

# Robótica industrial

## CONTEÚDO DO CAPÍTULO

- 8.1 Anatomia de um robô e atributos relacionados
  - 8.1.1 Articulações e elos
  - 8.1.2 Configurações comuns de robôs
  - 8.1.3 Sistemas de movimentação das articulações
- 8.2 Sistemas de controle de robôs
- 8.3 Efetuadores finais
  - 8.3.1 Garras
  - 8.3.2 Ferramentas
- 8.4 Sensores em robótica
- 8.5 Aplicações de robôs industriais
  - 8.5.1 Aplicações de manuseio de materiais
  - 8.5.2 Operações de processamento
  - 8.5.3 Montagem e inspeção
- 8.6 Programação de robôs
  - 8.6.1 Programação guiada
  - 8.6.2 Linguagens de programação de robôs
  - 8.6.3 Simulação e programação off-line
- 8.7 Precisão e repetibilidade de robôs

Um *robô industrial* é uma máquina programável, de aplicação geral e que possui determinadas características antropomórficas. A característica antropomórfica mais óbvia de um robô industrial é o braço mecânico, utilizado para desempenhar diversas tarefas industriais. Outras características humanas são as capacidades do robô de reagir a estímulos sensoriais, comunicar-se com outras máquinas e tomar decisões. Essas capacidades permitem que os robôs desempenhem uma série de tarefas úteis. O desenvolvimento da tecnologia de robótica seguiu-se ao desenvolvimento do controle numérico (Nota histórica 8.1), e as duas tecno-

logias são bastante similares. Ambas envolvem um controle coordenado de múltiplos eixos (chamados de *articulações* ou juntas em robótica) e usam computadores digitais dedicados como controladores. Enquanto máquinas de CN (controle numérico, do inglês, *numerical control* — NC) são projetadas para desempenhar processos específicos (por exemplo, usinagem, estampagem de metais laminados e corte térmico), robôs são projetados para uma gama mais ampla de tarefas. Aplicações de produção típicas de robôs industriais incluem solda a ponto, transferência de materiais, carga de máquinas, pintura pulverizada e montagem.

Algumas das qualidades que tornam os robôs industriais comercial e tecnologicamente importantes são:

- Podem substituir pessoas em ambientes de trabalho perigosos e desconfortáveis.
- Desempenham o ciclo de trabalho com consistência e repetibilidade que não podem ser alcançadas por pessoas.
- Podem ser reprogramados. Quando o curso de produção da tarefa corrente está concluído, um robô pode ser reprogramado e equipado com as ferramentas necessárias para desempenhar uma tarefa completamente diferente.
- São controlados por computadores e podem, dessa maneira, ser conectados a outros sistemas de computadores para chegar à manufatura integrada por computadores.

## Nota histórica 8.1

### Uma breve história dos robôs industriais

A palavra 'robô' entrou na língua inglesa por meio de uma peça tchecoslovaca intitulada *Rossum's universal robots* (Robôs universais de Rossum), escrita por Karel Capek no início da década de 1920. A palavra tcheca *robota* significa trabalhador forçado. Na tradução inglesa, a palavra foi convertida para *robot*. O enredo da peça centra-se em torno de um cientista chamado Rossum, que inventa uma substância química similar ao protoplasma e a utiliza para produzir robôs. A meta do cientista é fazer com que os robôs sirvam os seres humanos e realizem trabalhos físicos. Rossum, continua a fazer melhorias em sua invenção, para deixá-la perfeita. Esses "seres perfeitos" começam a se ressentir de seu papel subserviente na sociedade e se voltam contra seus mestres, matando toda a vida humana.

A peça de Capek era pura ficção científica. Nossa breve história tem de incluir dois inventores de verdade que fizeram as contribuições originais para a tecnologia da robótica industrial. O primeiro foi Cyril W. Kenward, inventor britânico que desenvolveu um manipulador que se movia em um sistema de eixos x-y-z. Em 1954, Kenward solicitou uma patente britânica para seu invento robótico e, em 1957, a patente foi emitida.

O segundo inventor foi um norte-americano chamado George C. Devol, que recebeu o crédito por duas invenções relacionadas à robótica. A primeira foi um invento para gravar magneticamente sinais elétricos de maneira que pudessem ser reproduzidos novamente para controlar a operação de máquinas. Esse invento foi desenvolvido em torno de 1946, e uma patente norte-americana foi emitida em 1952. A segunda invenção foi um projeto robótico desenvolvido na década de 1950, o qual Devol chamou de Transferência Programada de Artigos (*Programmed Article Transfer*). Esse invento foi feito para manipulação de peças. A patente norte-americana foi finalmente emitida em 1961. Foi um protótipo para os robôs impulsionados hidráulicamente, construídos mais tarde pela Unimation Inc.

Apesar de o robô de Kenward ter sido cronologicamente o primeiro (pelo menos em termos de data da patente), o robô de Devol, em última análise, provou ser muito mais importante no desenvolvimento e na comercialização da tecnologia robótica. A razão para isso foi a ação catalisadora de Joseph Engelberger, que havia se formado em física em 1949. Como estudante, ele havia lido romances de ficção científica sobre robôs. Em meados da década de 1950, estava trabalhando para uma empresa que produzia sistemas de controle para turbinas a jato. Assim, quando um encontro ao acaso ocorreu entre Engelberger e Devol em 1956, Engelberger estava "predisposto por educação, diversão e ocupação à noção da robótica".<sup>2</sup> O encontro ocorreu em um coquetel em Fairfield, Connecticut. Devol descreveu sua invenção de transferência programada de artigos para Engelberger, e eles subsequentemente começaram a considerar como desenvolver o invento como produto comercial para a indústria. Em 1962, a Unimation Inc. foi fundada, tendo Engelberger como presidente. O nome do primeiro produto da empresa foi Unimate, um robô de configuração polar, cuja primeira aplicação, em 1961, foi descarregar uma máquina de fundição de moldes em uma planta da General Motors localizada em Nova Jersey.

<sup>2</sup> Esta citação foi tomada emprestada de Groover et al. *Industrial robotics: Technology, programming, and applications*.

Figura 8.3 Estrutura de configuração polar

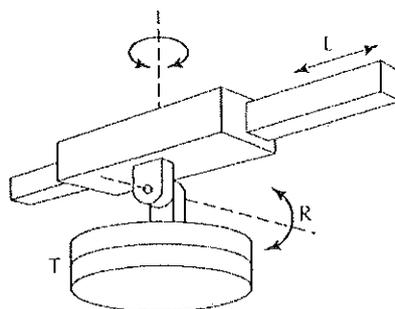
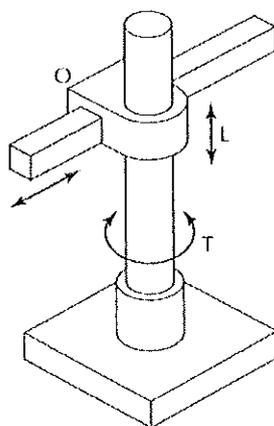


Figura 8.4 Estrutura de configuração cilíndrica



possível de essa configuração ser construída, utilizando uma articulação T para girar a coluna em torno do eixo. Uma articulação L é usada para mover o conjunto de braço verticalmente ao longo da coluna, enquanto uma articulação O é usada para conseguir o movimento radial do braço.

3. *Robô de coordenadas cartesianas.* Outros nomes para essa configuração incluem robô retilíneo e robô *x-y-z*. Como aparece na Figura 8.5, ele é composto de três articulações deslizantes, duas das quais são ortogonais.
4. *Robô articulado.* Esse robô manipulador (Figura 8.6) tem a configuração geral de um braço humano. O braço articulado consiste de uma coluna vertical que gira em torno da base usando uma articulação T. No topo da coluna há uma articulação de ombro (mostrada como uma articulação R na figura), cujo elo de saída conecta-se a uma articulação de cotovelo (outra articulação R).
5. *SCARA.* Acrônimo para *Selective Compliance Assembly Robot Arm* (Braço Robótico para Montagem com

Flexibilidade Seletiva). Essa configuração (Figura 8.7) é similar ao robô articulado, exceto pelos eixos rotacionais do ombro e do cotovelo que são verticais, o que significa que o braço é muito rígido na direção vertical, mas complacente na direção horizontal. Isso permite que o robô realize tarefas de inserção (em montagens) na direção vertical, na qual algum alinhamento na lateral pode ser necessário para casar as duas peças de maneira apropriada.

