosso sistema, utilizaram-se dois mapas de grelhas com células quadradas de $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$. Uma das grelhas, designada por grelha de Elfes, regista as

probabilidades espaciais de ocupação e é actualizada de acordo com o modelo de Elfes apresentado na secção 3.3. A probabilidade de ocupação é representada experimentalmente pela cor da célula, que varia entre branco, quando esta tem uma elevada probabilidade de estar vazia, e um tom crescente de azul, à medida que a sua probabilidade de estar ocupada aumenta.

A outra grelha armazena em cada célula a probabilidade de aí existir um dado tipo de reflector. Essa probabilidade à *priori* é utilizada pelo sistema de classificação desenvolvido anteriormente. Quando um novo padrão z é classificado, a nova probabilidade é armazenada na célula respectiva, e se for classificado com uma probabilidade suficientemente elevada – $P(\omega_i|z) > 0.9$ –, então, é representado no mapa de formas geométricas, sendo um plano apresentado por um segmento, a aresta por uma cruz e o canto por dois pequenos segmentos que formam um ângulo recto.

Na Figura 8.6, encontram-se representados os resultados experimentais obtidos pelo sistema ME-EERUF, utilizando-se o sistema classificador de Bayes, com as funções densidade de probabilidade estimadas geometricamente. O sistema efectua um varrimento circular, num ambiente ocupado com vários objectos.

Na Figura 8.7, encontram-se representados os resultados experimentais obtidos pelo sistema ME-EERUF, utilizando-se o sistema classificador de Bayes, com as funções densidade de probabilidade estimadas experimentalmente.

8.3 Conclusões

Neste capítulo, foi desenvolvido e proposto um sistema classificador de Bayes para reflectores do tipo plano, aresta e canto. Estimaram-se os parâmetros das funções densidade de probabilidade para cada reflector, com base em critérios geométricos e experimentais.

Com ambas as estimativas, a nova configuração de sensores e os métodos de processamento, o novo sistema ME-EERUF demonstra capacidade para localizar e classificar reflectores com elevada exactidão, conforme demonstram os resultados experimentais apresentados nas figuras 8.6 e 8.7.

