

ROBÓTICA INDUSTRIAL

Indústria 4.0

J. Norberto Pires



Índice Geral

Sobre o Autor	VII
Introdução	IX
Capítulo 1 Sistemas de Produção 4.0	1
1.1 Introdução	1
1.2 Equipamentos	6
1.3 Robôs	6
1.4 Sistemas de armazenamento automático	8
1.5 Sistemas de informação	9
1.5.1 Redes	9
1.5.2 Interfaces homem-máquina	10
1.6 Dimensão humana	11
1.7 Os desafios da robótica industrial	11
1.8 Indústria 4.0	15
1.8.1 Indústria 4.0 e fábricas inteligentes: o que são?	17
1.8.2 Papel dos sistemas embebidos	18
1.8.3 Sistemas ciberfísicos	18
1.8.4 A realização dos sistemas ciberfísicos dá origem às fábricas inteligentes	20
1.8.5 Indústria portuguesa	21
Bibliografia	22
Capítulo 2 Das Máquinas Gregas à Moderna Robótica Industrial	23
2.1 Robótica industrial: história e evolução	23
2.2 Então, o que é isso da robótica?	31
2.3 Robôs manipuladores industriais	33
2.4 Sistemas flexíveis de produção e robótica de manipulação industrial	36
Bibliografia	40
Capítulo 3 Cinemática, Dinâmica e <i>Software</i> Distribuído	43
3.1 Introdução	43
3.2 Cinemática	44
3.2.1 Cinemática direta	47
3.2.2 Cinemática inversa	49
3.3 Jacobiano	52

3.4	Dinâmica	58
3.5	Singularidades	60
3.6	Deteção da aproximação a singularidades	62
3.7	<i>Software</i> em Matlab (<i>toolbox</i> sobre robótica)	64
3.8	<i>Software</i> distribuído de monitorização e controlo	67
3.8.1	Arquitetura genérica	70
3.8.2	Aplicação a robôs manipuladores	71
3.8.3	Exemplos de aplicação	81
3.9	Controlo do robô via Matlab	91
3.10	Observações finais	97
	Bibliografia	98
Capítulo 4	Aplicações Industriais	101
4.1	Introdução	101
4.2	Exemplo industrial: paletização de vidros	101
4.2.1	<i>Software</i> de operação	105
4.3	Soldadura robotizada em ambiente industrial	121
4.3.1	Tecnologia da soldadura MIG/MAG	121
4.3.2	Sistema de soldadura robotizada	122
4.3.3	Casos práticos testados	129
	Bibliografia	136
Capítulo 5	Exemplos de Aplicação	139
5.1	Introdução	139
5.2	Controlo e monitorização de uma célula robotizada	140
5.2.1	Módulos de <i>software</i>	141
5.3	Célula equipada com mão robótica	152
5.3.1	Mão robótica	154
5.3.2	Sistema de visão	158
5.3.3	Robô industrial	160
5.3.4	<i>Software</i> de comando e monitorização	161
5.4	<i>Software</i> de integração sensorial: sensor de F/M da JR3	164
	Bibliografia	171
Capítulo 6	RobotStudio e dispositivos de interface homem-máquina	173
6.1	Introdução	173
6.2	RobotStudio: um ambiente de simulação e programação	175

6.3 Exemplo 1: RobotStudio, posições, <i>workobjects</i> , trajetórias e <i>AutoPath</i>	181
6.3.1 Trajetória manual	185
6.3.2 Trajetória automática – <i>AutoPath</i>	188
6.3.3 Criar uma aplicação final	190
6.4 Exemplo 2: Configuração do sistema, I/O, mecanismos e simulação	192
6.4.1 Adicionar um mecanismo (BarrettHand)	192
6.4.2 Constituir a célula	194
6.4.3 Posições da BarrettHand e movimentação da peça de trabalho	195
6.4.4 Definir a trajetória e gerar o movimento pretendido	199
6.5 Exemplo 3: Comunicações, servidor de <i>sockets</i> e interface exterior	200
6.5.1 Realizar a célula de trabalho	201
6.5.2 Desenhar e realizar o <i>software</i> do controlador do robô (servidor) e do computador remoto (cliente)	203
6.6 Impressão 3D de peças metálicas	211
6.7 Método numérico para seleção dos parâmetros do processo	213
(Amin S. Azar e J. Norberto Pires)	
6.7.1 Resultados de simulação	220
Bibliografia	228
Glossário	231
Índice Remissivo	233

Sobre o Autor

J. Norberto Pires é licenciado em Engenharia Física, ramo de Instrumentação (1991), mestre em Física Tecnológica, também no ramo de Instrumentação (1994), e doutor em Engenharia Mecânica, especialidade de Automação e Robótica (1999). Fez pós-doutoramento em Lund, na Suécia, em Controlo Automático (1999-2000), e esteve em várias universidades como cientista convidado.

É autor de várias centenas de artigos científicos e técnicos publicados em revistas e conferências de prestígio, três livros em inglês, editados pela Springer, três livros em português (um deles com cinco edições), editados pela LIDEL, vários capítulos em livros e mais de 500 artigos de divulgação técnico-científica. É diretor da revista *Robótica* (a única revista portuguesa de Robótica).

Tem uma presença assídua na comunicação social, com colunas de opinião e programas de rádio.

Foi presidente da Sociedade Portuguesa de Robótica, da Associação Portuguesa de Controlo Automático, da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro e do Comité de Investimento *JESSICA Holding Fund Portugal*. Foi também membro do Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia e do Conselho Nacional de Empreendedorismo e Inovação, entre outros cargos.

Em meados de 2007, assumiu a presidência do Conselho de Administração do iParque, Parque de Ciência e Tecnologia de Coimbra, cargo que exerceu até ao final de 2011, à frente de uma pequena mas muito dedicada equipa, com a qual planeou, obteve o financiamento e construiu esse importante espaço de localização empresarial de Coimbra. A estratégia de médio e longo prazo baseava-se na qualidade do espaço, nos edifícios VINCI e TESLA, na forte ligação à Universidade de Coimbra e numa muito eficaz coleção de serviços que constituísse um forte incentivo ao investimento e à localização de empresas baseadas em conhecimento.

É atualmente professor associado com agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.

Mais informação em www.jnorbertopires.pt.