**Configurações de punho.** O punho do robô é utilizado para estabelecer a orientação do efetuator. Punhos de robôs normalmente consistem de dois ou três graus de liberdade. A Figura 8.8 ilustra uma configuração possível para um conjunto de punho de três graus de liberdade. As três articulações são definidas como: (1) *rolamento* (do inglês, *roll*), utilizando uma articulação T para realizar rotação em torno do eixo do braço do robô; (2) *arfagem* (do inglês, *pitch*), que envolve rotação para cima e para baixo e tipicamente utiliza uma articulação R; e (3) *guinada* (do inglês, *yaw*), que envolve rotação para a direita e para a esquerda.

Figura 8.5 Estrutura de configuração cartesiana

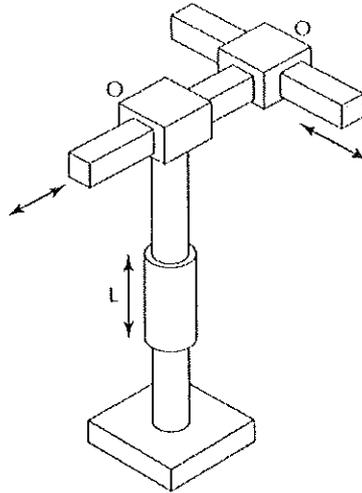


Figura 8.6 Estrutura de configuração articulada

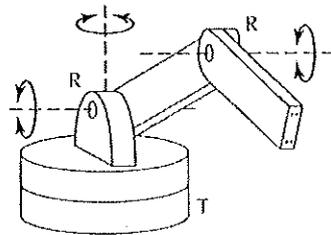
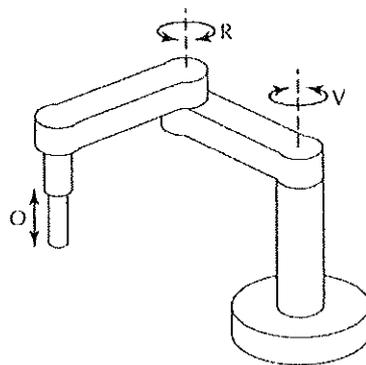


Figura 8.7 Montagem de configuração SCARA

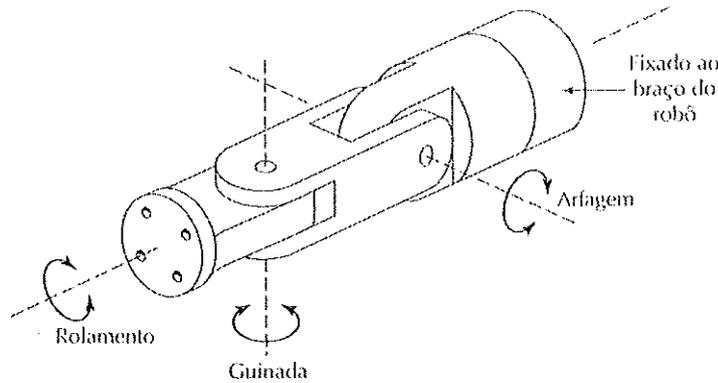


também realizada por meio de uma articulação R. Um punho de dois graus de liberdade em geral inclui somente articulações de rolamento e arfagem (articulações T e R).

Para evitar confusão nas definições de arfagem e guinada, o rolamento do punho dever ser presumido em posição central, como apresenta a figura. Para demonstrar a confusão possível, considere um conjunto

de punho duplamente articulado. Com a articulação de rolamento em posição central, a segunda articulação (articulação R) proporciona rotação para cima e para baixo (arfagem). Entretanto, se a posição de rolamento fosse 90° do centro (no sentido horário ou no sentido anti-horário), a segunda articulação proporcionaria uma rotação direita-esquerda (guinada).

Figura 8.8 Configuração típica de uma montagem de punho com três graus de liberdade, mostrando rolamento, arfagem e quinada



A configuração SCARA (Figura 8.7) é única no sentido de que normalmente não tem um conjunto de punho separado. Como descrito, é usada para operações de montagem tipo inserção, nas quais a inserção é feita por cima. Consequentemente, as exigências de orientação são mínimas e, portanto, o punho não é necessário. A orientação do objeto a ser inserido é às vezes necessária, e uma articulação rotativa adicional pode ser fornecida para essa finalidade. As outras quatro configurações da estrutura possuem conjuntos de punho que quase sempre consistem de combinações de articulações rotativas de tipos R e T.

**Sistema de notação de uma articulação.** Os símbolos de letras para os cinco tipos de articulações (L, O, R, T e V) podem ser usados para definir um sistema de

notação de uma articulação para o manipulador do robô. Nesse sistema de notação, o manipulador é descrito pelos tipos de articulações que formam a estrutura, seguidos pelos símbolos de articulações que formam o punho. Por exemplo, a notação TLR: TR representa um manipulador de cinco graus de liberdade cuja estrutura é feita de uma articulação de torção (articulação 1 = T), uma articulação linear (articulação 2 = L) e uma articulação rotacional (articulação 3 = R). O punho consiste de duas articulações, uma articulação de torção (articulação 4 = T) e uma articulação rotacional (articulação 5 = R). Um delimitador separa a notação da estrutura da notação de punho. Notações de articulações típicas para as cinco configurações comuns são apresentadas na Tabela 8.1. Notações de articulações de punho comuns são TRR e TR.

Tabela 8.1 Notações de articulações para cinco configurações robóticas comuns

Configuração	Notação de articulação	Configurações alternativas
Polar	TRL (Figura 8.3)	
Cilíndrica	TLO (Figura 8.4)	LVL
Cartesiana	LOO (Figura 8.5)	OOO
Braço articulado	TRR (Figura 8.6)	VVR
SCARA	VRO (Figura 8.7)	

Nota: Em alguns casos, mais de uma notação de articulação é dada porque a configuração pode ser construída utilizando mais de uma série de tipos de articulações.

**Volume de trabalho.** O volume de trabalho (o termo *envelope de trabalho* também é usado) do manipulador é definido como o envelope ou espaço tridimensional dentro do qual o robô pode manipular a extremidade de seu

punho. O volume de trabalho é determinado por número e tipos de articulações do manipulador (estrutura e punho), raios de ação das várias articulações e tamanhos físicos dos elos. O formato do volume de trabalho depende em grande

parte da configuração do robô. Um robô de configuração polar tende a ter uma esfera parcial como volume de trabalho, um robô cilíndrico tem um envelope de trabalho cilíndrico e um robô de coordenadas cartesianas tem um volume de trabalho retangular.

### 8.1.3 Sistemas de movimentação das articulações

Articulações de robôs são acionadas utilizando qualquer um dos três tipos de sistemas de movimentação: (1) elétrico, (2) hidráulico ou (3) pneumático. Sistemas elétricos utilizam motores elétricos como atuadores de articulações (por exemplo, servomotores ou motores de passo, os mesmos tipos utilizados em sistemas de posicionamento CN, Capítulo 7). Sistemas hidráulicos e pneumáticos utilizam mecanismos como pistões lineares e atuadores de pás rotativas para conseguir o movimento da articulação.

A movimentação pneumática é tipicamente limitada a robôs menores, utilizados em aplicações de transferência de materiais simples. A propulsão elétrica e a propulsão hidráulica são utilizadas em robôs industriais mais sofisticados. A movimentação elétrica tornou-se o sistema preferido em robôs comercialmente disponíveis, à medida que a tecnologia de motores elétricos tem avançado em anos recentes. É mais prontamente adaptável ao controle de computadores, tecnologia dominante hoje em dia para controladores de robôs. Comparados com robôs hidráulicamente alimentados, robôs de movimentação elétrica são relativamente precisos. Entretanto, as vantagens da movimentação hidráulica incluem velocidade e força maiores.