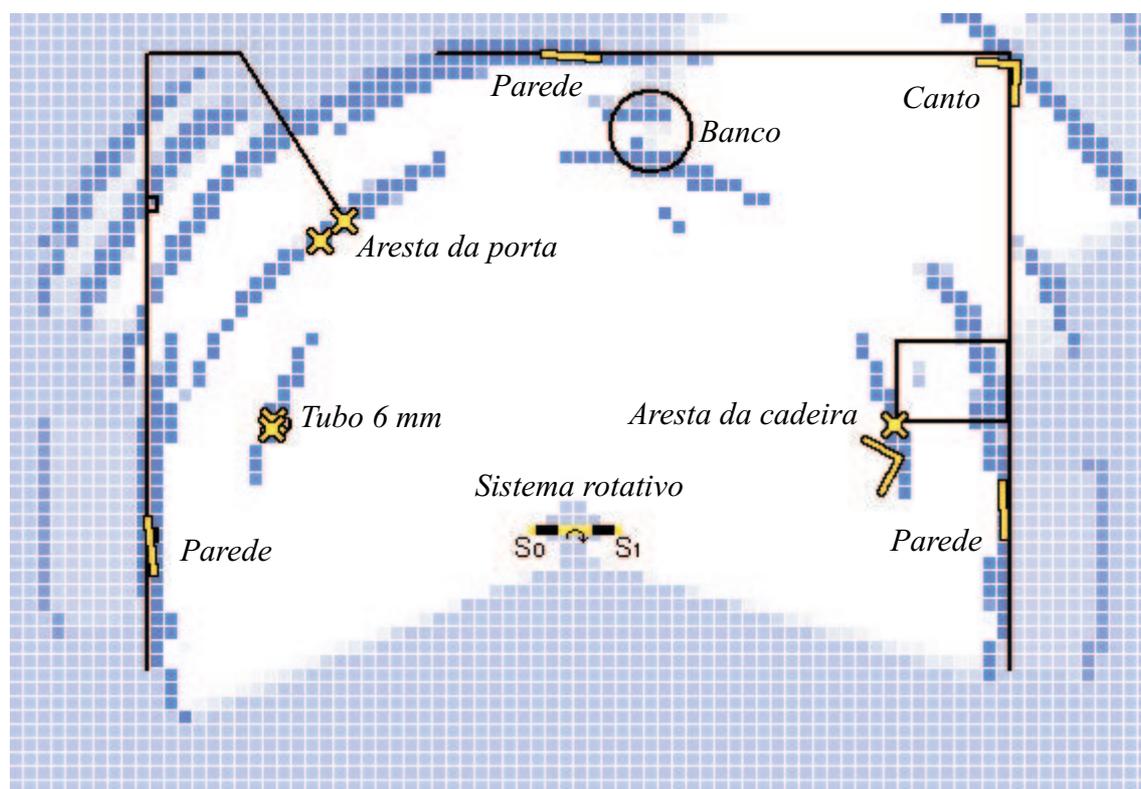


Figura 8.6: Mapa experimental com classificação, usando as fdp geométricas. As células mais escuras representam uma maior probabilidade de ocupação. Os símbolos amarelos representam os vários reflectores localizados e identificados.

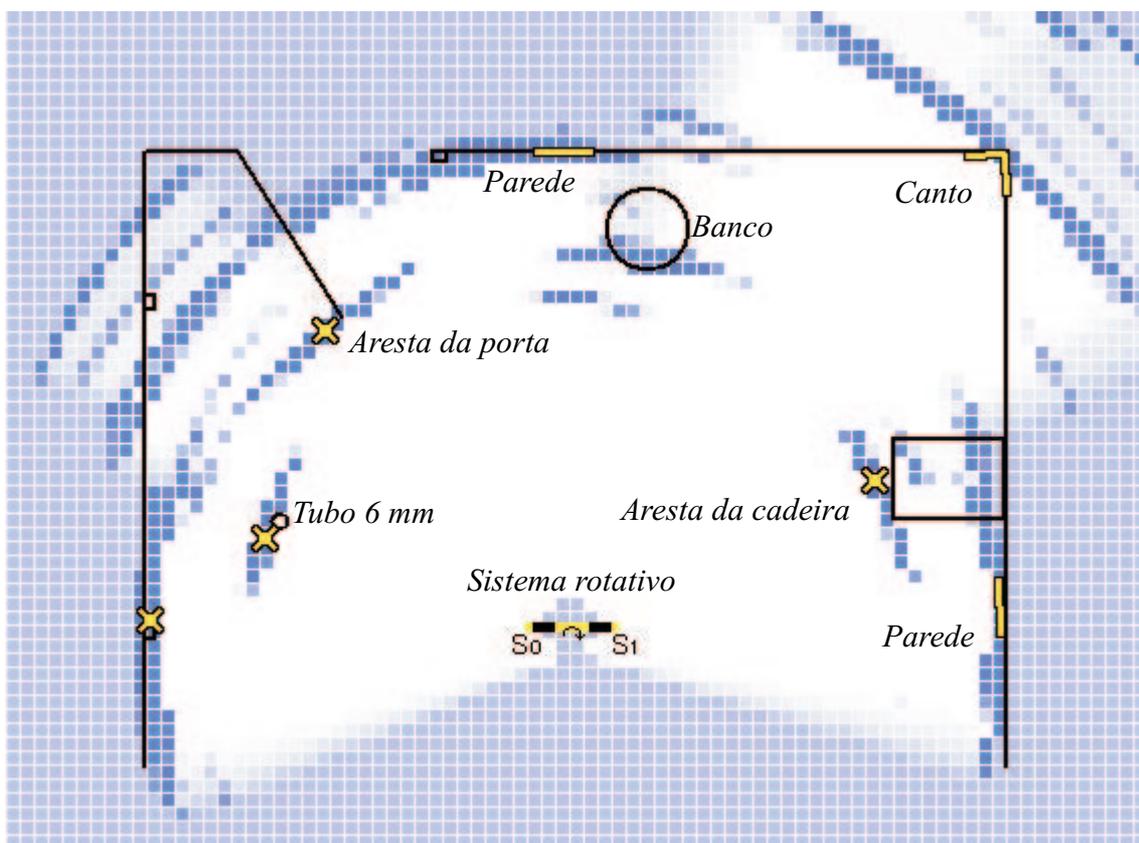


Figura 8.7: Mapa experimental com classificação usando as fdp experimentais. As células mais escuras representam uma maior probabilidade de ocupação. Os símbolos amarelos representam os vários reflectores localizados e identificados.