Introdução

Numa altura em que os sistemas automáticos, a inteligência artificial e os robôs são elementos do nosso dia a dia e ameaçam fazer uma transformação radical na forma como vivemos e trabalhamos, faz sentido estudar os fundamentos de duas das áreas mais importantes nos desenvolvimentos que permitiram a quarta revolução industrial: a Automação e Controlo Industrial e a Robótica Industrial. São áreas muito vastas e que evoluíram rapidamente desde o desenvolvimento da eletrónica digital, com a invenção do transistor de silício. Com isso apareceram os computadores – cada vez mais poderosos e rápidos –, os sensores, os robôs, o *software*, as redes informáticas, os sistemas embebidos, a inteligência artificial e a possibilidade de dotar as máquinas de capacidades cognitivas. E vivemos hoje o resultado de tudo isto, quando estes avanços científicos e técnicos permitiram desenvolver equipamentos capazes de substituir os humanos em muitas das tarefas relacionadas com trabalho, em qualquer área, nomeadamente nas que se conjugam na atividade de produção industrial. Muitos assuntos tornaram-se emergentes e foram fortemente desenvolvidos, como a colaboração homem-máquina, o desenvolvimento de robôs colaborativos, os robôs móveis com elevados níveis de autonomia, os sensores inteligentes, a produção aditiva – que permite imprimir componentes complexos e de dimensões diversas, usando qualquer tipo de material, incluindo várias ligas metálicas –, os sistemas embebidos inteligentes, capazes de se ligar entre si através da exploração de outros níveis de autonomia e capacidade de decisão, o *software* baseado em técnicas de inteligência artificial e *machine-learning*, capaz de avaliar cenários e tomar decisões em frações de segundo, etc.

Este livro aborda a vasta área da Robótica Industrial. Não pretende ser exaustivo, pois essa seria uma tarefa impossível, mas pretende abrir horizontes, fornecendo as pistas necessárias para quem procura uma introdução à área, mas também para quem pretende um complemento. Nessa perspetiva, tem capítulos mais introdutórios e capítulos mais avançados, procurando, assim, responder aos dois tipos de público. Foi desenhado para ser um guia detalhado para uma disciplina de Robótica Industrial ao nível do terceiro ou quarto anos de um curso superior, universitário ou politécnico, de Engenharia Mecânica, Industrial, de Produção ou Eletrotécnica.

O Capítulo 1 é uma introdução à área da Robótica Industrial, sendo apresentado numa perspetiva que retrata os desenvolvimentos que se conjugaram na denominada quarta revolução industrial (Indústria 4.0). É feita uma revisão da evolução até aos nossos dias, passando pela primeira, segunda e terceira revoluções industriais, discutindo os respetivos impactos, nomeadamente nos aspetos sociais e do trabalho. Este capítulo mostra os desafios que se colocam à robótica, exhibe os números e potencia os desenvolvimentos futuros.

O Capítulo 2 discorre sobre a história da robótica até aos nossos dias. Procura mostrar os principais desenvolvimentos e enquadrá-los com os acontecimentos científicos, técnicos e até políticos da nossa história comum. Porque a robótica, ao contrário do que muitos pensam, não é um assunto recente, nem do nosso século, nem do nosso milénio. Fez sempre parte do imaginário humano e podem ser encontrados trabalhos sobre robótica muito antes da nossa era. No final, a robótica industrial moderna é contextualizada, tendo por base as necessidades da indústria de produção do nosso tempo.

O Capítulo 3 tem como tema a modelização cinemática e dinâmica. Apresenta e particulariza estes conceitos para um tipo particular de robô manipulador. A ideia é que os conceitos apresentados possam sempre ser vistos de forma prática, facilitando, assim, a sua compreensão. No final, é apresentado o desenvolvimento de uma arquitetura de *software* que permite explorar remotamente este tipo de máquinas, explorar ambientes de simulação (como o Matlab) e adicionar todo o tipo de sensores e atuadores inteligentes. Este assunto será complementado nos capítulos seguintes.

O Capítulo 4 apresenta vários exemplos de aplicações industriais. Pretende mostrar, em várias áreas, a forma como se desenvolve uma aplicação industrial e o modo como se utilizam os recursos informáticos atualmente disponíveis para proporcionar vários tipos de funcionalidades requeridas pelos utilizadores.

O Capítulo 5 versa sobre outros exemplos, que utilizam preferencialmente aplicações de monitorização e de comando remotas. Além disso, estes exemplos incluem a utilização de equipamentos avançados, como sensores inteligentes, atuadores avançados, dispositivos de interface homem-máquina, mãos robóticas, etc.

O Capítulo 6 introduz um ambiente de programação e simulação (RobotStudio, da ABB), procurando constituir-se como um guia para o desenvolvimento de aplicações que têm por base esse tipo de *software*. Apresenta, por isso, um guia inicial de utilização do RobotStudio e, de seguida, um conjunto muito alargado de exemplos totalmente desenvolvidos para este livro. No final, é apresentado um exemplo de impressão 3D de peças metálicas, com a introdução de um método que permite seleccionar os parâmetros de impressão, bem como ajustar automaticamente a trajetória de impressão.

Este livro tem vários aspetos que o tornam único e uma boa escolha para docentes, alunos, profissionais da área da robótica industrial ou simples interessados neste tipo de assunto e que procuram informação avançada:

- O livro foi pensado para funcionar em conjunto com outra obra, da mesma editora e do mesmo autor, que aborda a temática da Automação e Controlo Industrial. Na verdade, dada a proximidade e correlação destes assuntos, nomeadamente em termos industriais, faz todo o sentido que o leitor interessado os utilize conjuntamente, até porque muitos dos conceitos e desenvolvimentos aqui apresentados são utilizados no livro *Automação e Controlo Industrial – Indústria 4.0*;
- O livro contém um conjunto muito alargado de exemplos práticos totalmente desenvolvidos e explicados. Além disso, o detalhe sobre cada exemplo, nomeadamente o código fonte do *software* desenvolvido, assim como vídeos de demonstração, são fornecidos num pacote de programas e outras ferramentas que fazem parte integrante do livro (www.jnorbertopires.pt). O mesmo acontece com o livro referido anteriormente;
- O autor tem uma vasta experiência científica, técnica e prática na área da Robótica Industrial, pelo que preparou o texto de modo a que os vários assuntos apareçam de forma lógica e na extensão considerada adequada, tendo em conta o tipo de público ao qual se dirige. Tal significa que se presta muita atenção aos conceitos e ao detalhe das realizações práticas, apresentando ainda uma extensa lista de referências bibliográficas que permitem ao leitor interessado prosseguir os estudos nesta área;

- Além de tudo isto, o material didático (imagens, *slides*, etc.) que acompanha o livro pode constituir um excelente auxiliar para professores, instrutores e profissionais que pretendam atualizar ou melhorar os seus materiais de formação científica, técnica ou profissional.