O sistema de movimentação, os sensores de posição (e sensores de velocidade, se usados) e os sistemas de controle por realimentação para as articulações determinam as características de resposta dinâmica do manipulador. A velocidade com a qual o robô pode chegar a uma posição programada e a estabilidade de seu movimento são características importantes de resposta dinâmica em robótica. A *velocidade* refere-se à velocidade absoluta do manipulador na extremidade do braço. A velocidade máxima de um robô grande é de em torno de 2 m/s (6 pés/s). A velocidade pode ser programada no ciclo de trabalho de maneira que diferentes porções do ciclo sejam realizadas em velocidades diferentes. O que às vezes é mais importante do que a velocidade é a capacidade do robô de acelerar e desacelerar de uma maneira controlada. Em muitos ciclos de trabalho, grande parte do movimento do robô é desempenhada em uma região confinada do volume de trabalho, de maneira que o robô nunca alcança a sua velocidade máxima. Nesses casos, quase todo o ciclo de movimento é consumido em aceleração e desaceleração em vez de em velocidade constante. Outros fatores que in-

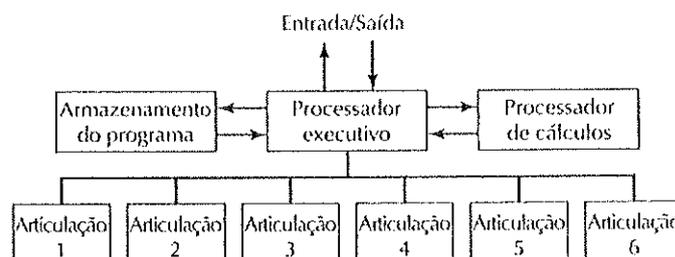
fluenciam a velocidade de movimento são o peso (massa) do objeto que está sendo manipulado e a precisão com a qual o objeto tem de ser colocado no fim de um determinado movimento. Um termo que leva esses fatores em consideração é a *velocidade de resposta*, que se refere ao tempo necessário para o manipulador se mover de um ponto a outro no espaço. A velocidade de resposta é importante porque influencia o ciclo de tempo do robô, que, por sua vez, afeta a razão de produção na aplicação. A *estabilidade* se refere ao montante de *overshoot* (ultrapassar do ponto programado) e oscilação que ocorre no movimento do robô na extremidade do braço à medida que ele tenta se mover para a próxima posição programada. Mais oscilação no movimento é indicação de menos estabilidade. O problema é que robôs com mais estabilidade são inerentemente mais lentos em sua resposta, enquanto robôs mais rápidos são geralmente menos estáveis.

A capacidade de movimentação de carga depende do tamanho físico e da construção do robô assim como da força e potência que pode ser transmitida à extremidade do punho. A capacidade de movimentação de peso de robôs comerciais varia de menos de 1 kg até aproximadamente 900 kg. Robôs de tamanho médio projetados para aplicações industriais típicas têm capacidades que variam de 10 kg a 45 kg. Quando se considera a capacidade de carga, um fator que deve ser mantido em mente é que um robô normalmente trabalha com uma ferramenta ou uma garra fixada a seu punho. Garras são projetadas para agarrar e mover objetos em torno da célula de trabalho. A capacidade de carga líquida do robô é obviamente reduzida pelo peso da garra. Se o robô é classificado em uma capacidade de 10 kg e o peso da garra é 4 kg, então a capacidade de mover peso é reduzida para 6 kg.

## 8.2 SISTEMAS DE CONTROLE DE ROBÔS

Os acionamentos das articulações individuais têm de ser controlados de maneira coordenada para que o manipulador realize o ciclo de movimentos desejado. Hoje em dia, controladores baseados em microprocessadores são comumente utilizados na robótica como o hardware do sistema de controle. O controlador é organizado em uma estrutura hierárquica (Figura 8.9) para que cada articulação tenha seu próprio sistema de controle por realimentação, e um supervisor coordena os acionamentos combinados das articulações de acordo com a sequência do programa do robô. Diferentes tipos de controle são necessários para diferentes aplicações. Controladores de robôs podem ser classificados em quatro categorias [5]: (1) controle de sequência limitado, (2) controle ponto a ponto, (3) controle de percurso contínuo e (4) controle inteligente.

Figura 8.9 Estrutura de controle hierárquico de um microcomputador controlador de robô



**Controle de seqüência limitada.** Esse é o tipo de controle mais elementar. Ele pode ser utilizado somente para ciclos de movimento simples, tais como operações de pegar e largar (isto é, pegar um objeto de um lugar e colocá-lo em outro). Ele é normalmente implementado estabelecendo-se limites ou paradas mecânicas para cada articulação e colocando em seqüência o acionamento das articulações para a conclusão do ciclo. Às vezes verificações de realimentação são utilizadas para indicar que o acionamento de uma articulação em particular foi concluído para que o próximo passo na seqüência possa ser iniciado. Entretanto, não há um servocontrole para conseguir um posicionamento preciso da articulação. Muitos robôs pneumáticos são robôs de seqüência limitada.

**Controle ponto a ponto.** Robôs programáveis (*play-back robots*) representam um controle mais sofisticado do que robôs de seqüência limitada. Significa que o controlador tem uma memória para gravar a seqüência de movimentos em um dado ciclo de trabalho, assim como as posições e outros parâmetros (como a velocidade) associados a cada movimento, e então, subsequentemente, reproduzir (em inglês, *play back*) o ciclo de trabalho durante a execução do programa. No controle ponto a ponto (do inglês, *point-to-point* — PTP), posições individuais do braço do robô são gravadas na memória. Essas posições não são limitadas a paradas mecânicas para cada articulação como em robôs de seqüência limitada. Em vez disso, cada posição no programa do robô consiste de um conjunto de valores representando localizações no raio de ação de cada articulação do manipulador. Desse modo, cada 'ponto' consiste de cinco ou seis valores correspondendo às posições de cada uma das cinco ou seis articulações do manipulador. Para cada posição definida no programa, as articulações são assim direcionadas para atuar nas respectivas localizações especificadas. O controle por realimentação é usado durante o ciclo de movimento para garantir que as articulações individuais cheguem às localizações especificadas no programa.

**Controle de percurso contínuo.** Robôs de percurso contínuo têm a mesma capacidade de execução que o tipo anterior. A diferença entre o percurso contínuo e o de ponto a ponto é a mesma na robótica e no CN (Seção 7.1.3). Um robô com controle de percurso contínuo é capaz de uma ou ambas as ações seguintes:

1. **Maior capacidade de armazenamento.** O controlador tem capacidade de armazenamento muito maior do que de ponto a ponto, de maneira que o número de localizações que podem ser registradas na memória é muito maior. Desse modo, os que constituem o ciclo de movimento podem ser espaçados muito proximamente para permitir que o robô realize um movimento contínuo suave. Em PTP, apenas a localização final dos elementos de movimento individual é controlado, de maneira que o percurso assumido pelo braço para chegar à localização final não é. Em um movimento de percurso contínuo, o movimento de braço e punho são controlados.
2. **Cálculos de interpolação.** O controlador calcula o percurso entre o ponto de partida e o ponto de chegada de cada movimento utilizando rotinas de interpolação similares àquelas usadas em CN. Essas rotinas geralmente incluem interpolação linear e circular (Tabela 7.1).

A diferença entre PTP e controle de percurso contínuo pode ser distinguida da seguinte maneira matemática. Considere um manipulador de coordenadas cartesianas de três eixos no qual a extremidade do braço é movida no espaço  $x$ - $y$ - $z$ . Em sistemas de ponto a ponto, os eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  são controlados para chegar a uma localização de ponto específica dentro do volume de trabalho do robô. Em sistemas de percurso contínuo, não apenas os eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , mas também as velocidades  $dx/dt$ ,  $dy/dt$  e  $dz/dt$  são controladas simultaneamente para realizar o percurso linear ou curvilíneo específico. Servocontrole é utilizado para regular continuamente a posição e a velocidade do manipulador. Deve ser mencionado que um robô de controle de percurso contínuo tem capacidade de controle PTP.

**Controle inteligente.** Os robôs industriais estão se tornando cada vez mais inteligentes. Nesse contexto, um *robô inteligente* é aquele que exibe comportamento que o faz parecer inteligente. Algumas das características que fazem um robô parecer inteligente incluem a capacidade para interagir com o meio, tomar decisões quando as coisas saem errado durante o ciclo de trabalho, comunicar-se com pessoas, fazer cálculos durante o ciclo de movimento e reagir à entrada de dados sensoriais avançados como visão de máquina.

Além disso, robôs com controle inteligente possuem capacidade tanto para PTP como para controle de percurso contínuo. Essas características exigem (1) nível relativamente alto de controle do computador e (2) linguagem de programação avançada para inserir a lógica de tomada de decisões e outra “inteligência” na memória.

### 8.3 EFETUADORES FINAIS

Em nossa discussão de configurações de robôs (Seção 8.1.2), mencionamos que um efetuador é normalmente fixado ao punho do robô. O efetuador capacita o robô a realizar uma tarefa específica. Devido ao fato de existir uma ampla gama de tarefas executadas por robôs industriais, o efetuador é normalmente produzido como um projeto personalizado e fabricado para cada aplicação diferente. As duas categorias de efetuadores são garras e ferramentas.