Capítulo 9

Conclusões e Trabalhos Futuros

O trabalho realizado nesta tese permitiu atingir os principais objectivos inicialmente propostos, nomeadamente, a caracterização experimental do sensor de ultra-sons da Polaroid e o desenvolvimento de um sistema com capacidade de detecção e classificação de reflectores.

O modelo experimental encontrado para o sensor de ultra-sons demonstrou a sua validade prática ao ser aplicado no sistema de classificação de reflectores (ME-EERUF) onde, as correcções introduzidas pelo novo modelo, permitiram melhorar, notoriamente, a precisão do sensor.

De uma forma geral, os resultados obtidos pelo novo sistema ME-EERUF são muito satisfatórios e promissores. O novo método de controlo e aquisição dos sensores é inovador e permite uma taxa de aquisição de dados, aproximadamente, quatro vezes superior aos outros métodos, mantendo, ainda assim, um baixo nível de erros. Por isso, este sistema revela importantes vantagens para todas as aplicações de tempo real, e que necessitem de informação rápida do seu meio envolvente.

O bom desempenho do sistema ME-EERUF e os resultados experimentais obtidos, constituem um estímulo para a continuação de trabalhos de investigação nesta área, por isso, encontra-se já em desenvolvimento, um novo sistema de 24 sensores, para robôs circulares (Figura 9.1). Este novo sistema, é uma combinação circular de células ME-EERUF, e pretende-se que seja capaz de efectuar um varrimento completo – 24 sensores – em menos de 100 *ms*, fornecendo, não só, a usual informação de distância, mas também, um mapa dos vários reflectores que rodeiam

o robô. Com o desempenho obtido pelo sistema ME-EERUF na detecção e classificação de reflectores, com o novo modelo experimental e com os métodos de classificação desenvolvidos, é de esperar excelentes resultados com o novo sistema. Ele irá proporcionar significativas vantagens, em aplicações de tempo real, onde seja necessário utilizar referências para localização e navegação.

