

# ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>PREFÁCIO</b>  | <b>xv</b> |
| <b>1 O MUNDO DOS ROBOTS</b>                                      | <b>1</b>  |
| 1.1 Introdução — O que é um robô?                                | 3         |
| 1.2 Breve cronologia   | 4         |
| 1.3 Uma visão global da Robótica                                 | 28        |
| Referências  | 29        |
| <b>2 CONCEITOS BASE</b>  | <b>37</b> |
| 2.1 Introdução   | 40        |
| 2.2 Ferramentas básicas  | 44        |
| 2.2.1 Álgebra de vetores e matrizes                              | 45        |
| 2.2.2 Inversas, pseudoinversas e determinantes de matrizes       | 45        |
| 2.2.3 Produto interno  | 48        |
| 2.2.4 Produto externo  | 49        |
| 2.2.5 Normas e distâncias  | 49        |
| 2.2.6 Valores próprios, vetores próprios e valores singulares    | 50        |
| 2.2.7 Formas quadráticas e matrizes (semi)definidas              | 51        |
| 2.2.8 Tensores   | 52        |
| 2.2.9 Quaterniões  | 53        |
| 2.3 Espaços de configuração                                      | 54        |
| 2.4 Transformações de coordenadas                                | 57        |
| 2.4.1 Estrutura de uma matriz de rotação                         | 58        |
| 2.4.2 Transformações de coordenadas em $SE(3)$                   | 60        |
| 2.4.3 Composição de transformações homogêneas entre referenciais | 62        |
| 2.4.4 Transformações de coordenadas usando quaterniões           | 64        |
| 2.5 Parametrizações comuns para matrizes de rotação              | 65        |
| 2.5.1 Parametrização por ângulo e eixo de rotação                | 66        |
| 2.5.2 Parametrização por três rotações                           | 67        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 2.5.3    | Não univocidade da representação das orientações por parametrização através de três ângulos | 73         |
| 2.5.4    | Transformação entre referenciais rodados em torno de eixos arbitrários — Problema inverso   | 75         |
| 2.6      | Quaterniões vs. Matrizes de rotação   | 76         |
| 2.6.1    | Singularidades no problema inverso  | 76         |
| 2.6.2    | Considerações computacionais  | 77         |
| 2.7      | Otimização — Procura de extremos de funções   | 77         |
| 2.8      | Interpolação polinomial   | 79         |
| 2.9      | Grafos  | 80         |
| 2.9.1    | Árvores   | 81         |
| 2.9.2    | O algoritmo de Dijkstra   | 82         |
| 2.9.3    | O algoritmo A*  | 83         |
| 2.10     | Simulação computacional de robôs  | 86         |
| 2.11     | Análise de estabilidade de Lyapunov   | 89         |
| 2.12     | Ruído e incerteza   | 91         |
| 2.13     | Exercícios e sugestões de estudo adicional  | 95         |
|          | Referências   | 97         |
| <b>3</b> | <b>CINEMÁTICA</b>   | <b>101</b> |
| 3.1      | Introdução  | 103        |
| 3.2      | Manipuladores série   | 105        |
| 3.2.1    | Cinemática direta   | 106        |
| 3.2.2    | Um manipulador didático 6R  | 122        |
| 3.2.3    | O manipulador <i>Niryo One</i>  | 125        |
| 3.2.4    | Cinemática inversa  | 127        |
| 3.2.5    | Cinemática inversa de um manipulador <i>PUMA 500</i>  | 132        |
| 3.2.6    | Cinemática inversa de um manipulador <i>Rob3/Tr5</i>  | 137        |
| 3.2.7    | Cinemática inversa de um manipulador didático 6R  | 141        |
| 3.2.8    | Cinemática inversa de um manipulador <i>Niryo One</i>                                       | 147        |
| 3.2.9    | Técnicas de otimização na cinemática inversa  | 148        |
| 3.3      | Manipuladores paralelos   | 149        |
| 3.4      | Plataformas móveis  | 154        |
| 3.4.1    | Método algébrico — A convenção Sheth-Uicker   | 155        |
| 3.4.2    | Método geométrico   | 164        |
| 3.4.3    | Incertezas em modelos cinemáticos   | 173        |
| 3.5      | Exercícios e sugestões de estudo adicional  | 176        |
|          | Referências   | 179        |
| 3.6      | Apêndice: Matriz hessiana para o problema da Figura 3.30                                    | 182        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>4</b> | <b>CINEMÁTICA DIFERENCIAL</b>   | <b>185</b> |
| 4.1      | Introdução  | 187        |
| 4.2      | Propagação de velocidades em manipuladores série                            | 188        |
| 4.3      | Transformação de velocidades entre referenciais                             | 190        |
| 4.4      | Propagação de velocidades entre troços de manipuladores série               | 194        |
| 4.5      | Modelos diferenciais para manipuladores série                               | 196        |
| 4.5.1    | Singularidades em modelos diferenciais                                      | 201        |
| 4.5.2    | Singularidades do manipulador didático de 6-dof                             | 204        |
| 4.6      | Jacobianos em plataformas móveis  | 207        |