Um livro sobre esta área nunca está concluído, nem totalmente atualizado, até porque os desenvolvimentos são contínuos e muito rápidos. Nessa perspetiva, o autor manterá atualizado o *site* do livro, adicionando regularmente novos desenvolvimentos, exemplos, referências e material multimédia, entre outros elementos, o que irá proporcionar ao leitor uma fonte de informação renovada. Tal permitirá que este livro seja dinâmico e acompanhe a velocidade de desenvolvimento da área, possibilitando ainda que futuras edições possam constituir uma consequência lógica de tudo isso.

O autor gostaria de agradecer a todos os profissionais que conheceu ao longo da sua já extensa carreira académica e profissional, especialmente a todos os seus alunos de doutoramento, mestrado e licenciatura, nomeadamente os do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, mas também a todos os engenheiros e técnicos com quem colaborou. A experiência adquirida é, em grande parte, uma consequência desse trabalho em equipa.

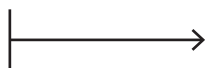
J. Norberto Pires

Coimbra, agosto de 2018

1.1 Introdução

Este livro é escrito numa altura em que se prepara uma nova revolução (denominada **Indústria 4.0**) na forma como encaramos, organizamos e realizamos os sistemas produtivos. Estamos a falar de uma revolução industrial e não política, pelo que aquilo que observamos é o início de um período de desenvolvimento tecnológico e organizativo que conduzirá a processos produtivos mais eficientes, a todos os níveis, incluindo os aspetos ambientais, mas também mais inteligentes e muito mais próximos das pessoas. Na verdade, numa primeira fase, todos estes desenvolvimentos que têm a robótica e a inteligência artificial como tecnologias prioritárias irão conduzir a uma muito significativa perda de empregos, como foi antecipado no Fórum Económico Mundial de 2016, realizado em Davos. Mas também levarão ao surgimento de novas formas de produção, mais inteligentes, e a novas oportunidades de emprego. De facto, as estimativas apontam para a destruição de mais de cinco milhões de postos de trabalho até 2020, como consequência direta da Indústria 4.0, numa vaga de desemprego que irá, numa fase inicial, afetar as profissões com menores necessidades de qualificação, mas, progressivamente, poderá afetar, de formas muito diversas, todas as outras profissões (estima-se que, na Europa, mais de 30% dos empregos atuais serão automatizados até 2030)^[1,3]. Essas transformações sociais são inevitáveis, pois o caminho que conduz a fábricas inteligentes é a forma correta de dar resposta às necessidades de produção e competitividade dos vários países e zonas económicas. No entanto, as vantagens competitivas obtidas, aliadas a profundas e radicais inovações tecnológicas, abrirão espaço a novas formas de trabalho e a novas oportunidades, incluindo modelos de negócio, que tenderão a equilibrar, com o tempo, a pressão sobre as formas tradicionais de trabalho. Os dois processos – destrutivo e criativo – têm velocidades de desenvolvimento diferentes, pelo que os efeitos sociais constituem verdadeiras adversidades para as quais personalidades como Bill Gates e Stephen Hawking, por exemplo, alertaram recentemente com alguma veemência. Os desafios prendem-se com a necessidade de conseguir sistemas produtivos inteligentes, mais fáceis de usar, mais flexíveis e ágeis, que se relacionem de forma mais eficiente e intuitiva com os operadores humanos, permitindo, assim, reduzir os custos de produção, diminuir o desperdício e aumentar a qualidade dos produtos. Hoje em dia, as economias modernas dependem daquilo que as suas empresas produzem. De uma forma algo simplista, mas não menos verdadeira, podemos dizer que existem três tipos de riqueza (aqui entendida como bem-estar ou prosperidade):

- Riqueza cultivada;
- Riqueza extraída;
- Riqueza produzida (manufaturada).



Nos países ocidentais, contribui muito pouco para o produto interno bruto (PIB) e envolve uma percentagem cada vez menor da população ativa.

Consequentemente, a prosperidade está, de certa forma, ligada à capacidade de produzir melhor. E tal significa produzir com maior qualidade e a preço mais baixo. Aplica-se a regra “*you’ll live well if you manufacture well*”, ou seja, “viverá bem se produzir bem”. Vivemos, hoje, numa

Fábricas inteligentes?

Porquê?