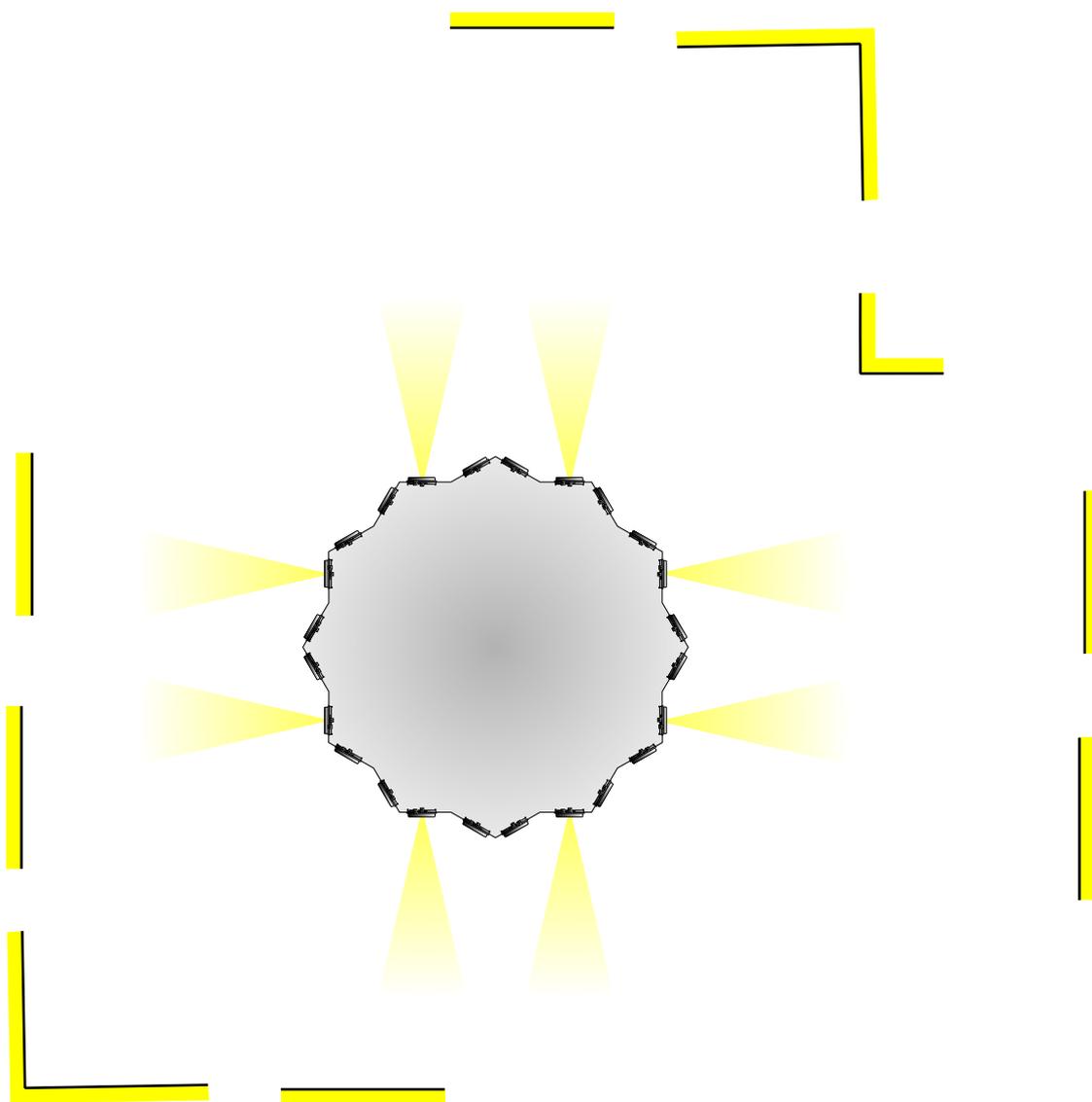


Figura 9.1: Rede ultra-rápida de sensores de ultra-sons. Com o novo método, desenvolvido nesta tese, os sensores são disparados quase em simultâneo sem interferências. Esta combinação circular de células ME-EERUF, irá permitir uma varrimento completo dos 24 sensores em menos de 100 ms , fornecendo informação de distância e, também, um mapa dos reflectores detetados e identificados em redor do robô.

Bibliografia

- E. G. Araujo and R. A. Grupen. Feature detection and identification using a sonar-array. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:1584–1589, May 1998.
- E. G. Araujo and R. A. Grupen. Feature extraction for autonomous navigation using an active sonar head. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 2000.
- Audi, BMW, DaimlerChrysler, Motorola, Inc, V. C. Technologies, Volkswagen, and V. C. Corporation. Lin specification package. Technical report, November 17 2000.
- B. Barshan and R. Kuc. Differentiating sonar reflections from corners and planes by employing an intelligent sensor. In *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, volume 12, pages 560–569. IEEE, June 1990.
- J. Borenstein and Y. Koren. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 19(5):1179–1187, Sept./Oct. 1989.
- J. Borenstein and Y. Koren. Histogramic in-motion mapping for mobile robot obstacle avoidance. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 7(4):535–539, 1991a.
- J. Borenstein and Y. Koren. The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 7(3):278–288, June 1991b.
- J. Borenstein and Y. Koren. Error eliminating rapid ultrasonic firing for mobile robot obstacle avoidance. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 11(1):132–138, February 1995.

- M. Buchberger, K.-W. Jorg, and E. V. Puttkamer. Laserradar and sonar based wrld modeling and motion control for fast obstacle avoidance of the autonomous mobile robot mobot-iv. In *Robotics and Automation*, Atlanta, Georgia, May 1993. IEEE.
- K. S. Chong and L. Kleeman. Sonar feature based map building for a mobile robot. MECSE 10, Department of Electrical and Computer System Engineer. Monash University, 1996.
- K. S. Chong and L. Kleeman. Feature-based mapping in real, large scale environments using an ultrasonic array. *The International Journal of Robotics Research*, 18(1):13–19, Jan 1999.
- I. J. Cox. Blanche: Position estimation for an autonomous robot vehicle. *Autonomous Robot Vehicles*, pages 221–228, July 1990.
- J. L. Crowley. World modeling and position estimation for a mobile robot using ultrasonic ranging. In *Proceedings of the 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 674–680, Scottsdale, Arizona, May 1989.
- A. Elfes. Sonar-based real-world mapping and navigation. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-3(3):249–265, 1987.
- A. Elfes. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation. *Computer Magazine*, pages 46–57, June 1989.
- A. Elfes. Occupancy grids: A stochastic spatial representation for active robot perception. In *Proceedings of the Sixth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, Cambridge, MA, July 1990.
- K. Fukunaga. *Introduction to statistical pattern recognition (2nd ed.)*. Academic Press Professional, Inc., 1990. ISBN 0-12-269851-7.
- H. Hakala, O. Karasti, P. Mattila, and H. Vaataja. Using ultrasonic sensors onboard mobile robots. 1992.
- K. D. Harris and M. Recce. Experimental modelling of time-of-flight sonar. *Robotics and Autonomous Systems*, 24:33–42, 1998.

