UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE MATEMÁTICA
NÚCLEO DE COMPUTAÇÃO ELETRÔNICA

Cristiano Soares de Aguiar

Identificação de Estados e Cruzamento de Portas Utilizando Visão Robótica

RIO DE JANEIRO
2005

CRISTIANO SOARES DE AGUIAR

IDENTIFICAÇÃO DE ESTADOS E CRUZAMENTO DE PORTAS UTILIZANDO VISÃO ROBÓTICA

Dissertação de Mestrado Submetida ao Programa de Pós-graduação em Informática do Instituto de Matemática / Núcleo de Computação Eletrônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Informática.

Orientadores: Eliana Prado Lopes Aude
Ernesto Prado Lopes

RIO DE JANEIRO

2005

A282 Aguiar, Cristiano Soares de.
Identificação de Estados e Cruzamento de Portas Utilizando Visão Robótica / Cristiano Soares de Aguiar. – Rio de Janeiro, 2005.
132 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Informática) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Matemática, Núcleo de Computação Eletrônica, 2005.

Orientadores: Eliana Prado Lopes Aude; Ernesto Prado Lopes

1. Robótica – Teses. 2. Visão Computacional – Teses. 3. Reconhecimento de Portas – Teses. 4. Identificação de Estados de Portas – Teses. I. Eliana Prado Lopes Aude/Ernesto Prado Lopes (Orient.). II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Matemática. Núcleo de Computação Eletrônica. III.Título.

CDD:

IDENTIFICAÇÃO DE ESTADOS E CRUZAMENTO DE PORTAS UTILIZANDO VISÃO ROBÓTICA

Dissertação de Mestrado Submetida ao Programa de Pós-graduação em Informática do Instituto de Matemática / Núcleo de Computação Eletrônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Informática.

Aprovada em

_____

Profª. Eliana Prado Lopes Aude, Ph.D.
(Universidade Federal do Rio de Janeiro)

_____

Prof. Ernesto Prado Lopes, Ph.D.
(Universidade Federal do Rio de Janeiro)

_____

Prof. João Carlos Machado, Ph.D.
(Universidade Federal do Rio de Janeiro)

_____

Prof. Mauro Antonio Rincon, Ph.D.
(Universidade Federal do Rio de Janeiro)

RIO DE JANEIRO

2005

Com amor aos meus pais
Joviano e Regina
por todo apoio, carinho e dedicação.
A realização deste sonho só foi possível
graças ao sacrifício de vocês.

Agradecimentos

À CAPES, Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de estudos fornecida durante dois anos do curso de mestrado.

Ao NCE-UFRJ, Núcleo de Computação Eletrônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que forneceu toda sua estrutura para o desenvolvimento desta dissertação.

Aos amigos e integrantes do grupo CONTROLAB, Eliana Aude, Ernesto Lopes, Henrique Serdeira, Mário Martins, Júlio Silveira, Flavio Signorelli, Marcelo Signorelli e Marcela Souto por todo o apoio dado durante estes anos de mestrado.

Aos meus orientadores Eliana Prado Lopes Aude, Ernesto Prado Lopes e Mário Ferreira Martins que souberam orientar, principalmente nos momentos mais difíceis e incertos e também por terem ajudado a tornar o desenvolvimento deste trabalho muito prazeroso.

Às amigas da biblioteca do NCE Maria Silveira, Raquel Porto, Luiza Pereira, Selma Mendes, Silma, por toda a ajuda e dedicação.

À Tia Deise, Zezé e Regina por toda a simpatia e companheirismo demonstrado em todos estes anos.

À Lina e Adriana que sempre estiveram dispostas a ajudar em todas as situações.

Aos amigos do curso de mestrado Leando Caetano, Austeclynio Pereira, Luciano Soares, Macário Costa, Airam Marques, Christiane Costa e doutorado Eugenio Silva, Raquel Defelippo, Jorge Gavídia por todos estes anos de companheirismo e luta.

Aos professores do mestrado Oswaldo Vernet, Adriano Cruz e Eduardo Silva pela grande contribuição ao meu crescimento pessoal e acadêmico.

Ao meu melhor amigo Ronildo Evangelista

Aos meus pais Joviano Aguiar Neto e Maria Regina Soares de Aguiar pessoas de poucas palavras mas que souberam demonstrar todo seu amor de outras formas.

À minha querida irmã Regiane Soares de Aguiar pelo carinho e incentivo em todos os momentos de minha vida.

À minha amante e esposa Rosana Fernandes da Silva Aguiar pelo amor e cumplicidade incondicionais.

E por último, mas não menos importante, agradecimento especial ao grande amigo Ely Maranhão. Sem cujos grandes ensinamentos este trabalho teria se tornado muito mais difícil.

RESUMO

IDENTIFICAÇÃO DE ESTADOS E CRUZAMENTO DE PORTAS UTILIZANDO VISÃO ROBÓTICA

Cristiano Soares de Aguiar

Orientadores: Eliana Prado Lopes Aude
Ernesto Prado Lopes

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Informática, Instituto de Matemática e Núcleo de Computação Eletrônica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Informática.

Este trabalho descreve um sistema para reconhecimento de estados de portas e auto localização do robô utilizando visão robótica, baseado apenas em informações visuais geométricas extraídas do próprio ambiente. A abordagem não impõe nenhum conhecimento a priori a respeito da localização, cor ou mesmo abertura da porta. Este trabalho é parte integrante do projeto CONTROLAB desenvolvido no Núcleo de Computação Eletrônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (NCE/UFRJ).

Inicialmente descrevemos as características que definem a porta, ou seja, sua assinatura, a fim de elaborarmos um modelo simplificado para reconhecimento e classificação de estados. Descrevemos também um modelo utilizado para localização relativa do robô. Em seguida descrevemos o algoritmo utilizado para classificar o estado da porta e medida de sua abertura.

Finalmente, apresentamos alguns resultados experimentais e conclusões a respeito dos resultados obtidos. Propostas para trabalhos futuros são apresentadas no final desta dissertação.

ABSTRACT

DOOR CROSSING AND STATE IDENTIFICATION USING ROBÔIC VISION

Cristiano Soares de Aguiar

Orientador: Eliana Prado Lopes Aude

Ernesto Prado Lopes

Abstract da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Informática, Instituto de Matemática e Núcleo de Computação Eletrônica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Informática.

This work describes a system for door state recognition and autonomous location of the robot using robotic vision, just based on geometric visual information extracted from the environment. The approach doesn't require any previous information about the location, color or even door aperture. This work is integral part of the project CONTROLAB developed in the Núcleo de Computação Eletrônica at Federal University of Rio de Janeiro (NCE/UFRJ).

Initially, we describe the characteristics that define the door, in other words, its signature, in order to elaborate a simplified model for recognition and classification of states. We also describe a model used for relative location of the robot. Next, we describe the algorithm used to classify the state of the door and measure its opening.

Finally, we present experimental results and conclusions about the obtained results.

Lista de Figuras

Figura 1.1. Metodologia utilizada para a solução do problema de reconhecimento de porta, identificação de seu estado e cálculo de sua abertura. 24
Figura 1.2. Etapas do algoritmo classificação de portas e cálculo da abertura. 25
Figura 2.1. Representação de uma imagem digital. 29
Figura 2.2. (a) imagem colorida, (b) redução de cores através do cálculo da luminância. 31
Figura 2.3. Negativo da Figura 2.2 (b). 32
Figura 2.4. Detecção de bordas em uma linha da imagem utilizando derivadas de primeira e segunda ordem. 33
Figura 2.5. Imagem i e máscara de convolução m 3x3. 34
Figura 2.6. Convolução de uma imagem com uma máscara 3x3. 35
Figura 2.7. Operador Sobel. Aproximação da primeira derivada. 36
Figura 2.8. Detecção de bordas de uma imagem utilizando o operador Sobel. 38
Figura 2.9. Operador Laplaceano. Aproximação da segunda derivada. 39
Figura 2.10. Detecção de bordas utilizando o operador Laplaceano. 40
Figura 2.11. Representação geométrica da Transformada de Hough. 42
Figura 2.12. Aplicação da Transformada de Hough sobre uma imagem sintética. A Figura 2.12 (a) corresponde a pontos de contorno na imagem original. A Figura 2.12 (b) corresponde a senóides geradas a partir de cada ponto de contorno da imagem original 42
Figura 2.13. (a) imagem sintética contendo 3 segmentos de reta, (b) Transformada de Hough aplicada à imagem sintética ilustrada em (a). A Figura 2.13 (b) apresenta uma particularidade da Tranformada de Houg. Observe que há 4 nuvens de pontos das quais duas estão sobre θ igual a $\pm$ 90º. Na verdade estas nuvens correspondem a mesma reta pois há uma simetria em $\theta = \pm$ 90º. 44
Figura 2.14. (a) imagem de contorno de uma porta, (b) Transformada de Hough aplicada à imagem ilustrada em (a). 45
Figura 2.15. Restauração das retas suporte do contorno da porta em uma imagem real. 46
Figura 2.16. Imagem de contorno contendo algumas janelas de covariância, ilustrando as principais situações. Esta figura apresenta 5 janelas destacando algumas situações para a distribuição dos pontos de contorno da imagem. 49
Figura 2.17. Aplicação da janela de covariância sobre uma reta horizontal e diagonal. Existem 3 janelas de covariância na imagem, à esquerda da porta (1), no meio da porta (2), e à direita da porta (3). Cada janela de covariância é dividida em duas subjanelas adjacentes. Os coeficientes de índice 1: $\mu 1_x$, $\mu 1_y$, $\sigma 1_x^2$, $\sigma 1_y^2$, r1 e $\theta 1$ correspondem à subjanela esquerda e os coeficientes de índice 2: $\mu 2_x$, $\mu 2_y$, $\sigma 2_x^2$, $\sigma 2_y^2$, r2 e $\theta 2$ correspondem à subjanela direita.
diagonal. 51
Figura 3.1. Exemplos de portas reais em seus diferentes estados: fechada, entreaberta e aberta, respectivamente. 54
Figura 3.2. Modelo de porta baseado em características geométricas. 55
Figura 3.3. Modelo geométrico de uma porta fechada. 56
Figura 3.4. Transformada de Hough relativa à Figura 3.3. Observe que nesta figura há duas densas nuvens de pontos em θ igual a 90º. Estas nuvens correspondem ao portal da porta. 57

Figura 3.5. Restauração das retas suporte do contorno da porta. 58
Figura 3.6. Imagem de contorno de uma porta real. 59
Figura 3.7. Tranformada de Hough aplicada à Figura 3.6. 60
Figura 3.8. Restauração das retas suporte do contorno da porta em uma imagem real. 60
Figura 3.9. Posições relativas do robô em relação à parede. (a) robô à esquerda em relação à parede, (b) robô perpendicular à parede, (c) robô à direita em relação à parede. 62
Figura 3.10. (a) Robô à esquerda em relação à parede, (b) características visuais observadas por um inclinado à esquerda em relação à parede. 62
Figura 3.11. Janela de covariância aplicada à uma imagem sintética. 64
Figura 3.12. (a) Robô perpendicular à parede, (b) características visuais observadas por um robô perpendicular à parede. 65
Figura 3.13. Imagem sintética representando as características geométricas de uma porta fechada, observadas por um robô perpendicular à parede. 65
Figura 3.14. (a) Robô à direita em relação à parede, (b) características visuais de uma porta fechada observadas por um robô à direita em relação à parede. 67
Figura 3.15. Aplicação da janela de covariância à uma imagem sintética. 67
Figura 4.1. (a) imagem de contorno de uma porta, (b) modelo simplificado contendo apenas as retas verticais, a base da porta e o rodapé. 70
Figura 4.2. Desenho da reta virtual paralela ao rodapé. 72
Figura 4.3. Projeções perpendiculares das bases das retas verticais na reta virtual. 72
Figura 4.4. Robô perpendicular em relação à parede. (a) porta fechada, (b) porta entreaberta, (c) porta aberta, (d) porta totalmente aberta. 74
Figura 4.5. Robô inclinado à esquerda em relação à parede. (a) porta fechada, (b) porta entreaberta, (c) porta aberta, (d) porta totalmente aberta. 75
Figura 4.6. Robô inclinado à direita em relação à parede. (a) porta fechada, (b) porta entreaberta, (c) porta aberta, (d) porta totalmente aberta. 76
Figura 4.7. Modelo de uma porta entreaberta utilizado no cálculo de sua abertura. 77
Figura 4.8. (a) dimensões reais de uma porta entreaberta, (b) dimensões em pixel de uma porta entreaberta. 79
Figura 5.1. imagem de uma porta fechada capturada pelo robô perpendicular à parede, (b) imagem de contorno da porta - em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta. 81
Figura 5.2. Porta fechada - identificação do rodapé. 82
Figura 5.3. imagem de uma porta entreaberta capturada pelo robô perpendicular à parede, (b) imagem de contorno da porta - em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta. 84
Figura 5.4 porta entreaberta - identificação do rodapé. 85
Figura 5.5. Desenho da reta virtual paralela ao rodapé - (a) imagem real, (b) modelo simplificado. 86
Figura 5.6. imagem de uma porta aberta capturada pelo robô perpendicular à parede, (b) imagem de contorno da porta - em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta. 88
Figura 5.7. Porta aberta - identificação do rodapé. 89
Figura 5.8. Desenho da reta virtual paralela ao rodapé - (a) imagem real, (b) modelo simplificado. 90

Figura 5.9. imagem de uma porta totalmente aberta capturada pelo robô perpendicular à parede, (b) imagem de contorno da porta - em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta. 92
Figura 5.10. Porta totalmente aberta - identificação do rodapé. 93
Figura 5.11. imagem de uma porta fechada capturada pelo robô inclinado à esquerda em relação à parede, (b) imagem de contorno da porta - em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta..... 95
Figura 5.12. Porta fechada - identificação do rodapé. 96
Figura 5.13. imagem de uma porta fechada capturada pelo robô inclinado à esquerda em relação à parede, (b) imagem de contorno da porta - em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta..... 98
Figura 5.14. Porta entreaberta - identificação do rodapé. 99
Figura 5.15. Desenho da reta virtual paralela ao rodapé - (a) imagem real, (b) modelo simplificado. 101
Figura 5.16. imagem de uma porta fechada capturada pelo robô inclinado à esquerda em relação à parede, (b) imagem de contorno da porta - em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta..... 103
Figura 5.17 Porta aberta - identificação do rodapé. 104
Figura 5.18. Desenho da reta virtual paralela ao rodapé - (a) imagem real, (b) modelo simplificado. 105
Figura 5.19. imagem de uma porta fechada capturada pelo robô inclinado à esquerda em relação à parede, (b) imagem de contorno da porta - em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta..... 107
Figura 5.20. Porta totalmente aberta - identificação do rodapé. 108
Figura 5.21. imagem de uma porta fechada capturada pelo robô inclinado à direita em relação à parede, (b) imagem de contorno da porta - em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta..... 110
Figura 5.22. Porta fechada - identificação do rodapé. 111
Figura 5.23. imagem de uma porta fechada capturada pelo robô inclinado à direita em relação à parede, (b) imagem de contorno da porta - em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta..... 113
Figura 5.24. Porta entreaberta - identificação do rodapé. 114
Figura 5.25. Desenho da reta virtual paralela ao rodapé - (a) imagem real, (b) modelo simplificado. 115
Figura 5.26. imagem de uma porta fechada capturada pelo robô inclinado à direita em relação à parede, (b) imagem de contorno da porta - em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta..... 117
Figura 5.27. Porta aberta - identificação do rodapé. 118
Figura 5.28. Desenho da reta virtual paralela ao rodapé - (a) imagem real, (b) modelo simplificado. 119
Figura 5.29. imagem de uma porta fechada capturada pelo robô inclinado à direita em relação à parede, (b) imagem de contorno da porta - em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta..... 121
Figura 5.30. Porta totalmente aberta - identificação do rodapé. 122

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Parâmetros das janelas de covariância ilustradas na Figura 2.17. 51
Tabela 3.1. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 3.4..... 57
Tabela 3.2. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 3.7..... 60
Tabela 3.3. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 3.6..... 61
Tabela 3.4. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 3.10 (b). 64
Tabela 3.5. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 3.11. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta. 64
Tabela 3.6. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 3.12 (b). 66
Tabela 3.7. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 3.13. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta. 66
Tabela 3.8. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 3.14 (b). 68
Tabela 3.9. Parametros das janelas de covariância referentes à Figura 3.15. 68
Tabela 4.1. Parametros da janela de covariância referentes à Figura 4.1 (a). 71
Tabela 4.2. Coordenadas das bases das .arestas verticais referentes à Figura 4.1 (a). 71
Tabela 4.3. Coordenadas das projeções das bases das retas verticais na reta virtual referentes à Figura 4.3. 73
Tabela 5.1. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.1 (c). 81
Tabela 5.2. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.2. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta. 82
Tabela 5.3. Coordenadas da base das arestas verticais referentes à Figura 5.2. 83
Tabela 5.4. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.3 (c). 84
Tabela 5.5. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.4. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta. 85
Tabela 5.6. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 5.4. 85
Tabela 5.7. Coordenadas das projeções das bases das retas verticais na reta virtual referentes à Figura 5.5.. 86
Tabela 5.8. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.6 (c).. 88
Tabela 5.9. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.7. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação

às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta.. 89
Tabela 5.10. Coordenadas da base das arestas verticais referentes à Figura 5.7. 90
Tabela 5.11. Coordenadas das projeções das bases das retas verticais na reta virtual referentes à Figura 5.8.. 91
Tabela 5.12. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.9 (c). 92
Tabela 5.13. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.10. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta.. 93
Tabela 5.14. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 5.10. 94
Tabela 5.15. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.11 (c).. 95
Tabela 5.16. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.12. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta..... 96
Tabela 5.17. Coordenadas da base das arestas verticais referentes à Figura 5.12. 97
Tabela 5.18. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.13 (c). 99
Tabela 5.19. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.14. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta. 100
Tabela 5.20. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 5.14. 100
Tabela 5.21. Coordenadas das projeções das bases das retas verticais na reta virtual referentes à Figura 5.15. 101
Tabela 5.22. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.16 (c). 103
Tabela 5.23. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.17. 104
Tabela 5.24. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 5.17. 104
Tabela 5.25. Coordenadas das projeções das bases das retas verticais na reta virtual referentes à Figura 5.18. 105
Tabela 5.26. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.19 (c). 107
Tabela 5.27. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.20. 108
Tabela 5.28. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 5.20. 108
Tabela 5.29. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.21 (c).. 110
Tabela 5.30.
Tabela 5.30. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.22. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta..... 111
Tabela 5.31. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 5.22. 111
Tabela 5.32. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.23 (c).. 113
Tabela 5.33. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.24. 114
Tabela 5.34. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 5.24. 114

Tabela 5.35. Coordenadas das projeções das bases das retas verticais na reta virtual referentes à Figura 5.25... 115
Tabela 5.36. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.26 (c).. 117
Tabela 5.37. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.27..... 118
Tabela 5.38. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 5.27..... 118
Tabela 5.39. Coordenadas das projeções das bases das retas verticais na reta virtual referentes à Figura 5.28.. 119
Tabela 5.40. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.29 (c). 121
Tabela 5.41. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.30..... 122
Tabela 5.42. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura30.....122

Sumário

CAPÍTULO 1 18

INTRODUÇÃO 18

1.1 Objetivo 19
1.2 Trabalhos relacionados 20
1.3 Algoritmo Proposto 23
1.4 Organização da dissertação 27

CAPÍTULO 2 28

PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS 28

2.1 Conceitos Iniciais 28
2.2 Detecção de bordas dos objetos 32
2.3 Convolução bidimensional 34
2.4 Detecção de bordas usando o operador Sobel 35
2.5 Detecção de bordas usando o operador Laplaciano 38
2.6 Transformada de Hough 40
2.7 Matriz de Covariância 46

CAPÍTULO 3 52

DEFINIÇÃO DAS ASSINATURAS UTILIZADAS PELO SISTEMA DE RECONHECIMENTO DO ESTADO DA PORTA 52

3.1 Identificação de portas 52
3.1.1 Localização das arestas verticais 55
3.2 Identificação da posição relativa do robô 61

CAPÍTULO 4 69

ALGORITMO DE RECONHECIMENTO DO ESTADO DA PORTA E MEDIDA DE SUA ABERTURA 69

4.1 Reconhecimento do estado da porta 69
4.2 Núcleo do Algoritmo para reconhecimento do estado da porta 70
4.3 Cálculo da Abertura da Porta 76

CAPÍTULO 5 80

RESULTADO EXPERIMENTAIS 80

5.1. Robô perpendicular à parede 80
5.1.1. Porta fechada 80
5.1.2. Porta entreaberta 83
5.1.3. Porta aberta 87
5.1.4. Porta totalmente aberta 91
5.2. Robô à esquerda 94
5.2.1. Porta fechada 94
5.2.2. Porta entreaberta 97
5.2.3. Porta aberta 102
5.2.4. Porta totalmente aberta 106

5.2. Robô à direita 109
5.3.1. Porta fechada 109
5.3.2. Porta entreaberta 112
5.3.3. Porta aberta 116
5.4.4. Porta totalmente aberta 120
CAPÍTULO 6 124
CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 134

1

Introdução

A robótica tem sido reconhecida como a tecnologia do futuro e mesmo hoje as pesquisas nesta área têm causado grande impacto em nossas vidas. Os robôs têm ocupado lugar de destaque em atividades que eram essencialmente humanas, principalmente aquelas que se caracterizam por serem extremamente repetitivas, de grande precisão ou até mesmo muito perigosas. Um dos grandes divisores de água entre a robótica do passado e a robótica do futuro, é a capacidade de "pensar" que os robôs vêm adquirindo. Aliada ao avanço tecnológico, principalmente da nanotecnologia e das técnicas de Inteligência Artificial, as pesquisas têm proporcionado o desenvolvimento de robôs cada vez menores e independentes de ações humanas, ou seja, robôs inteligentes capazes de tomar suas próprias decisões baseado em informações extraídas do ambiente.

Dentre as pesquisas na área de robótica, a robótica móvel tem recebido atenção especial, principalmente a robótica voltada à exploração de ambientes internos como casas, escritórios, bibliotecas e hospitais. Em todos estes ambientes, robôs autônomos tem se

mostrado como uma importante ferramenta para execução de tarefas. Dentre os sentidos utilizados pelo robô a fim de identificar obstáculos e reconhecer marcos de navegação, a visão recebe um destaque especial. Capaz de identificar pessoas, locais e objetos, estimar distâncias, velocidade, a visão consegue extrair informaçõpes e reproduzir do ambiente um modelo rico em detalhes. Com o objetivo de extrair informações cada vez mais precisas das imagens capturadas pelo sistema de visão do robô, diversas pesquisas têm sido realizadas a fim proporcionar à máquina características exclusivas dos seres humanos.

1.1 Objetivo

Esta dissertação tem como objetivo desenvolver um sistema de visão computacional utilizando apenas uma câmera, cuja principal finalidade é auxiliar robôs que navegam em ambientes internos, identificando alguns objetos de referência para auto localização e detecção de obstáculos.

Em particular, estamos interessados em reconhecer portas e identificar seu estado (fechado, entreaberto, aberto, totalmente aberto). Portas são objetos de grande interesse para grupos de pesquisa em robótica móvel voltada para exploração de ambientes internos, pois são objetos que aparecem em quase todos os ambientes e, freqüentemente, o robô deve atravessá-las durante o processo de navegação. Além de representarem um importante marco de referência para auto localização, as portas funcionam também como obstáculos para o robô. Uma porta fechada ou mesmo pouco aberta impede que o robô siga sua trajetória, obrigando-o a buscar um caminho alternativo. Uma porta classificada como entreaberta deve ter a dimensão de sua abertura calculada a fim de

determinar se o robô consegue ou não atravessá-la, dadas as dimensões do próprio robô. Já uma porta totalmente aberta certamente representa um marco de referência, no entanto, não oferecendo nenhum risco à navegação do robô. Deste modo, identificar portas, classificar seus estados e mensurar sua abertura é o objeto de estudo desta dissertação.

1.2 Trabalhos relacionados

Uma das tarefas essenciais para robôs que navegam em ambientes internos é determinar sua localização e uma série de trabalhos tem sido propostos neste sentido[Franz98][DeSouzas02]. Alguns dos trabalhos são baseados na utilização de mapas[Borenstein89, Borenstein91, Kim94, Kim95]. Neste caso, o robô possui um modelo do ambiente, podendo ser um modelo simplificado como a planta baixa do ambiente ou até mesmo um CAD completo. Outra abordagem para auto localização é baseada na identificação de marcos de referência [Sugihara88, Krotkov89, Christensen94, Ohya97, Ohya98, Zingaretti98]. A idéia central é indicar ao robô, direta ou indiretamente, a seqüência de marcos que ele deve encontrar durante o processo de navegação. Estes marcos podem ser elementos artificiais como códigos de barra, sensores eletromagnéticos espalhados pelo ambiente, ou mesmo elementos naturais como mesas, paredes, portas, etc.

No cenário das pesquisas em robótica móvel voltada a ambientes internos, portas têm recebido atenção especial em detrimento de sua importância em nosso cotidiano. Além de representarem um significativo marco de referência para a própria localização do robô, portas também funcionam como obstáculos a serem evitados. Diversas abordagens

voltadas para a identificação de porta e seu estado têm sido propostas por diferentes grupos de pesquisa. As soluções apresentadas para solucionar este problema podem ser classificadas em 3 grupos: identificação e reconhecimento baseado em sensores de profundidade: laser, infravermelho e ultra-som; identificação e reconhecimento utilizando apenas câmeras; identificação e reconhecimento baseado em fusão de sensores de profundidade e câmeras. A seguir será descrita a idéia central de cada uma destas soluções, referenciando os principais trabalhos na área.

Uma das abordagens dada por diversos grupos de pesquisa para o problema de identificação de portas é a utilização de sensores de profundidade: infravermelho, ultra-som, laser [Jensfelt00, Jensfelt01, Lazkano03]. Por se tratar de sensores que medem exclusivamente a distância do robô em relação aos objetos ao seu redor, a maioria das propostas utilizando unicamente este tipo de sensores contempla apenas o reconhecimento de portas abertas. Algumas soluções para distinguir portas abertas de portas fechadas utilizando apenas sonares utilizam informações adicionais, como a planta baixa do ambiente e também um sistema para identificação da própria localização [Xiang03, Xiang05] seja por odometria ou mesmo por GPS (G*lobal Positioning System*). Neste caso, dada a planta baixa do ambiente e sabendo-se que o robô está diante de uma porta, fica fácil distinguir seu estado baseado em informações de profundidade. Nenhuma das abordagens propostas utilizando sonares contempla reconhecimento de portas entreabertas e a utilização de planta baixa para localização do robô são algumas das razões que inviabilizam a utilização destas soluções para nosso caso, em particular.

O grupo de soluções para reconhecimento de portas utilizando imagens pode ser subdividido em: reconhecimento baseado em cor e reconhecimento baseado em forma. As soluções para reconhecimento baseado em cor assumem que as portas de determinado ambiente possuem cor específica e que demais objetos como paredes e piso do ambiente possuem cores diferentes. Conhecendo-se o padrão de cor das portas do ambiente, dado uma cena capturada pelo robô, o sistema de visão procura isolar na imagem apenas os objetos de determinada cor previamente definida. Em seguida o sistema descarta da imagem todos os objetos que não estão delimitados por retas verticais. Os objetos restantes na cena são classificados como portas. A grande maioria dos sistemas considera apenas portas fechadas [Kosaka95, Dulimarta96, Kundur98, Amir99, Tomono00, Raño01, Hayet02, Marek02, Martinez03, Libuda04]. Outras propostas para reconhecimento de portas baseadas em cores utilizam mapa e sonares para distinguir entre portas abertas e portas fechadas [Thrun98, Neira99].