#### 8.3.1 Garras

Garras são efetuadores utilizados para agarrar e manipular objetos durante o ciclo de trabalho. Os objetos são normalmente peças movidas de uma localização para ou-

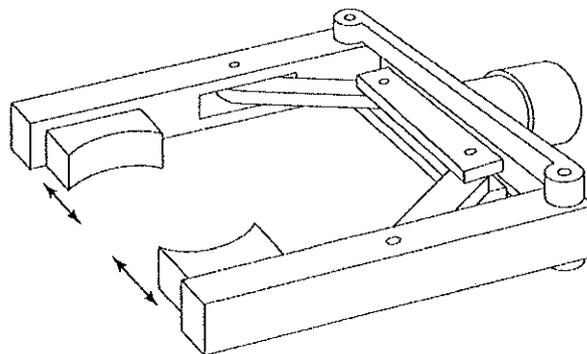
tra na célula. Aplicações de carga e descarga de máquinas caem nessa categoria (Seção 8.5.1). Devido à variedade de formatos, tamanhos e pesos das peças, a maioria das garras tem de ser personalizada. Tipos de garras usadas em aplicações de robôs industriais incluem as seguintes:

- *Garras mecânicas*, que consistem de dois ou mais dedos que podem ser acionados pelo controlador do robô para o movimento de abrir e fechar para agarrar a peça (a Figura 8.10 mostra uma garra de dois dedos).
- *Garras a vácuo*, nas quais copos de sucção são usados para segurar objetos planos.
- *Dispositivos magnetizados*, para segurar peças ferrosas.
- *Dispositivos adesivos*, que usam uma substância adesiva para segurar um material flexível, como um tecido.
- *Dispositivos mecânicos simples*, como ganchos e pás.

Garras mecânicas são o tipo de garra mais comum. Algumas das inovações e dos avanços na tecnologia de pinças mecânicas incluem:

- *Garras duplas*, que consistem de dois dispositivos de garras e um efetuador para carga e descarga. Com uma única garra, o robô tem de ir até a máquina de produção duas vezes, uma vez para descarregar a peça terminada da máquina e posicioná-la em uma localização externa, e a segunda vez para pegar a próxima peça e carregá-la na máquina. Com uma garra dupla, o robô pega a próxima peça enquanto a máquina ainda está processando a peça anterior. Quando o ciclo está terminado, o robô vai até a máquina apenas uma vez: para remover a peça terminada e carregar a próxima. Isso reduz o tempo do ciclo por peça.

Figura 8.10 Garra mecânica de um robô



- *Dedos intercambiáveis*, que podem ser usados em um mecanismo de garra. Para acomodar diferentes peças, diferentes dedos são fixados à garra.
- *Recalibração sensória* nos dedos, que proporcionam à garra capacidades como (1) sentir a presença da peça a ser trabalhada ou (2) aplicar uma força limitada específica à peça a ser trabalhada ao pegá-la (para peças frágeis).
- *Garras com múltiplos dedos*, que possuem a anatomia geral de mão humana.
- *Garras padronizadas*, que são comercialmente disponíveis e, desse modo, reduzem a necessidade de personalizar uma garra para cada aplicação de robô em separado.

### 8.3.2 Ferramentas

O robô utiliza ferramentas para realizar operações de processamento sobre a peça e as manipula em relação a um objeto estacionário ou em movimento lento (por exemplo, uma peça ou um subconjunto). Exemplos de ferramentas usadas como efetadores por robôs para executar aplicações de processamento incluem pistolas de soldagem por pontos; soldas a arco; pistolas de pintura pulverizada; broca rotativa para furação, fresamento, rebarbação e operações similares; ferramenta de montagem (por exemplo, chave de fenda automática); maçarico de aquecimento; concha (para fundição de metal); e ferramenta de corte a jato de água. Em cada caso, o robô tem não somente de controlar a posição da ferramenta em relação ao trabalho como uma função de tempo, ele também tem de controlar a operação da ferramenta. Para essa finalidade, o robô tem de ser capaz de transmitir sinais de controle para a ferramenta começar, parar e regular suas ações de outra forma.

Em algumas aplicações, o robô pode usar múltiplas ferramentas durante o ciclo de trabalho. Por exemplo, vários tamanhos de brocas de furação e fresamento têm de ser aplicados à peça. Desse modo, o robô tem de ter um meio de mudar rapidamente de ferramentas. O efetador nesse caso assume a forma de mandril porta-ferramenta de troca rápida para apertar e soltar rapidamente as várias ferramentas usadas durante o ciclo de trabalho.

## 8.4 SENSORES EM ROBÓTICA

O tópico geral de sensores como componentes em sistemas de controle foi discutido no Capítulo 6 (Seção 6.1). Aqui discutimos sensores à medida que eles são aplicados à robótica. Sensores usados na robótica industrial podem ser classificados em duas categorias: (1) internos e (2) externos. *Sensores internos* são componentes do robô

usados para controlar as posições e velocidades das várias articulações. Formam uma malha de controle por realimentação com o controlador do robô. Sensores típicos utilizados para controlar a posição do braço do robô incluem potenciômetros e encoders. Tacômetros de vários tipos são usados para controlar a velocidade do braço do robô.

Os *sensores externos* são utilizados para coordenar a operação do robô com outro equipamento na célula. Em muitos casos, os sensores externos são dispositivos relativamente simples, tais como interruptores de fim de curso que determinam se uma peça foi posicionada de maneira apropriada em um gabarito ou se uma peça está pronta para ser pega em um transportador. Outras situações exigem tecnologias de sensores mais avançadas, incluindo as seguintes:

- *Sensores táteis*. Usados para determinar se é feito contato entre o sensor e outro objeto, podem ser divididos em dois tipos em aplicações de robôs: (1) sensores táteis e (2) sensores de força. *Sensores táteis* indicam simplesmente que foi realizado contato com o objeto. *Sensores de força* indicam a magnitude da força com o objeto. Isso pode ser útil em garras para medir e controlar a força aplicada para segurar um objeto delicado.
- *Sensores de proximidade*. Indicam quando um objeto está próximo do sensor. Quando usado para indicar a distância real do objeto, é chamado de *sensor de alcance*.
- *Sensores óticos*. Fococélulas e outros dispositivos fotométricos podem ser utilizados para detectar presença ou ausência de objetos e são seguidamente utilizados para a detecção de proximidade.
- *Visão de máquina*. É utilizada em robótica para inspeção, identificação de peças, orientação e outros usos. Na Seção 22.6, há uma discussão completa de visão de máquina em inspeção automatizada. Melhorias na programação de sistemas de robôs guiados por visão (do inglês, *vision-guided robot* — VGR) tornaram as implementações dessa tecnologia mais fáceis e rápidas [12].
- *Outros sensores*. Sensores que podem ser usados em robótica, como dispositivos para medir temperatura, pressão e vazão de fluidos, tensão elétrica, corrente e outras propriedades físicas.

## 8.5 APLICAÇÕES DE ROBÔS INDUSTRIAIS

Uma das primeiras instalações de robô industrial foi feita em 1961, quando um robô foi usado em uma operação para descarregar moldes de uma máquina de

fundição (Nota histórica 8.1). O ambiente típico da fundição não é agradável para seres humanos devido ao calor proveniente dos gases emitidos pelo processo de fundição. Assim, parecia bastante lógica a utilização de um robô nesse tipo de ambiente de trabalho no lugar de um operador humano. O ambiente de trabalho é uma das várias características que devem ser consideradas quando se escolhe uma aplicação para robô. As características gerais de situações de trabalho industrial que tendem a promover a substituição de robôs por mão de obra humana são as seguintes:

1. *Trabalho perigoso para pessoas.* Quando o trabalho e o ambiente no qual ele é desempenhado são perigosos, inseguros, nocivos à saúde, desconfortáveis ou, de outro modo, desagradáveis para as pessoas, é desejável (também moral e socialmente necessário) considerar o uso de um robô industrial para a tarefa. Além da fundição, há outras situações de trabalho que são perigosas ou desagradáveis para as pessoas, como forjamento, pintura *spray* (por pulverização), soldagem a arco e soldagem a ponto. Robôs industriais são utilizados em todos esses processos.
2. *Ciclo de trabalho repetitivo.* Uma segunda característica que tende a promover o uso da robótica é um ciclo de trabalho repetitivo. Se a sequência de elementos no ciclo é a mesma e os elementos consistem de movimentos relativamente simples, um robô normalmente é capaz de desempenhar o ciclo de trabalho com mais consistência e repetibilidade que um trabalhador, o que normalmente reflete em uma qualidade de produto mais alta que a alcançada em uma operação manual.
3. *Difícil manuseio para pessoas.* Se a tarefa envolve manuseio de peças ou ferramentas que são pesadas ou difíceis de manipular, um robô industrial pode ser disponibilizado para que realize a operação. Peças ou ferramentas que são pesadas demais para que as pessoas manuseiem de maneira conveniente encontram-se absolutamente dentro da capacidade condutiva de um grande robô.
4. *Operação de múltiplos turnos.* Em operações manuais exigindo segundo e terceiro turnos, a substituição por robô proporciona retorno financeiro mais rápido do que a operação de turno único. Em vez de substituir um trabalhador, o robô substitui dois ou três trabalhadores.
5. *Mudanças esporádicas.* A maioria das operações por produto exige a mudança do local de trabalho. O tempo exigido para fazer a mudança é um tempo não produtivo, já que as peças não estão sendo produzidas. Consequentemente, a utilização de robôs têm sido tradicionalmente mais fáceis de se justificar nos casos de

execuções de produção relativamente longas, em que mudanças são esporádicas. Avanços foram feitos na tecnologia de robôs para reduzir o tempo de programação, e as atividades de produção mais curtas tornaram-se mais econômicas.

6. *Posição e orientação de peças são estabelecidas na célula de trabalho.* Atualmente, a maioria dos robôs nas aplicações industriais não tem capacidade de visão. Sua capacidade de pegar um objeto durante cada ciclo de trabalho baseia-se no fato de a peça encontrar-se em posição e orientação conhecidas. Deve-se pensar em um meio de apresentar a peça para o robô na mesma localização em cada ciclo.

Robôs estão sendo usados em diversas aplicações na indústria. A maioria das aplicações atuais está na manufatura. As aplicações normalmente podem ser classificadas em uma das seguintes categorias: (1) manuseio de materiais, (2) operações de processamento ou (3) montagem e inspeção. Pelo menos algumas das características de trabalho discutidas acima têm de estar presentes para tornar a instalação de um robô técnica e comercialmente viável.

### 8.5.1 Aplicações de manuseio de materiais

Em aplicações de manuseio de materiais, o robô move materiais ou peças de um lugar para outro. Para realizar a transferência, o robô é equipado com um efetuator tipo garra. A garra tem de ser projetada para manusear a peça específica ou as peças que devem ser movidas na aplicação. Incluídos dentro dessa categoria de aplicação estão (1) a transferência de materiais e (2) a carga e/ou descarga de máquinas. Em quase todas as aplicações de manuseio de materiais, as peças têm de ser apresentadas ao robô em posição e orientação conhecidas. Isso exige alguma forma de dispositivo de manuseio de materiais para que as peças sejam entregues em posição e orientação definidas na célula de trabalho.

*Transferência de materiais.* Essas aplicações são aquelas em que a principal finalidade do robô é pegar peças em uma posição e colocá-las em outra. Em muitos casos, a reorientação da peça é realizada durante a movimentação. A aplicação básica nessa categoria é a operação relativamente simples de *pegar e largar* (do inglês, *pick-and-place*), na qual o robô pega uma peça e a deposita em uma nova localização. Transferir peças de um transportador para outro é um exemplo. As exigências da aplicação são modestas; um robô de baixa tecnologia (por exemplo, do tipo sequência limitada) normalmente é suficiente. Apenas duas, três ou

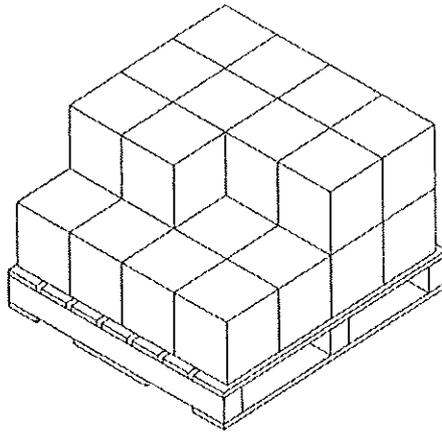
quatro articulações são necessárias para a maioria das aplicações. Robôs com movimentação pneumática são usados frequentemente.

Um exemplo mais complexo de transferência de materiais é a *paletização*, na qual o robô busca peças, caixas de papelão ou outros objetos de uma localização e os deposita em um palete ou em contêineres em posições múltiplas no palete (Figura 8.11). Apesar de o ponto de busca ser o mesmo para cada ciclo, a localização de depósito no palete é diferente para cada caixa de papelão. Isso aumenta o grau de dificuldade da tarefa. O robô tem de ser treinado para localizar cada posição no palete utilizando o método guiado *leadthrough* (Seção 8.6.1) ou tem de calcu-

lar a localização baseando-se nas dimensões e nas distâncias de centro entre as caixas de papelão (tanto nas direções  $x$  como nas  $y$ ).

Outras aplicações similares incluem a *despaletização*, que consiste em remover peças de um arranjo ordenado em um palete e colocá-las em outra posição (por exemplo, em um transportador em movimento); operações de *empilhamento*, que envolvem a atividade de colocar peças planas umas sobre as outras de tal maneira que a posição vertical de liberação esteja em contínua mudança de acordo com cada ciclo; e operações de *inserção*, nas quais o robô insere peças nos compartimentos de uma caixa de papelão dividida.

Figura 8.11 Típico arranjo de peças para operação de paletização de um robô



**Carga e/ou descarga de uma máquina.** Em aplicações de carga e/ou descarga, o robô transfere peças para dentro e/ou de uma máquina de produção. Os três casos possíveis são: (1) *carga de máquinas*, na qual o robô carrega peças para dentro da máquina de produção, mas as peças são descarregadas de outra forma; (2) *descarga de máquinas*, na qual as matérias-primas são alimentadas na máquina sem o robô, que, por sua vez, descarrega as peças terminadas; e (3) *carga e descarga de máquinas*, que envolve tanto a carga da peça bruta como a descarga da peça concluída pelo robô. Aplicações de robôs industriais de carga e/ou descarga de máquinas incluem os processos a seguir:

- **Fundição.** O robô descarrega peças de uma máquina de fundição. Operações periféricas às vezes desempenhadas por robôs incluem imersão das peças em água para esfriamento.
- **Injeção de plástico.** A injeção de plástico é similar à fundição. O robô descarrega peças injetadas de uma máquina de injeção.
- **Operações de usinagem de metal.** O robô carrega metal bruto para a máquina-ferramenta e descarrega as peças concluídas da máquina. A mudança de formato e tamanho da peça antes e depois da usinagem frequentemente apresenta problema no projeto do efetuator e as garras duplas (Seção 8.3.1) são muitas vezes utilizadas para lidar com essa questão.
- **Forjamento.** O robô tipicamente carrega o lingote quente bruto para o molde, segura-o durante os golpes de forjamento e o remove do martelo de forja. A ação de martelamento e o risco de dano ao molde ou ao efetuator são problemas técnicos significativos. Forjamento e processos relacionados são difíceis aplicações de robôs devido às severas condições sob as quais o robô tem de operar.
- **Laminação de chapas de metal.** Operadores humanos correm riscos consideráveis em operações de laminação de metal devido à ação da prensa. Para reduzir os perigos, robôs são usados como substitutos para os trabalhadores. Nessas aplicações, o robô carrega a

chapa de metal na prensa, a operação de prensagem é realizada e a peça cai da parte de trás da máquina para dentro de um contêiner. Em execuções de alta produção, operações de laminação podem ser mecanizadas utilizando-se rolos de chapas de metal em vez de chapas individuais. Essas operações não exigem a participação direta de pessoas, tampouco de robôs, no processo.

- *Tratamento térmico.* Em geral, são operações relativamente simples nas quais o robô carrega e/ou descarrega peças de uma fornalha.

### 8.5.2 Operações de processamento

Em aplicações de processamento, o robô realiza alguma operação de processamento em uma peça, como retífica ou pintura. Uma característica distinta dessa categoria é a de que o robô é equipado com algum tipo de ferramenta como efetuador (Seção 8.3.2). Para realizar o processo, o robô tem de manipular a ferramenta em relação à peça durante o ciclo de trabalho. Em algumas aplicações de processamento, mais de uma ferramenta tem de ser usada durante o ciclo de trabalho. Nesses casos, um mandril porta-ferramenta de troca rápida é usado para substituir ferramentas durante o ciclo. Exemplos de aplicações de robôs industriais na categoria de processamento incluem soldagem a ponto, soldagem a arco, pintura, diversas usinagens e outros processos que usam eixos rotativos.