| 4.7      | Exercícios e sugestões de estudo adicional                                  | 209        |
|          | Referências   | 210        |
| <b>5</b> | <b>DINÂMICA</b>   | <b>211</b> |
| 5.1      | Introdução  | 213        |
| 5.2      | Influência de distribuição de massa no movimento de um robô                 | 216        |
| 5.3      | Formulação iterativa de Newton-Euler para a dinâmica de robôs               | 219        |
| 5.3.1    | Aceleração de um corpo rígido   | 220        |
| 5.3.2    | Exemplo 1 — Manipulador RP  | 226        |
| 5.3.3    | Exemplo 2 — Manipulador RPR   | 229        |
| 5.3.4    | Exemplo 3 — Pêndulo invertido numa plataforma móvel unidimensional          | 231        |
| 5.4      | Formulação lagrangiana para a dinâmica de robôs                             | 235        |
| 5.4.1    | Exemplo 1 — Manipulador RRR planar  | 236        |
| 5.4.2    | Exemplo 2 — Plataforma móvel tipo uniciclo                                  | 238        |
| 5.5      | Estrutura das equações da dinâmica de um robô                               | 243        |
| 5.6      | Inclusão de efeitos dissipativos na dinâmica de robôs                       | 244        |
| 5.6.1    | Exemplo 1 — Plataforma móvel simplificada com atrito nos veios dos motores  | 247        |
| 5.6.2    | Exemplo 2 — Plataforma móvel simplificada com atrito no contacto com o chão | 247        |
| 5.7      | Exercícios e sugestões de estudo adicional                                  | 250        |
| 5.8      | Apêndice: Tensores de inércia   | 253        |
|          | Referências   | 255        |
| <b>6</b> | <b>SENSORES E ATUADORES</b>   | <b>259</b> |
| 6.1      | Sensores  | 261        |
| 6.1.1    | Potenciómetro — Resistência elétrica variável                               | 263        |
| 6.1.2    | <i>Encoders</i> óticos  | 264        |
| 6.1.3    | Odometria   | 267        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 6.1.4    | Sensores de velocidade  | 271        |
| 6.1.5    | Sensores de força   | 271        |
| 6.1.6    | Acelerómetros   | 272        |
| 6.1.7    | Sensores de campo magnético                                   | 274        |
| 6.1.8    | Giroscópios   | 275        |
| 6.1.9    | Inclinómetros   | 278        |
| 6.1.10   | Unidades de Medição Inercial                                  | 279        |
| 6.1.11   | Sensores para nanoposicionamento                              | 281        |
| 6.1.12   | Ultrassons  | 282        |
| 6.1.13   | Sensores de distância por infravermelhos                      | 286        |
| 6.1.14   | Sensores de distância através de laser                        | 287        |
| 6.1.15   | Sensores de imagem  | 290        |
| 6.1.16   | Modelo básico para uma câmara                                 | 293        |
| 6.1.17   | Sistema de Posicionamento Global (GPS)                        | 297        |
| 6.1.18   | Sistema de Detecção/Identificação por Rádio-frequência (RFID) | 301        |
| 6.1.19   | Código-QR   | 303        |
| 6.2      | Atuadores   | 304        |
| 6.2.1    | Motores elétricos DC e AC                                     | 304        |
| 6.2.2    | Motores pneumáticos e hidráulicos                             | 307        |
| 6.2.3    | Músculos artificiais  | 307        |
| 6.2.4    | Atuadores para nanoposicionamento                             | 308        |
| 6.2.5    | Sistemas integrados de atuadores                              | 309        |
| 6.3      | Exercícios e sugestões de estudo adicional                    | 310        |
|          | Referências   | 311        |
| <b>7</b> | <b>CONTROLO</b>   | <b>317</b> |
| 7.1      | Introdução  | 320        |
| 7.2      | Controlabilidade e controlo geométrico de robôs               | 326        |
| 7.3      | Princípios de síntese de controladores                        | 333        |
| 7.3.1    | Topologias simples  | 337        |
| 7.3.2    | Inclusão de tarefas no controlador                            | 341        |
| 7.4      | Controlo por modelo preditivo                                 | 348        |
| 7.5      | Controlo proporcional-integral-derivativo (PID)               | 354        |
| 7.5.1    | Sistemas lineares de 2ª ordem — Sistema massa-mola-atrito     | 355        |
| 7.5.2    | Controlo com termo de robustez                                | 361        |
| 7.6      | Controlo não linear de robôs                                  | 364        |
| 7.7      | Exemplo: Manipulador RR com termos de flexibilidade           | 368        |
| 7.8      | Controlo por Modo Deslizante                                  | 376        |
| 7.8.1    | Exemplo 1: Um sistema não linear simples                      | 377        |
| 7.8.2    | Exemplo 2: Robô unicycle                                      | 378        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 7.8.3    | Controlo PID expandido com termo de modo deslizante                             | 383        |
| 7.9      | Controlo de força em manipuladores  | 387        |