As propostas baseadas em reconhecimento de padrões utilizando cor apresentam uma grande limitação pois as cores das portas podem variar de ambiente para ambiente. Mesmo que vários padrões de cor sejam inseridos no banco de informações do robô, o sistema continua dependente de informações alimentadas previamente. Além disso, um sistema de reconhecimento baseado em cor é muito sensível à variação da luminosidade do ambiente. Outra grande desvantagem para reconhecimento baseado em cor é o volume de informações que devem ser processadas para o reconhecimento de determinado padrão. Um volume de dados pelo menos três vezes maior do que em uma imagem em nível de cinza , dado que uma imagem colorida é composta na verdade, por três imagens, uma para cada componente de cor RGB (vermelho, verde, azul). Nenhuma

das propostas para reconhecimento de portas utilizando cor contempla o reconhecimento de portas entreabertas.

Outro grupo de soluções para identificação de portas em imagens utiliza as formas do objeto, ou seja, reconhecimento baseado em características geométricas. Mesmo que as características de forma devam ser conhecidas a priori, elas são muito mais genéricas do que informações de cor. Em nosso mundo real, portas estão muito menos susceptíveis a mudar as características de sua forma, do que seu padrão de cor ou textura.Uma série de trabalhos tem sido propostos no sentido de identificar portas utilizando suas características geométricas. A maioria das abordagens contempla apenas dois estados: portas abertas e portas fechadas [Castellanos96, Kim98, Duffy00, Stoeter00, Castellanos01, Monasterio01]. A distinção entre estes estados é realizada através de sonares. As soluções apresentadas para a identificação de portas e reconhecimento de seu estado utilizando características geométricas também não contemplam o reconhecimento de portas entreabertas.

1.3 Algoritmo Proposto

O algoritmo proposto nesta dissertação para reconhecimento de portas e classificação de seu estado procura processar e extrair características geométricas das imagens à medida que o robô caminha em sua trajetória. A metodologia utilizada neste trabalho segue as seguintes etapas: pré-processamento das imagens, extração de características, reconhecimento e interpretação e medida da abertura da porta. O diagrama da Figura 1.1 ilustra a metodologia utilizada.

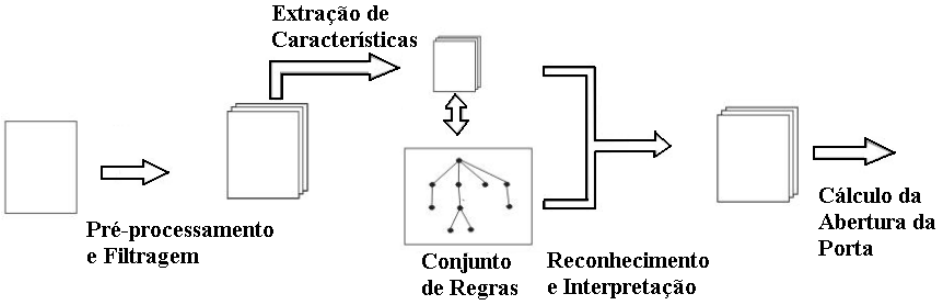


Figura 1.1. Metodologia utilizada para a solução do problema de reconhecimento de porta, identificação de seu estado e cálculo de sua abertura.

A primeira fase do algoritmo, a fase de pré-processamento, corresponde às operações de remoção de ruído e extração do contorno dos objetos da imagem; em seguida são aplicadas as ferramentas de extração de características, responsáveis por identificar as características que compõem a assinatura de nosso objeto de interesse; a próxima etapa corresponde ao reconhecimento e interpretação, ou seja, correspondente ao casamento entre as características extraídas da imagem e as características previamente definidas da porta; a fase de medida de abertura da porta, como o próprio nome já diz, diz respeito ao cálculo da abertura da porta no sentido de verificar se é possível que o robô atravesse a porta de forma segura, ou seja, sem colisão. Um diagrama detalhado do algoritmo de acompanhamento de cena, extração de características e classificação de portas e medida da abertura é apresentado na Figura 1.2.

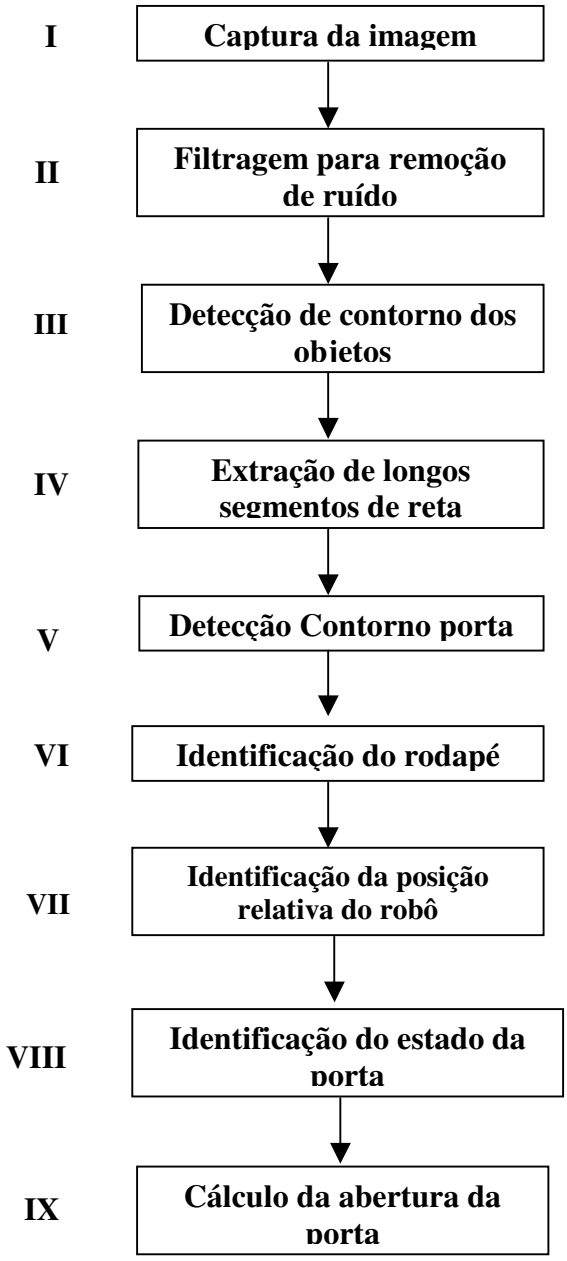


Figura 1.2. Etapas do algoritmo classificação de portas e cálculo da abertura.

O algoritmo proposto nesta dissertação realiza captura de cenas em tempo real e executa uma série de técnicas de processamento de imagem e reconhecimento de padrões sobre a imagem com o objetivo de identificar portas e classificar seus estados. Este pode ser listado da seguinte forma:

I. **Captura da imagem:** captura das imagens através do sistema de visão monocular;

II. **Filtragem para remoção de ruído:** nesta etapa são aplicados filtros para remoção de ruídos de diferentes natureza presentes na imagem: imperfeição do sensor, irregularidades na textura, etc.

III. **Filtragem e detecção de contorno:** são apresentados filtros para detecção de contorno dos objetos da cena. Nesta fase são eliminadas informações de cor e textura. São enfatizadas apenas as características geométricas dos objetos.

IV. **Extração de longos segmentos de reta:** são apresentadas técnicas de extração de linhas retas: principais características que definem a porta, nosso objeto de interesse. Esta etapa não consegue identificar portas, apenas identifica as características candidatas à definirem o contorno da porta;

V. **Detecção do contorno da porta:** dos candidatos à contorno da porta, são identificadas as características que de fato a identificam;

VI. **Identificação do rodapé:** o conhecimento da posição relativa do robô é extremamente importante para classificarmos corretamente o estado de abertura da porta;

VII. **Identificação da posição relativa do robô:** descrevemos a técnica utilizada para identificar a posição relativa do robô em relação à parede, baseado no ângulo de inclinação do rodapé;

VIII. **Identificação do estado da porta:** a identificação do estado da porta é feita através da aplicação de um conjunto de regras definidas nesta dissertação;

IX. **Cálculo da abertura da porta:** o cálculo de abertura da porta é feito utilizando medidas extraídas da própria imagem. Através do cálculo de abertura da porta é possível identificar se o robô consegue ou não atravessá-la de forma segura.

1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. O segundo capítulo apresenta o suporte teórico necessário à compreensão das técnicas de processamento de imagens e visão computacional utilizados no trabalho. O terceiro capítulo descreve as técnicas utilizadas para extração das principais características nas imagens capturadas pelo robô para reconhecimento de portas e identificação da posição relativa do robô em relação à parede. O quarto capítulo apresenta o algoritmo para reconhecimento do estado da porta e medida da sua abertura. O quinto capítulo apresenta alguns dos resultados experimentais encontrados. O sexto capítulo descreve algumas conclusões acerca do trabalho desenvolvido e também algumas propostas para trabalhos futuros.

2

Processamento de Imagens Digitais

Este capítulo aborda os principais conceitos iniciais relacionados a processamento de imagens digitais, ferramenta fundamental para a compreensão do trabalho desenvolvido nesta dissertação. Em particular, este capítulo abrange do item I ao item IV da descrição do algoritmo ilustrado na Figura 1.2. As etapas ali descritas correspondem ao processamento de baixo nível e nível intermediários, responsáveis por operações locais para tratamento de imagens e extração de características primárias.

2.1 Conceitos Iniciais

Imagens digitais são os objetos de estudo desta dissertação. Sobre elas são aplicados algoritmos de pré-processamento, extração de características e análise. As imagens utilizadas neste trabalho são em nível de cinza (preto e branco) que podem ser compreendidas como matrizes bi-dimensionais, onde cada célula da matriz, conhecida como pixel, possui um e apenas um valor inteiro. De uma forma mais geral uma imagem digital I pode ser descrita como sendo uma função:

$$I : D \subset \Re^2 \rightarrow \Re^n$$

onde D é o domínio da imagem, em geral é um retângulo limitado e discreto, e n é um número inteiro, maior que zero, correspondente ao número de valores escalares utilizados para representar as informações de cor para um ponto qualquer da imagem.

Na prática, cada um destes valores escalares é quantizado em um certo número de bits. A situação mais freqüente é utilizar um byte (oito bits) para cada valor escalar. Logo, cada pixel da imagem pode conter um valor inteiro variando de 0 a 255.

A Figura 2.1 ilustra uma típica imagem monocromática. As resoluções horizontal e vertical são denotadas por Δw e Δh, respectivamente, e as dimensões por $w\Delta u$ e $h\Delta v$. Os incrementos Δu e Δv são tomados como iguais a 1. Conceitualmente, cada ponto da imagem (*pixel*) é localizado pelo par ordenado (u, v), e sua informação de cor é definida por i_{uv}.

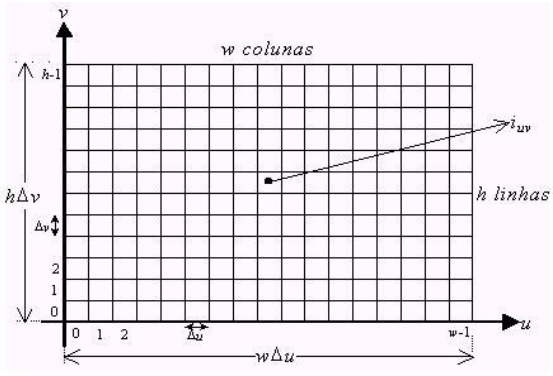


Figura 2.1. Representação de uma imagem digital.

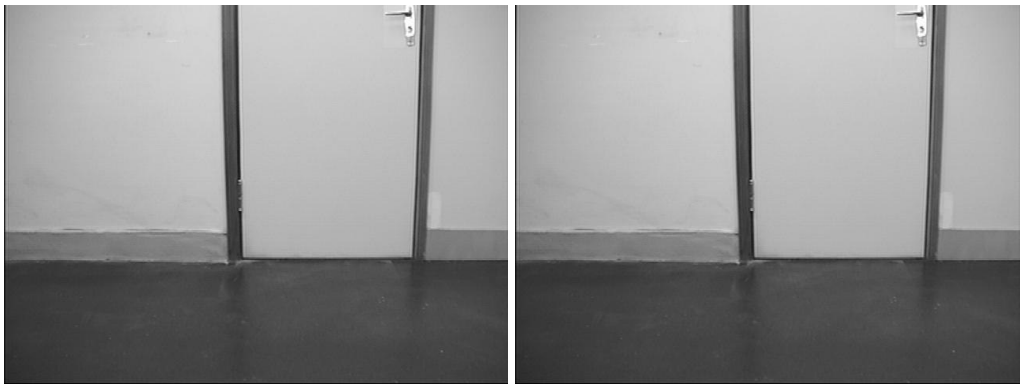
Cada equipamento de captura de imagens pode possuir uma forma particular para representá-las. Imagens do tipo monocromáticas são, em geral, representadas como uma matriz, conforme descrito anteriormente. Imagens coloridas são ligeiramente diferentes, principalmente pela quantidade de cores que elas devem representar e uma forma comum de representá-las é decompor a imagem em componentes de cores primárias: vermelho (R), verde (G) e azul (B). Neste caso, existem três imagens na memória, uma para cada componente de cor.

As imagens capturadas para serem utilizadas neste trabalho são originalmente coloridas e representadas em termos de suas componentes RGB. No entanto o modelo proposto para reconhecimento de portas não utiliza informações de cor e textura, logo estas informações capturadas pela câmera podem ser eliminadas. A grande vantagem em se eliminarem informações de cor está na reduzição da quantidade de dados para processamento. Uma das formas mais simples para se transformar uma imagem colorida em monocromática é eliminar dois canais de cores, em geral, o vermelho e o azul. Outra forma é através do cálculo da luminância através da Equação 2.1[**Gonzalez93, Szenberg01**]:

$$\mathbf{L} = 0.299\mathbf{R} + 0.587\mathbf{G} + 0.114\mathbf{B} \qquad \textbf{(2.1)}$$

A técnica de descarte de canais de cores é muito rápida, no entanto, algumas informações importantes podem ser eliminadas. Em alguns casos a conversão de imagens coloridas em monocromáticas através do cálculo da luminância apresenta um melhor resultado. Utilizamos neste trabalho redução de cores através do cálculo de

luminância. A Figura 2.2 (a) ilustra uma imagem colorida capturada pela câmera do robô e a Figura 2.2 (b) ilustra o resultado da redução de cores utilizando o cálculo da luminância.



(a) **(b)**

Figura 2.2. (a) imagem colorida, (b) redução de cores de uma imagem digital através do cálculo da luminância.

Uma das operações muito utilizadas neste trabalho é a extração do negativo de uma imagem. Esta operação nada mais é do que se inverter os bits dos pixels da imagem. Para uma imagem em níveis de cinza quantizada em um byte por pixel (valores de 0 à 255), o negativo é dado por:

$$\mathbf{N} = 255 - \mathbf{I} \qquad (2.2)$$

Na prática, o resultado desta operação é a inversão das cores dos pixels de uma imagem, neste caso, os pixels brancos ficam pretos e vice versa. Esta operação é muito utilizada principalmente no sentido de gerar imagens mais nítidas ao olho humano em determinados casos. A Figura 2.3 ilustra o negativo da Figura 2.2 (b).

Figura 2.3. Negativo da Figura 2.2 (b)

2.2 Detecção de bordas dos objetos

Para alcançarmos a etapa de reconhecimento de objetos através de suas formas geométricas é necessário delimitarmos inicialmente as bordas dos objetos em questão, técnica conhecida como detecção de contornos, bordas ou arestas[Gonzalez93].

Existem inúmeras técnicas para detecção de bordas propostas na literatura, dentre elas podemos citar: Sobel, Prewitt, Canny, Laplaciano, Laplaciano da Gaussiana (LoG)[Umbaugh98], cujos métodos são baseados na descontinuidade dos valores de nível de cinza da imagem e a maioria utiliza derivadas de primeira ou segunda ordem[Gomes94]. A Figura 2.4 ilustra o conceito da derivada em uma imagem sintética. As derivadas primeira e segunda são aplicadas a apenas uma linha horizontal da imagem, mas o mesmo conceito pode ser aplicado também a uma linha vertical. As equações são mostradas na Figura 2.4.

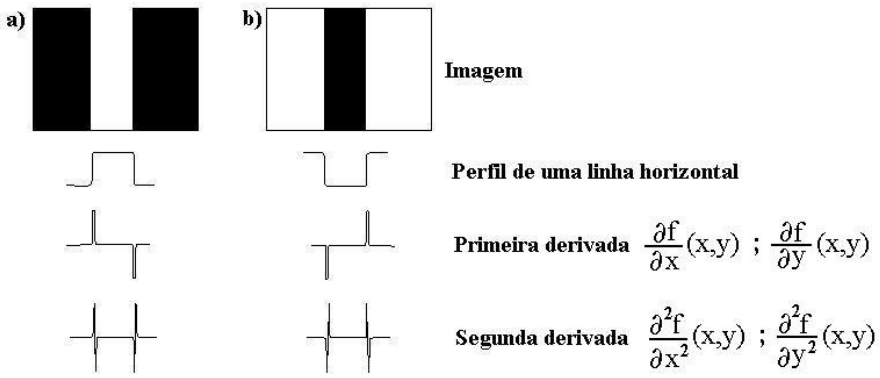


Figura 2.4. Detecção de bordas em uma linha da imagem utilizando derivadas de primeira e segunda ordem.

Para fins práticos, são utilizadas aproximações discretas destas derivadas, uma vez que as imagens no computador são discretas e não contínuas. Implementações digitais para estas derivadas podem ser feitas de diversas maneiras[Fausgera96;Gomes94]. Uma possível aproximação para estas derivadas pode ser implementada utilizando a fórmula de Taylor[Gomes94]:

$$\partial f/\partial x(x,y) = \Delta_x f(x,y) = f(x+1,y) - f(x,y) \quad \textbf{(2.3)}$$

$$\partial f/\partial y(x,y) = \Delta_y f(x,y) = f(x,y+1) - f(x,y) \quad \textbf{(2.4)}$$

$$(\partial^2 f/\partial x^2) f(x,y) = \Delta_x(\Delta_x f) = f(x+2,y) - 2f(x+1,y) + f(x,y) \quad \textbf{(2.5)}$$

$$(\partial^2 f/\partial y^2) f(x,y) = \Delta_y(\Delta_y f) = f(x,y+2) - 2f(x,y+1) + f(x,y) \quad \textbf{(2.6)}$$

As implementações das derivadas discretas podem ser realizadas utilizando máscaras de convolução bidimensional[Gomes94].

2.3 Convolução bidimensional

Para realizarmos uma operação de convolução bidimensional em uma imagem, precisamos escolher uma vizinhança em torno de um ponto (x,y) da mesma. Em geral, esta vizinhança é escolhida utilizando-se uma sub-imagem (máscara) quadrada, centrada no ponto (x,y) da imagem. Observe a Figura 2.5.

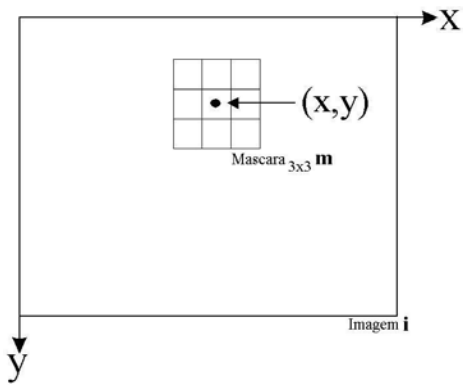


Figura 2.5. Imagem **i** e máscara de convolução **m** $_{3x3}$.

Realizar a operação de convolução no pixel de coordenadas (x,y), consiste em posicionar o centro da máscara (0,0) sobre o pixel (x,y) da imagem, multiplicar os elementos correspondentes na máscara e na imagem, somar os resultados da multiplicação e então guardar o resultado final na posição (x,y) da nova imagem[Gomes94].

A operação de convolução sobre a imagem é realizada movendo a máscara pixel a pixel por toda ela, iniciando, por exemplo, no canto superior desta. Para cada ponto da imagem são realizadas então as operações de multiplicação e soma e então é gerada uma nova imagem com as mesmas dimensões da original. A Figura 2.6 ilustra geometricamente a operação de convolução.

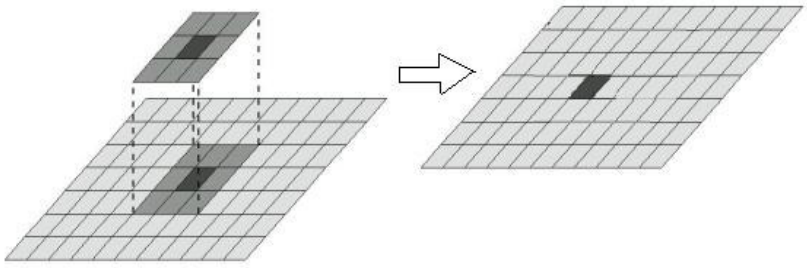


Figura 2.6. Convolução de uma imagem com uma máscara 3x3.

Alguns dos principais métodos para extração de contorno de objetos utiliza máscaras de convolução para implementar derivadas de primeira ou segunda ordem. Neste trabalho implementamos dois dos principais métodos: Operador de Sobel e Laplaciano.

2.4 Detecção de bordas usando o operador Sobel

O operador Sobel [Umbaugh98] utilizado para detecção de bordas em uma imagem trabalha com uma aproximação discreta da primeira derivada dos valores dos pixels de uma imagem. Em particular, para cada ponto da imagem, são calculadas duas derivadas: uma em relação ao eixo x (para detectar bordas verticais) e outra em relação ao eixo y (para detectar bordas horizontais). Depois de calculadas as derivadas para cada ponto da imagem, é definido o vetor gradiente *f* nas coordenadas (x,y) dado por:

$$\nabla f = [\partial f/\partial x \;\; \partial f/\partial y]^T \qquad (2.7)$$

Para o cálculo do valor da descontinuidade no ponto (x,y) da imagem, é utilizada a magnitude do vetor gradiente, este valor indica o nível de descontinuidade do pixel e seu vizinho. A magnitude do vetor gradiente é definida pela Equação 2.8.

$$|\nabla f| = mag(\nabla f) = [(\partial f/\partial x)^2 + (\partial f/\partial y)^2]^{1/2} \qquad (2.8)$$

O operador Sobel aproxima o cálculo das derivadas de primeira ordem em relação ao eixo x e y através do método de diferenças finitas utilizando duas máscaras de convolução de dimensão 3x3[Gonzalez93]. A Figura 2.7 ilustra esta aproximação.

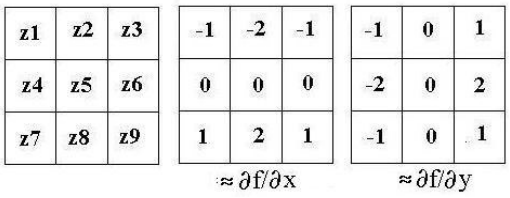


Figura 2.7. Operador Sobel. Aproximação da primeira derivada.

onde os módulos das derivadas podem ser aproximados por:

$$|\partial f/\partial x| \approx |(z7 + 2z8 + z9) - (z1 + 2z2 + z3)| \qquad (2.9)$$

$$|\partial f/\partial y| \approx |(z3 + 2z6 + z9) - (z1 + 2z4 + z7)| \qquad (2.10)$$

$$|\nabla f| \approx |\partial f/\partial x + \partial f/\partial y| \qquad (2.11)$$

Para cada uma das máscaras que aproximam as derivadas mostradas na Figura 2.7, realizamos a operação de convolução com a imagem original. Obtemos assim duas imagens cujos resultados são somados na tentativa de se obter uma aproximação da magnitude do vetor gradiente. Segue abaixo um pseudocódigo que ilustra o cálculo da operação de convolução sobre uma imagem:

```
/* calculo do operador sobel sobre uma imagem. */
para (y = 0; y < Y_MAX; y = y + 1)
    {
     para (x = 0; x = x < X_MAX; x = x + 1)
          {
           gx = ((-1)*imagem[x-1][y-1] + (-2)*imagem[x][y-1] + _
                  (-1)*imagem[x+1][y-1])) - _
                ((1)*imagem[x-1][y+1] + (2)*imagem[x][y+1] + _
                  (1)*imagem[x+1][y+1]);

           gy = ((1)*imagem[x-1][y-1] + (2)*imagem[x-1][y] + _
                  (1)*imagem[x-1][y+1]) - ((-1)*imagem[x+1][y-1] + _
                  (-2)*imagem[x+1][y] + (-1)*imagem[x+1][y+1]);

           imagem_bordas[x][y] = abs(gx) + abs(gy);
           }
     }
```

Como resultado da operação de convolução temos uma imagem de mesma dimensão da original cujo conteúdo são as bordas dos objetos. A Figura 2.8 ilustra o resultado da convolução do operador de Sobel com a imagem real ilustrada na Figura 2.2 (b).

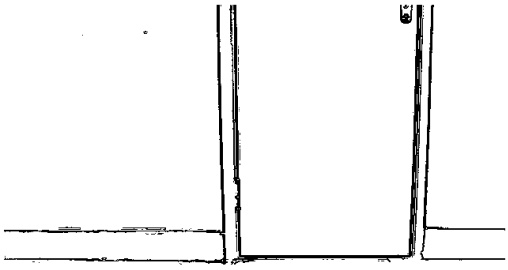


Figura 2.8. Detecção de bordas de uma imagem utilizando o operador Sobel.

2.5 Detecção de bordas usando o operador Laplaciano

O operador Laplaciano[Gonzalez93] também utilizado para detecção de bordas em uma imagem aproxima a derivada segunda dos valores dos pixels de uma imagem. O laplaciano de uma função bidimensional f(x,y) é definido pela Equação 2.12.

$$\nabla^2 f = \partial^2 f/\partial^2 x + \partial^2 f/\partial^2 y \qquad \textbf{(2.12)}$$

Uma aproximação discreta para o operador Laplaciano pode ser implementada de diversas maneiras. Uma das formas de implementá-lo é utilizando uma máscara de convolução de dimensão 3x3[Gonzalez93]. A Figura 2.9 ilustra uma das possíveis máscaras de convolução utilizadas na implementação do Laplaciano, calculada usando 2.5 e 2.6 como segue:

$$\nabla^2 f(x+1, y+1) = \partial^2 f/\partial^2 x(x+1, y+1) + \partial^2 f/\partial^2 y(x+1, y+1) = \qquad \textbf{(2.13)}$$

$$[f(x+2, y+1) + f(x, y+1 + f(x+1,y+2) + f(x+1,y) - 4f(x+1,y+1)] \quad \textbf{(2.14)}$$

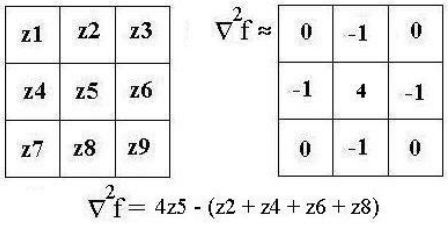


Figura 2.9. Operador Laplaciano. Aproximação da segunda derivada.

O Laplaciano é um operador que apresenta valores "altos" na transição de intensidade do nível de cinza de uma imagem e apresenta valor nulo sempre que um pixel tiver o mesmo valor de seus vizinhos. Uma exigência para a definição dos coeficientes da máscara de convolução é que o coeficiente associado com o pixel central seja positivo e os outros pixels externos sejam negativos, uma vez que o laplaciano é uma derivada, a soma dos coeficientes tem que ser nula[Gonzalez93].