- O. Khatib. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The International Journal of Robotics Research*, 5(1):1179–1187, Spring 1986.
- L. E. Kinsler. *Fundamentals of Acoustics*, chapter 8, pages 178–182. John Wiley Sons, 1982. ISBN 0471029335.
- L. Kleeman and R. Kuc. Mobile robot sonar for target localization and classification. *International Journal of Robotics Research*, 14(4):295–318, 1995.
- R. Kuc. A spatial sampling criterion for sonar obstacle detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(7):686–690, July 1990.
- R. Kuc and Y.-D. Di. Intelligent sensor approach to differentiating sonar reflections from corners and planes. In *In Proceedings of the International Conference on Intelligent Autonomous Systems*, pages 329–333, Amsterdam, Dec. 1987.
- R. Kuc and V. B. Viard. A physically based navigation strategy for sonar-guided vehicles. *The International Journal of Robotics Research*, 10(2):75–87, April 1991.
- S. Lacroix and G. Dudek. On the identification of sonar features. In *Intelligent Robots and Systems*. IEEE/RSJ International Conference, Sept 1997.
- D. Lee. *The Map-Building and Exploration Strategies of a Simple Sonar-Equipped Robot*, chapter 2, pages 13–26. CAMBRIDGE University Press, 1996. ISBN 0521573319.
- J. J. Leonard and H. F. Durrant-Whyte. Mobile robot localization by tracking geometric beacons. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(3):376–382, June 1991.
- J. J. Leonard and H. F. Durrant-Whyte. *Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation*. Kluwer Academic Publishers, 1992.
- P. MacKenzie and G. Dudek. Precise positioning using model-based maps. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 1615–1621, San Diego, CA, May 1994. IEEE.

- L. Matthies and A. Elfes. Integration of sonar and stereo range data using a grid-based representation. In I. C. S. Press, editor, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pages 727–733, Philadelphia, PA, April 1988.
- P. J. McKerrow. Echolocation - from range to outline segments. *Robotics and Autonomous Systems*, 11:205–211, 1993.
- F. Moita. *Manual Técnico do Sistema Ultra-sónico ME-EERUF e Rede Local LIN-BB*. ISR, DEE – Universidade Coimbra, Polo II, 3030 Coimbra, Portugal, Dezembro 2002.
- F. Moita, A. Feijão, and U. Nunes. Ultrasonic and dead reckoning data processing. Repor of sub-task st1/t2, PO-ROBOT, April 1994a.
- F. Moita, A. Feijão, U. Nunes, and A. T. de Almeida. Modelling and callibration of an ultrasonic ranging system of a mobile robot. In *CONTROLO 94*, Lisboa, Portugal, 1994b. 1º Encontro Português de Controlo Automático.
- F. Moita, A. Feijão, U. Nunes, and A. T. de Almeida. Ultrasonic and odometric modelling for mobile robots. In *EURISCON 94 Conference*, Malaga, Spain, August 22-26 1994c. European Robotics and Intelligent Systems Conference.
- F. Moita and U. Nunes. Multi-echo technique for feature detection and identification using simple sonar configurations. In *Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 389–394. IEEE/ASME International Conference, July 2001.
- F. Moita and U. Nunes. Ultrasonic reflectors recognition with a fast firing system. In *SICI-CA 2003 5th IFAC International Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications*, Aveiro, Portugal, July 2003.
- A. M. Mood, F. A. Graybill, and D. C. Boes. *Introduction to the theory of statistics (3rd ed.)*. McGraw-Hill, 1974.
- H. P. Moravec and A. Elfes. High resolution maps from wide angle sonar. *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, pages 116–121, 1985.