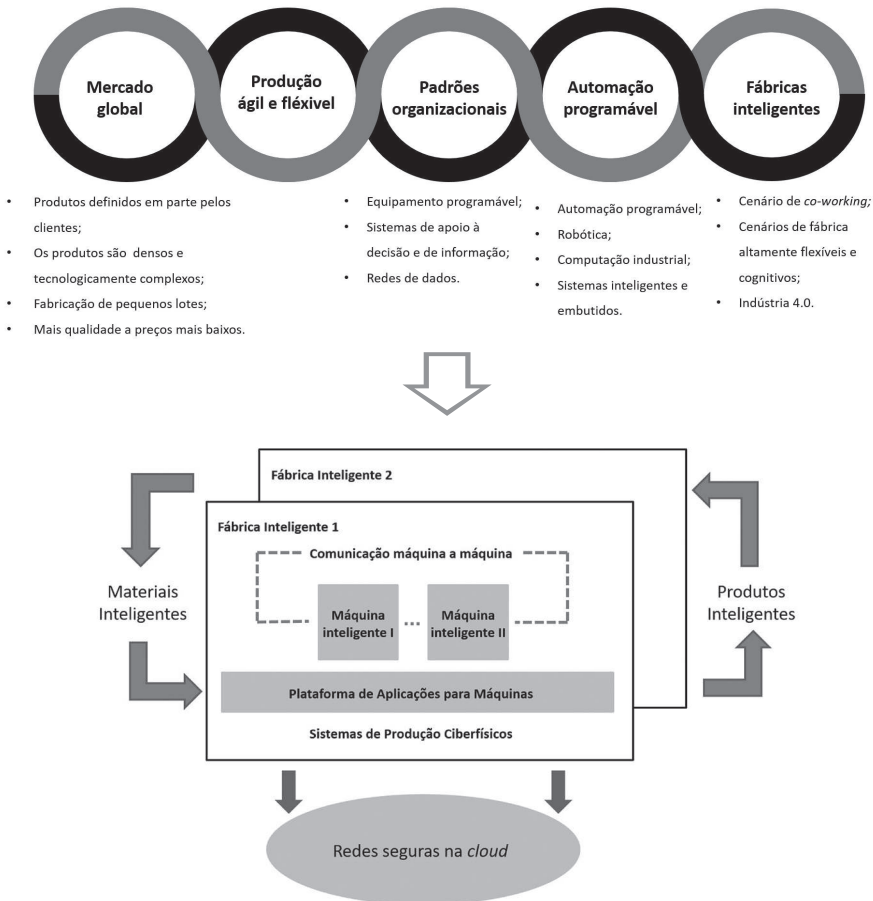


Figura 1.12 Fábricas inteligentes como consequência das características do mercado, dos consumidores e da realidade socioeconómica

Consequentemente, e como já foi referido (ver Figura 1.5), os esforços que temos feito em termos de I&D e de progressos técnicos têm conduzido ao desenvolvimento de máquinas e de sistemas de produção que, aparentemente, têm um desempenho superior ao do trabalho humano. Na verdade, esses esforços, que têm conduzido a máquinas cada vez mais evoluídas, flexíveis e ágeis, estão a projetar cenários em que **as máquinas são mais favoráveis** (em termos imediatos de custos de produção) do que qualquer outra forma de trabalho, incluindo a humana.

Na verdade, segundo as estimativas da PricewaterhouseCoopers (PWC)^[1,3], cerca de 30% dos empregos no Reino Unido, 38% nos EUA, 35% na Alemanha e 21% no Japão serão substituídos, até **2025**, por **bots automatizados e outros robôs** (Figura 1.13). Os riscos parecem ser mais altos em sectores como o transporte e o armazenamento (56%), a manufatura (46%), as vendas

O princípio, contrariamente ao que se possa pensar, não foi neste século, nem neste milênio, nem no milênio passado. Foi anterior à nossa era, no local onde quase tudo da nossa civilização começou: na Grécia antiga, por volta de 300 a.C. É um choque para quem tem dos robôs a imagem dos filmes ou dos desenhos animados. Um choque comparável ao que experimentam quando veem um robô atual e se apercebem das suas limitações, nomeadamente quando confrontam essa realidade com os fantásticos *C3PO* e *R2D2*, da saga *A Guerra das Estrelas* (Figuras 2.2 e 2.10).

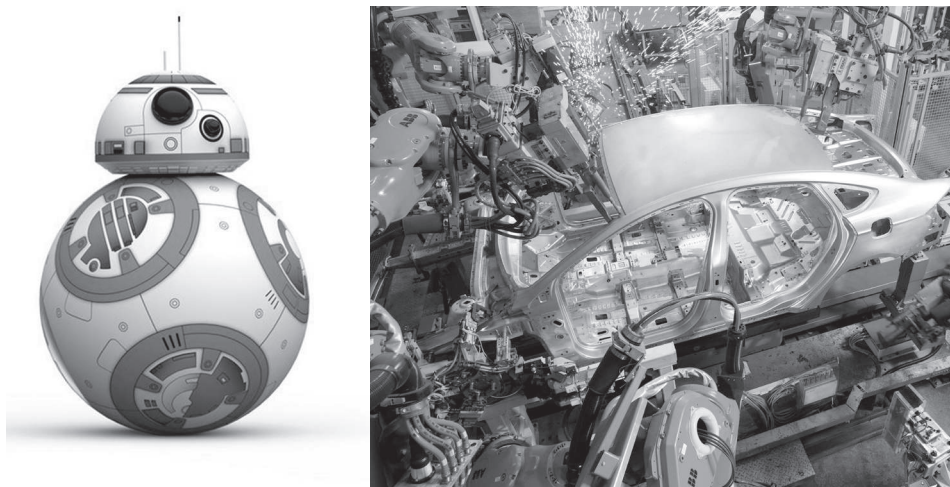


Figura 2.10 Ficção e realidade

Certa vez, num trabalho industrial numa empresa, um dos robôs que instalámos cometia sistematicamente um erro numa determinada situação. Era um erro de programação, de sincronização com os controladores lógicos programáveis (PLC) que controlavam os transportadores de peças, mas um dos operadores tinha uma explicação mais fantástica. Dizia ele: “O robô faz aquilo porque, como a peça já passou e ele viu e não teve tempo de apanhar, então...”. Como se o robô fosse um ser vivo, capaz de pensar e de cometer erros de análise, de tomar opções não pré-programadas.

Eu próprio tenho da robótica uma imagem de máquinas soberbas, fortes, incansáveis (como as de Karel Capek), obedientes (“Sim, Norberto *san...*”) e, no entanto, fascinantes. E esse fascínio não aparece naquela definição. Lamento, mas não aparece.

Costumo pegar em três períodos da história da robótica para delinear o conceito. Dos Gregos e dos Árabes retiro a ideia fundamental: “mecanismos engenhosos”. Na verdade, a robótica tem muito de mecânica, de movimentos, de mecanismos para os transmitir e de engenho para os imaginar e construir. “Mecanismos engenhosos” é, sem dúvida, um bom começo.

Depois, passa-se por Leonardo da Vinci (século XVI) e retira-se da sua contribuição as ideias: “precisão” e “fonte permanente de energia”. Ele percebeu que os robôs necessitavam de peças construídas com precisão, mas também teriam de ser movidos por uma qualquer fonte de energia permanente. Nada disso existia na altura, isto é, máquinas-ferramentas e uma fonte de energia (elétrica, pneumática ou hidráulica).