A máscara mostrada na Figura 2.9 é então convoluída com a imagem com o objetivo de extrair as bordas dos objetos. Segue abaixo um pseudocódigo que ilustra o cálculo da operação de convolução do operador Laplaciano com uma imagem.

```
/* calculo do operador Laplaciano sobre uma imagem. */
para (y = 0; y < Y_MAX; y = y + 1)
     {
```

```
      para (x = 0; x = x < X_MAX; x = x + 1)
            {
             g = (4)*imagem[x][y] - (imagem[x-1][y] + imagem[x+1][y] +
_
                  imagem[x][y-1] + imagem[x][y+1]);

             imagem_bordas[x][y] = g;
            }
     }
```

Como resultado da operação de convolução da imagem com o operador Laplaciano temos uma outra imagem de mesma dimensão da original cujo conteúdo são as bordas dos objetos que compõem a cena. A Figura 2.10 ilustra o resultado da convolução entre o operador Laplaciano ilustrado na Figura 2.9 e a imagem ilustrada na Figura 2.2 (b).

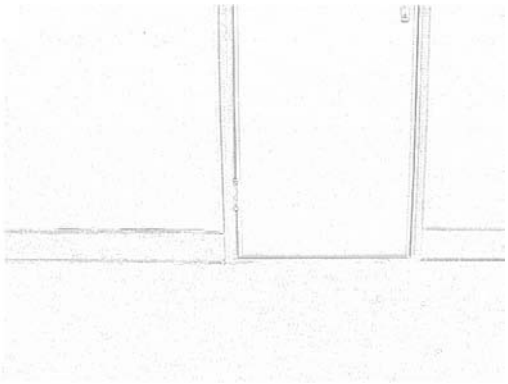


Figura 2.10. Detecção de bordas utilizando o operador Laplaciano.

2.6 Transformada de Hough

A Transformada de Hough[Umbaugh98] é uma das principais ferramentas matemáticas utilizadas para extrair linhas retas de uma imagem. Ela mapeia os pontos de uma curva

paramétrica de uma imagem (plano cartesiano), em parâmetros de um espaço conhecido como Mapa de Hough. A grande vantagem da Transformada de Hough para detecção de linhas retas é que ela condensa todos os pontos contidos em uma linha reta em apenas um ponto do Mapa de Hough. Desta forma, a busca por determinadas linhas retas no Mapa de Hough se resume a identificar determinadas coordenadas de alguns pontos, reduzindo-se assim o espaço de busca. Além disso, a Transformada de Hough consegue identificar também retas que contenham descontinuidades. O funcionamento da Transformada de Hough é descrito a seguir.

Dado um conjunto de pontos no plano da imagem, a Transformada de Hough mapeia cada um dos pontos do domínio x, y para o espaço de parâmetros ρ e θ através da equação,

$$\rho = x.\cos(\theta) + y.\text{sen}(\theta);\ -90^{o} \leq \theta \leq 90^{o} \text{ e } \rho \leq \sqrt{m^2 + n^2} \qquad \textbf{(2.15)}$$

onde, x e y são as coordenadas cartesianas de cada um dos pontos da imagem, ρ corresponde à distância perpendicular de uma reta à origem do plano e θ corresponde ao ângulo da reta perpendicular em relação ao eixo horizontal. As variáveis m e n correspondem às dimensões da imagem em relação aos eixos horizontal e vertical, respectivamente. A Figura 2.11 ilustra geometricamente esta transformada.

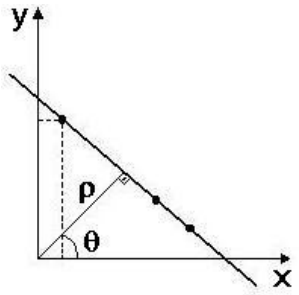
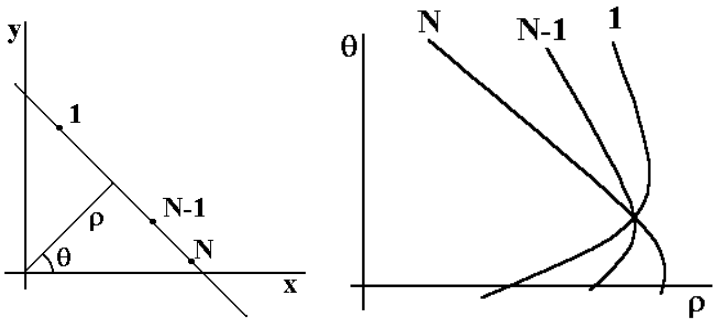


Figura 2.11. Representação geométrica da Transformada de Hough.

Para cada um dos pontos de coordenadas x,y da imagem original a Transformada de Hough gera uma senóide diferente no Mapa de Hough, com θ variando de -90º à 90º. O Mapa de Hough, na verdade, funciona como uma matriz de acumuladores. Esta matriz é inicializada com zeros e determinadas células tem seu valor incrementado de uma unidade sempre que uma nova senóide for gerada. As senóides cujos pontos pertençam à uma mesma reta, se interceptam em uma determinada célula de coordenadas (ρ, θ). A Figura 2.12 ilustra a aplicação da Trasformada de Hough sobre uma imagem sintética com apenas 3 pontos.



(a) (b)

Figura 2.12. Aplicação da Transformada de Hough sobre uma imagem sintética. A Figura 2.12 (a) corresponde a pontos de contorno na imagem original. A Figura 2.12 (b) corresponde a senóides geradas a partir de cada ponto de contorno da imagem original.

Observe que na Figura 2.12 (b) as senóides se interceptam duas a duas, indicando que os pontos na imagem original estão alinhados dois a dois e a reta suporte para cada par de pontos possui parâmetro (ρ_i, θ_i), exatamente as coordenadas das intersecções das senóides.

Existe uma relação direta entre o comprimento da reta e o valor escalar contido em determinada célula do Mapa de Hough, quanto mais intersecções houverem em determinada coordenada (ρ, θ) do Mapa de Hough, maior é o número de pontos em determinada reta do plano da imagem. A partir do Mapa de Hough podemos então procurar por "grandes" retas de forma simples e direta, basta procurarmos por aquelas células do Mapa que contém os maiores valores escalares. Além da facilidade de procurar por grandes retas, podemos procurar também por retas com determinada orientação. Por exemplo, se desejarmos encontrar retas horizontais ou verticais, basta realizarmos buscas em θ igual à 0º ou 90º, respectivamente. Segue abaixo um pseudocódigo que ilustra a implementação da Transformada de Hough utilizando matriz de acumuladores.

/* cálculo da transformada de Hough */

```
para (x = 0; x < X_MAX; x++)
    {
     para (y = 0; y < Y_MAX; y++)
          {
           se(imagem[x][y]== 255)
               {
```

```
            para (theta = -90; theta < 90; theta++)
                {
                 roh = x*cos(theta) + y*sen(theta);
                 mapa_hough[roh][theta] = mapa_hough[roh][theta]+1;
                 }
            }
        }
    }
```

A Figura 2.13 ilustra a Transformada de Hough aplicada a uma imagem sintética contendo 3 segmentos de reta distintos. Na Figura 2.13 (b) podemos observar uma certa simetria para retas cujo ângulo de inclinação é ±90º de modo que um segmento de reta vertical gera 2 nuvens de pontos em $\theta = \pm 90º$.

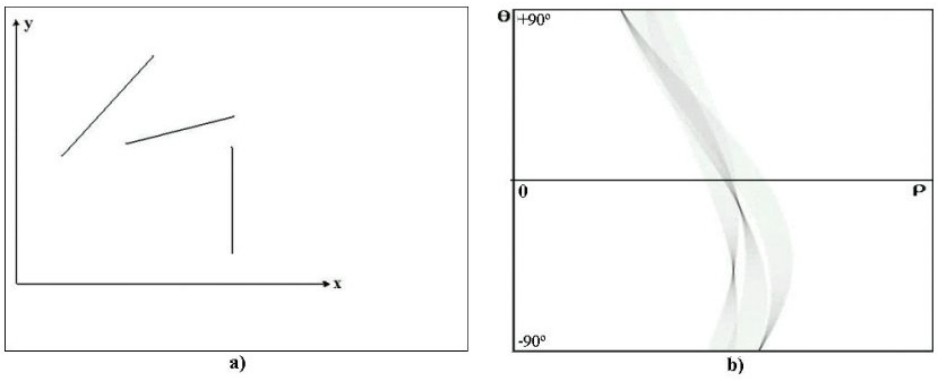


Figura 2.13. (a) imagem sintética contendo 3 segmentos de reta, (b) Transformada de Hough aplicada à imagem sintética ilustrada em (a). A Figura 2.13 (b) apresenta uma particularidade da Tranformada de Houg. Observe que há 4 nuvens de pontos das quais duas estão sobre θ igual a ± 90º. Na verdade estas nuvens correspondem a mesma reta pois há uma simetria em $\theta = \pm 90º$.

Observe que cada segmento de reta gera um conjunto de senóides no Mapa de Hough. No entanto, a intersecção destas senóides se dá em uma densa nuvem de pontos, e não em um único ponto de coordenadas (ρ, θ) como descrito anteriormente. Idealmente pontos pertencentes à uma linha reta gerariam senóides que se interceptam em um único par de coordenadas (ρ, θ). Porém por problemas de discretização, aproximação e arredondamento, dificilmente todas as intersecções convergiriam para um único ponto no Mapa de Hough. Ao invés disso, a intersecção das senóides converge para uma densa nuvem de pontos. Quanto mais pontos estiverem contidos em uma reta na imagem original, mais densa será a nuvem gerada. Procurar por longos segmentos de reta com determinada orientação, resume-se então a procurar por densas nuvens de pontos com determinada coordenada $\theta \pm \Delta\theta$ no Mapa de Hough. No entanto, cada uma destas nuvens de pontos pode ser aproximada por um único ponto de coordenadas (ρ_i, θ_i) através do cálculo dos valores médios.

A Figura 2.14 ilustra a aplicação da Transformada de Hough sobre a imagem de contorno ilustrada na Figura 2.8. Por questão de comodidade, realizamos uma translação de eixos no Mapa de Hough, de modo que θ igual à 90º fique no centro do eixo.

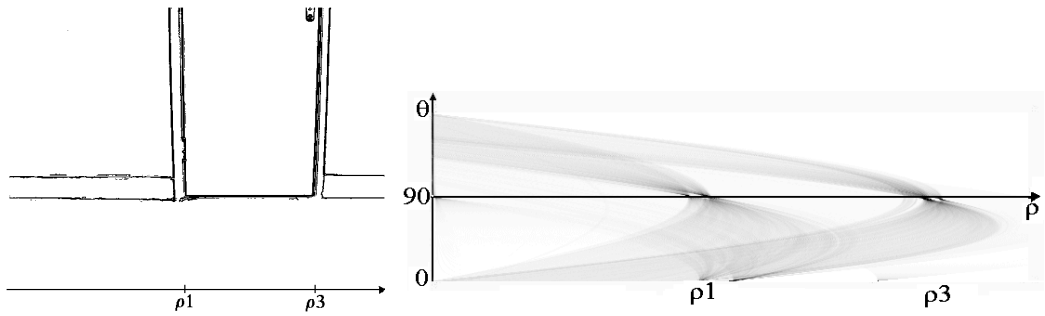


Figura 2.14. (a) imagem de contorno de uma porta, (b) Transformada de Hough aplicada à imagem ilustrada em (a).

Observe que cada reta pertencente ao contorno da porta dá origem à um conjunto de senóides que se interceptam em determinada nuvem de pontos de coordenadas ($\rho \pm \Delta\rho$, $\theta \pm \Delta\theta$). Existe uma relação direta entre as coordenadas x das retas que representam o contorno vertical da porta ilustrada na Figura 2.14 (a) e as coordenadas ρ que representam a distância perpendicular da reta à origem do plano, ilustradas na Figura 2.14 (b). Uma vez localizadas as nuvens de pontos representadas pelos valores médios ρ_i, a localização da reta na imagem original é feita de forma direta, aplicando a Transformada de Hough Inversa. A Figura 2.15 ilustra a recuperação das retas verticais a partir do Mapa de Hough.

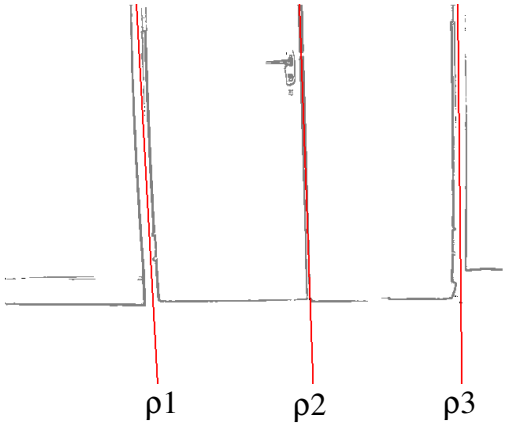


Figura 2.15. Restauração das retas suporte do contorno da porta em uma imagem real.

2.7 Matriz de Covariância

Outra ferramenta muito utilizada para extração de linhas retas em uma imagem é a matriz de covariância (matriz quadrada de ordem 2), definida através de seus coeficientes de autocorrelação em x (σ_x^2), autocorrelação em y (σ_y^2) e também correlação em x, y (r), Equação 2.14. Avaliando os coeficientes desta matriz é possível

avaliar o grau de orientação dos pixels na imagem e, caso exista alguma orientação, é possível estimar o ângulo de inclinação do eixo principal que define a orientação dos pixels. Utilizamos esta técnica de extração de linhas retas para detectarmos pequenos segmentos específicos, que poderiam ser descartados através da Transformada de Hough, em particular, utilizamos esta abordagem para detecção do rodapé da parede.

Para a identificação da orientação dos pixels da imagem, é necessário definir uma janela de varredura (janela de covariância), em geral, retangular de dimensão em pixels variável. As dimensões desta janela de varredura são definidas *empiricamente*, em função da dimensão dos segmentos de reta que se deseja encontrar. Para identificar pequenos segmentos de reta, a janela deve ter dimensão reduzida e, para identificar longos segmentos de reta, a dimensão deve ser obviamente maior. A grande vantagem da utilização da matriz de covariância é reduzir o espaço de busca por uma reta, seja qual for a dimensão da janela NxN pixels, para uma matriz de dimensão 2x2, a matriz de covariância definida por:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^2 & r \\ r & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \qquad \textbf{(2.16)}$$

onde,

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n}(x_i - \overline{x})^2}{n}} \qquad \textbf{(2.17)}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{v}(y_j - \overline{y})^2}{n}} \qquad (2.18)$$

$$r = \frac{\frac{\sum_{i,j=0}^{u,v}(x_i - \overline{x})(y_j - \overline{y})}{n}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{u}(x_i - \overline{x})^2}{n}}\sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{v}(y_j - \overline{y})^2}{n}}} \qquad (2.19)$$

Os coeficientes σ_x^2 e σ_y^2 da matriz de covariância (Equação 2.14) correspondem à autocorrelação das variáveis x e y, respectivamente. E, o coeficiente r corresponde à correlação cruzada das variáveis x e y. Nas equações 2.15 à 2.17, x_i e y_i representam as coordenadas dos pixels que representam contorno de objetos, presentes na célula; $\overline{x}$ e $\overline{y}$ representam as médias das coordenadas dos pontos de contorno e N representa o número de pontos de contorno encontrados na célula. Nas Equações 2.15 e 2.16 σ_x e σ_y representam o desvio padrão em relação à x e y respectivamente. Na Equação 2.17 r representa o coeficiente de correlação em relação às variáveis x e y, normalizado.

Através da avaliação dos coeficientes da matriz de covariância é possível descobrir se a janela recobre ou não alguma reta da imagem, neste caso, o módulo do coeficiente de correlação deve ser próximo de 1,0 para retas diagonais ou a razão entre a variância σ_x^2 e a variância σ_y^2 apresentar um valor alto, para retas horizontais. A Figura 2.16 ilustra uma imagem de contorno da porta destacando algumas janelas de covariância ilustrando as situações possíveis.

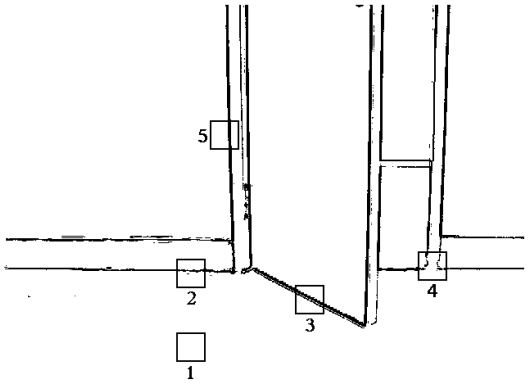


Figura 2.16. Imagem de contorno contendo algumas janelas de covariância, ilustrando as principais situações. Esta figura apresenta 5 janelas destacando algumas situações para a distribuição dos pontos de contorno da imagem.

Observando as células da Figura 2.16 podemos observar 5 situações básicas:

1. A célula não contém nenhum ponto de contorno;
2. A célula contém pontos que definem apenas uma linha reta horizontal;
3. A célula contém pontos que definem apenas uma linha reta diagonal;
4. A célula contém pontos que não definem uma orientação definida (uma quina por exemplo, ou mesmo mais de uma reta);
5. A célula contém pontos que definem apenas uma linha reta vertical.

A partir desta classificação, podemos dividir as céluas em dois grupos. No primeiro grupo estão as células cujo conjunto de pontos não indica nenhuma direção predominante, trata-se das células que se encaixam nos casos 1 e 4. No segundo grupo estão as demais células, ou seja, células nas quais o conjunto de pontos indica uma direção predominante, formando um segmento de reta, são os casos 2, 3 e 5. Esta classificação das células em dois grupos é dada a partir da análise do coeficiente de correlação r, da matriz de covariância.

Experimentalmente definimos um limiar mínimo 0.8 para o coeficiente de correlação (r) para retas diagonais e um mínimo de 15 para a relação $\sigma x/\sigma_y$ para retas horizontais, de modo que os pontos contidos numa célula sejam classificados como pertencentes à uma reta. Este limiar é necessário uma vez que os pontos contidos numa determinada célula dificilmente estão perfeitamente alinhados, ou por irregularidades contidas no contorno do objeto, podendo ocasionar inclusive falhas no contorno, por ruído na imagem ou mesmo por imprecisão do operador de detecção de contorno.

Além de podermos identificar a presença de segmentos de reta através da análise dos coeficientes da matriz de covariância, podemos identificar a equação desta reta através da Equação 2.18.

$$y = r(\sigma_y /\sigma_x)x + \mu_y - r(\sigma_y /\sigma_x)\mu_x, \qquad \textbf{(2.20)}$$

onde $r(\sigma_y /\sigma_x)$ corresponde ao coeficiente angular da reta e, o ângulo de inclinação θ é dado por $\arctan(r(\sigma_y /\sigma_x))$. A Figura 2.17 ilustra a aplicação da janela de covariância sobre uma imagem de contorno. Os parâmetros da janela de covariância ilustradas na Figura 2.17 são mostrados na Tabela 2.1. Os coeficientes de índice 1 são relativos à sub-janela esquerda e os coeficientes de índice 2 são relativos à sub-janela direita da janela de covariância.

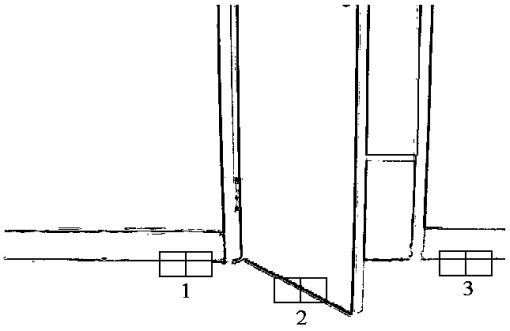


Figura 2.17. Aplicação da janela de covariância sobre uma reta horizontal e diagonal. Existem 3 janelas de covariância na imagem, à esquerda da porta (1), no meio da porta (2), e à direita da porta (3). Cada janela de covariância é dividida em duas subjanelas adjacentes. Os coeficientes de índice 1: $\mu 1_x$, $\mu 1_y$, $\sigma 1_x^2$, $\sigma 1_y^2$, r1 e $\theta 1$ correspondem à subjanela esquerda e os coeficientes de índice 2: $\mu 2_x$, $\mu 2_y$, $\sigma 2_x^2$, $\sigma 2_y^2$, r2 e $\theta 2$ correspondem à subjanela direita.

Janela 1			
$\mu 1_x$	226,80	$\mu 2_x$	246,44
$\mu 1_y$	325,20	$\mu 2_y$	325,19
$\sigma 1_x^2$	35,94	$\sigma 2_x^2$	34,87
$\sigma 1_y^2$	1,50	$\sigma 2_y^2$	1,67
r1	0,159	r2	-0,033
$\theta 1$	1,71	$\theta 2$	-0,57

Janela 2			
$\mu 1_x$	365,80	$\mu 2_x$	383,71
$\mu 1_y$	353,61	$\mu 2_y$	362,31
$\sigma 1_x^2$	31,36	$\sigma 2_x^2$	29,62
$\sigma 1_y^2$	11,40	$\sigma 2_y^2$	9,33
r1	0,830	r2	0,787
$\theta 1$	26,56	$\theta 2$	23,74

Janela 3			
$\mu 1_x$	571,73	$\mu 2_x$	590,12
$\mu 1_y$	322,54	$\mu 2_y$	322,57
$\sigma 1_x^2$	35,45	$\sigma 2_x^2$	35,52
$\sigma 1_y^2$	0,30	$\sigma 2_y^2$	0,35
r1	0,106	r2	-0,158
$\theta 1$	-0,57	$\theta 2$	-1,14

Tabela 2.1. Parâmetros das janelas de covariância ilustradas na Figura 2.17. As janelas de índice 1, 2 e 3 correspondem às janela 1, 2 e 3 da Figura 2.17, respectivamente. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta.

3

Definição das Assinaturas Utilizadas Pelo Sistema de Reconhecimento do Estado da Porta

Este capítulo apresenta a aplicação das ferramentas de extração de características e também definição das assinaturas dos objetos. Em particular, estamos interessados na identificação da assinatura da porta e também na identificação da posição relativa do robô em relação à parede. O conteúdo descrito neste capítulo compreende as etapas de V à VII do algoritmo ilustrado na Figura 1.2.

3.1 Identificação de portas

Um dos desafios para o processo de identificação de portas em imagens digitais é a quantidade de objetos que podem aparecer em uma cena capturada pelo robô. Na tentativa de identificar portas e isolá-las dos demais objetos da cena, procuramos identificar as características que definem exclusivamente a assinatura do objeto. Uma

vez conhecidas as características que definem exclusivamente uma porta e sabendo extraí-las de uma imagem, dado uma cena vista pelo robô, é possível verificar se ele está olhando para um local que a contém ou não. Verificada sua existência e localizada sua posição será necessário classificá-la em um dos estados (fechada, entreaberta, muito aberta, totalmente aberta). Em situações que uma porta seja classificada como fechada, o robô não tem nada a fazer a não ser procurar por um caminho alternativo. Em situações em que uma porta seja classificada como muito aberta ou mesmo totalmente aberta, o robô necessita identificar o vão de abertura e simplesmente atravessá-lo. Mas em situações em que a porta seja classificada como entreaberta é necessário que o robô consiga calcular a abertura do vão da porta a fim de decidir se é possível ou não atravessá-lo de forma segura, dadas as suas dimensões e, sendo possível atravessá-la, é necessário definir uma trajetória para que o robô a atravesse.

Uma das principais formas de reconhecimento de objetos é procurar classificá-los utilizando suas propriedades geométricas[Lent01]. Neste sentido, tentamos encontrar um conjunto mínimo de informações a partir do qual podemos identificar e classificar nosso objeto. Através de observações de imagens de portas de nosso mundo real ilustradas na Figura 3.1, procuramos elaborar um modelo com o mínimo de informações possível, a partir do qual conseguimos identificar a porta e também distinguir seus estados.

Figura 3.1. Exemplos de portas reais em seus diferentes estados: fechada, entreaberta e aberta, respectivamente.

Através de imagens como as apresentadas na Figura 3.1 extraímos algumas das principais características:

1. **Batente da porta:** caracterizado por retas paralelas verticais (pelo menos duas). Retas paralelas verticais (duas ou três) são uma das principais características que definem a silhueta da porta. A quantidade de retas verticais encontradas representa uma das principais características para a classificação do estado da porta.
2. **Base da porta:** Segmento de reta unindo pares de retas verticais. Esta característica além de ajudar a determinar o contorno da porta, ajuda identificar o ângulo de abertura da porta.
3. **Rodapé**: o rodapé é caracterizado por segmentos de reta horizontal à esquerda e à direita da base das arestas verticais mais à esquerda e mais à direita na imagem, respectivamente. Esta característica é muito importante pois ajuda a identificar a posição relativa do robô em relação à parede e, portanto, ajuda a definir as características visuais que podem ser observadas.

A partir das características observadas nas imagens da Figura 3.1 procuramos elaborar um modelo geométrico simplificado no qual possamos distinguir a porta dos demais objetos da cena e também classificar a porta em seus diferentes estados. Além disso, precisamos calcular o vão de abertura da porta quando necessário. O modelo proposto baseia-se principalmente nas formas geométricas, características semelhantes à praticamente todos os tipos de porta. Todas as informações que dizem respeito à cor e textura foram eliminadas do modelo pois variam de uma porta para outra, este tipo de informação restringiria em muito nosso padrão de interesse. A Figura 3.2 ilustra um modelo baseado principalmente nas características geométricas: retas verticais (batente da porta), segmento de reta horizontal ou diagonal (base da porta).

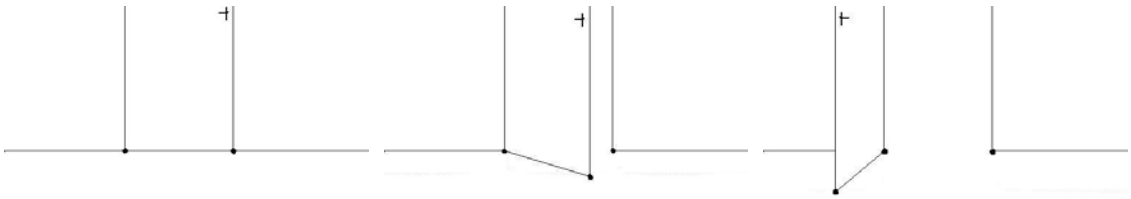


Figura 3.2. Modelo de porta baseado em características geométricas.

Com base no modelo simplificado da figura 3.2 propomos um algoritmo a partir do qual conseguimos distinguir os diferentes estados da porta. Conseguimos também mensurar a abertura do vão da porta a fim de avaliar se a abertura possui dimensão suficiente para que o robô possa atravessá-la de forma segura.

3.1.1 Localização das arestas verticais

Para aproximarmos as imagens das portas reais ao nosso modelo, necessitamos identificar as principais características do objeto, ou seja, as arestas verticais. As imagens produzidas através da utilização do operador de Sobel contém apenas o contorno dos objetos presentes na cena, mas é incapaz de dizer se existem longos segmentos de reta ou mesmo indicar sua localização. Longos segmentos de retas, principalmente verticais, são uma das principais características que definem a assinatura do objeto de interesse e, conforme podemos verificar através do modelo ilustrado na Figura 3.2, devemos procurar por uma dupla ou tripla de arestas verticais distantes entre si. O número de arestas verticais encontradas varia de acordo com o estado da porta e o ângulo de visão do robô. Para extrair estas características utilizamos a Transformada de Hough.

Como estamos interessados em retas que definem o contorno da porta, ou seja, longos segmentos de reta verticais com inclinação próximo à 90º, basta limitarmos nosso espaço de busca ao longo do eixo ρ (distância da reta à origem do sistema) e θ igual a 90º (inclinação das retas). A Figura 3.3 ilustra o modelo da porta contendo apenas suas características geométricas e sua respectiva Transformada de Hough é ilustrado na Figura 3.4.