**Soldagem a ponto.** Processo de junção de metal no qual duas chapas de metal são fundidas juntas em pontos de contato localizados. Dois eletrodos apertam as peças de metal juntas e, então, uma grande corrente elétrica é aplicada através do ponto de contato para fazer com que a fusão ocorra. Os eletrodos, juntamente ao mecanismo que atua com eles, constituem a pistola de soldagem na soldagem a ponto. Devido a seu amplo uso na indústria automobilística para a fabricação de chassis de carros, a soldagem a ponto representa uma das aplicações mais comuns de robôs industriais hoje. O efetuador é a pistola de soldagem a ponto usada para prender simultaneamente os painéis do carro e realizar o processo de soldagem de resistência. A pistola de soldagem usada para a soldagem a ponto de automóveis é normalmente pesada. Antes da aplicação por robôs, trabalhadores realizavam essa operação, e as pesadas ferramentas de soldagem eram difíceis para que as pessoas as manipulassem com precisão. Consequentemente havia muitos casos de soldagens não realizadas, soldagens mal localizadas e outros defeitos, resultando em baixa

qualidade geral do produto terminado. O uso de robôs industriais nessa aplicação melhorou dramaticamente a consistência das soldagens.

Robôs usados para a soldagem a ponto são normalmente grandes, com capacidade de carga suficiente para empunhar a pesada pistola de soldagem. Cinco ou seis eixos são geralmente precisos para que a posição e a orientação necessárias da pistola de soldagem sejam alcançadas. São usados robôs de execução ponto a ponto. Além deles, robôs de braço articulado são o tipo mais comum nas linhas de soldagem a ponto de automóveis, as quais podem consistir de várias dúzias de robôs.

**Soldagem a arco.** Usada para fornecer soldas contínuas em vez de soldas a ponto individuais em pontos de contato específicos. A junta soldada a arco é substancialmente mais forte que a da soldagem a ponto. Tendo em vista que a solda é contínua, ela pode ser usada em vasos de pressão e em outras soldagens nas quais força e continuidade são necessárias. Há várias formas de soldagem a arco, e todas seguem a descrição geral apresentada.

As condições de trabalho para as pessoas que realizam soldagem a arco não são boas. O soldador tem de usar capacete de rosto, cuja janela tem de ser escura o suficiente para a proteção dos olhos contra a radiação ultravioleta (UV) emitida pelo processo de soldagem a arco. Uma corrente elétrica alta é usada no processo de soldagem, o que também cria um risco para o soldador. Por fim, há o perigo óbvio das temperaturas do processo, altas o suficiente para fundir aço, alumínio ou outro metal que está sendo soldado. Uma quantidade significativa de coordenação mão-olho é exigida dos soldadores para se ter certeza de que o arco segue o percurso desejado com precisão para uma boa solda. Isso, juntamente com as condições descritas acima, resulta em alto nível de fadiga do trabalhador. Consequentemente, o soldador consegue realizar com sucesso o processo de soldagem em apenas 20-30 por cento das vezes. Essa porcentagem é chamada de tempo com arco aberto (em inglês, *arc-on time*), definida como a proporção de tempo durante o turno enquanto o arco de soldagem está em andamento e realizando o processo. Para ajudar o soldador, um segundo trabalhador, chamado *ajustador*, está presente no local de trabalho; sua tarefa é preparar as peças que devem ser soldadas e desempenhar outras funções de apoio ao soldador.

Devido às condições na soldagem a arco manual, a automação é utilizada onde é técnica e economicamente viável. Para trabalhos repetitivos de soldagem que envolvem longas juntas contínuas, máquinas de soldagem

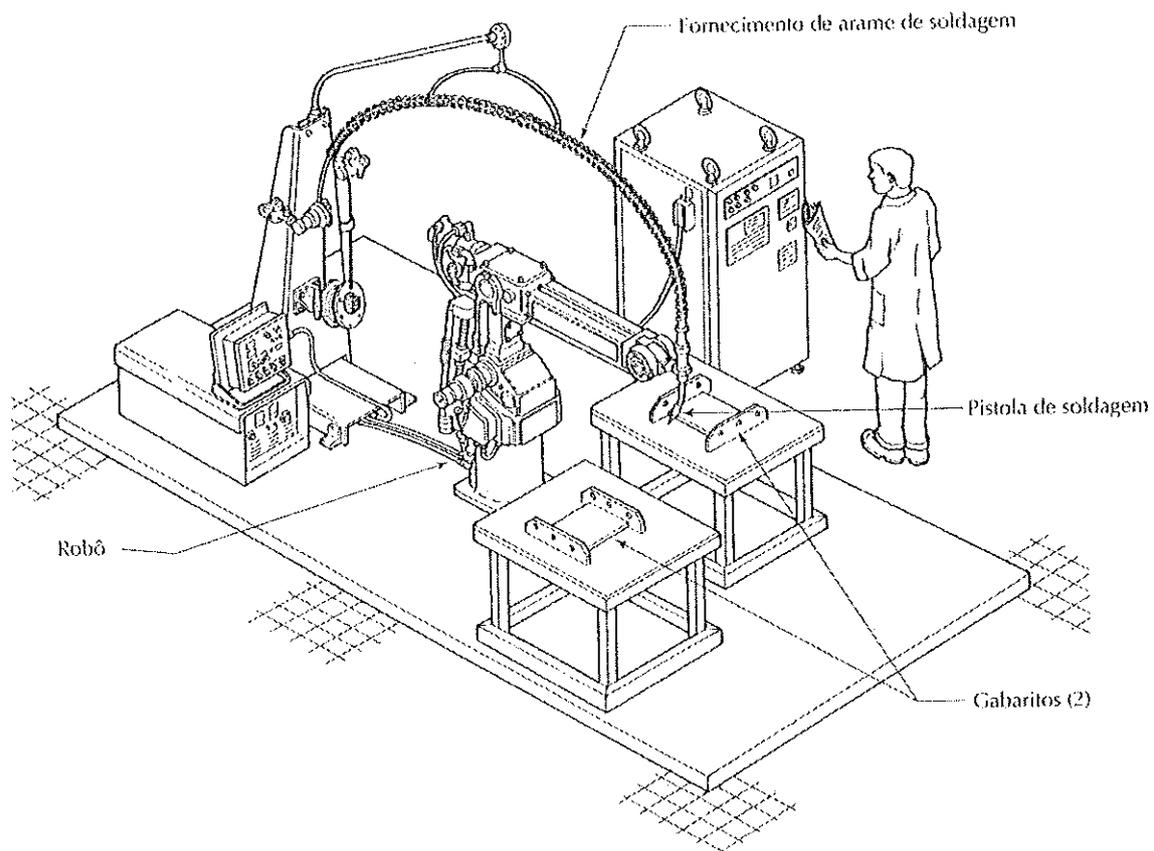
mecanizadas foram projetadas para a realização do processo. Essas máquinas são usadas para partes retas longas e peças curvas regulares, como vasos de pressão, tanques e canos.

Robôs industriais podem também ser utilizados para automatizar o processo de soldagem a arco. A célula consiste de robô, aparato de soldagem (unidade de força, controlador, ferramenta de soldagem e mecanismo afimentador) e um gabarito que posicione os componentes para o robô. O gabarito é mecanizado com um ou dois graus de liberdade, de maneira que possa apresentar diferentes porções da peça para o robô durante a soldagem (o termo *posicionador* é usado para esse tipo de gabarito). Tendo em vista maior produtividade, um gabarito duplo é comumente utilizado para que um ajudante humano possa descarregar o trabalho finalizado e carregar o componente para o próxi-

mo ciclo enquanto o robô está simultaneamente soldando a peça atual. A Figura 8.12 ilustra esse tipo de arranjo de local de trabalho.

O robô utilizado nos trabalhos de soldagem a arco tem de ser capaz de exercer um controle de percurso contínuo. Robôs de braço com seis articulações são frequentemente utilizados. Alguns fornecedores de robôs disponibilizam manipuladores que têm braços superiores ocios, de maneira que os cabos conectados ao maçarico de soldar possam ser contidos no braço para proteção em vez de fixados no exterior. Melhorias de programação para soldagem a arco baseadas em CAD/CAM também tornaram muito mais fácil e rápido implementar uma célula robótica. O percurso de soldagem pode ser desenvolvido diretamente a partir do modelo em CAD da unidade [8].