3.7 Software em Matlab (*toolbox* sobre robótica)

Aproveitando os desenvolvimentos anteriormente apresentados e que foram particularizados para o IRB1400, bem como as potencialidades da ferramenta matemática Matlab, desenvolveu-se um conjunto de funções que realizam muitos desses resultados. No seu conjunto, constituem uma verdadeira *toolbox* de robótica, que pode ser usada para simular e operar o robô a partir do Matlab. A funcionalidade desta *toolbox* é complementada por outra, apresentada na secção 3.10, que permite comandar o robô real a partir do Matlab.

Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos usando o Matlab, embora, nalgumas situações, tenham depois sido simplificados (otimização simbólica) fora do Matlab, nomeadamente por simplificação manual, por se ter verificado que era possível obter equações mais simples do que as obtidas recorrendo ao Symbolic Toolbox do Matlab. Seja como for, os resultados do Matlab foram usados para verificar a correção das soluções obtidas, por comparação com os resultados alcançados em várias configurações.

Foram escritas funções que permitem calcular a cinemática direta e inversa do robô, obter qualquer matriz de rotação ou de transformação, calcular o jacobiano (usando a simplificação simbólica obtida ou o método diferencial definido por Paul, Shimano e Mayer^[43]), calcular o jacobiano DLS, obter as trajetórias no espaço das juntas ou no espaço cartesiano entre duas configurações (permitindo definir velocidades e acelerações iniciais e finais, em que se utiliza uma função de interpolação quadrática, como definiu Craig^[23]), funções de animação do robô e outras. Em certa medida, este conjunto de funções está intimamente ligado ao tipo de robô usado, isto é, não foi preocupação torná-las compatíveis com qualquer tipo de robô. Assim, utilizam-se funções otimizadas para o tipo de robô utilizado (antropomórfico de punho esférico), em que a cinemática (direta e inversa) foi obtida simbolicamente e otimizada. Apresentam-se, de seguida, três exemplos de utilização destas funções.

Cálculo do jacobiano

Funções: jacobian.m e jacobdls.m.

Parâmetros de entrada: função $J = \text{jacobian}(\text{dh}, q, \text{type})$ e função $J_{\text{dls}} = \text{jacobdls}(\text{dh}, q, \text{type})$, em que:

dh – Parâmetros de Denavit-Hartenberg do robô;

q – Vetor ou matriz de vetores de posição angular das juntas;

type – Tipo de cálculo a efetuar;

- a – Devolve o jacobiano de base e o jacobiano do elemento terminal $[J \ J_0]$, usando o método de Paul, Shimano e Mayer^[43];
- b – Devolve o jacobiano de base usando o mesmo método;
- e – Devolve o jacobiano de base usando as nossas simplificações;
- d – Devolve os dois jacobianos usando as nossas simplificações;
- f – Devolve o jacobiano do elemento terminal usando as nossas simplificações.

determinada célula de produção devem ser definidos vários serviços parametrizáveis que permitam executar todas as funcionalidades previstas para a célula, tornando, assim, mais fácil a adaptação da célula a novos produtos ou a produtos que sofreram alterações. Essas alterações também serão mais fáceis de executar, podendo ainda tirar-se partido das capacidades de processamento e da grande diversidade de aplicações do computador remoto.

3.8.3 Exemplos de aplicação

Nas secções 3.7 e 3.8 foram apresentados alguns exemplos de utilização do *software* desenvolvido, nomeadamente demonstrando a utilização do Matlab para comandar o robô manipulador e utilizando o serviço de manipulação remoto por *joystick*. As potencialidades de funcionamento em rede (protocolo TCP/IP) do *software* apresentado permitem construir aplicações industriais de monitorização e controlo de redes de robôs inseridas em CFP. Essas aplicações incluem operações do tipo:

- Programação remota usando o mecanismo de chamadas remotas já anteriormente referido em conjunto com a livreria de funções genéricas definidas para cada equipamento;
- Carregamento de programas nos controladores dos robôs a partir de qualquer computador da rede;
- Gestão de programas e ficheiros, incluindo ficheiros de registo de operações (ficheiros de LOG);
- Monitorização de estado, contabilização e registo de erros;
- Recuperação de situações de paragem, colocando os robôs em posições de segurança. Estes procedimentos utilizam trajetórias de segurança que têm em conta a posição atual e o estado do robô, bem como da ferramenta em uso;
- Controlo de movimento dos robôs, atualizando posições e/ou trajetórias a partir de informação sensorial proveniente de sensores inteligentes, como sensores de força/momento, sistemas de visão, sensores de proximidade *laser*, etc. Para operações executadas *online* torna-se necessário um computador dedicado à tarefa. Tal exigência não se aplica a tarefas realizadas *offline*.

Aplicações que utilizam este tipo de operações podem ser facilmente construídas recorrendo ao Matlab e ao Microsoft Visual Studio, bem como à interface gráfica disponível nos ambientes baseados no API Win32/.NET. Mostram-se, de seguida, de forma detalhada e a título de exemplo, três aplicações construídas para demonstrar as capacidades deste tipo de *software*.

3.8.3.1 Painel de controlo

Esta aplicação (Figura 3.16) foi construída para, de alguma forma, reproduzir algumas das funções do painel de controlo de um robô manipulador industrial. O painel foi codificado para funcionar com todos os robôs ABB equipados com controladores da família S4 (que a ABB disponibiliza desde 1994). Com este painel, o operador pode, entre outras coisas, mudar o estado do robô, carregar e descarregar programas, executar programas e receber e listar eventos (enviados pelo sistema de controlo do robô, como mensagens assíncronas, e recebidos no PC através de um servidor RPC construído para o efeito).

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados dois exemplos industriais de aplicação de robótica industrial. Os exemplos foram realizados pelo autor em empresas portuguesas, pelo que a descrição será exaustiva e com os detalhes considerados suficientes. O objetivo, um pouco à imagem dos temas deste livro (robótica industrial, mas também automação e controlo), é apresentar modelos que possam funcionar como casos de integração de vários assuntos: robótica, eletrónica, *software*, instrumentação, atuação elétrica, pneumática e hidráulica, autómatos programáveis, redes de comunicação, etc. Os exemplos escolhidos incluem comando e monitorização via computador pessoal (PC), o que permite discutir vantagens e inconvenientes desse tipo de opção em ambiente industrial. Um dos aspetos abordados é a interface com o operador do sistema, o que introduz tópicos de discussão interessantes. Um outro ponto importante é a adaptabilidade a novas situações, nomeadamente à introdução de novos produtos ou modificação de condições operacionais, entre outros. Tal coloca desafios significativos e exige um planeamento cuidadoso.