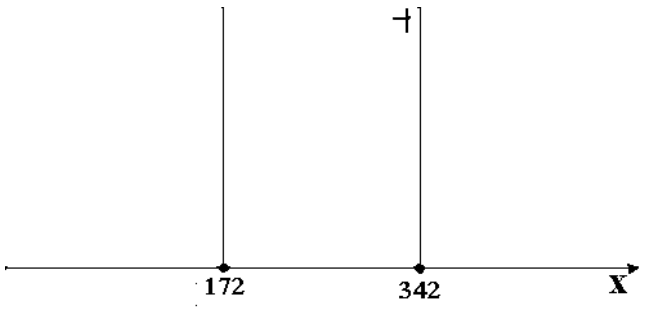


Figura 3.3. Modelo geométrico de uma porta fechada.

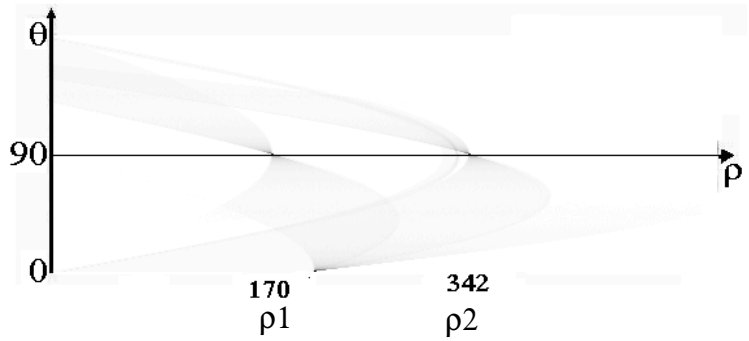


Figura 3.4. Transformada de Hough relativa à Figura 3.3. Observe que nesta figura há duas densas nuvens de pontos em θ igual a 90º. Estas nuvens correspondem ao portal da porta.

No. linhas retas		2
	$\bar{\rho}i$	$\bar{\theta}i$
Reta esquerda ρ1	170	90
Reta meio ρ2	-	-
Reta direita ρ3	342	90

Tabela 3.1. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 3.4.

Observe que na Figura 3.4 em θ = 90º existem duas nuvens de pontos cujos centros em ρ são 168 e 340, correspondentes às arestas esquerda e direita da porta, respectivamente. Há uma relação direta entre a coordenada x da aresta vertical na imagem original e o centro da nuvem, calculado sobre o Mapa de Hough. Idealmente estes pontos seriam coincidentes, mas por problemas de discretização em ρ e θ, há um erro de aproximação entre a real posição da reta na imagem e a posição indicada pelo Mapa de Hough de aproximadamente 2%. A Tabela 3.1 ilustra os valores médios de ρ e θ para cada aresta vertical encontrada, ρ1 e ρ3 correspondem às arestas verticais esquerda e direita,

respectivamente, e ρ2 corresponde a aresta vertical do meio que neste caso não está presente. Esta última se aplica a apenas portas entreabertas ou abertas.

A Figura 3.5 ilustra a restauração do contorno da porta a partir da Figura 3.4. O erro de aproximação encontrado é da ordem de 2%, o que significa alguns poucos pixels de diferença o que não influencia significativamente no resultado encontrado. Desconsiderando este erro de aproximação podemos dizer que as retas suporte do contorno da porta foram identificadas.

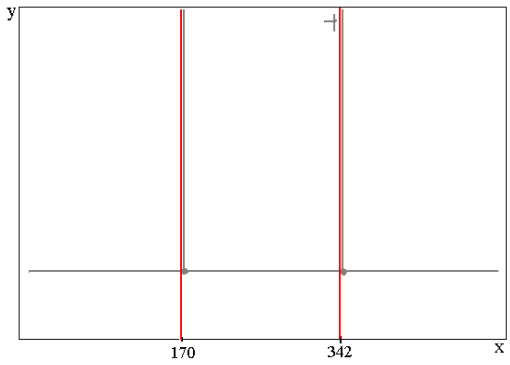


Figura 3.5. Restauração das retas suporte do contorno da porta.

Para identificação das retas em imagens reais como a apresentada na Figura 3.6 temos algumas dificuldades adicionais como irregularidades e falhas no contorno da porta, arestas duplicadas provenientes da espessura do portal e o próprio ângulo de inclinação das arestas da porta podem ser ligeiramente diferentes de 90º ou por deformidades causadas pela lente da câmera ou mesmo calibração inadequada da própria câmera. As irregularidades encontradas no contorno da porta são contornadas intrinsecamente pela própria Transformada de Hough. No entanto, as arestas duplicadas e o ângulo de inclinação inadequado devem ser especialmente tratados.

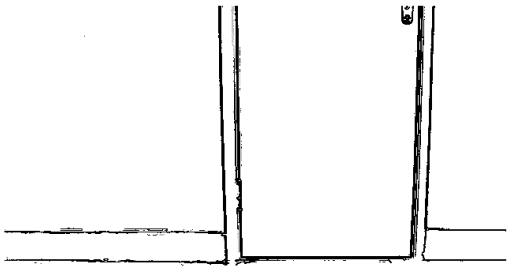


Figura 3.6. Imagem de contorno de uma porta real.

A Transformada de Hough apresentada na Figura 3.7 apenas converge todas as retas verticais da Figura 3.6 em um conjunto de densas nuvens de pontos cuja coordenada θ difere ligeiramente de 90º. Definimos empiricamente um valor $\Delta\theta = \pm 4$ pixels na tentativa de englobar todas as retas verticais encontradas na imagem Este $\Delta\theta$ corresponde a um erro de 9% em relação ao ângulo de inclinação da reta. Deste modo, a faixa de varredura em θ compreende o intervalo entre 86º e 94º a fim de identificar um valor $\bar{\theta}i$. Outra dificuldade a ser resolvida é a duplicidade de arestas devido à espessura do portal que gera no Mapa de Hough duas densas nuvens de pontos muito próximas, neste caso, definimos uma valor $\Delta\rho = \pm 10$ pixels, equivalente a um erro de 4%. Para cada nuvem encontrada, calculamos a média dos pontos do intervalo: ρ_i - 10 e ρ_i + 10. Caso haja intersecção entre estes intervalos convergimos as médias de cada centros de massa para apenas um ponto, cuja coordenada é dada pela média aritmética das coordenadas $\bar{\rho}i$'s correspondentes. Deste modo, nuvens distintas cujos centros de massa estejam distante de um valor igual ou inferior à 20 pixels, são interpretadas como

apenas uma reta na imagem original. A Figura 3.8 ilustra o resultado desta operação, destacando as retas encontradas.

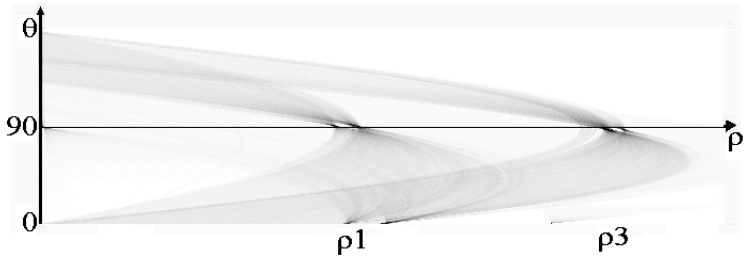


Figura 3.7. Tranformada de Hough aplicada à Figura 3.6.

No. retas verticais		2
	$\bar{\rho}i$	$\bar{\theta}i_i$
Reta esquerda **ρ1**	290	90
Reta meio ρ2	-	-
Reta direita ρ3	535	90

Tabela 3.2. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 3.7.

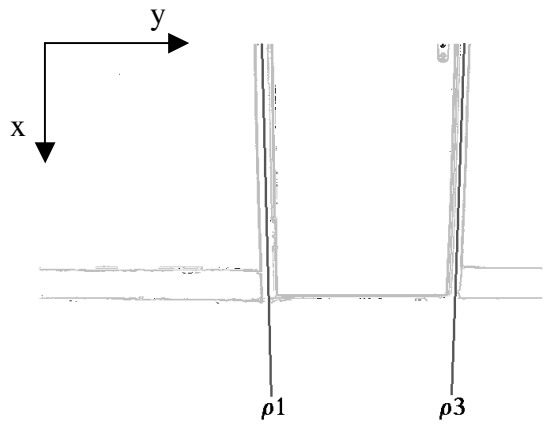


Figura 3.8. Restauração das retas suporte do contorno da porta em uma imagem real.

Dada a localização das retas verticais na imagem, conseguimos localizar também as coordenadas da base de cada aresta vertical. Para esta operação fazemos a varredura da

imagem em torno de cada $\overline{\rho i}$ $\pm\Delta\rho$ buscando por um yi máximo. Definimos assim um conjunto de pontos de coordenadas (x_i, y_i), identificados por p_e e p_d correspondentes às coordenadas da base das arestas esquerda e direita, respectivamente, e p corresponde a aresta vertical do meio. Esta última se aplica a apenas portas entreabertas ou abertas.

. A Tabela 3.3 ilustra a extração das coordenadas da base das arestas verticais da Figura 3.6.

Número de retas:		2
Reta	Coordenadas	
	x_i	y_i
p	290	318
p_e	-	-
p_d	535	318

Tabela 3.3. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 3.6.

3.2 Identificação da posição relativa do robô

Durante o processo de navegação o robô pode aproximar-se da porta seguindo diversas trajetórias. Em linhas gerais, podemos definir 3 trajetórias básicas em relação à parede que o robô pode seguir: perpendicular, inclinado à direita ou mesmo inclinado à esquerda. Seguindo cada uma das trajetórias o ângulo de visão do robô é essencialmente diferente e, conseqüentemente, as características visuais observadas também o são. Na tentativa de definir as características visuais observadas pelo robô em cada uma dessas possíveis trajetórias, necessitamos inicialmente identificar a própria trajetória do robô. A Figura 3.9 ilustra as possíveis posições do robô à esquerda em relação à parede, perpendicularmente à parede e à direita em relação à parede.

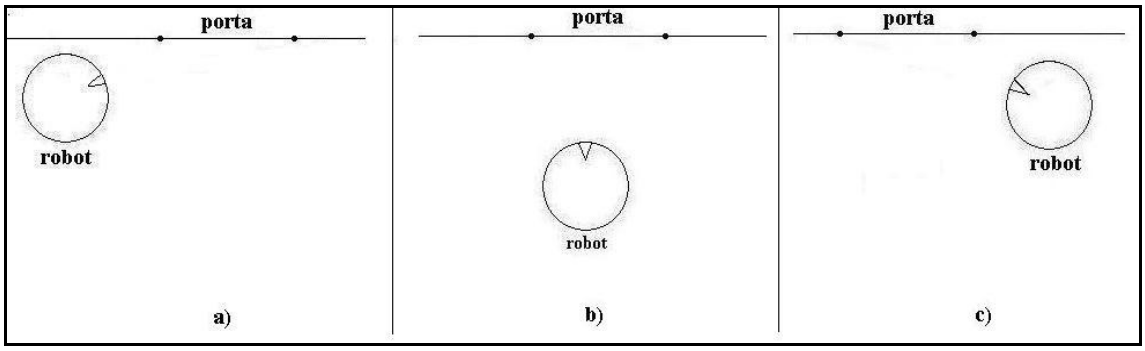
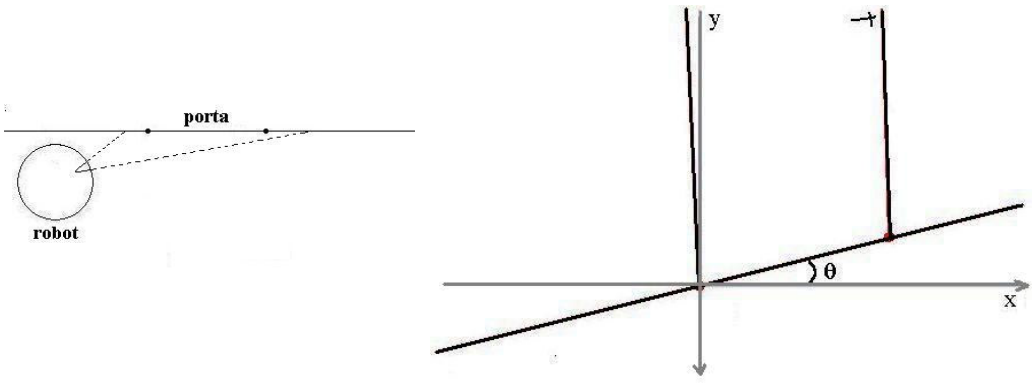


Figura 3.9. Posições relativas do robô em relação à parede. (a) robô à esquerda em relação à parede, (b) robô perpendicular à parede, (c) robô à direita em relação à parede.

Para cada uma das posições definidas, uma característica é sensivelmente diferente de uma posição para outra, independentemente do estado da porta: trata-se da inclinação do rodapé da porta. Definido em alto nível como sendo segmentos de reta à esquerda e à direita da base da porta, o rodapé possui inclinação característica em função da posição relativa do robô. As Figuras 3.10, 3.12 e 3.14 ilustram o modelo do rodapé para cada umas das posições ilustradas na Figura 3.9. A Figura 3.10 (a). ilustra o robô inclinado à direita em relação à parede e (b) ilustra as características visuais observadas pelo robô naquela posição e são destacados também os eixos x e y.



(a) (b)

Figura 3.10. (a) Robô à esquerda em relação à parede, (b) características visuais observadas por um inclinado à esquerda em relação à parede.

Note que uma vez inclinado à esquerda em relação ao rodapé o ângulo de inclinação do rodapé é negativo, ou seja, menor que zero. À medida que o robô se inclina à esquerda, o ângulo do rodapé diminui e à medida que o robô se incline à direita, o ângulo do rodapé aumenta tendendo a zero, até que o robô se encontre perpendicular em relação à parede. A identificação dos parâmetros de inclinação do rodapé é feito através da janela de covariância , conforme descrito no Capítulo 2

Na tentativa de evitar que a janela de covariância identifique uma falsa aresta, identificando algum lixo no chão, ou mesmo classifique incorretamente determinado segmento de reta que contenha falhas, utilizamos duas janelas de covariância adjacentes, onde o resultado final é dado através da média dos valores de cada janela. A janela de covariância varre a imagem verticalmente à esquerda e a direita das retas ρ_1 e $\rho 3$, respectivamente, iniciando da base da imagem até atingir o rodapé. A identificação da posição do robô se dá em termos relativos, ou seja, estamos interessados em identificar se o ângulo de inclinação do rodapé é próximo de zero, positivo ou negativo.

A Figura 3.11 ilustra a aplicação da janela de covariância à uma imagem sintética. A Tabela 3.4 ilustra os parâmetros de localização das retas verticais extraídos da transformada de Hough e a Tabela 3.5 ilustra os parâmetros do rodapé extraídos da janela de covariância.

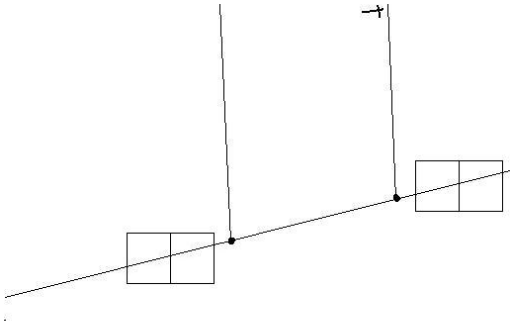


Figura 3.11. Janela de covariância aplicada à uma imagem sintética.

No. retas verticais		2
	$\bar{\rho}i$	$\bar{\theta}i$
Reta esquerda **ρ1**	217	90
Reta meio **ρ2**	-	-
Reta direira **ρ3**	387	90

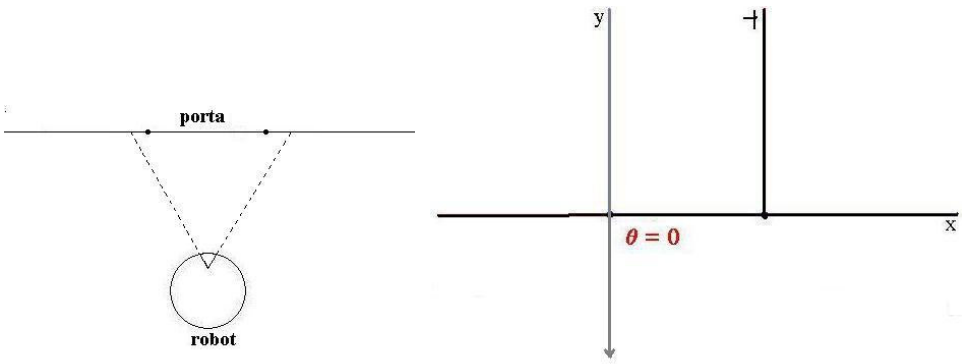
Tabela 3.4. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 3.10 (b).

Janela esquerda			
$\mu 1_x$	176,50	$\mu 2_x$	195,50
$\mu 1_y$	252,00	$\mu 2_y$	247,25
$\sigma 1_x^2$	35,00	$\sigma 2_x^2$	35,00
$\sigma 1_y^2$	2,11	$\sigma 2_y^2$	2,30
r1	-0,981	r2	-0,982
$\theta 1$	-13,49	$\theta 2$	-14,03

Janela direita			
$\mu 1_x$	425,50	$\mu 2_x$	444,50
$\mu 1_y$	189,50	$\mu 2_y$	184,75
$\sigma 1_x^2$	35,00	$\sigma 2_x^2$	35,00
$\sigma 1_y^2$	2,37	$\sigma 2_y^2$	2,30
r1	-0,983	r2	-0,982
$\theta 1$	-14,57	$\theta 2$	-14,03

Tabela 3.5. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 3.11. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta.

As características visuais de uma porta fechada observadas pelo robô localizado perpendicularmente em relação à parede podem ser vistas na Figura 3.12 (b). Observe que nesta imagem, o ângulo entre o rodapé e o eixo das abscissas (eixo x) é igual à zero.



(a) (b)

Figura 3.12. (a) Robô perpendicular à parede, (b) características visuais observadas por um robô perpendicular à parede.

A Figura 3.13 ilustra a aplicação da janela de covariância à uma imagem sintética representando as características visuais de uma porta fechada, observadas por um robô perpendicular à parede. A Tabela 3.6 ilustra os parâmetros de localização das retas verticais extraídos da transformada de Hough e a Tabela 3.7 ilustra os parâmetros do rodapé extraídos da janela de covariância.

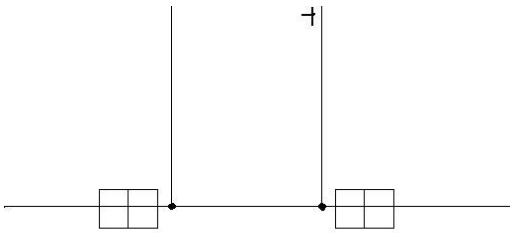


Figura 3.13. Imagem sintética representando as características geométricas de uma porta fechada, observadas por um robô perpendicular à parede.

No. retas verticais		2
	$\bar{\rho}i$	$\bar{\theta}i$
Reta esquerda ρ1	168	90
Reta meio ρ2	-	-
Reta direita ρ3	320	90

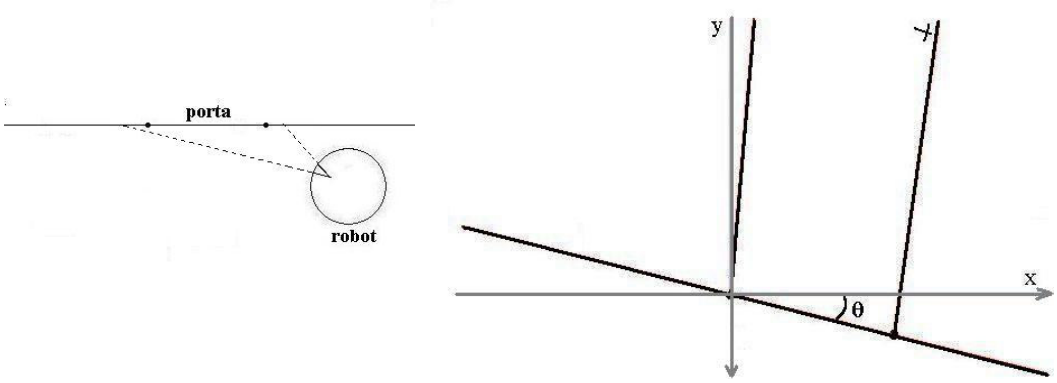
Tabela 3.6. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 3.12 (b).

Jarnela esquerda			
$\mu 1_x$	115,50	$\mu 2_x$	134,50
$\mu 1_y$	2,2,00	$\mu 2_y$	202,00
$\sigma 1_x^2$	35,00	$\sigma 2_x^2$	35,00
$\sigma 1_y^2$	0,00	$\sigma 2_y^2$	0,00
r1	1,00	r2	1,00
θ1	0,00	θ2	0,00

Janela direita			
$\mu 1_x$	348,50	$\mu 2_x$	367,00
$\mu 1_y$	202,00	$\mu 2_y$	202,00
$\sigma 1_x^2$	35,00	$\sigma 2_x^2$	35,00
$\sigma 1_y^2$	0,00	$\sigma 2_y^2$	0,00
r1	1,00	r2	1,00
θ1	0,00	θ2	0,00

Tabela 3.7. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 3.13. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta.

A Figura 3.14 (a) ilustra o robô inclinado à direita em relação à parede e (b) representa as características visuais da porta observadas pelo robô naquela posição. Podemos notar simetria entre as imagens observadas pelo robô inclinado à esquerda e à direita, em relação à parede. No caso do robô inclinado à direita, o ângulo de inclinação do rodapé em relação ao eixo das abscissas é positivo, tendendo a zero quando o robô se desloca para a esquerda.



(a) (b)

Figura 3.14. (a) Robô à direita em relação à parede, (b) características visuais de uma porta fechada observadas por um robô à direita em relação à parede.

A Figura 3.15 ilustra a aplicação da janela de covariância aplicada à uma imagem sintética de uma porta fechada visualizada pelo robô à direita em relação à parede. A Tabela 3.8 ilustra os parâmetros de localização das retas verticais extraídos da transformada de Hough e a Tabela 3.9 ilustra os parâmetros do rodapé extraídos da janela de covariância.

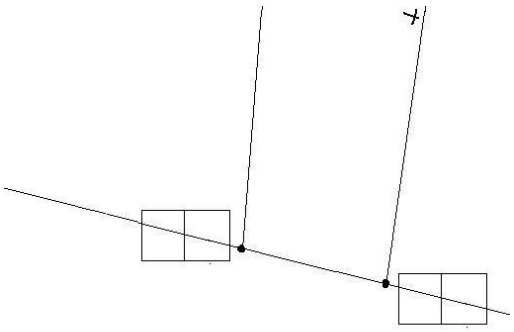


Figura 3.15. Aplicação da janela de covariância à uma imagem sintética.

No. retas verticais		2
	$\bar{\rho}i$	$\bar{\theta}i$
Reta esquerda **ρ1**	218	90
Reta meio **ρ2**	-	-
Reta direita **ρ3**	364	90

Tabela 3.8. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 3.14 (b).

Janela esquerda			
$\mu 1_x$	283,97	$\mu 2_x$	301,50
$\mu 1_y$	307,76	$\mu 2_y$	316,50
$\sigma 1_x^2$	25,24	$\sigma 2_x^2$	34,10
$\sigma 1_y^2$	6,25	$\sigma 2_y^2$	8,97
r1	0,974	r2	0,982
θ1	25,64	θ2	26,05

Janela direita			
$\mu 1_x$	418,95	$\mu 2_x$	434,50
$\mu 1_y$	376,27	$\mu 2_y$	384,00
$\sigma 1_x^2$	31,94	$\sigma 2_x^2$	35,03
$\sigma 1_y^2$	5,68	$\sigma 2_y^2$	6,01
r1	0,983	r2	0,975
θ1	23,26.	θ2	26,10

Tabela 3.9. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 3.15. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta.

O próximo capítulo apresenta o algoritmo utilizado para medir a abertura da porta, uma vez que o robô esteja localizado perpendicularmente em relação à parede e a porta seja classificada como entreaberta.

4

Algoritmo de Reconhecimento do Estado da Porta e Medida de Sua Abertura

Este capítulo descreve o algoritmo utilizado para reconhecer o estado da porta utilizando informações visuais extraídas do ambiente, dada a posição relativa do robô. Identificar o estado da porta é uma tarefa importante, pois só assim é possível definir as ações do robô. Uma vez verificado que a porta encontra-se entreaberta é possível estimar sua abertura a fim de definir se o robô consegue ou não atravessá-la.. Este capítulo abrange as etapas VIII à IX do algoritmo ilustrado na Figura 1.2.

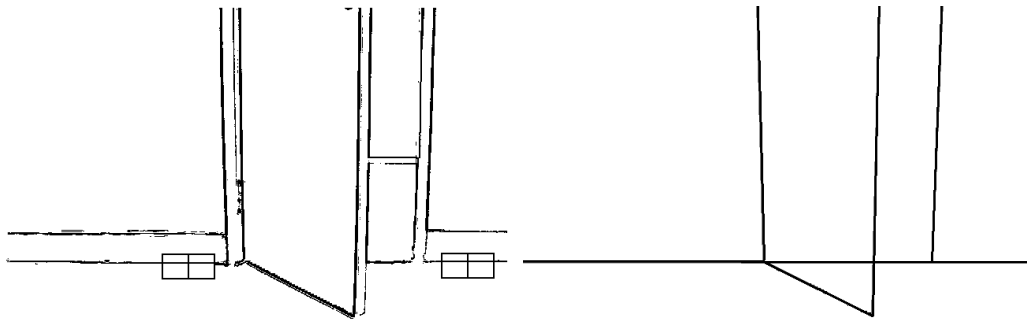
4.1 Reconhecimento do estado da porta

As características visuais observadas pelo robô mudam em função de sua posição relativa, no entanto, a classificação do estado da porta deve ser invariante à esta característica, ou seja, uma porta entreaberta deve assim ser classificada independentemente da posição do robô. Na tentativa de classificar corretamente o

estado da porta são definidos um conjunto de regras para cada posição do robô, no entanto, o núcleo do algoritmo é o mesmo.

4.2 Núcleo do Algoritmo para reconhecimento do estado da porta

O núcleo do algoritmo para reconhecimento do estado da porta utiliza características geométricas extraídas da própria imagem como: número de linhas retas verticais, posição e inclinação do rodapé e também as coordenadas da base de cada aresta vertical encontrada. Dadas estas características, procuramos elaborar um modelo simplificado contendo apenas as informações de interesse, conforme ilustrado na Figura 4.1 (b). Os coeficientes da reta que define o rodapé são mostrados na Tabela 4.1 e as coordenadas da base das arestas verticais são mostradas na Tabela 4.2.



(a) (b)

Figura 4.1. (a) imagem de contorno de uma porta, (b) modelo simplificado contendo apenas as retas verticais, a base da porta e o rodapé.

Janela esquerda			
$\mu 1_x$	223,85	$\mu 2_x$	243,4
$\mu 1_y$	324,9	$\mu 2_y$	324,9
$\sigma 1_x^2$	38,81	$\sigma 2_x^2$	38,93
$\sigma 1_y^2$	1,36	$\sigma 2_y^2$	0,90
r1	0,269	r2	-0,10
$\theta 1$	3,36	$\theta 2$	-0,89

Janela direita			
$\mu 1_x$	559,00	$\mu 2_x$	579,19
$\mu 1_y$	322,50	$\mu 2_y$	322,57
$\sigma 1_x^2$	37,57	$\sigma 2_x^2$	36,24
$\sigma 1_y^2$	0,26	$\sigma 2_y^2$	0,34
r1	0,0	r2	0,05
$\theta 1$	0,0	$\theta 2$	0,28

Tabela 4.1. Parametros da janela de covariância referentes à Figura 4.1 (a). Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta.

No. retas verticais		3
	x_i	y_i
Reta esquerda	307	324
Reta meio	445	393
Reta direita	533	324

Tabela 4.2. Coordenadas das bases das .arestas verticais referentes à Figura 4.1 (a).