- K. Nagatani, H. Choset, and N. Lazar. The arc-transversal median algorithm: an approach to increasing ultrasonic sensor accuracy.
- U. Nehmzow. *Mobile Robotics: A Practical Introduction*. Applied Computing. Springer, 2000. ISBN 1-85233-173-9.
- D. Pagac, E. M. Nebot, and H. Durrant-Whyte. An evidential approach to probabilistic map-building. In *Reasoning with Uncertainty in Robotics: International Workshop. Proceedings / RUR'95*, pages 164–170, Amsterdam, The Netherlands, December 1996. (Lecture notes in Computer Science, Vol. 1093).
- G. Pires, N. Martins, R. Almeida, F. Moita, U. Nunes, and A. T. Almeida. Optimization of the tri-aural system, detection and identification of different reflectors. In *Mechatronics 96 With M²VIP 96 Conference*, Universidade do Minho, Portugal, September 1996.
- Polaroid. Technical specifications for 600 series instrument grade electrostatic transducers. Polaroid OEM Components Group, 1999a.
- Polaroid. Technical specifications for 6500 series sonar ranging module. Polaroid OEM Components Group, 1999b.
- ROBOSOFT. *Local Area Ultrasonic Network, User's Manual*. ROBOSOFT SA, ROBOSOFT sarl 15 // 17 rue de Verdun 92600 ASNIERES FRANCE, 01 edition, August 1992a.
- ROBOSOFT. *Robuter TM, User's Manual*. ROBOSOFT SA, ROBOSOFT sarl 15 // 17 rue de Verdun 92600 ASNIERES FRANCE, 01 edition, August 1992b.
- A. M. Sabatini. Active hearing for external imaging based on an ultrasonic transducer array. *Proceedings of IROS 92*, pages 829–836, 1992a.
- A. M. Sabatini. Ultrasound-based active hearing techniques for tracking and identification of objects. *Proceedings of IROS 92*, pages 48–53, 1992b.

- J. Simmons, E. Freedman, S. Stevenson, L. Chen, and T. Wohlgenant. Clutter interference and the integration time of echoes in the echolocating bat, *Eptesicus fuscus*. *J. Acoust. Soc. Am.*, 86:1318–1332, 1989.
- J. A. Simmons and L. Chen. The acoustic basis for target discrimination by FM echolocating bats. *J. Acoust. Soc. Am.*, 86:1333–1350, 1989.
- J. A. Simmons, M. J. Ferragamo, and C. F. Moss. Echo-delay resolution in sonar images of the big brown bat, *Eptesicus fuscus*. In *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, volume 95, pages 12647–12652, 1998.
- J. Ureña, M. Mazo, J. J. García, E. Bueno, and J. C. García. Ultrasonic sensor module for an autonomous industrial vehicle. pages 269–279. ELSEVIER, 1999.
- J. Ureña, M. Mazo, J. J. García, Á. Hernández, and E. Bueno. Classification of reflectors with an ultrasonic sensor for mobile robot applications. In *Intelligent Autonomous Vehicles*, pages 219–224. 3rd IFAC Symposium, March 1998.
- V. Varveropoulos. Robot localization and map construction using sonar data. The Rossum Project. <http://rosum.sourceforge.net>.
- H.-C. von der Wense. Introduction to local interconnect network - lin. Technical report, Motorola, Munich, Germany, March 2000.
- O. Wijk and H. Christensen. Sonar based pose tracking using natural point landmarks. In *Symposium of Intelligent Robotic Systems, SIRS99*, pages 245–254, Coimbra, Portugal, July 1999. IEEE.
- O. Wijk and H. Christensen. Triangulation based fusion of sonar data with application in robot pose tracking. In *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, volume 16, pages 740–752, Leuven, Belgium, december 2000. IEEE.
- O. Wijk, P. Jensfelt, and H. Christensen. Triangulation based fusion of ultrasonic sensor data. In *In Proc. of International Conference on Robotics and Automation*, volume 4, pages 3419–3424, Leuven, Belgium, may 1998. IEEE.

T. Yata, L. Kleeman, and Shin'ichi. Fast-bearing measurement with a single ultrasonic transducer. *The International Journal of Robotic Research*, 17(11):1202, 1213 1998.