Este capítulo está organizado da seguinte forma: primeiro, é apresentado um exemplo de paletização na indústria de componentes para a indústria automóvel, nomeadamente vidros para automóvel. Segue-se um exemplo na área da soldadura industrial, usando desenvolvimentos feitos no Laboratório de Robótica Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra. Em ambos são exploradas as capacidades de interface via PC com o operador, mas também as possibilidades que são abertas pela inclusão de um PC na célula, tendo em conta as capacidades avançadas dos PC atuais e a existência de *software* poderoso e de fácil utilização para programação, bases de dados, etc.

No fim do capítulo é feita uma breve discussão dos conceitos aqui apresentados, bem como das opções entretanto tomadas, e perspetiva-se o futuro a curto/médio prazo na robótica industrial, mas também na automação e controlo.

4.2 Exemplo industrial: paletização de vidros

Este é um exemplo típico do tipo de tarefas industriais que beneficiam muito da existência de um PC na instalação produtiva. Neste caso, como é vulgar em muitas indústrias, o produto não acabado tem de ser paletizado em vários estágios do seu ciclo produtivo, para transitar de célula em célula, poder ser vendido em vários estágios (a outras empresas que completam o fabrico, introduzindo-lhe características próprias) e armazenado por períodos mais ou menos longos, de acordo com o planeamento da produção e as necessidades da empresa. Os produtos usados neste exemplo são vidros laterais para automóvel e a tarefa é a sua paletização. Neste caso particular, os vidros são paletizados a cerca de 30% do seu ciclo, para poderem ser usados na linha que permite dar a curvatura característica do modelo de vidro. Essa linha, que inclui um forno de alta temperatura e um sistema de encurvamento a quente, é partilhada por todos os modelos de vidros da empresa, pelo que a alimentação automática a partir das linhas seria muito complexa ou até impossível. Assim, os vidros são paletizados por modelos, usando um robô manipulador, e são colocados na linha de encurvamento por outro robô, bastando, para

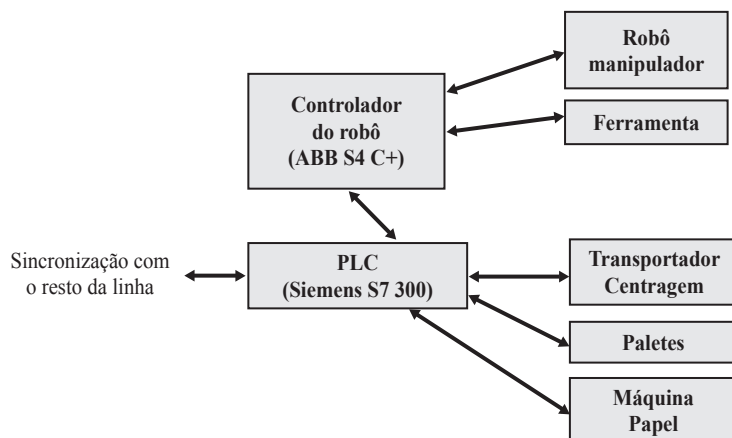


Figura 4.1 Componentes do sistema de paletização para a indústria automóvel

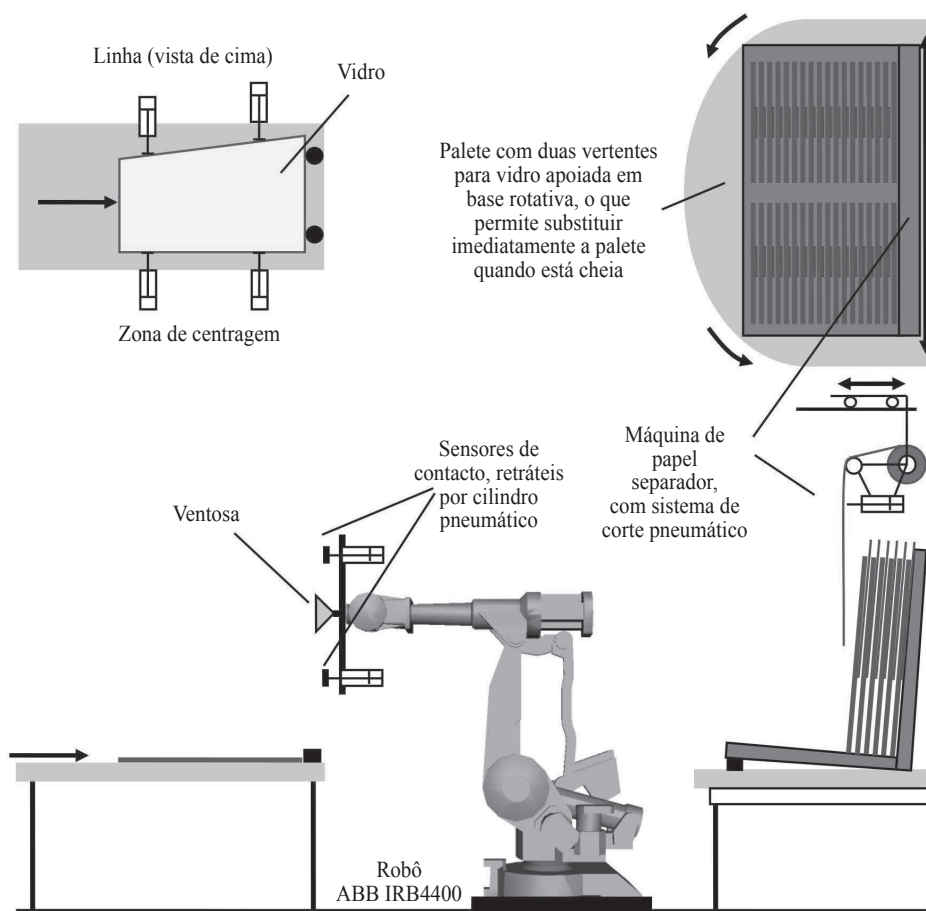


Figura 4.2 Célula de paletização de vidros para indústria automóvel (vista geral do sistema)

5.3 Célula equipada com mão robótica

Como foi referido na secção 5.2.1.1, em muitas situações industriais é necessário detetar a posição de objetos para que possam ser manipulados. Estão incluídas nesses casos, entre outras, as situações de empacotamento, paletização e deteção de defeitos. Nessas tarefas, o robô manipulador usado deve identificar os objetos e a respetiva posição espacial. Além disso, em certos casos é necessário usar ferramentas especiais para manipular, de forma precisa, os objetos em causa. No exemplo apresentado nesta secção (Figura 5.11) utiliza-se uma mão robótica de três dedos^[13] (fabricada pela Barrett Inc.), acoplada ao robô manipulador e controlada a partir de um PC externo.