Dados o coeficiente angular do rodapé e também a coordenada da base da aresta vertical que não pertence ao rodapé, o próximo passo do algoritmo é traçar uma reta virtual paralela ao rodapé, passando pelo ponto que não pertence ao rodapé. A equação da reta virtual é mostrada na Equação 4.1. A Figura 4.2 ilustra o desenho da reta virtual paralela ao rodapé.

$$y = r(\sigma_y / \sigma_x)x + \mu_y - r(\sigma_y / \sigma_x)\mu_x \qquad (4.1)$$

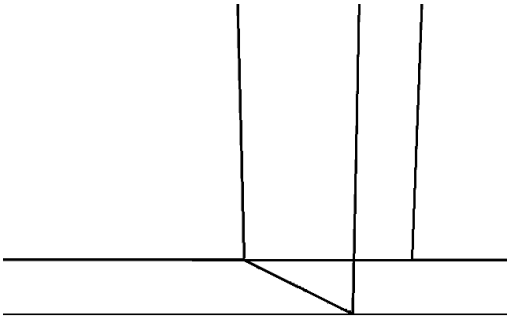


Figura 4.2. Desenho da reta virtual paralela ao rodapé.

O próximo passo do algoritmo corresponde a traçarmos a perpendicular de cada base das retas verticais encontradas, à reta virtual. A interseção do pé das retas perpendiculares com a reta virtual define 3 pontos como mostrado na Figura 4.3. A Tabela 4.3 apresenta os valores das coordenadas das projeções sobre a reta virtual.

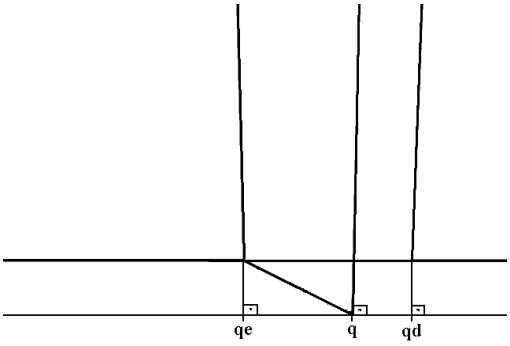


Figura 4.3. Projeções perpendiculares das bases das retas verticais na reta virtual.

O algoritmo para reconhecimento do estado da porta utiliza as coordenadas das projeções das bases das retas verticais à reta virtual, para identificar o estado da porta. Dadas as coordenadas de cada projeção, o algoritmo verifica se o ponto definido pela projeção da base da reta que não termina no rodapé, pertence ou não ao segmento

definido pelas projeções das bases das outras retas. Caso o ponto não pertença ao segmento, a porta é classificada como aberta e o robô pode seguir sua trajetória. Caso o ponto pertença ao segmento, a porta é classificada como entreaberta e então é necessário mensurar sua abertura.

No. retas verticais		2
	x_i	y_i
Reta esquerda	307	324
Reta meio	445	393
Reta direita	533	324

Tabela 4.3. Coordenadas das projeções das bases das retas verticais na reta virtual referentes à Figura 4.3.

O núcleo do algoritmo utilizado para reconhecimento do estado da porta é o mesmo, independentemente da posição relativa do robô.

A Figura 4.4 ilustra o modelo proposto aplicado aos diferentes estados da porta, dado que o robô se encontra perpendicularmente à parede.

Uma vez localizado perpendicularmente em relação à parede, uma porta fechada é distinta dos demais estados através do número de retas encontradas e também através da avaliação das coordenadas da base das retas verticais que terminam na reta suporte que definem o rodapé. Uma porta totalmente aberta também possui todas as 3 retas verticais terminando na reta suporte. Uma porta entreaberta é distinta de uma porta aberta através do cálculo das projeções das bases das arestas verticais.

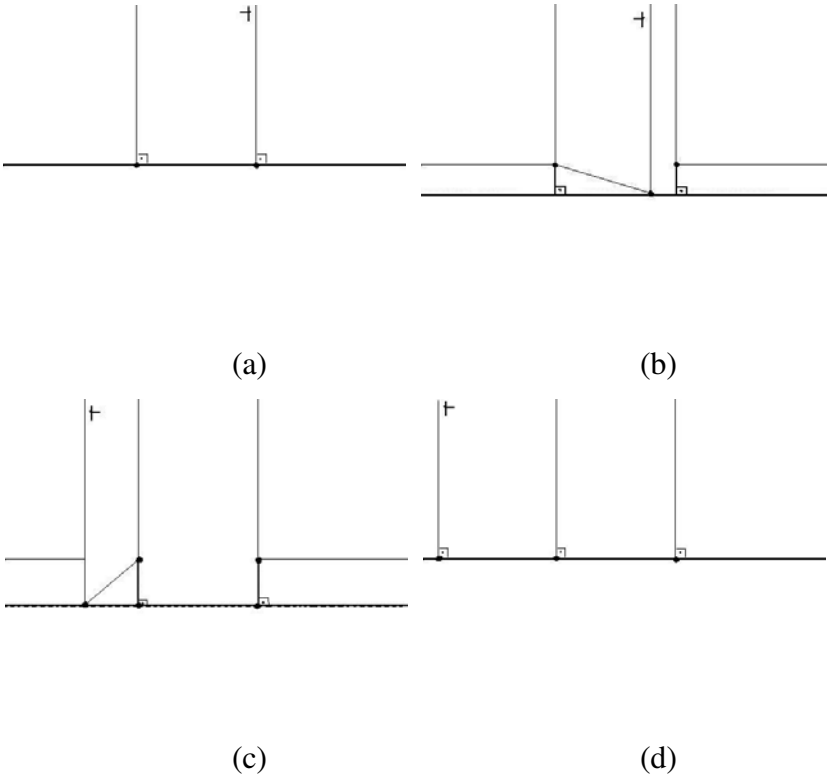
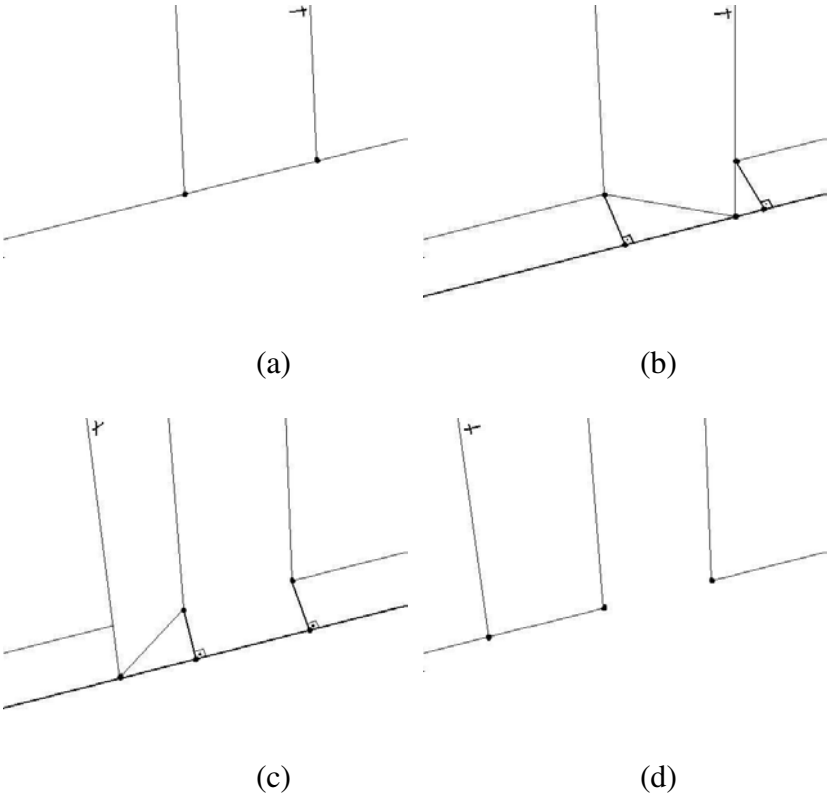


Figura 4.4. Robô perpendicular em relação à parede. (a) porta fechada, (b) porta entreaberta, (c) porta aberta, (d) porta totalmente aberta.

A seguir a Figura 4.5 ilustra a situação em que o robô se encontra à esquerda em relação à parede. São ilustrados também os diferentes estados da porta.

Uma vez identificado que o robô está localizado à esquerda em relação à parede, uma porta fechada pode ser identificada através da localização de 2 retas verticais terminando na reta suporte que define o rodapé. Uma porta totalmente aberta pode ser identificada quando são encontradas 3 retas verticais também terminando na reta suporte que define o rodapé. Uma porta entreaberta é caracterizada por duas retas verticais, das quais uma delas não termina no rodapé. Sobre esta reta, além do ponto que define sua base, encontramos um outro ponto de especial interesse, trata-se da intersecção do rodapé com a própria reta vertical. Projetamos então este ponto e as

bases das arestas verticais na reta virtual, a fim de identificarmos o estado da porta. Caso a projeção do ponto que define a base da reta vertical que termina no rodapé pertença ao segmento definido pelos outros pontos, a porta é classificada como entreaberta. Em caso contrário, a porta é classificada como aberta.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 4.5. Robô inclinado à esquerda em relação à parede. (a) porta fechada, (b) porta entreaberta, (c) porta aberta, (d) porta totalmente aberta.

No caso do robô estar inclinado à direita em relação à parede a Figura 4.6 ilustra também os diferentes estados da porta.

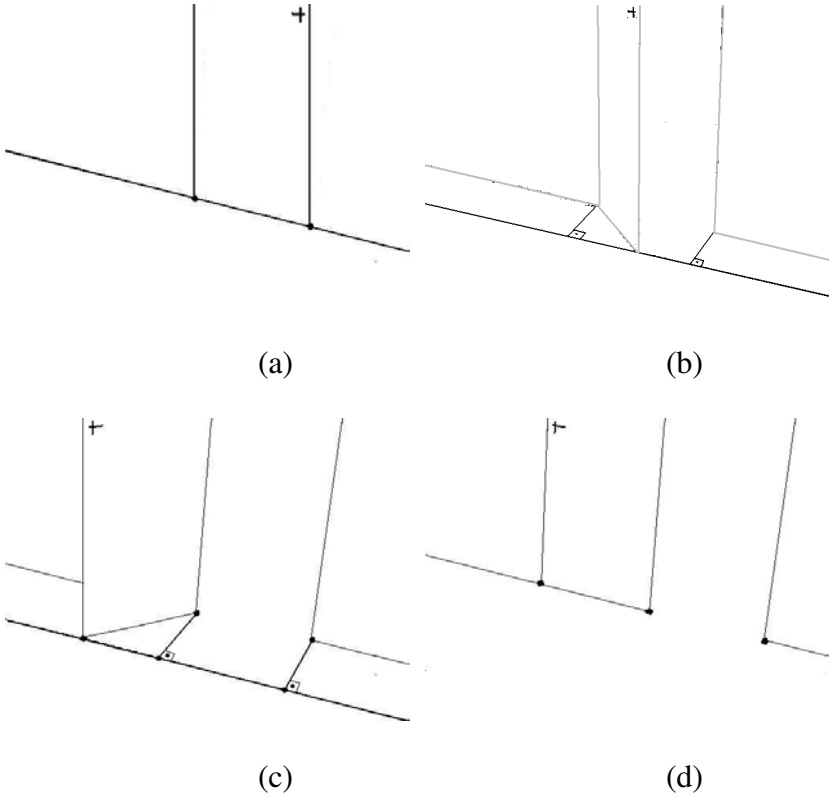


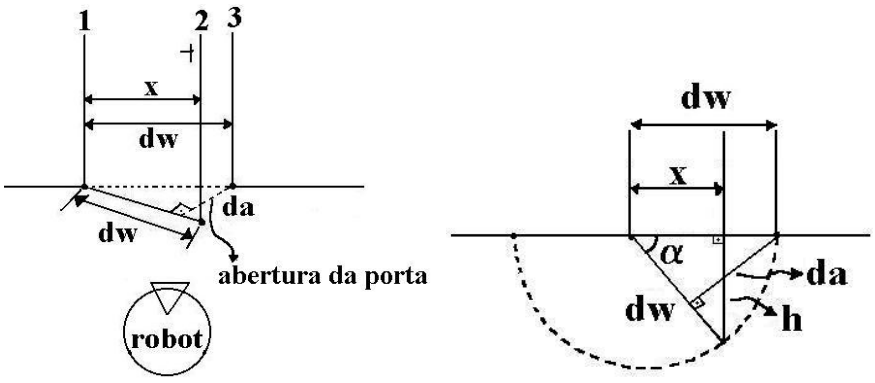
Figura 4.6. Robô inclinado à direita em relação à parede. (a) porta fechada, (b) porta entreaberta, (c) porta aberta, (d) porta totalmente aberta.

A identificação de uma porta fechada é dada através da localização de 2 retas verticais terminando na reta suporte que define o rodapé. Uma porta totalmente aberta é identificada através da localização de 3 retas verticais também terminando na reta suporte que define o rodapé. E, a distinção entre porta entreaberta e porta aberta é realizada através da análise das projeções das bases das retas verticais à reta virtual como realizado no caso anterior (robô à esquerda em relação à parede).

4.3 Cálculo da Abertura da Porta

O cálculo da abertura da porta é necessário quando a porta visualizada pelo robô é classificada como entreaberta. Para que o cálculo da abertura seja realizado, é

necessário que o robô esteja perpendicular à parede. Basta então medir a distância das retas verticais correpondentes ao portal da porta. Conhecida a largura da porta, o cálculo da abertura da porta mostrada na Figura 4.7 (b). A Figura 4.7 (a) ilustra a o robô perpendicular à porta e as características necessárias para realizarmos o cálculo da abertura.



(a) (b)

Figura 4.7. Modelo de uma porta entreaberta utilizado no cálculo de sua abertura.

Na Figura 4.7 dw representa a dimensão da porta, x representa a distância entre a aresta do portal esquerdo e a aresta do meio (aresta da aba da porta), da representa a menor distância da abertura da porta e h representa o comprimento da aresta da porta que se estende abaixo da reta suporte do rodapé, onde h = da. O cálculo da abertura da porta é dado por

$$dw^2 = x^2 + h^2 \qquad (4.2)$$

esta equação pode ser reescrita como:

$$da = \sqrt{(dw^2 - x^2)} \quad \textbf{(4.3)}$$

o valor encontrado na Equação 4.3 é dado em pixels, precisamos utilizar um fator de proporção pixel x centrímetros, a fim de identificarmos a dimensão real da abertura da porta. Para identificarmos este fator de proporcionalidade, é preciso conhecer a largura real da porta. em centímetros O fator de proporcionalidade **f** pode ser calculado então através da Equação 4.4.

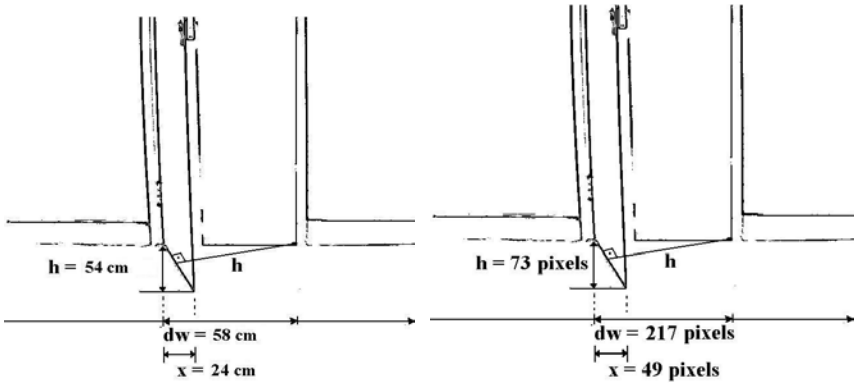
$$f = 58 \text{ cm}/(dw \text{ pixels}) \quad \textbf{(4.4)}$$

a dimensão real da abertura da porta w deve ser calculada através da Equação 4.5.

$$w = da*f \quad \textbf{(4.5)}$$

onde a dimensão real da abertura da porta w da é medido em pixels

A Figura 4.8 (a) ilustra uma imagem real com suas dimensões em centímetros e (b) a mesma imagem com as dimensões em pixel. A seguir calculamos a dimensão w da abertura da imagem, a partir dos valores em pixel.



(a) (b)

Figura 4.8. (a) dimensões reais de uma porta entreaberta, (b) dimensões em pixel de uma porta entreaberta.

$$w = da*f \quad (4.6)$$

$$w = \sqrt{(dw^2 - x^2)} * 58cm/(dw\ pixels) \quad (4.7)$$

$$w = \sqrt{(217^2 - 49^2)} * 58cm/(217\ pixels) \quad (4.8)$$

$$w = 56{,}43\ cm \quad (4.9)$$

Há um erro de aproximação entre o valor da abertura real da porta e o valor calculado. O erro é de aproximadamente 2,3 cm, em termos percentuais equivalente a 4,25%. Este erro é considerado pelo robô acerca da possibilidade de atravessar a porta.

O capítulo a seguir apresenta alguns resultados obtidos a partir de imagens capturadas dos diferentes estados da porta, capturadas em diferentes posições relativas do robô, onde aplicamos as regras definidas no capítulo 3 para reconhecimento do estado da porta e também o algoritmo proposto neste capítulo para medir a abertura da porta.

5

Resultado Experimentais

Este capítulo descreve alguns resultados experimentais obtidos pelo sistema de identificação da posição relativa do robô, reconhecimento do estado da porta e também medida de sua abertura.

5.1. Robô perpendicular à parede

Esta seção ilustra os diferentes estados da porta visualizados pelo robô localizado perpendicularmente em relação à parede.

5.1.1. Porta fechada

Uma vez localizado perpendicularmente em relação à parede uma porta pode ser classificada como fechada quando encontramos apenas duas retas verticais. Neste caso não é necessário realizar cálculos adicionais a respeito do estado da porta. O robô necessita então procurar por um caminho alternativo. A Figura 5.1 ilustra uma situação em que o robô se encontra perpendicular em relação à parede e a porta está fechada. Em (a) é ilustrado a imagem capturada pela câmera. Em (b) a imagem de contorno da porta

e as coordenadas das arestas verticais dadas por ρ1 e ρ3 e em (c) é ilustrada a aplicação da transformada de Hough da imagem de contorno e a identificação das retas verticais.

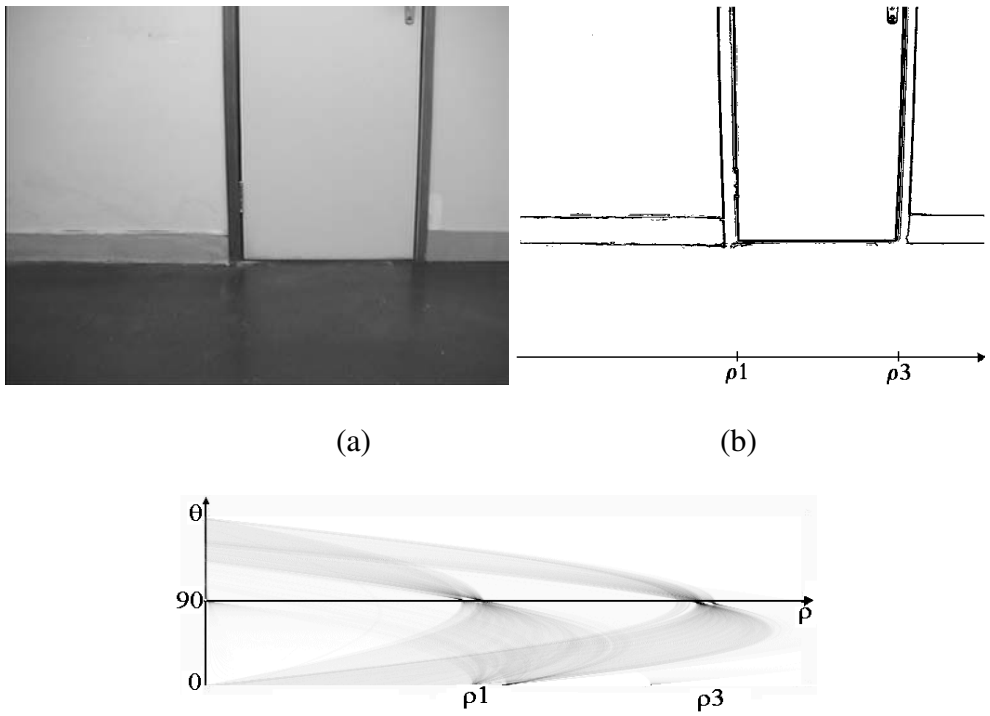


Figura 5.1. imagem de uma porta fechada capturada pelo robô perpendicular à parede, (b) imagem de contorno da porta – em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta.

O número de retas verticais e suas localizações (ρ1 e ρ3) são dadas pela transformada de Hough. Os valores extraídos são mostrados na Tabela 5.1.

No. retas verticais		2
	$\overline{\rho i}$	$\overline{\theta i}$
Reta esquerda ρ1	284	90
Reta meio ρ2	-	-
Reta direita ρ3	520	90

Tabela 5.1. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.1 (c).

A Figura 5.2 ilustra a aplicação da janela de covariância, a fim de identificar os parâmetros de inclinação do rodapé. A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros da janela de covariância e o ângulo de inclinação do rodapé θ. A Tabela 5.3 apresenta as coordenadas das bases de cada uma das arestas verticais.

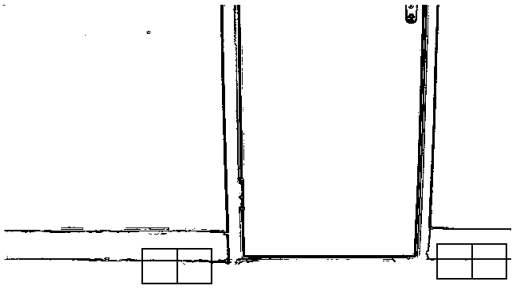


Figura 5.2. Porta fechada - identificação do rodapé.

Janela esquerda			
$\mu 1_x$	236,07	$\mu 2_x$	255,30
$\mu 1_y$	325,17	$\mu 2_y$	325,25
$\sigma 1_x^2$	32,52	$\sigma 2_x^2$	35,12
$\sigma 1_y^2$	1,39	$\sigma 2_y^2$	1,39
r1	-0,193	r2	0,569
$\theta 1$	-0,04	$\theta 2$	0,11

Janela direita			
$\mu 1_x$	565,50	$\mu 2_x$	584,38
$\mu 1_y$	322,50	$\mu 2_y$	322,57
$\sigma 1_x^2$	34,10	$\sigma 2_x^2$	32,78
$\sigma 1_y^2$	0,26	$\sigma 2_y^2$	0,35
r1	0,0	r2	-0,052
$\theta 1$	0,0	$\theta 2$	-0,01

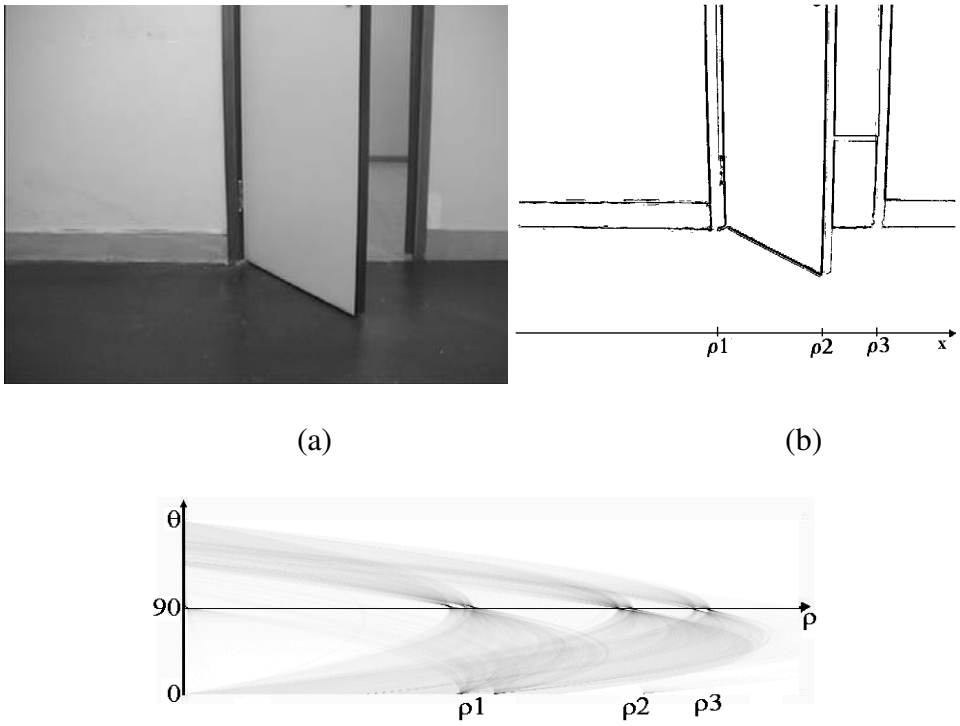
Tabela 5.2. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.2. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta.

No. retas verticais		2
	x_i	y_i
Reta esquerda	283	325
Reta meio	-	-
Reta direita	518	325

Tabela 5.3. Coordenadas da base das arestas verticais referentes à Figura 5.2.

5.1.2. Porta entreaberta

Uma porta entreaberta se distingue de uma porta fechada através do número de arestas encontradas na imagem. Uma porta entreaberta possui três arestas verticais definindo seu contorno: duas arestas definindo o portal da porta e uma terceira, entre elas, definindo a aresta da própria porta. No entanto, o número de retas encontradas na imagem não é característica suficiente para distinguir uma porta entreaberta de uma porta aberta ou mesmo totalmente aberta. Necessitamos então avaliar as posições relativas das projeções perpendiculares das bases das arestas verticais à reta virtual paralela ao rodapé. A Figura 5.3 ilustra uma situação em que o robô se encontra perpendicular em relação à parede e a porta está entreaberta. Em (a) é ilustrado a imagem capturada pela câmera. Em (b) a imagem de contorno da porta e as coordenadas das arestas verticais dadas por $\rho 1$ e $\rho 3$ e em (c) é ilustrada a aplicação da transformada de Hough da imagem de contorno e a identificação das retas verticais.



(a) (b)

(c)

Figura 5.3. imagem de uma porta entreaberta capturada pelo robô perpendicular à parede, (b) imagem de contorno da porta – em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta.

O número de retas verticais e suas localizações (ρ1 e ρ3) são dadas pela transformada de Hough. Os valores extraídos são mostrados na Tabela 5.4.

No. retas verticais		3
	$\bar{\rho}i$	$\bar{\theta}i$
Reta esquerda ρ1	301	90
Reta meio ρ2	446	91
Reta direia ρ3	525	92

Tabela 5.4. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.3 (c).

A Figura 5.4 ilustra a aplicação da janela de covariância, a fim de identificar os parâmetros de inclinação do rodapé. A Tabela 5.5 apresenta os parâmetros da janela de

covariância e o ângulo de inclinação do rodapé θ. A Tabela 5.6 apresenta as coordenadas das bases de cada uma das arestas verticais.

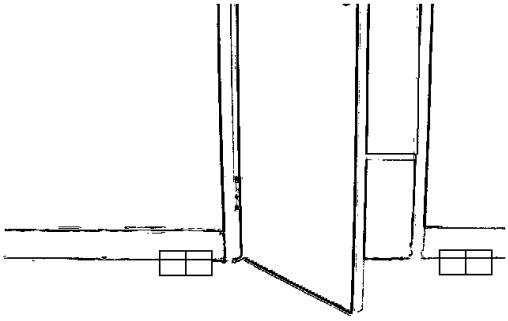


Figura 5.4 porta entreaberta – identificação do rodapé.