| 7.10     | Combinação de múltiplas técnicas de controlo                                    | 390        |
| 7.11     | Controlo de trajetória para um automóvel autónomo                               | 392        |
| 7.12     | Bengala robô  | 396        |
| 7.13     | Formações de robôs  | 398        |
| 7.14     | Exercícios e sugestões de estudo adicional                                      | 400        |
|          | Referências   | 401        |
| <b>8</b> | <b>GUIAMENTO DA EXECUÇÃO DE TAREFAS</b>   | <b>407</b> |
| 8.1      | Introdução  | 409        |
| 8.2      | Planeamento de caminhos   | 411        |
| 8.2.1    | Planeamento de caminhos no espaço de configuração                               | 413        |
| 8.2.2    | Planeamento de caminhos em manipuladores  | 415        |
| 8.2.3    | Planeamento de caminhos em plataformas móveis                                   | 416        |
| 8.3      | Introdução às principais técnicas de planeamento de caminhos                    | 419        |
| 8.3.1    | Métodos por mapa — Grafos de visibilidade                                       | 420        |
| 8.3.2    | Métodos por mapa — Diagrama de Voronoi  | 422        |
| 8.3.3    | Decomposição em células exatas  | 424        |
| 8.3.4    | Decomposição em células aproximadas   | 426        |
| 8.3.5    | Potenciais artificiais  | 427        |
| 8.3.6    | Potenciais harmónicos   | 435        |
| 8.3.7    | Métodos Monte-Carlo — Árvores aleatórias de exploração rápida                   | 436        |
| 8.3.8    | Métodos Monte-Carlo — Algoritmos evolutivos                                     | 439        |
| 8.4      | Geração de trajetórias  | 441        |
| 8.4.1    | Geração de trajetórias utilizando polinómios cúbicos                            | 442        |
| 8.4.2    | Trajetoórias para sistemas multirrobo   | 448        |
| 8.5      | Prevenção de obstáculos   | 451        |
| 8.6      | Exemplo — Guiamento e controlo de um veículo autónomo a circular em autoestrada | 452        |
| 8.7      | Exercícios e sugestões de estudo adicional                                      | 457        |
|          | Referências   | 458        |
| <b>9</b> | <b>PERCEÇÃO</b>   | <b>461</b> |
| 9.1      | Introdução  | 463        |
| 9.2      | Localização   | 464        |
| 9.2.1    | Triangulação  | 464        |
| 9.2.2    | Trilateração  | 466        |
| 9.3      | Visão por computador  | 469        |
| 9.3.1    | Operações de interesse sobre uma imagem   | 469        |

|                         |   |            |
|-------------------------|---|------------|
| 9.3.2                   | Estereoscopia   | 472        |
| 9.4                     | Fusão sensorial   | 475        |
| 9.4.1                   | O filtro de Kalman  | 475        |
| 9.4.2                   | Interseção de covariância                                     | 481        |
| 9.4.3                   | Filtros de partículas   | 483        |
| 9.4.4                   | Estimadores-S (de escala)                                     | 486        |
| 9.5                     | Mapeamento do ambiente  | 487        |
| 9.5.1                   | Grelhas de ocupação   | 491        |
| 9.5.2                   | SLAM — Localização e mapeamento simultâneos                   | 492        |
| 9.6                     | Exercícios e sugestões de estudo adicional                    | 497        |
|                         | Referências   | 498        |
| <b>10</b>               | <b>INTERAÇÃO HUMANO-ROBÔ E ROBÓTICA SOCIAL</b>                | <b>501</b> |
| 10.1                    | Introdução  | 503        |
| 10.2                    | A inspiração da Psicologia                                    | 505        |
| 10.3                    | Modelos para robôs sociais                                    | 510        |
| 10.4                    | Interação humano-computador e interfaces                      | 512        |
| 10.5                    | Interação humano-robô   | 516        |
| 10.6                    | Linguagens de programação e arquiteturas de controlo de robôs | 519        |
| 10.7                    | Proxémica   | 520        |
| 10.8                    | Antropomorfismo   | 522        |
| 10.9                    | Expressividade do movimento                                   | 525        |
| 10.10                   | Métricas para interação humano-robô                           | 526        |
| 10.11                   | Exercícios e sugestões de estudo adicional                    | 528        |
|                         | Referências   | 529        |
| <b>APÊNDICES</b>        |   | <b>537</b> |
| A.                      | Igualdades trigonométricas básicas                            | 537        |
| B.                      | A função tangente inversa de quatro quadrantes                | 537        |
| C.                      | Função de Dirac   | 538        |
| D.                      | Produtos de Lie   | 539        |
| <b>ÍNDICE REMISSIVO</b> |   | <b>541</b> |