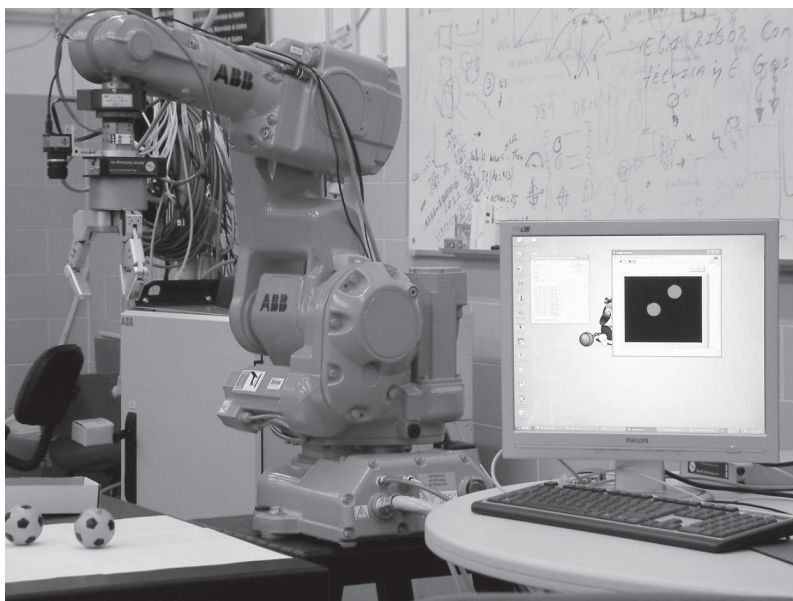


Figura 5.11 Vista geral do sistema: mesa de trabalho, robô, mão robótica, câmara CCD e robô de comando e controlo

O objetivo final deste exemplo é identificar os objetos colocados na mesa de trabalho (Figura 5.11), calcular a sua posição através de um sistema de visão e comandar o robô para os apanhar e colocar numa caixa. O processo de identificação implica reconhecer a forma do objeto (neste caso, circular) e verificar se a área é a predefinida. Em caso afirmativo, o *software* de processamento de imagem (Figura 5.12) calcula a posição da peça, informação que é devolvida na resposta ao serviço *camera get objects* (ver secção 5.2.1.5).

RobotStudio e dispositivos de interface homem-máquina

6.1 Introdução

A robótica industrial é uma disciplina fundamental na engenharia moderna. Desdobrou-se em várias áreas técnicas durante os últimos anos, originando máquinas e soluções capazes de resolver a maioria das exigências dos sistemas de produção modernos. Embora se tivessem registado outros esforços importantes em diversas áreas relacionadas com a robótica, quer ao nível técnico, quer ao nível científico, as interfaces homem-máquina (IHM) – e dispositivos relacionados – foram objeto de atenção e de desenvolvimento muito alargados. De facto, o cenário de produção evoluiu muito significativamente, passando de um paradigma de colaborador (*coworker*), em que operadores e máquinas devem cooperar, para estruturas hiperflexíveis, nas quais a agilidade é uma questão-chave. Os novos desenvolvimentos visam introduzir capacidades cognitivas nas máquinas e nas soluções de produção, o que as tornará capazes de resolver, de forma autónoma, a maioria dos problemas de produção. É óbvio que o desafio da produção flexível e ágil depende principalmente do desenvolvimento de IHM simples e naturais. Outras áreas que estão a emergir, com a tendência de digitalizar totalmente a produção e explorar a Internet das coisas (Indústria 4.0), são as da manufatura aditiva e híbrida – manufatura aditiva por soldadura por arco (*Wire Arc Additive Manufacturing*) –, deposição de metal por *laser* (*Laser Metal Deposition* – LMD) e *Computer Aided Design and Manufacturing* (CAD/CAM) para produção e manutenção de componentes atuais. Nesta área, a impressão de metal apresenta muitos desafios, devido às altas temperaturas de processamento e ao fenómeno de transformação de fase. A indústria está a reforçar a capacidade de imprimir metais, incluindo materiais e ligas leves e caras. Na verdade, o mundo da produção aguarda por um sistema inovador e disruptivo que permita a produção autónoma e económica de materiais radicalmente novos.

Este capítulo apresenta os desenvolvimentos recentes em dispositivos de IHM para células robóticas de manufatura, especificamente os usados para manufatura aditiva/híbrida, bem como métodos de interoperabilidade entre os dados CAD e os sistemas de modelação de materiais. Consequentemente, o capítulo é apresentado – recorrendo a algumas soluções desenvolvidas pelo autor – como um conjunto de diretrizes conceptuais – discutidas ao longo do texto – e uma forma de demonstrar de que forma podem ser aplicadas e quais são as implicações práticas.