Janela esquerda			
$\mu 1_x$	235,02	$\mu 2_x$	253,08
$\mu 1_y$	325,57	$\mu 2_y$	325,31
$\sigma 1_x^2$	31,28	$\sigma 2_x^2$	27,78
$\sigma 1_y^2$	1,42	$\sigma 2_y^2$	2,28
r1	-0,191	r2	0,04
$\theta 1$	-0,04	$\theta 2$	0,09

Janela direita			
$\mu 1_x$	565,39	$\mu 2_x$	584,40
$\mu 1_y$	322,54	$\mu 2_y$	322,57
$\sigma 1_x^2$	33,74	$\sigma 2_x^2$	32,73
$\sigma 1_y^2$	0,30	$\sigma 2_y^2$	32,73
r1	-0,05	r2	-0,04
$\theta 1$	0,0	$\theta 2$	0,0

Tabela 5.5. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.4. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta.

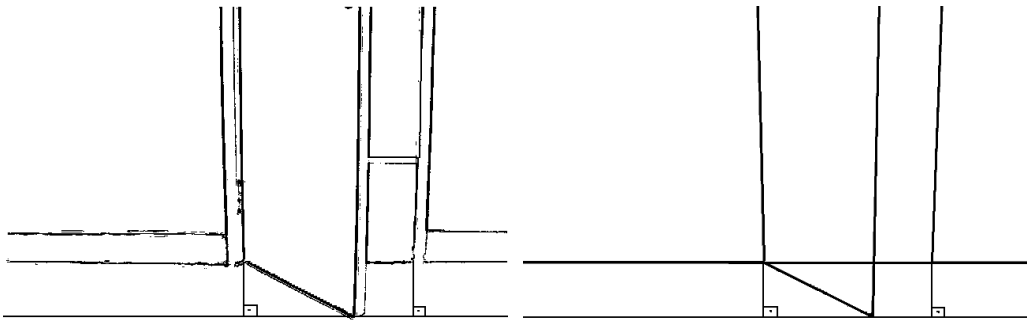
No. Retas verticais		3
	x_i	y_i
Reta esquerda	303	325
Reta meio	444	395
Reta direita	520	325

Tabela 5.6. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 5.4.

A equação da reta virtual é dada pela Equação 5.1

$$y = 0{,}0x + 391{,}50 \quad \textbf{(5.1)}$$

Dados os parâmetros de inclinação do rodapé e as coordenadas da base de cada aresta vertical, traçamos uma linha virtual paralela ao rodapé passando pelas coordenadas da base da aresta da porta e então traçamos projeções perpendiculares da base de cada aresta vertical à reta virtual. A Figura 5.5 ilustra a reta virtual sobre a imagem de contorno da porta entreaberta e também as projeções perpendiculares. A Tabela 5.7 apresenta as coordenadas das projeções do pé das retas verticais à paralela ao rodapé.



(a) (b)

Figura 5.5. Desenho da reta virtual paralela ao rodapé – (a) imagem real, (b) modelo simplificado.

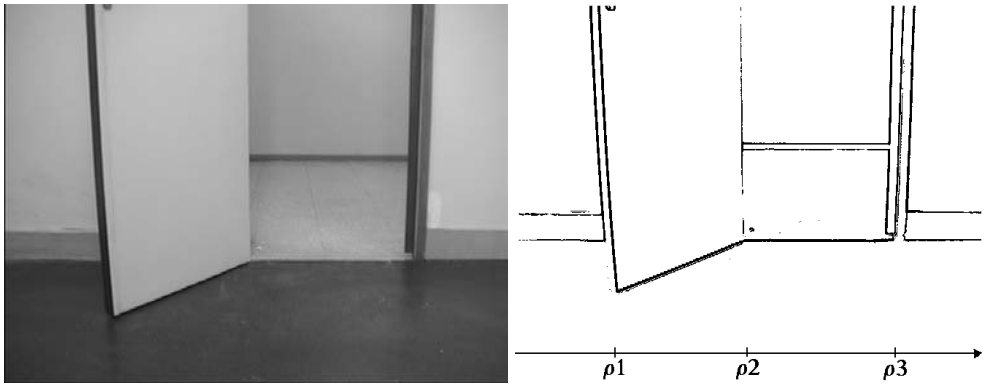
No. Retas verticais		3
	x_i	y_i
Reta esquerda	304	392
Reta meio	443	395
Reta direita	519	393

Tabela 5.7. Coordenadas das projeções das bases das retas verticais na reta virtual referentes à Figura 5.5.

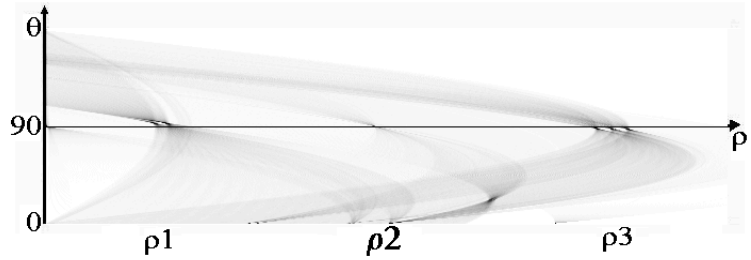
Através da avaliação das coordenadas de cada uma das projeções das bases da reta, podemos verificar que a projeção da aresta da porta (q) se encontra no intervalo do segmento definido pelas projeções do portal da porta: portal esquerdo (q_e) e portal direito (q_d). Logo, podemos concluir que a porta está entreaberta. Neste caso o robô necessita calcular a abertura da porta a fim de identificar se ele consegue atravessá-la ou não, dadas suas dimensões.

5.1.3. Porta aberta

Uma porta aberta também possui três linhas retas verticais delimitando seu contorno. Porém, apenas esta característica não define exclusivamente o estado aberto da porta, uma vez que uma porta entreaberta e também uma porta totalmente aberta também possui estas características. Necessitamos então identificar outras características e, observando a Figura 5.6 (a) notamos que a aresta que define o contorno da porta (p) se encontra fora do intervalo definido pelas arestas do portal da porta (p_e e p_d). Podemos notar também que a base da aresta da porta (p) não se encontra alinhada em relação às bases das outras duas arestas da porta. As projeções perpendiculares das bases da porta sobre a reta virtual corroboram a hipótese da posição relativa das arestas verticais. A Figura 5.6 ilustra uma situação em que o robô se encontra perpendicular em relação à parede e a porta está aberta. Em (a) é ilustrada a imagem de contorno de uma porta aberta, em (b) é ilustrada a imagem de contorno da porta e as coordenadas das arestas verticais dadas por ρ1, ρ2 e ρ3 e em (c) é ilustrada a aplicação da transformada de Hough da imagem de contorno e a identificação das retas verticais.



(a) (b)



(c)

Figura 5.6. imagem de uma porta aberta capturada pelo robô perpendicular à parede, (b) imagem de contorno da porta – em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta.

O número de retas verticais e suas localizações (ρ1, ρ2 e ρ3) são dadas pela transformada de Hough. Os valores extraídos são mostrados na Tabela 5.8.

No. retas verticais		3
	$\overline{\rho i}$	$\overline{\theta i}$
Reta esquerda ρ1	116	88
Reta meio ρ2	309	89
Reta direita ρ3	530	90

Tabela 5.8. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.6 (c).

A Figura 5.7 ilustra a aplicação da janela de covariância, a fim de identificar os parâmetros de inclinação do rodapé. A Tabela 5.9 apresenta os parâmetros da janela de covariância e o ângulo de inclinação do rodapé **θ**. A Tabela 5.10 apresenta as coordenadas das bases de cada uma das arestas verticais.

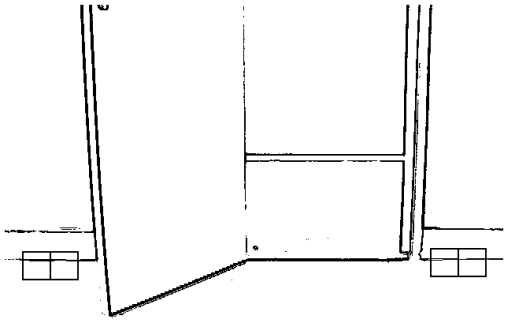


Figura 5.7. Porta aberta – identificação do rodapé.

Janela esquerda			
$\mu 1_x$	66,57	$\mu 2_x$	86,28
$\mu 1_y$	322,59	$\mu 2_y$	322,80
$\sigma 1_x^2$	36,36	$\sigma 2_x^2$	31,08
$\sigma 1_y^2$	0,30	$\sigma 2_y^2$	0,57
r1	-0,054	r2	0,04
$\theta 1$	0,0	$\theta 2$	0,06

Janela direita			
$\mu 1_x$	565,54	$\mu 2_x$	583,91
$\mu 1_y$	322,98	$\mu 2_y$	335,44
$\sigma 1_x^2$	34,29	$\sigma 2_x^2$	31,22
$\sigma 1_y^2$	0,67	$\sigma 2_y^2$	0,63
r1	0,02	r2	-0,15
$\theta 1$	0,0	$\theta 2$	-0,02

Tabela 5.9. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.7. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta.

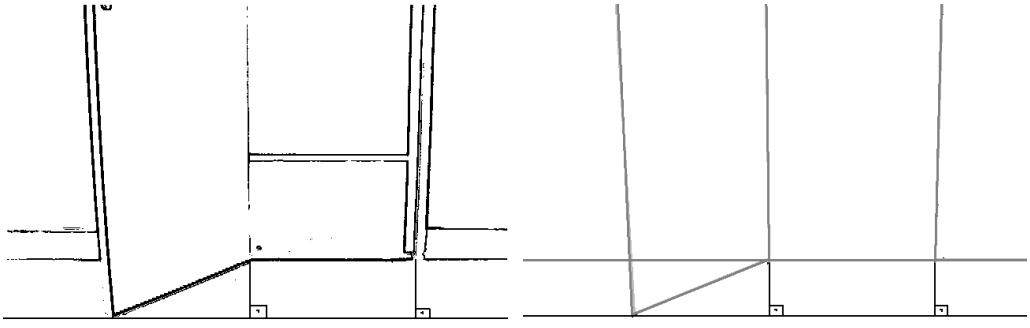
No. Retas verticais		3
	x_i	y_i
Reta esquerda	118	395
Reta meio	310	325
Reta direita	530	324

Tabela 5.10. Coordenadas da base das arestas verticais referentes à Figura 5.7.

A equação da reta virtual é dada pela Equação 5.2

$$y = 0{,}0x + 397{,}50 \tag{5.2}$$

Dados os parâmetros de inclinação do rodapé e as coordenadas da base de cada aresta vertical, traçamos uma linha virtual paralela ao rodapé passando pelas coordenadas da base da aresta da porta e então traçamos projeções perpendiculares da base de cada aresta vertical à reta virtual. A Figura 5.8 ilustra a reta virtual sobre a imagem de contorno da porta aberta e também suas projeções perpendiculares. A Tabela 5.11 apresenta as coordenadas das projeções do pé das retas verticais à paralela ao rodapé.



(a) (b)

Figura 5.8. Desenho da reta virtual paralela ao rodapé – (a) imagem real, (b) modelo simplificado.

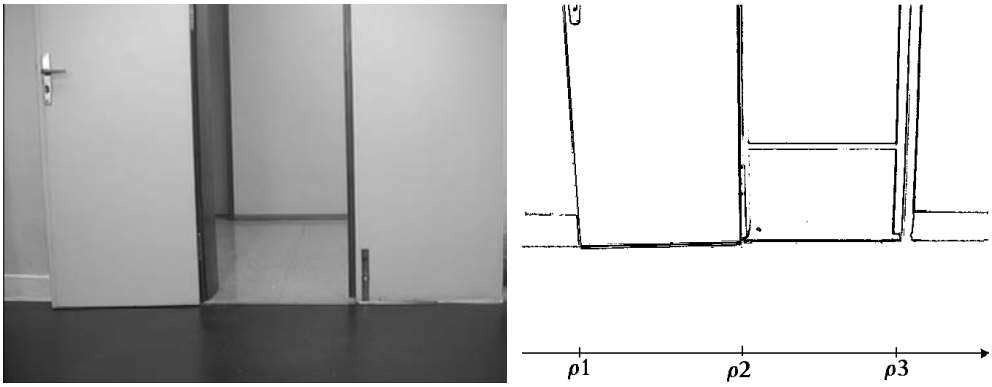
No. retas verticais		3
	x_i	y_i
Reta esquerda	138	398
Reta meio	312	397
Reta direita	523	399

Tabela 5.11. Coordenadas das projeções das bases das retas verticais na reta virtual referentes à Figura 5.8.

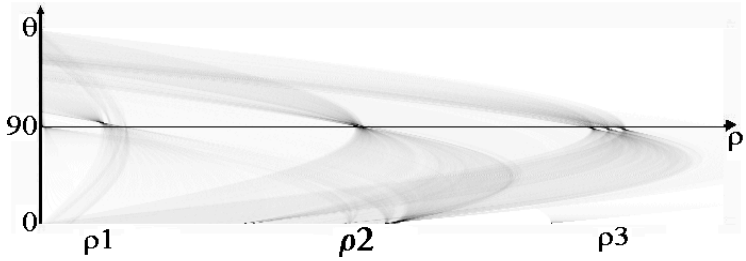
Através da avaliação das coordenadas de cada uma das projeções das bases da reta, podemos verificar que a projeção da aresta da porta (q) se encontra fora do intervalo do segmento definido pelas projeções do portal da porta: portal esquerdo (q_e) e portal direito (q_d). Logo, podemos concluir que a porta está aberta. Neste caso o robô pode atravessá-la seguindo sua trajetória previamente definida, dado que o caminho encontra-se desobstruído.

5.1.4. Porta totalmente aberta

Uma porta totalmente aberta se caracteriza por apresentar três linhas retas verticais e a base destas arestas está sobre uma mesma reta suporte, a reta que define o rodapé da porta. Identificadas estas características é possível distinguir o estado da porta sem a necessidade de realizar todos os cálculos adicionais a fim de identificar a abertura da porta. A Figura 5.9 ilustra uma situação em que o robô se encontra perpendicular em relação à parede e a porta está totalmente aberta. Em (a) é ilustrado a imagem capturada pela câmera. Em (b) a imagem de contorno da porta e as coordenadas das arestas verticais dadas por ρ1, ρ2 e ρ3 e, em (c) é ilustrada a aplicação da transformada de Hough da imagem de contorno e a identificação das retas verticais.



(a) (b)



(c)

Figura 5.9. imagem de uma porta totalmente aberta capturada pelo robô perpendicular à parede, (b) imagem de contorno da porta – em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta.

O número de retas verticais e suas localizações (ρ1 e ρ3) são dadas pela transformada de Hough. Os valores extraídos são mostrados na Tabela 5.12.

No. retas verticais		3
	$\overline{\rho i}$	$\overline{\theta i}$
Reta esquerda ρ1	60	88
Reta meio ρ2	298	90
Reta direita ρ3	531	92

Tabela 5.12. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.9 (c).

A Figura 5.10 ilustra a aplicação da janela de covariância, a fim de identificar os parâmetros de inclinação do rodapé. A Tabela 5.13 apresenta os parâmetros da janela de covariância e o ângulo de inclinação do rodapé **θ**. A Tabela 5.14 apresenta as coordenadas das bases de cada uma das arestas verticais.

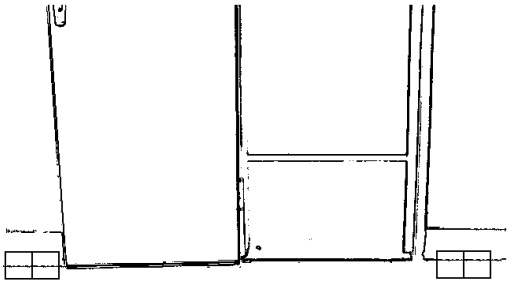


Figura 5.10. Porta totalmente aberta – identificação do rodapé.

Janela esquerda			
$\mu 1_x$	35,11	$\mu 2_x$	53,84
$\mu 1_y$	323,11	$\mu 2_y$	322,54
$\sigma 1_x^2$	36,45	$\sigma 2_x^2$	30,81
$\sigma 1_y^2$	1,48	$\sigma 2_y^2$	0,26
r1	0,186	r2	0,131
$\theta 1$	0,04	$\theta 2$	0,01

Janela direita			
$\mu 1_x$	568,47	$\mu 2_x$	586,75
$\mu 1_y$	323,02	$\mu 2_y$	323,05
$\sigma 1_x^2$	34,25	$\sigma 2_x^2$	33,19
$\sigma 1_y^2$	0,73	$\sigma 2_y^2$	0,88
r1	-0,03	r2	-0,19
$\theta 1$	0,0	$\theta 2$	-0,03

Tabela 5.13. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.10. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta.

No. Linhas retas		3
	x_i	y_i
Reta esquerda	63	330
Reta meio	300	325
Reta direita	530	325

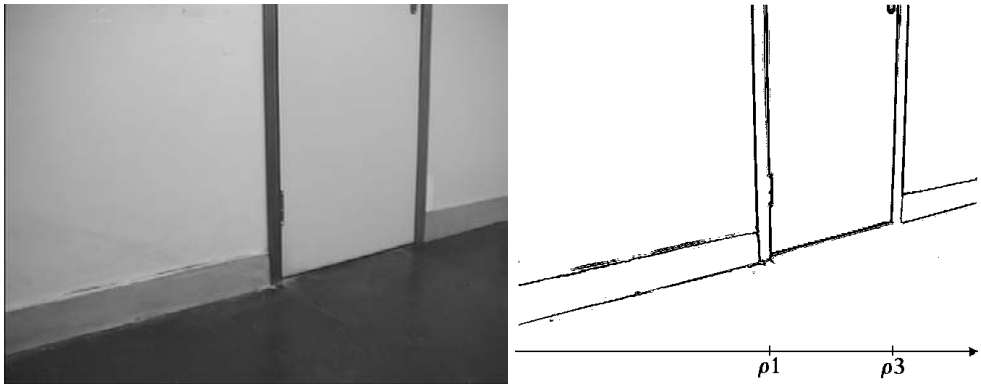
Tabela 5.14. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 5.10.

5.2. Robô à esquerda

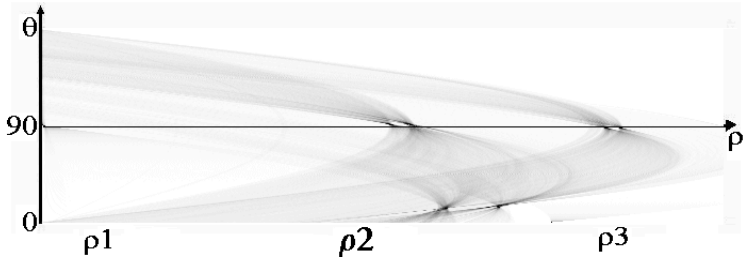
Esta seção ilustra os diferentes estados da porta visualizados pelo robô localizado inclinado à esquerda em relação à parede.

5.2.1. Porta fechada

Uma vez localizado à esquerda em relação à parede uma porta pode ser classificada como fechada quando encontramos apenas duas retas verticais cujas bases terminam no rodapé da porta. Quando o robô encontra uma porta fechada, ele necessita então procurar por um caminho alternativo. A Figura 5.11 ilustra uma situação em que o robô se encontra inclinado à esquerda em relação à parede e a porta está fechada. Em (a) é ilustrado a imagem capturada pela câmera. Em (b) a imagem de contorno da porta e as coordenadas das arestas verticais dadas por $\rho 1$ e $\rho 3$ e em (c) é ilustrada a aplicação da transformada de Hough da imagem de contorno e a identificação das retas verticais.



(a) (b)



(c)

Figura 5.11. imagem de uma porta fechada capturada pelo robô inclinado à esquerda em relação à parede, (b) imagem de contorno da porta – em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta.

O número de retas verticais e suas localizações (ρ1 e ρ3) são dadas pela transformada de Hough. Os valores extraídos são mostrados na Tabela 5.15.

No. retas verticais		2
	$\bar{\rho}i$	$\bar{\theta}i$
Reta esquerda ρ1	348	89
Reta meio ρ2	-	-
Reta direita ρ3	530	92

Tabela 5.15. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.11 (c).

A Figura 5.12 ilustra a aplicação da janela de covariância, a fim de identificar os parâmetros de inclinação do rodapé. A Tabela 5.16 apresenta os parâmetros da janela de covariância e o ângulo de inclinação do rodapé θ. A Tabela 5.17 apresenta as coordenadas das bases de cada uma das arestas verticais.

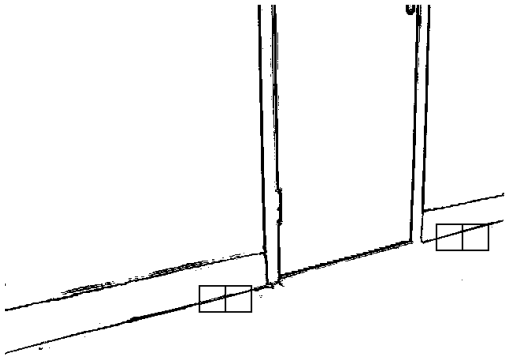


Figura 5.12. Porta fechada – identificação do rodapé.

Janela esquerda			
$\mu 1_x$	283,17	$\mu 2_x$	302,58
$\mu 1_y$	370,88	$\mu 2_y$	365,71
$\sigma 1_x^2$	33,72	$\sigma 2_x^2$	34,55
$\sigma 1_y^2$	2,49	$\sigma 2_y^2$	4,25
r1	-0,893	r2	-0,912
θ1	-0,24	θ2	-0,32

Janela direita			
$\mu 1_x$	564,81	$\mu 2_x$	583,42
$\mu 1_y$	291,81	$\mu 2_y$	286,64
$\sigma 1_x^2$	34,98	$\sigma 2_x^2$	33,25
$\sigma 1_y^2$	3,30	$\sigma 2_y^2$	3,00
r1	-0,90	r2	-0,88
θ1	-0,28	θ2	-0,27

Tabela 5.16. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.12. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta.

No. Retas verticais		2
	x_i	y_i
Reta esquerda	350	353
Reta meio	-	-
Reta direita	530	305

Tabela 5.17. Coordenadas da base das arestas verticais referentes à Figura 5.12.

A equação da reta virtual é dada pela Equação 5.3

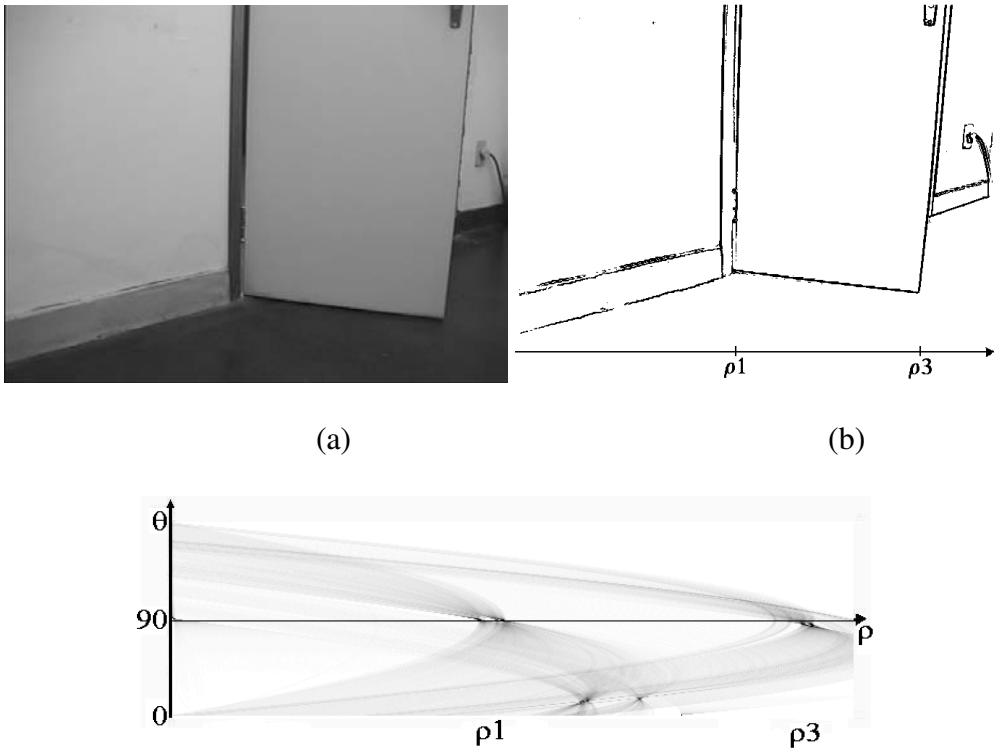
$$y = -0,26x + 444,35 \quad \textbf{(5.3)}$$

Dados os parâmetros de inclinação do rodapé e as coordenadas da base de cada aresta vertical classificamos a porta como fechada.

5.2.2. Porta entreaberta

Quando o robô está localizado à esquerda em relação à parede, o número de retas verticais que observamos quando a porta está fechada é o mesmo número de retas que observamos quando a porta está entreaberta, no entanto, uma diferença crucial entre os estados da porta são as coordenadas das bases das arestas verticais. Numa porta entreaberta uma das arestas não termina na reta que define o rodapé. Esta reta vertical define dois pontos essenciais: um dos pontos é a própria base da porta e o outro é o ponto de intersecção entre o rodapé e a própria aresta. Através das projeções destes pontos à reta virtual conseguiremos identificar o estado da porta. A Figura 5.13 ilustra uma situação em que o robô se encontra inclinado à esquerda em relação à parede e a porta está entreaberta. Em (a) é ilustrado a imagem capturada pela câmera. Em (b) a

imagem de contorno da porta e as coordenadas das arestas verticais dadas por ρ1 e ρ3 e em (c) é ilustrada a aplicação da transformada de Hough da imagem de contorno e a identificação das retas verticais.



(a) (b)

(c)

Figura 5.13. imagem de uma porta fechada capturada pelo robô inclinado à esquerda em relação à parede, (b) imagem de contorno da porta – em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta.

O número de retas verticais e suas localizações (ρ1 e ρ3) são dadas pela transformada de Hough. Os valores extraídos são mostrados na Tabela 5.18.

No. Retas verticais		2
	$\overline{\rho i}$	$\overline{\theta i}$
Reta esquerda ρ1	299	90
Reta meio ρ2	-	-
Reta direita ρ3	591	94

Tabela 5.18. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.13 (c).

A Figura 5.14 ilustra a aplicação da janela de covariância, a fim de identificar os parâmetros de inclinação do rodapé. A Tabela 5.19 apresenta os parâmetros da janela de covariância e o ângulo de inclinação do rodapé θ. A Tabela 5.20 apresenta as coordenadas das bases de cada uma das arestas verticais.

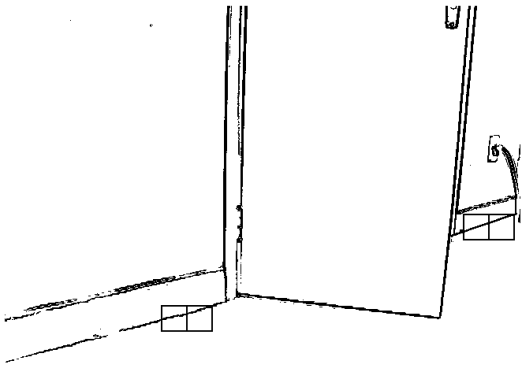


Figura 5.14. Porta entreaberta – identificação do rodapé.

Janela esquerda			
$\mu 1_x$	235,40	$\mu 2_x$	255,46
$\mu 1_y$	391,73	$\mu 2_y$	385,78
$\sigma 1_x^2$	33,40	$\sigma 2_x^2$	30,58
$\sigma 1_y^2$	3,06	$\sigma 2_y^2$	2,99
r1	-0,930	r2	-0,931
$\theta 1$	-15,72	$\theta 2$	-16,23

Janela direita			
$\mu 1_x$	591,66	$\mu 2_x$	611,44
$\mu 1_y$	286,70	$\mu 2_y$	281,49
$\sigma 1_x^2$	36,36	$\sigma 2_x^2$	30,36
$\sigma 1_y^2$	3,09	$\sigma 2_y^2$	2,89
r1	-0,874	r2	-0,923
$\theta 1$	-14,31	$\theta 2$	-15,09

Tabela 5.19. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.14. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta.