Figura 8.12 Célula de soldagem a arco (escudos de proteção foram removidos para deixar a ilustração mais clara; na realidade, haveria uma barreira entre o robô e o trabalhador)



**Revestimento pulverizado.** Direciona uma pistola pulverizadora no objeto a ser trabalhado. O fluido (por exemplo, tinta) sai, através do bico da pistola pulverizadora para ser disperso e aplicado sobre a superfí-

cie do objeto. Pintura pulverizada é a aplicação mais comum na categoria, mas o revestimento pulverizado refere-se a uma gama mais ampla de aplicações além da pintura.

O ambiente de trabalho para pessoas que realizam esse processo é cheio de perigos à saúde, os quais incluem gases nocivos e prejudiciais no ar, risco de fogos repentinos (*flash fires*) e ruído do bico da pistola pulverizadora. Principalmente devido a esses perigos, robôs estão sendo cada vez mais usados em tarefas de revestimento pulverizado.

Aplicações de robôs incluem revestimento pulverizado de utensílios, chassis de automóveis, motores e outras peças; tingimento pulverizado de produtos de madeira; e pulverização de revestimentos de porcelana em acessórios de banheiro. O robô tem de ser capaz de um controle de percurso contínuo para realizar as sequências de movimentos suaves exigidas na pintura pulverizada. O método de programação mais conveniente é o guiado manual (Seção 8.6.1). Robôs de braço articulado parecem ser a anatomia mais comum para essa aplicação. O robô tem de possuir um volume de trabalho suficiente para acessar as áreas da peça a ser revestida na aplicação.

Além de proteger trabalhadores de um ambiente nocivo, o uso de robôs industriais para aplicações de revestimento pulverizado oferece uma série de benefícios, os quais incluem maior uniformidade na aplicação do revestimento em relação ao trabalho realizado por pessoas, redução no desperdício de tinta, necessidades mais baixas de ventilação da área de trabalho, já que pessoas não estão presentes no processo, e maior produtividade.

**Outras aplicações de processamento.** Soldagem a ponto, soldagem a arco e revestimento pulverizado são as aplicações de processamento mais familiares de robôs industriais. A lista de processos industriais realizados por robôs cresce continuamente. Entre eles estão:

- *Furação, fresamento e outros processos de usinagem.* Aplicações que utilizam ferramenta rotativa como efetuator. A ferramenta de corte é montada no mandril. Um dos problemas dessa aplicação são as altas forças de corte encontradas na usinagem. O robô tem de ser forte o suficiente para suportá-las e manter a precisão exigida do corte.
- *Retífica, escovação a aço e operações similares.* Operações que também usam eixo rotativo para impulsionar a ferramenta (rebolo, escova de aço, roda de polimento etc.) em alta velocidade rotacional para a realização de acabamento e rebarbação na peça trabalhada.
- *Corte por jato de água.* Processo no qual um fluxo de água de alta pressão é forçado através de um pequeno bico em alta velocidade para cortar com precisão chapas de plástico, tecidos, papelão e outros materiais. O efetuator é o bico do jato de água, que é direcionado para seguir o percurso de corte desejado pelo robô.

- *Corte a laser.* A função do robô é similar à desempenhada no caso de corte por jato de água. A ferramenta a laser é fixada ao robô como seu efetuator. Soldagem a raio laser é uma aplicação similar.

### 8.5.3 Montagem e inspeção

Em certos pontos, montagem e inspeção são misturas das duas categorias de aplicação anteriores: manuseio e processamento de materiais. Aplicações de montagem e inspeção podem envolver o manuseio de materiais ou a manipulação de uma ferramenta. Por exemplo, operações de montagem normalmente envolvem a adição de componentes para a fabricação de um produto. Isso exige o movimento de peças de um local de suprimento no espaço de trabalho para o produto sendo montado — manuseio de materiais. Em alguns casos, a fixação dos componentes exige que uma ferramenta seja usada pelo robô (por exemplo, soldar, aparafusar). Similarmente, algumas operações de inspeção de robôs exigem que peças sejam manipuladas, enquanto outras exigem que uma ferramenta de inspeção seja manipulada.

Tradicionalmente, montagem e inspeção são atividades de trabalho intensivo, altamente repetitivas e normalmente tediosas. Por essas razões, são candidatas lógicas para aplicações robóticas. Entretanto, o trabalho de montagem tipicamente envolve tarefas diversas e às vezes difíceis, exigindo constantes ajustes em peças que não estejam se encaixando bem. O sentido do tato é muitas vezes necessário para se conseguir o encaixe das peças. O trabalho de inspeção exige alta precisão e paciência, e o julgamento humano é muitas vezes necessário para determinar se um produto está dentro das especificações de qualidade ou não. Devido a essas complicações em ambos os tipos de trabalho, a aplicação de robôs não tem sido fácil. Contudo, os resultados potencialmente positivos são tão grandes que esforços substanciais estão sendo feitos para desenvolver as tecnologias necessárias para alcançar o sucesso nessas aplicações.

**Montagem.** Envolve a combinação de duas ou mais peças para formar uma nova entidade, chamada de submontagem ou montagem. A nova entidade torna-se segura com a fixação simultânea das partes, baseada no uso de técnicas de fixação mecânica (por exemplo, parafusos, cavilhas, porcas e rebites) ou processos de junção (por exemplo, caldeamento, brasagem, soldagem ou colagem por adesivo). Aplicações robóticas em soldagem foram discutidas anteriormente.

Devido à importância econômica da montagem, métodos automatizados são seguidamente aplicados. A automação rígida é apropriada à produção em massa de

produtos relativamente simples, como canetas, lapiseiras, isqueiros e bocais de mangueiras de jardim. Robôs normalmente estão em desvantagem nessas situações de alta produção porque não operam nas altas velocidades alcançadas por equipamentos automáticos rígidos. A aplicação mais interessante de robôs industriais para montagem é em situações nas quais uma mistura de produtos ou modelos similares é produzida na mesma célula de trabalho ou linha de montagem. Exemplos desses tipos de produtos incluem motores elétricos, utensílios pequenos e outros produtos elétricos e mecânicos pequenos. Nesses casos, a configuração básica dos diferentes modelos é a mesma, mas há variações em tamanho, formato, opções e outras características. Tais produtos são seguidamente feitos em lotes em linhas de montagem manual. Entretanto, a pressão para reduzir estoques torna as linhas de montagem de modelo misto (Seção 15.4) mais atraente. Robôs podem substituir algumas ou todas as estações manuais nessas linhas. O que os torna viáveis em montagens de modelo misto é a capacidade de executar variações programadas no ciclo de trabalho para acomodar configurações de produtos diferentes.

Robôs industriais usados para os tipos de operações de montagem descritos são tipicamente pequenos, com capacidades de carga leves. As configurações mais comuns são braço articulado, SCARA e coordenadas cartesianas. Exigências de precisão em trabalhos de montagem são frequentemente mais rigorosas do que em outras aplicações de robôs, e alguns dos robôs mais precisos nessa categoria têm repetibilidades tão próximas quanto  $\pm 0,05$  mm ( $\pm 0,002$  pol). Além do robô em si, as exigências do efetuidor são muitas vezes rigorosas. O efetuidor pode ter de desempenhar múltiplas funções em uma única estação de trabalho para reduzir o número de robôs exigidos na célula. Essas funções múltiplas podem incluir manuseio de mais de um formato de peça e desempenho de funções tanto de garra como de ferramenta de montagem automática.

**Inspeção.** Em sistemas de montagem e produção automatizada, frequentemente há necessidade de inspeção do trabalho realizado. Inspeções têm as seguintes funções: (1) certificação de que um determinado processo foi completado, (2) garantia de que as peças foram acrescentadas na montagem como especificado, e (3) identificação de falhas em matérias-primas e peças terminadas. A inspeção automatizada é detalhada no Capítulo 21. Nosso propósito aqui é identificar o papel realizado por robôs industriais em inspeção. Tarefas de inspeção desempenhadas por robôs podem ser divididas nos dois casos a seguir:

1. O robô realiza tarefas de carga e descarga para dar apoio a uma máquina de inspeção ou testes. Esse caso é realmente carga e descarga de máquinas, em que a máquina é uma máquina de inspeção. O robô pega peças (ou conjuntos) que entram na célula, as carrega e descarrega para levar adiante o processo de inspeção, e as coloca na produção da célula. Em alguns casos, a inspeção pode resultar na escolha de peças que tem de ser realizada pelo robô. Dependendo do nível de qualidade das peças, o robô as coloca em diferentes contêineres ou em diferentes transportadores de saída.
2. O robô manipula um dispositivo de inspeção, como uma sonda mecânica, para testar o produto. Esse caso é similar à operação de processamento na qual o efetuidor fixado ao punho do robô é a sonda de inspeção. Para desempenhar o processo, a peça tem de ser apresentada na estação de trabalho na posição e na orientação corretas, e o robô tem de manipular o dispositivo de inspeção como exigido.