Os sistemas robóticos de produção modernos, além da exigência de flexibilidade, devem permitir que os utilizadores – nos níveis de programação, engenharia avançada, manutenção e operação – possam simplesmente dizer ou mostrar o que querem que os sistemas executem. Tal significa, como já referido, que a produção flexível e ágil depende fortemente da existência de IHM simples e naturais^[1,2]. Isso é particularmente importante para pequenas e médias empresas (PME), uma vez que a disponibilidade de conhecimento técnico entre os seus recursos humanos é limitada, tanto em termos de número, como de tempo dedicado a essas tarefas, em comparação com empresas de maior dimensão. Consequentemente, as PME exigem novas abordagens radicais quando se consideram os diversos ângulos do problema: novos modelos de negócio, robôs devidamente adaptados às condições específicas das PME, flexibilidade e agilidade, IHM poderosas e integração mais eficiente com todos os níveis da empresa^[1,2,3]. Isto é muito importante, porque

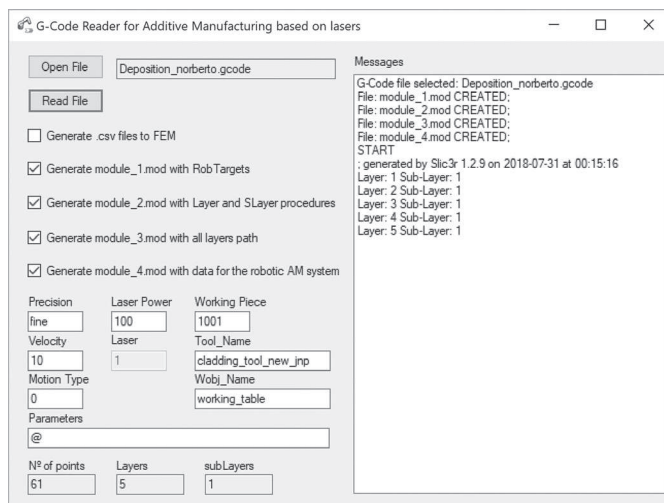


Figura 6.35 Aplicação que permite converter o *gcode* obtido a partir do *software* de *slicing* em trajetórias para o robô manipulador do sistema de impressão 3D

6.7 Método numérico para seleção dos parâmetros do processo

(Amin S. Azar e J. Norberto Pires)

O processo de impressão 3D começa sempre com o corte (*slicing*) do objeto 3D (a partir de um ficheiro CAD) que se pretende imprimir. Esse processo recorre a *software* próprio, que analisa a peça a imprimir e permite obter, tendo em conta certas configurações dimensionais e de dinâmica de impressão, um certo número de camadas às quais estão associadas trajetórias de impressão. São, como referido, trajetórias que se obtêm de forma matemática, baseadas em fatores geométricos. Utilizar essas trajetórias como trajetórias finais de impressão é uma boa primeira aproximação, que tem, no entanto, de ser melhorada. De facto, esse processo negligencia as propriedades finais do material, o qual passa por vários ciclos térmicos durante o processo de impressão (dependendo do tipo de processo de deposição usado). Ao contrário do processo de maquinação, no qual o planeamento de trajetórias pode ser puramente matemático, o processo de deposição é regulado por mais dois fatores: a termodinâmica e a cinética do processo. De facto, e no sentido de atingir um processo de fabricação sustentável, que garanta a produção das peças pretendidas sem grandes ciclos de tentativa-erro (*do it right the first time* – DRIFT), é necessário incluir a física do material no panorama geral.

O objetivo desta secção é apresentar e demonstrar um método desenvolvido para otimizar a trajetória de deposição que o sistema robótico deve executar, usando a física do material para controlar o sistema de deposição (*laser*).

Na conceção do processo experimental (*design of experiment* – DOE), a fonte de informação para o robô tomar decisões, baseadas nas propriedades definidas pelo utilizador, são alguns casos de simulação bem definidos. Estes casos devem evidenciar o efeito dos principais elementos paramétricos do processo de deposição usado, como velocidade de deposição, temperatura entre camadas (*layers*) e potência do *laser*.

Glossário

Glossário de termos correspondentes em Português Europeu¹ e Português do Brasil.

	Português Europeu (PE)	Português do Brasil (PB)
C	Calibração	Calibragem
	Condensador	Capacitor
	Controlo	Controle
F	Fábrica	Usina
	Ferramenta	Efetor
I	Íman	Magneto
M	Momento	Torque
P	Produção	Manufatura
R	Realimentação	Feedback
	Rebarbagem	Rebarbação
	Resistência	Resistor
S	Soldadura	Soldagem
T	Troca de ferramenta	Trocador de ferramenta

¹ Designa-se por Português Europeu a variante da língua falada em Angola, Cabo Verde, Guiné-Bissau, Moçambique, Portugal, São Tomé e Príncipe e Timor-Leste.

ROBÓTICA INDUSTRIAL Indústria 4.0

Numa altura em que os sistemas automáticos, os sistemas inteligentes, a inteligência artificial e os robôs são elementos do nosso dia a dia e ameaçam fazer uma transformação radical na forma como vivemos e trabalhamos, faz sentido estudar os fundamentos de uma das áreas mais importantes nos desenvolvimentos que permitiram a quarta revolução industrial: a Robótica Industrial.

Trata-se de uma área muito vasta, que integra conhecimentos de muitas outras áreas científicas e técnicas, pelo que este livro não pretende ser exaustivo, pois essa seria uma tarefa impossível. Mas pretende abrir os horizontes, fornecendo as pistas necessárias para quem procura uma introdução ou um complemento. Nessa perspetiva, tem capítulos mais introdutórios e outros mais avançados, procurando, assim, responder aos dois tipos de público.

Esta obra foi preparada para ser um guia detalhado para uma disciplina de Robótica Industrial ao nível do terceiro ou do quarto anos de um curso superior, universitário ou politécnico, de Engenharia Mecânica, Industrial, de Produção, Eletrotécnica, etc. Está também particularmente adaptada para profissionais da indústria da automação, como os integradores de sistema, incluindo utilizadores finais.

Contém um conjunto muito alargado de exemplos práticos totalmente desenvolvidos e explicados. Além disso, todos os programas implementados para esses exemplos, assim como vídeos de demonstração, são fornecidos num pacote de *software* e outras ferramentas, disponíveis num *site* desenvolvido pelo autor.

Os temas abordados incluem:

- Sistemas de produção 4.0
- Evolução histórica da robótica industrial
- Cinemática, dinâmica e *software* distribuído
- Aplicações industriais e alguns exemplos
- RobotStudio e dispositivos de interface homem-máquina

**Inclui glossário de termos correspondentes
entre o português europeu e o português do Brasil.**



ISBN 978-989-752-226-0



9 789897 522260

www.lidel.pt

O software e as aplicações informáticas apresentadas no livro estão disponíveis em www.jnorbertopires.pt até o livro se esgotar ou ser publicada uma nova edição atualizada ou com alterações.