No. retas verticais		2
	$\mathbf{x_i}$	$\mathbf{y_i}$
Reta esquerda	299	372
Reta meio	-	-
Reta direita	560	399

Tabela 5.20. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 5.14.

A equação da reta virtual é dada pela Equação 5.4

$$y = -0,28x + 554,22 \qquad \textbf{(5.4)}$$

Dados os parâmetros de inclinação do rodapé e as coordenadas da base de cada aresta vertical, traçamos uma linha virtual paralela ao rodapé passando pelas coordenadas da base da aresta da porta e então traçamos projeções perpendiculares da base de cada aresta vertical à reta virtual. A Figura 5.15 ilustra a reta virtual sobre a imagem de

contorno da porta entreaberta e também as projeções perpendiculares. A Tabela 5.21 apresenta as coordenadas das projeções do pé das retas verticais à paralela ao rodapé.

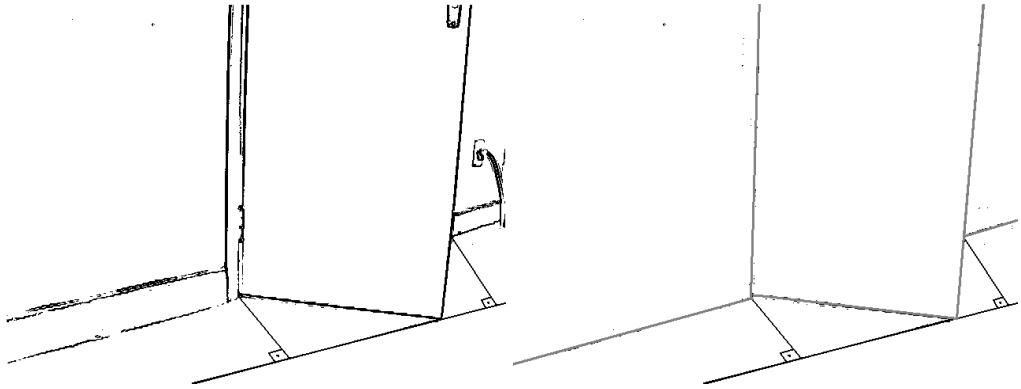


Figura 5.15. Desenho da reta virtual paralela ao rodapé – (a) imagem real, (b) modelo simplificado.

No. Retas Verticais		3
	x_i	y_i
Reta esquerda	379	448
Reta meio	559	400
Reta direita	638	377

Tabela 5.21. Coordenadas das projeções das bases das retas verticais na reta virtual referentes à Figura 5.15.

Através da avaliação das coordenadas de cada uma das projeções das bases da reta, podemos verificar que a projeção da aresta da porta (q) se encontra no intervalo do segmento definido pelas projeções do portal da porta: portal esquerdo (q_e) e portal direito (q_d). Logo, podemos concluir que a porta está entreaberta. Neste caso o robô necessita calcular a abertura da porta a fim de identificar se ele consegue atravessá-la ou não, dadas suas dimensões.

5.2.3. Porta aberta

Uma vez localizado à esquerda em relação à parede e estando a porta aberta, conseguimos visualizar 3 retas verticais das quais duas terminam na reta que define o rodapé. Além desta característica, utilizamos a análise da projeção das bases das retas verticais ao rodapé afim de identificar o estado da porta. A Figura 5.16 ilustra uma situação em que o robô se encontra inclinado à esquerda em relação à parede e a porta está aberta. Em (a) é ilustrado a imagem capturada pela câmera. Em (b) a imagem de contorno da porta e as coordenadas das arestas verticais dadas por ρ1 e ρ3 e em (c) é ilustrada a aplicação da transformada de Hough da imagem de contorno e a identificação das retas verticais.

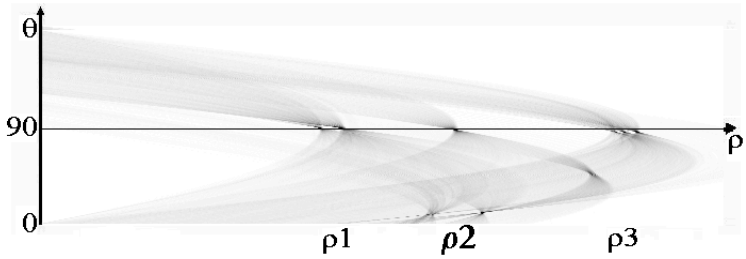


Figura 5.16. imagem de uma porta fechada capturada pelo robô inclinado à esquerda em relação à parede, (b) imagem de contorno da porta – em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta.

O número de retas verticais e suas localizações (ρ1, ρ2 e ρ3) são dadas pela transformada de Hough. Os valores extraídos são mostrados na Tabela 5.22.

No. retas verticais		3
	$\bar{\rho}i$	$\bar{\theta}i$
Reta esquerda ρ1	273	91
Reta meio ρ2	385	92
Reta direita ρ3	545	94

Tabela 5.22. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.16 (c).

A Figura 5.17 ilustra a aplicação da janela de covariância, a fim de identificar os parâmetros de inclinação do rodapé. A Tabela 5.23 apresenta os parâmetros da janela de covariância e o ângulo de inclinação do rodapé θ. A Tabela 5.24 apresenta as coordenadas das bases de cada uma das arestas verticais.

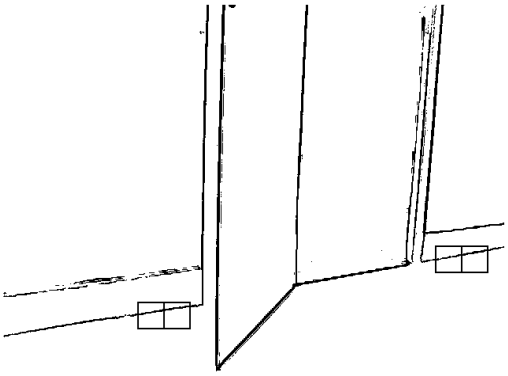


Figura 5.17 Porta aberta – identificação do rodapé.

Janela esquerda			
$\mu 1_x$	209,83	$\mu 2_x$	228,87
$\mu 1_y$	384,63	$\mu 2_y$	381,48
$\sigma 1_x^2$	37,08	$\sigma 2_x^2$	37,94
$\sigma 1_y^2$	1,71	$\sigma 2_y^2$	1,51
r1	-0,822	r2	-0,799
$\theta 1$	-10,02	$\theta 2$	-9,06

Janela direita			
$\mu 1_x$	559,14	$\mu 2_x$	579,52
$\mu 1_y$	321,12	$\mu 2_y$	317,44
$\sigma 1_x^2$	40,70	$\sigma 2_x^2$	39,31
$\sigma 1_y^2$	1,66	$\sigma 2_y^2$	1,74
r1	-0,867	r2	-0,834
$\theta 1$	-7,71	$\theta 2$	-9,95

Tabela 5.23. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.17.

No. retas verticais		3
	x_i	y_i
Reta esquerda	273	463
Reta meio	371	356
Reta direita	515	330

Tabela 5.24. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 5.17.

A equação da reta virtual é dada pela Equação 5.5

$$y = -0,20x + 518,45 \quad \textbf{(5.5)}$$

Dados os parâmetros de inclinação do rodapé e as coordenadas da base de cada aresta vertical, traçamos uma linha virtual paralela ao rodapé passando pelas coordenadas da base da aresta da porta e então traçamos projeções perpendiculares da base de cada aresta vertical à reta virtual. A Figura 5.18 ilustra a reta virtual sobre a imagem de contorno da porta entreaberta e também as projeções perpendiculares. A Tabela 5.25 apresenta as coordenadas das projeções do pé das retas verticais à paralela ao rodapé.

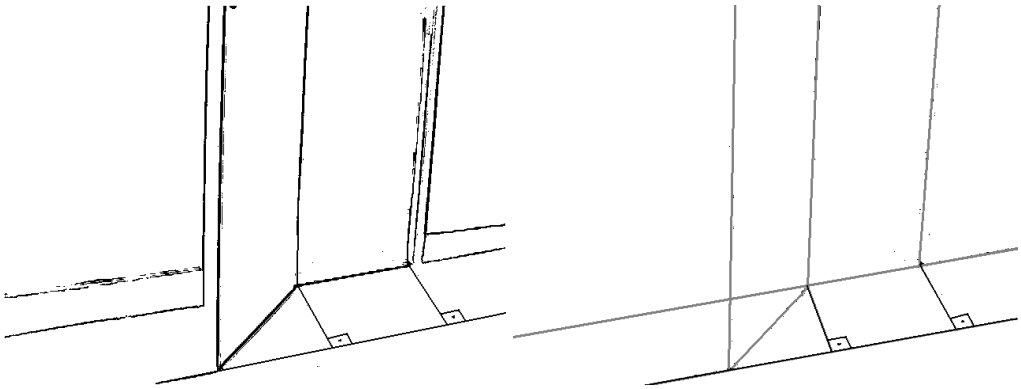


Figura 5.18. Desenho da reta virtual paralela ao rodapé – (a) imagem real, (b) modelo simplificado.

No. retas verticais		3
	x_i	y_i
Reta esquerda	274	463
Reta meio	428	433
Reta direita	570	404

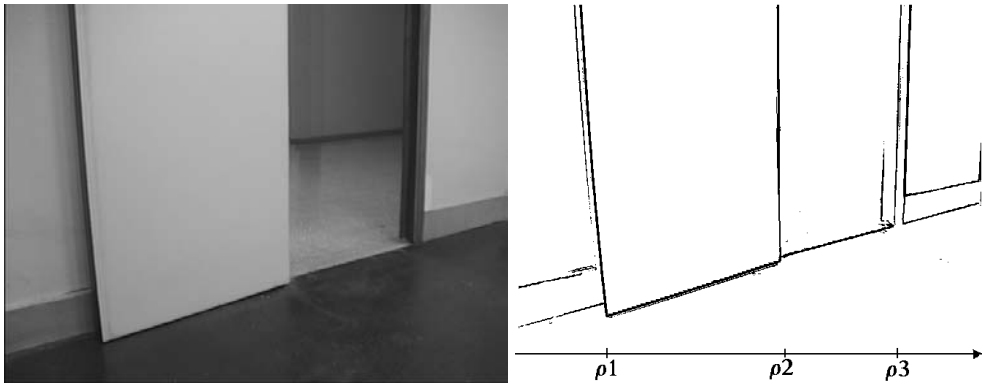
Tabela 5.25. Coordenadas das projeções das bases das retas verticais na reta virtual referentes à Figura 5.18.

Através da avaliação das coordenadas de cada uma das projeções das bases da reta, podemos verificar que a projeção da aresta da porta (q) se encontra fora do intervalo do segmento definido pelas projeções do portal da porta: portal esquerdo (q_e) e portal

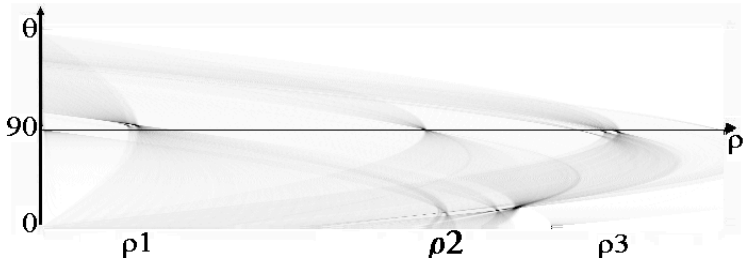
direito (q_d). Logo, podemos concluir que a porta está aberta. Neste caso o robô não necessita calcular a abertura da porta, basta atravessá-la.

5.2.4. Porta totalmente aberta

Quando o robô está localizado à esquerda em relação à parede e a porta está totalmente aberta, conseguimos visualizar 3 retas verticais e, além disso, todas as retas terminam no rodapé. Dadas estas características já é possível concluir o estado da porta. A Figura 5.19 ilustra uma situação em que o robô se encontra inclinado à esquerda em relação à parede e a porta está totalmente aberta. Em (a) é ilustrado a imagem capturada pela câmera. Em (b) a imagem de contorno da porta e as coordenadas das arestas verticais dadas por ρ1 e ρ3 e em (c) é ilustrada a aplicação da transformada de Hough da imagem de contorno e a identificação das retas verticais.



(a) (b)



(b)

Figura 5.19. imagem de uma porta fechada capturada pelo robô inclinado à esquerda em relação à parede, (b) imagem de contorno da porta – em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta.

O número de retas verticais e suas localizações (ρ1, ρ2 e ρ3) são dadas pela transformada de Hough. Os valores extraídos são mostrados na Tabela 5.26.

No. retas verticais		3
	$\bar{\rho}i$	$\bar{\theta}i$
Reta esquerda ρ1	92	87
Reta meio ρ2	361	90
Reta direita ρ3	527	92

Tabela 5.26. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.19 (c).

A Figura 5.20 ilustra a aplicação da janela de covariância, a fim de identificar os parâmetros de inclinação do rodapé. A Tabela 5.27 apresenta os parâmetros da janela de covariância e o ângulo de inclinação do rodapé **θ**. A Tabela 5.28 apresenta as coordenadas das bases de cada uma das arestas verticais.

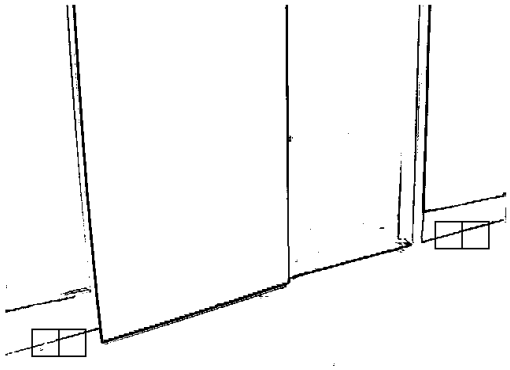


Figura 5.20. Porta totalmente aberta – identificação do rodapé.

Janela esquerda			
$\mu 1_x$	70,90	$\mu 2_x$	89,53
$\mu 1_y$	423,65	$\mu 2_y$	418,51
$\sigma 1_x^2$	33,02	$\sigma 2_x^2$	34,38
$\sigma 1_y^2$	3,31	$\sigma 2_y^2$	3,34
r1	-0,933	r2	-0,91
$\theta 1$	-0,30	$\theta 2$	-0,28

Janela direita			
$\mu 1_x$	569,71	$\mu 2_x$	588,62
$\mu 1_y$	290,08	$\mu 2_y$	284,74
$\sigma 1_x^2$	33,96	$\sigma 2_x^2$	32,97
$\sigma 1_y^2$	3,31	$\sigma 2_y^2$	2,85
r1	-0,913	r2	-0,883
$\theta 1$	-0,28	$\theta 2$	-0,26

Tabela 5.27. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.20.

No. Retas verticais		3
	x_i	y_i
Reta esquerda	94	425
Reta meio	361	347
Reta direita	525	303

Tabela 5.28. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 5.20.

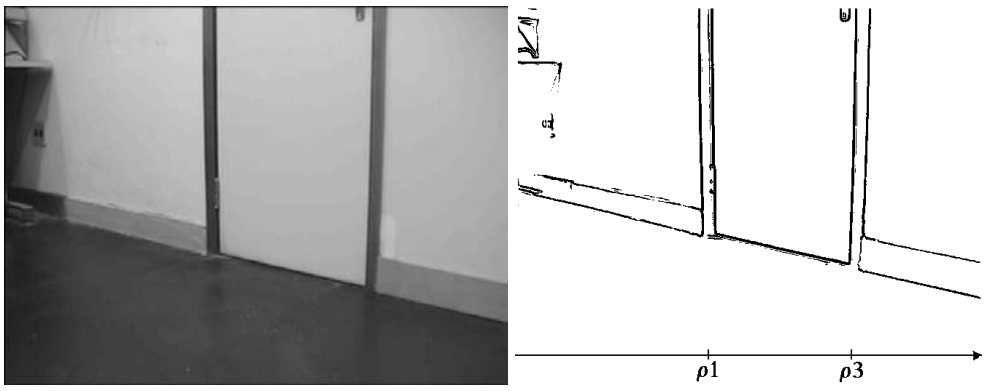
Dados os parâmetros de inclinação do rodapé e as coordenadas da base de cada aresta vertical, conseguimos identificar a porta como totalmente aberta.

5.3. Robô à direita

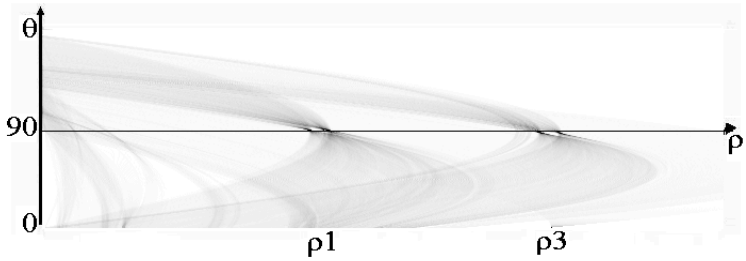
Esta seção ilustra os diferentes estados da porta visualizados pelo robô localizado inclinado à direita em relação à parede.

5.3.1. Porta fechada

Uma vez localizado à direita em relação à parede uma porta pode ser classificada como fechada quando encontramos apenas duas retas verticais cujas bases terminam no rodapé da porta. Quando o robô encontra uma porta fechada, ele necessita então procurar por um caminho alternativo. A Figura 5.21 ilustra uma situação em que o robô se encontra inclinado à direita em relação à parede e a porta está fechada. Em (a) é ilustrado a imagem capturada pela câmera. Em (b) a imagem de contorno da porta e as coordenadas das arestas verticais dadas por ρ1 e ρ3 e em (c) é ilustrada a aplicação da transformada de Hough da imagem de contorno e a identificação das retas verticais.



(a) (b)



(b)

Figura 5.21. imagem de uma porta fechada capturada pelo robô inclinado à direita em relação à parede, (b) imagem de contorno da porta – em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta.

O número de retas verticais e suas localizações (ρ1, ρ2 e ρ3) são dadas pela transformada de Hough. Os valores extraídos são mostrados na Tabela 5.29.

No. retas verticais		2
	$\bar{\rho}i$	$\bar{\theta}i$
Reta esquerda ρ1	270	90
Reta meio ρ2	-	-
Reta direita ρ3	465	90

Tabela 5.29. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.21 (c).

A Figura 5.22 ilustra a aplicação da janela de covariância, a fim de identificar os parâmetros de inclinação do rodapé. A Tabela 5.30 apresenta os parâmetros da janela de covariância e o ângulo de inclinação do rodapé θ. A Tabela 5.31 apresenta as coordenadas das bases de cada uma das arestas verticais.

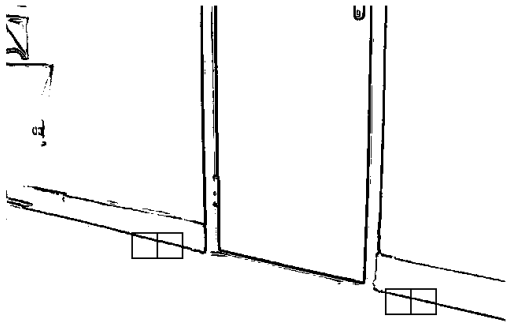


Figura 5.22. Porta fechada – identificação do rodapé.

Janela esquerda			
$\mu 1_x$	183,10	$\mu 2_x$	202,14
$\mu 1_y$	295,48	$\mu 2_y$	300,36
$\sigma 1_x^2$	34,19	$\sigma 2_x^2$	33,43
$\sigma 1_y^2$	3,50	$\sigma 2_y^2$	2,89
r1	0,871	r2	0,874
$\theta 1$	0,28	$\theta 2$	0,26

Janela direita			
$\mu 1_x$	513,31	$\mu 2_x$	532,59
$\mu 1_y$	371,13	$\mu 2_y$	375,61
$\sigma 1_x^2$	34,85	$\sigma 2_x^2$	33,16
$\sigma 1_y^2$	2,74	$\sigma 2_y^2$	2,02
r1	0,869	r2	0,805
$\theta 1$	0,24	$\theta 2$	0,20

Tabela 5.30. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.22. Os coeficientes μ_x e μ_x correspondem às médias em relação às variáveis x e y, respectivamente. Os coeficientes σ_x e σ_y correspondem às variâncias em relação às variáveis x e y. O coeficiente r corresponde a covariância entre as variáveis x e y. O coeficiente θ corresponde ao ângulo de inclinação da reta.

No. Retas verticais		2
	x_i	y_i
Reta esquerda	271	321
Reta meio	-	-
Reta direita	465	360

Tabela 5.31. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 5.22.

A equação do rodapé dada pela Equação 5.6:

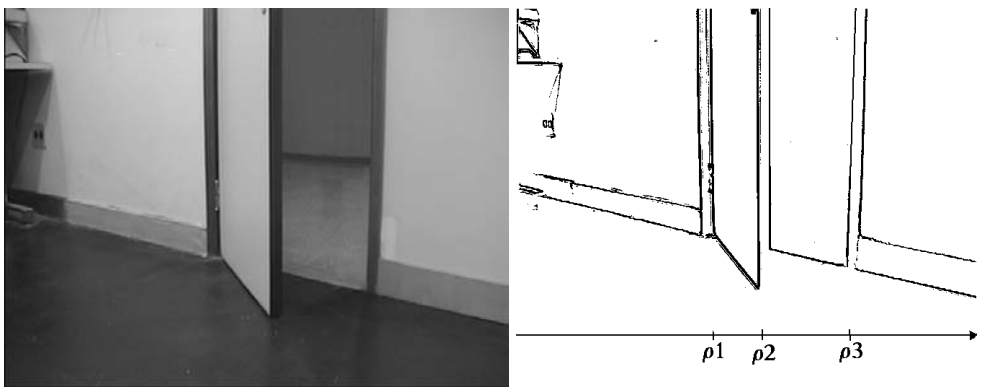
(5.6)

$$y = 0{,}23x + 252{,}62$$

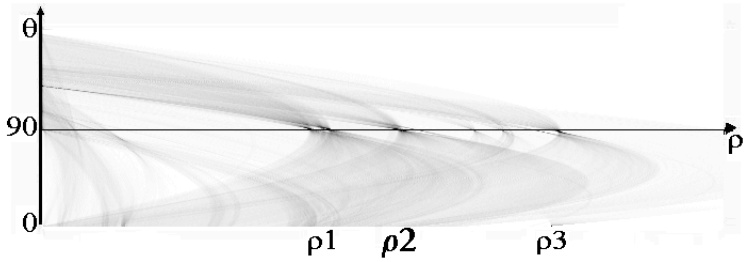
Dados os parâmetros de inclinação do rodapé e as coordenadas da base de cada aresta vertical identificamos a porta como fechada.

5.3.2. Porta entreaberta

Quando o robô está localizado à esquerda em relação à parede e a porta está entreaberta, conseguimos visualizar 3 retas verticais, das quais 2 terminam na reta definida pelo rodapé. Precisamos identificar as coordenadas da base de cada aresta vertical e então traçarmos o pé da perpendicular à reta virtual paralela ao rodapé, com o objetivo de identificar o estado da porta. No caso de uma porta entreaberta o robô necessita calcular o vão de abertura a fim de definir se é possível atravessar ou não com segurança, ou seja, sem colisão. A Figura 5.23 ilustra uma situação em que o robô se encontra inclinado à direita em relação à parede e a porta está entreaberta. Em (a) é ilustrado a imagem capturada pela câmera. Em (b) a imagem de contorno da porta e as coordenadas das arestas verticais dadas por ρ1 e ρ3 e em (c) é ilustrada a aplicação da transformada de Hough da imagem de contorno e a identificação das retas verticais.



(a) (b)



(c)

Figura 5.23. imagem de uma porta entreaberta capturada pelo robô inclinado à direita em relação à parede, (b) imagem de contorno da porta – em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta.

O número de retas verticais e suas localizações (ρ1, ρ2 e ρ3) são dadas pela transformada de Hough. Os valores extraídos são mostrados na Tabela 5.32.

No. retas verticais		3
	$\overline{\rho i}$	$\overline{\theta i}$
Reta esquerda ρ1	272	90
Reta meio ρ2	336	90
Reta direita ρ3	486	92

Tabela 5.32. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.23 (c).

A Figura 5.24 ilustra a aplicação da janela de covariância, a fim de identificar os parâmetros de inclinação do rodapé. A Tabela 5.33 apresenta os parâmetros da janela de covariância e o ângulo de inclinação do rodapé θ. A Tabela 5.34 apresenta as coordenadas das bases de cada uma das arestas verticais.

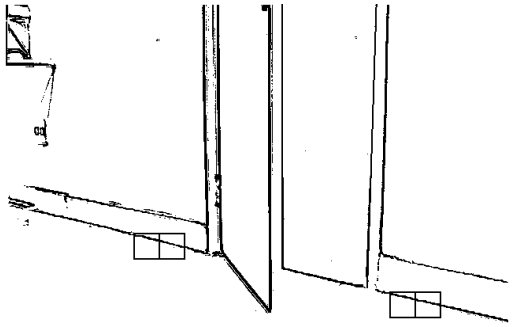


Figura 5.24. Porta entreaberta – identificação do rodapé.

Janela esquerda			
$\mu 1_x$	203,08	$\mu 2_x$	222,58
$\mu 1_y$	300,51	$\mu 2_y$	305,58
$\sigma 1_x^2$	33,95	$\sigma 2_x^2$	34,55
$\sigma 1_y^2$	2,85	$\sigma 2_y^2$	2,29
r1	0,892	r2	0,805
$\theta 1$	0,26	$\theta 2$	0,21

Janela direita			
$\mu 1_x$	499,86	$\mu 2_x$	518,31
$\mu 1_y$	367,96	$\mu 2_y$	372,27
$\sigma 1_x^2$	36,78	$\sigma 2_x^2$	32,42
$\sigma 1_y^2$	2,40	$\sigma 2_y^2$	2,92
r1	0,836	r2	0,889
$\theta 1$	0,21	$\theta 2$	0,27

Tabela 5.33. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.24.

No. Retas verticais		3
	x_i	y_i
Reta esquerda	272	320
Reta meio	336	390
Reta direita	485	361

Tabela 5.34. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 5.24.

A equação da reta virtual é dada pela Equação 5.7 e a Tabela 5.35 apresenta as coordenadas das projeções das bases das arestas verticais sobre a reta virtual.

$$y = 0{,}23x + 310{,}82 \quad \textbf{(5.7)}$$

Dados os parâmetros de inclinação do rodapé e as coordenadas da base de cada aresta vertical, traçamos uma linha virtual paralela ao rodapé passando pelas coordenadas da base da aresta da porta e então traçamos projeções perpendiculares da base de cada aresta vertical à reta virtual. A Figura 5.25 ilustra a reta virtual sobre a imagem de contorno da porta entreaberta e também as projeções perpendiculares. A Tabela 5.35 apresenta as coordenadas das projeções do pé das retas verticais à paralela ao rodapé.

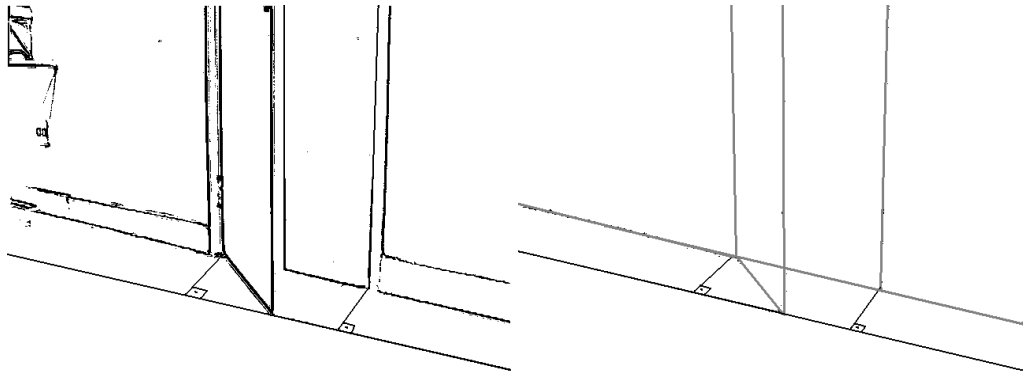


Figura 5.25. Desenho da reta virtual paralela ao rodapé – (a) imagem real, (b) modelo simplificado.

No. retas verticais		3
	x_i	y_i
Reta esquerda	215	360
Reta meio	335	390
Reta direita	414	407

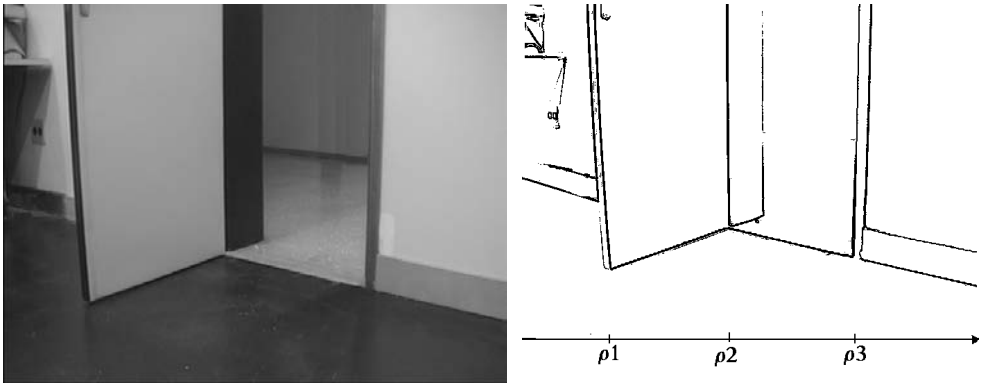
Tabela 5.35. Coordenadas das projeções das bases das retas verticais na reta virtual referentes à Figura 5.25.

Através da avaliação das coordenadas de cada uma das projeções das bases da reta, podemos verificar que a projeção da aresta da porta (q) se encontra no intervalo do segmento definido pelas projeções do portal da porta: portal esquerdo (q_e) e portal

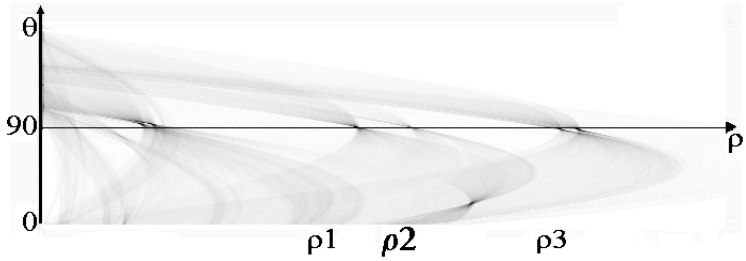
direito (q_d). Logo, podemos concluir que a porta está entreaberta. Neste caso o robô necessita calcular a abertura da porta a fim de identificar se ele consegue atravessá-la ou não, dadas suas dimensões.

5.3.3. Porta aberta

Quando o robô está localizado à esquerda em relação à parede e a porta está aberta, conseguimos visualizar 3 retas verticais, das quais 2 terminam na reta definida pelo rodapé. A fim de avaliarmos corretamente o estado da porta, necessitamos avaliar as projeções das bases das retas verticais à reta virtual paralela ao rodapé. No caso de uma porta classificada como aberta, o robô pode seguir sua trajetória sem a necessidade de calcular a abertura da porta. A Figura 5.26 ilustra uma situação em que o robô se encontra inclinado à direita em relação à parede e a porta está aberta. Em (a) é ilustrado a imagem capturada pela câmera. Em (b) a imagem de contorno da porta e as coordenadas das arestas verticais dadas por $\rho 1$ e $\rho 3$ e em (c) é ilustrada a aplicação da transformada de Hough da imagem de contorno e a identificação das retas verticais.



(a) (b)



(c)

Figura 5.26. imagem de uma porta aberta capturada pelo robô inclinado à direita em relação à parede, (b) imagem de contorno da porta – em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta.

O número de retas verticais e suas localizações (ρ1, ρ2 e ρ3) são dadas pela transformada de Hough. Os valores extraídos são mostrados na Tabela 5.36.

No. retas verticais		3
	$\bar{\rho}i$	$\bar{\theta}i$
Reta esquerda ρ1	104	87
Reta meio ρ2	295	90
Reta direita ρ3	486	92

Tabela 5.36 Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.26 (c).

Figura 5.27 ilustra a aplicação da janela de covariância, a fim de identificar os parâmetros de inclinação do rodapé. A Tabela 5.37 apresenta os parâmetros da janela de covariância e o ângulo de inclinação do rodapé θ. A Tabela 5.38 apresenta as coordenadas das bases de cada uma das arestas verticais.

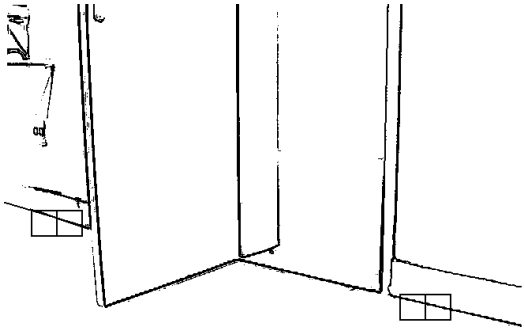


Figura 5.27. Porta aberta – identificação do rodapé.

Janela esquerda			
$\mu 1_x$	69,68	$\mu 2_x$	91,23
$\mu 1_y$	267,98	$\mu 2_y$	275,87
$\sigma 1_x^2$	33,58	$\sigma 2_x^2$	34,11
$\sigma 1_y^2$	5,41	$\sigma 2_y^2$	5,20
r1	0,908	r2	0,810
θ1	0,36	θ2	0,32

Janela direita			
$\mu 1_x$	515,66	$\mu 2_x$	534,27
$\mu 1_y$	373,57	$\mu 2_y$	372,79
$\sigma 1_x^2$	37,53	$\sigma 2_x^2$	35,11
$\sigma 1_y^2$	2,74	$\sigma 2_y^2$	3,02
r1	0,847	r2	0,862
θ1	0,23	θ2	0,25

Tabela 5.37. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.27.

No. retas verticais		3
	x_i	y_i
Reta esquerda	107	383
Reta meio	297	325
Reta direira	485	365

Tabela 5.38 Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 5.27.

A equação da reta virtual é dada pela Equação 5.8.

$$y = 0{,}25x + 349{,}07 \quad \textbf{(5.8)}$$

Dados os parâmetros de inclinação do rodapé e as coordenadas da base de cada aresta vertical, traçamos uma linha virtual paralela ao rodapé passando pelas coordenadas da base da aresta da porta e então traçamos projeções perpendiculares da base de cada aresta vertical à reta virtual. A Figura 5.28 ilustra a reta virtual sobre a imagem de contorno da porta entreaberta e também as projeções perpendiculares. A Tabela 5.39 apresenta as coordenadas das projeções do pé das retas verticais à paralela ao rodapé.

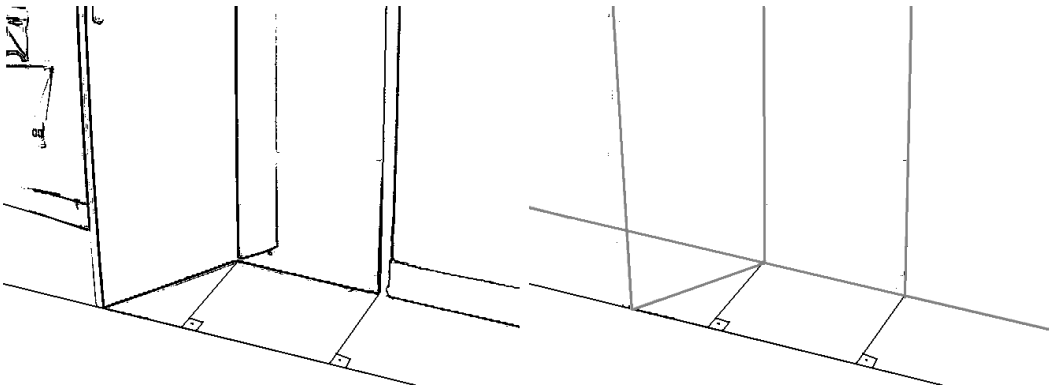


Figura 5.28. Desenho da reta virtual paralela ao rodapé – (a) imagem real, (b) modelo simplificado.

No. retas verticais		3
	x_i	y_i
Reta esquerda	127	384
Reta meio	227	409
Reta direita	395	447

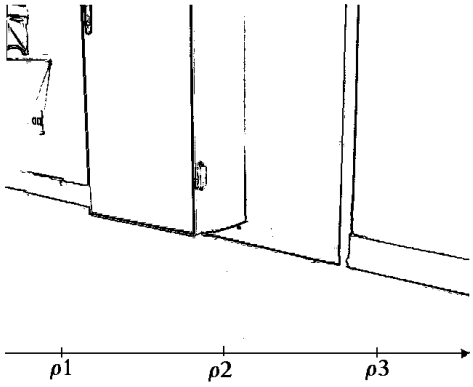
Tabela 5.39. Coordenadas das projeções das bases das retas verticais na reta virtual referentes à Figura 5.28.

Através da avaliação das coordenadas de cada uma das projeções das bases da reta, podemos verificar que a projeção da aresta da porta (q) não se encontra no intervalo do segmento definido pelas projeções do portal da porta: portal esquerdo (q_e) e portal direito (q_d). Logo, podemos concluir que a porta está aberta. Neste caso o robô não necessita calcular a abertura da porta.

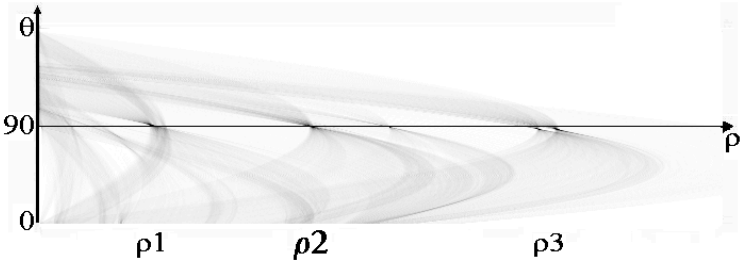
5.3.4. Porta totalmente aberta

Quando o robô está localizado à esquerda em relação à parede e a porta está totalmente aberta, conseguimos observar 3 retas verticais, todas terminando na reta que define o rodapé. Dadas estas características, não é necessário cálculo adicional para estimar a abertura da porta e o robô pode seguir sua trajetória normalmente. A Figura 5.29 ilustra uma situação em que o robô se encontra inclinado à direita em relação à parede e a porta está totalmente aberta. Em (a) é ilustrado a imagem capturada pela câmera. Em (b) a imagem de contorno da porta e as coordenadas das arestas verticais dadas por $\rho 1$ e $\rho 3$ e em (c) é ilustrada a aplicação da transformada de Hough da imagem de contorno e a identificação das retas verticais.

(a)



(b)



(c)

Figura 5.29. imagem de uma porta totalmente aberta capturada pelo robô inclinado à direita em relação à parede, (b) imagem de contorno da porta – em destaque a localização das arestas verticais, (c) Transformada de Hough da imagem de contorno da porta.

O número de retas verticais e suas localizações (ρ1, ρ2 e ρ3) são dadas pela transformada de Hough. Os valores extraídos são mostrados na Tabela 5.40.

No. retas verticais		3
	$\overline{\rho i}$	$\overline{\theta i}$
Reta esquerda ρ1	106	88
Reta meio ρ2	256	90
Reta direita ρ3	485	91

Tabela 5.40. Parâmetros do Mapa de Hough referentes à Figura 5.29 (c).

A Figura 5.30 ilustra a aplicação da janela de covariância, a fim de identificar os parâmetros de inclinação do rodapé. A Tabela 5.41 apresenta os parâmetros da janela de covariância e o ângulo de inclinação do rodapé θ. A Tabela 5.42 apresenta as coordenadas das bases de cada uma das arestas verticais.

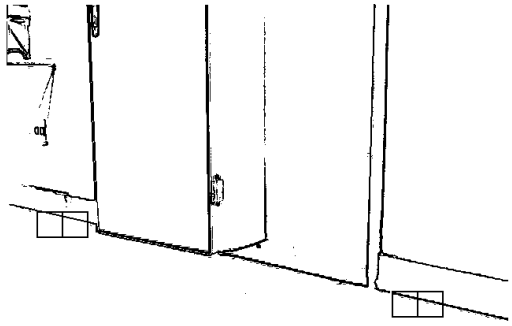


Figura 5.30. Porta totalmente aberta – identificação do rodapé.

Janela esquerda			
$\mu 1_x$	75,65	$\mu 2_x$	95,09
$\mu 1_y$	270,09	$\mu 2_y$	254,92
$\sigma 1_x^2$	30,97	$\sigma 2_x^2$	37,36
$\sigma 1_y^2$	2,42	$\sigma 2_y^2$	1,85
r1	0,836	r2	0,915
θ1	0,23	θ2	0,20

Janela direita			
$\mu 1_x$	493,44	$\mu 2_x$	512,40
$\mu 1_y$	366,48	$\mu 2_y$	370,91
$\sigma 1_x^2$	31,23	$\sigma 2_x^2$	33,97
$\sigma 1_y^2$	2,14	$\sigma 2_y^2$	2,59
r1	0,850	r2	0,872
θ1	0,22	θ2	0,24

Tabela 5.41. Parâmetros das janelas de covariância referentes à Figura 5.30.

No.r retas verticais		3
	$\mathbf{x_i}$	$\mathbf{y_i}$
Reta esquerda	107	291
Reta meio	258	314
Reta direita	484	365

Tabela 5.42. Coordenadas das bases das arestas verticais referentes à Figura 5.30.

A equação do rodapé é dada pela Equação 5.9.

$$y = 0{,}23x + 253{,}75 \quad \textbf{(5.9)}$$

Dados os parâmetros de inclinação do rodapé e as coordenadas da base de cada aresta vertical, identificamos a porta como totalmente aberta.

Os resultados apresentados neste capítulo validam o conjunto de regras utilizado para reconhecimento de portas em imagens digitais e também o algoritmo utilizado para mensuar a abertura da porta, uma vez que o robô está localizado perpendicularmente à parede. O Capítulo a seguir descreve algumas conclusões acerca do trabalho desenvolvido e aponta também algumas propostas para trabalhos futuros.

6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Identificar portas, reconhecer seu estado e mensurar sua abertura é atividade essencial para qualquer robô que opera em ambientes internos como escritórios, laboratórios, etc, uma vez que o robô deve atravessá-la durante seu processo de navegação. Neste sentido, procuramos desenvolver nesta dissertação um algoritmo para reconhecimento de portas, classificação de estado e também medida de sua abertura baseado em informações geométricas visuais extraídas de imagens capturadas pelo sistema de visão de um robô autônomo.

No primeiro capítulo apresentamos uma introdução sobre a problemática da identificação de portas de forma autônoma pelo robô, alem de uma série de soluções para identificação de portas baseadas nas mais diferentes técnicas. Apresentamos também a metodologia utilizada para identificação, reconhecimento e medida da abertura da porta.

No segundo capítulo descrevemos os principais conceitos necessários para a compreensão do trabalho desenvolvido, bem como o fundamento das principais ferramentas matemáticas utilizadas em nossa solução.

No terceiro capítulo apresentamos um modelo simplificado a partir do qual podemos identificar portas em uma imagem capturada pelo robô. Descrevemos também uma técnica para extração das características geométricas de uma porta a partir de uma imagem real. Apresentamos ainda uma técnica para identificação da posição relativa do robô em relação à parede.

No quarto capítulo propomos um conjunto de regras utilizadas para classificação dos diferentes estados da porta à partir de diferentes posições relativas do robô. Discutimos também um algoritmo para mensurar a dimensão da abertura da porta afim de definir se o robô consegue atravessá-la ou não, de forma segura.

No quinto capítulo mostramos alguns resultados experimentais obtidos através de imagens reais capturadas pelo robô. Procuramos descrever de forma exaustiva as diferentes situações possíveis para o estado da porta em diferentes posições relativas do robô. Apresentamos também os resultados encontrados em cada situação.

Os programas desenvolvidos nesta dissertação foram implementados utilizando Linguagem de Programação C, sistema operacional de tempo real QNX e câmera SONY EVI-400 cujas imagens capturadas possuem dimensão 640x480 pixels.

Os resultados apresentados nesta dissertação mostram a eficiência do algoritmo desenvolvido.

Referências bibliográficas

01. [AMIR99] AMIR, E., REID, P.M., **"*Door Identification*"**. Documento disponível em <http://www-formal.stanford.edu/eyal/cs223b/report.html>. Acessado em: 05. jun 2004.

02. [AVOTS02] AVOTS, D., LIM, E., THIBAUX, R., THRUN, S., ***"A Probabilistic Technique for Simultaneous Localization and Door State Estimation with Mobile Robôs in Dynamics Environments"***, Proceedings of the Conference on Intelligent Robôs and Systems, IROS, Lausanne, Switzerland, October, 2002.

03. [BORENSTEIN91] BORENSTEIN, J., KOREN, Y., ***"The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robôs"***, IEEE Transaction on Robôics and Automation, Vol. 7, Nº 3, pp. 278-288, June, 1991.

04. [BORENSTEIN89] BORENSTEIN, J., KOREN, Y., ***"Real-Time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robôs in Cluttered Environments"***, IEEE Transaction System, Man, and Cybernetics, Vol. 19, Nº 5, pp. 1179-1187, 1989.

05. [CARNEIRO99] CARNEIRO, G.H.M.B., **"*Tratamento de Comandos Remotos e Processamento de Visão Para Navegação de Veículos Autônomos em Tempo Real*"**, Dissertação de Mestrado, IME, 1999.

06. [CASTELLANOS01] CASTELLANOS, J. A., NEIRA, J., TARDÓS, J. D., ***"Multisensor Fusion for Simultaneous Localization and Map Building"***, Robôics and Automation, IEEE Transaction on Volume 17, Issue 6, December, 2001.

07. [CASTELLANOS96] CASTELLANOS, J. A., NEIRA, J., STRAUSS, O., TARDOS, J. D., ***"Detecting High Level Features for Mobile Robô Localization"***, Proceedings of 1996

IEEE/SICE/RSJ International Conference on Multisensor and Integration for Intelligent Systems, Washington DC, December, 1996.

08. [CHRISTENSEN94] CHRISTENSEN, H. I., KIRKEBY, N. O., KRISTENSEN., S., KNUDSEN, L., ***"Model-Driven Vision for In-Door Navigation"***, Robôics and Autonomous System, Vol. 12, pp. 199-207, 1994.

09. [COSTA00] COSTA, L.F., JUNIOR, R.M.C., ***"Shape Analysis and Classification: Theory and Practice"***, CRC Press LLC, 2000.

10. [DUFFY00] DUFFY, B.R., GaRcia, C., ROONEY, C. F. B., O'HARE, G. M. P., ***"Sensor Fusion for Social Robôics",*** 31st International Symposium on Robôics (ISR 2000), Montréal, May, 2000.

11. [DULIMARTA97] DULIMARTA, H.S., JAIN, A. K., ***"Mobile robô Localization in Indoor Environment"***, Pattern Recognition, Vol. 30, No. 1, pp. 99-111, 1997.

12. [FAUSGERA96] FAUSGERA, O., ***"Three Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint"***, Cambridge, 1996.

13. [FRANZ98] FRANZ, M. O., SCHÖLKOPF, B., MALLOT, H. A., BÜLTHOFF, H. H., "Where did I take that snapshot? Scene-based homing by image matching", Biological Cybernetics, Spring-Verlag, Vol. 79, pp. 191-202, June, 1998.

14. [GOMES94] GOMES, J., VELHO, L., ***"Computação Gráfica - Imagem"***, IMPA, 1994.

15. [GONZALEZ93] GONZALEZ, R.C., WOODS, R.E., ***"Digital Image Processing"***, Addson-Wesley, September 1993.

16. [GRIMSON90] GRIMSON, W.E.L., "***Object Recognition by Computer: The Role of Geometric Constraints***", Massachussetts Institute of Tecnology, 1990.

17. [HAYET02] HAYET, J. B., LERASLE, F., DEVY, M., ***"A Visual Landmark Framework for Indoor Mobile Robô Navigation"***, Proceedings of the 2002 IEEE International conference on Robôics & Automation, Washington, DC, May, 2002.

18. [JAIN89] JAIN, A.K., **"*Fundamentals of Digital Image Processing*"**, Prentice-Hall, 1989.

19. [JENSFELT01] JENSFELT, P., ***"Approaches to Mobile Robô Localization in Indoor Environments"***, Doctoral Thesis, Department of Signals, Sensors and Systems Royal Institue of Technology, Stockholm, Sweden, 2001.

20. [JENSFELT00] JENSFELT, P., AUSTIN, D. J., WIJK, O., ANDERSSON, M., ***"Feature Based Condensation for Mobile Robô Localization"***, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robôics & Automation, San Francisco, CA, April, 2000.

21. [KIM99] KIM, D., NEVATIA, R., **"*Recognition and localization of generic objects for indoor navigation using functionality*"**, Image and Vision Computiong, No. 16, pp. 729-743, 1998.

22. [KIM98] KIM, D., NEVATIA, R., **"*Recognition and localization of generic objects for indoor navigation using functionality*"**, Image and Vision Computing, Vol 16, pp. 729-743, 1998.

23. [KIM94] KIM, D., NEVATIA, R., ***"Representation and Computation of the Spatial Environment for Indoor Navigation"***, Proceedings of International Conference on Intelligent Robôs and Systems, pp. 475-482, 1994.

24. [KIM72] KIM, D., NEVATIA, R., ***"Symbolic Navigation with a Generic Map"***, Proceedings of IEEE Workshop Vision for Robôs, pp. 136-145, August, 1995.

25. [KORTENKAMP94] KORTENKAMP, D., WEYMOUTH, T., ***"Topological mapping for mobile robôs using a combination of sonar and vision sensing"***, Proceedings of the Twelfth National Conference on Artificial Intelligence, AAI Press MIT, July, 1994.

26. [KOSAKA95] KOSAKA, A., PAN, J., ***"Purdue Experiments in Model Based Vision for Hallway navigation"***, Proceedings of Workshop on Vision for Robôs in IROS'95 Conference, Pittsburg, PA, pp. 87-96, 1995.

27. [Krotkov89] KROTKOV, E., ***"Mobile Robô Localization Using a Single Image"***, Proceedings of IEEE International Conference on Robôics and Automation, pp. 978-983, 1989.

28. [KUNDUR97] KUNDUR, S. R., RAVIV, D., ***"A vision-based pragmatic strategy for autonomous navigation"***, Pattern Recognition, Vol. 31, Nº 9 pp. 1221-1239, 1998.

29. [LAZKANO03] LAZKANO, E., SIERRA, B., RAÑÓ, I., ZARAUZ, I., ***"Door crossing behavior for a mobile robô using Baysean Networks"***, Proceedings of CIMCA, 2003.

30. [LENT01] LENT, R., ***"Cem bilhões de neurônios"***, FAPERJ, 2001.

31. [LIBUDA00] LIBUDA, L., KRAISS, K., ***"Identification of Natural Landmarks for Vision Based Navigation"***, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robôics & Automation, San Francisco, CA, April 2000.

32. [MAREK02] MAREK, A., SMART, W. D., MARTIN, M. C., ***"Learning Visual Feature Detectors for Obstacle Avoidance Using Genetic Programming"***, In Proceedings of the Genetic and Evoluionary Computation Conference (GECCO 2002) Late Breaking Papers Track, 2002.

33. [MARTÍNEZ04] MARTÍNEZ, J. C., SÁNCHEZ, D., SUÁREZ, B. P., ***"A Fuzzy Colour Image Segmentation Applied to Robô Vision"***, Conference on Mechatronics & Robôics, 2004.

34. [MONASTERIO01] MONASTERIO, I., LAZKANO, E., RAÑÓ, I., SIERRA, B., ***"learning to traverse doors using visual information"***, Systems Science Journal, Vol. 27, 97-108 (2001).

35. [NEIRA99] NEIRA, J., TARDOS, J. D., HORN, J., SCHMIDT, G., ***"Fusing Range and Intensity Images for Mobile Robô Localization"***, IEEE Transaction on Robôics and Automation, Vol. 15, Nº 1, February, 1999.

36. [OHYA98] OHYA, A., KOSAKA, A., KAK, A., ***"Vision-Based Navigation by Mobile Robô with Obstacle Avoidance Using Single-Camera Vision and Ultrasonic Sensing"***,

IEEE Transaction Robôics and Automation, Vol. 14, Nº 6, pp. 969-978, December, 1998.

37. [OHYA97] OHYA, A., KOSAKA, A., KAK, A., ***"Vision-Based Navigation of Mobile Robô with Obstacle Avoidance by Single Camera Vision and Ultrasonic Sensing"***, Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robôs and Systems, pp. 704-711, September, 1997.

38. [PITAS00] PITAS, I., ***"Digital Image Processing Algorithms and Applications"***, John Wiley & Son, 2000.

39. [RAÑÓ01] RAÑÓ, I., E., LAZKANO, MONASTERIO, I., SIERRA, B., ***"Mobile robô navigation Using Color Image Segmentation"***, Proceedings of CAEPIA-TTIA Vol. 1 (625-634), 2001.

40. [RUSSEL95] RUSSEL, S., NORVING, P., ***"Artificial Intelligence: A Modern Approach"***, Prentice Hall, 1995.

41. [STOETER00] STOETER, S. A., MAUFF, F., PAPANIKOLOPOULOS, N. P., ***"Real-Time Door Detection in Cluttered Environments"***, Proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Control, Rio, Greece, pp. 187-192, July, 2000.

42. [SUGIHARA88] SUGIHARA, K., ***"Some Location Problems for Robô Navigation Using Single Camera"***, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol. 42, pp. 112-129, 1988.

43. [SZENBERG01] SZENBERG, F., ***"Acompanhamento de cenas com calibração automática de câmeras"***, Tese de Doutorado, PUC-Rio, 2001.

44. [THRUN98] THRUN, S., ***"Finding Landmarks for Mobile Robô Navigation"***, Proceedings of the IEEE International Conference on Robôics ans Automation (ICRA), 1998.

45. [TOMONO00] TOMONO, M., YUTA, S. ***"Mobile Robô Navigation in Indoor Environments using Object and Character Recognition"***, Proceedings of the 2000

IEEE International Conference on Robôics & Automation, San Francisco, CA, April, 2000.

46. [TRUCCO98] TRUCCO, E., VERRI, A., ***"Introductory Tehniques for 3-D Computer Vision"***, Prentice Hall, 1998.

47. [UMBAUGH98] UMBAUGH, S., ***"Computer Vision and Image Processing: A Practical Approach Using CVIPtools"*** , Prentice Hall, 1998.

48. [WATT98] WATT, A., POLICARPO, F., ***"The Computer Image"***, Addson-Wesley, 1998.

49. [XIANG05] XIANG, Z., SANTOS, V. M. F., ***"Locating and crossing doors and narrow passages for a mobile robô"***, Proceedings of ICINCO 2004.

50. [XIANG03] XIANG, Z., SANTOS, V., LIU, V., ***"Robust Mobile Robô Localization by Fusing Laser and Sonar"***, Proceedings of International Conference on Advanced Robôics, ICAR2003, pp. 276-280, Coimbra, Portugal, June, 2003.

51. [ZINGARETTI98] ZINGARETTI, P., CARBONARO, A., ***"Route Following Based on Adaptative Visual Landmark Matching"***, Robôics and Autonomous System, Vol. 25. Nº 3-4, pp. 177-184, November, 1998.