## 8.6 PROGRAMAÇÃO DE ROBÔS

Para realizar um trabalho útil, um robô tem de estar programado para desempenhar seu ciclo de movimento. Um *programa de robô* pode ser definido como um percurso no espaço a ser seguido pelo manipulador, combinado com ações periféricas que dão apoio ao ciclo de trabalho. Exemplos de ações periféricas incluem abrir e fechar a garra, realizar tomada de decisões lógica e comunicar-se com outros equipamentos na célula do robô. Um robô é programado por meio da inserção de comandos de programação na memória de seu controlador. Robôs diferentes usam métodos diferentes de inserção de comandos.

No caso de robôs de sequência limitada, a programação é realizada estabelecendo-se interruptores de fim de curso e paradas mecânicas para o controle dos pontos finais de seus movimentos. A sequência na qual os movimentos ocorrem é regulamentada por um dispositivo sequenciador. Esse dispositivo determina a ordem na qual cada articulação é acionada para formar o ciclo de movimento completo. Estabelecer as paradas e os interruptores e fazer a conexão com o sequenciador são mais parecidos com ajuste manual do que com programação.

Hoje em dia, quase todos os robôs industriais têm computadores digitais como controladores, e dispositivos de armazenamento compatíveis como unidades de memória. Para esses robôs, três métodos de programação podem ser distinguidos: (1) programação guiada, (2) linguagens de programação de robôs semelhantes a computadores e (3) programação off-line.

### 8.6.1 Programação guiada

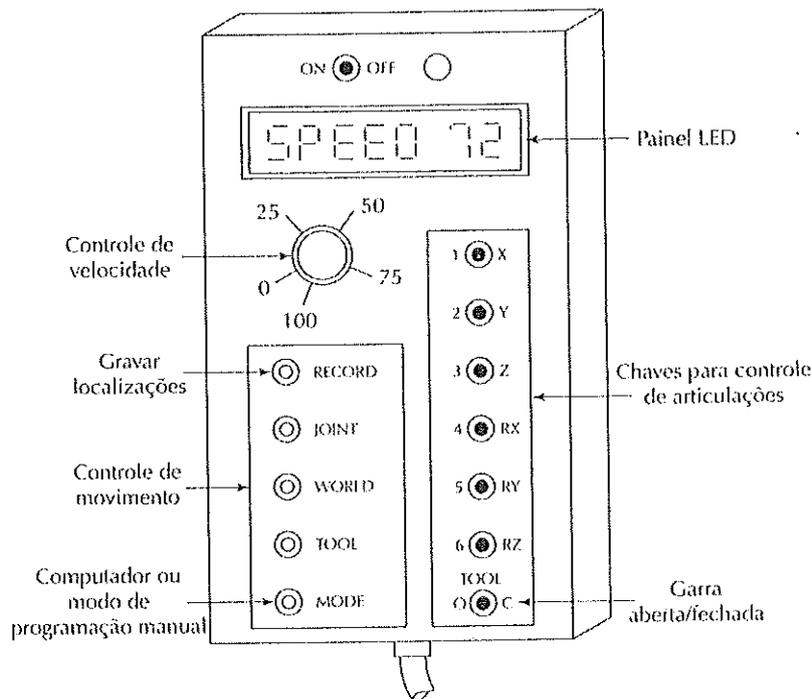
A programação guiada ou ensinada (do inglês, *lead-through*) data do início dos anos de 1960, antes de o controle dos computadores ser predominante. Os mesmos métodos básicos são usados atualmente para muitos robôs controlados por computadores. Na programação guiada, a tarefa é ensinada ao robô movendo o manipulador através do ciclo de movimento exigido e inserindo simultaneamente o programa na memória do controlador para a execução subsequente.

**Ensino acionado (powered leadthrough) versus Ensino manual (leadthrough manual).** Existem dois métodos para se realizar o procedimento de ensino guiado: (1) ensino acionado e (2) ensino manual. A diferença entre os dois está na maneira como o manipulador é deslocado através do ciclo de movimento durante a programação. O ensino acionado é comumente utilizado como método de programação para robôs com controle ponto a ponto. Envolve o uso de painéis de programação (painel de controle manual — *teach pendant*) que têm chaves articuladas e/ou botões de contato para controle do movimento das articulações do manipulador. A Figura 8.13 ilustra os componentes importantes de

um painel de controle manual de ensino. Utilizando as chaves articuladas ou botões, o programador dirige o braço do robô para as posições desejadas, em sequência, e registra as posições na memória. Posteriormente, durante a execução, o robô se move através da sequência de posições sob sua própria vontade.

O ensino manual é conveniente para programar robôs com controle de percurso contínuo, em que o percurso contínuo é um padrão de movimento irregular como na pintura. Esse método de programação exige que o operador fisicamente segure a extremidade do braço ou a ferramenta que está fixada ao braço e o mova através da sequência do movimento, gravando o percurso na memória. Devido ao fato de que o braço do robô em si pode ter uma massa significativa e seria, portanto, difícil de mover, normalmente um dispositivo de programação especial substitui o robô em si para o procedimento de ensino. O dispositivo de programação tem a mesma configuração de articulações que o robô e é equipado com um punho de gatilho (ou outra chave de controle), o qual o operador ativa quando está gravando movimentos na memória. Os movimentos são gravados como uma série de pontos proximalmente espaçados. Durante a execução, o percurso é recriado controlando o próprio braço do robô através da mesma sequência de pontos.

Figura 8.13 Um típico painel de programação de robô



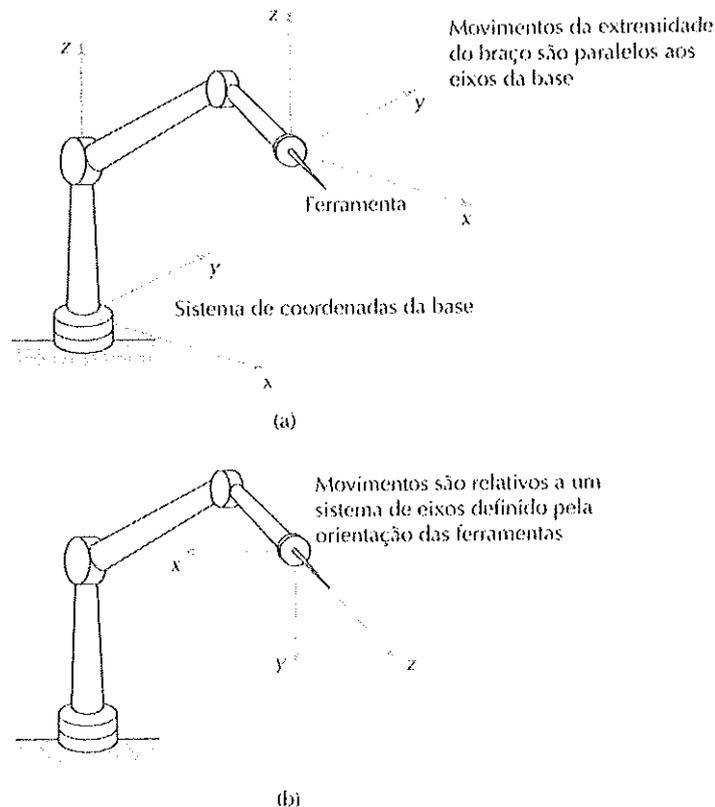
**Programação de movimento.** Os métodos de ensinamento proporcionam uma maneira natural de programar comandos de movimento no controlador do robô. No ensinamento manual, o operador simplesmente move o braço através do percurso exigido para criar o programa. No ensinamento acionado, o operador utiliza um painel de programação para dirigir o manipulador. O painel de programação é equipado com uma chave ou botões de contato para cada articulação. Ao ativar essas chaves ou esses botões de maneira coordenada para as várias articulações, o programador move o manipulador para as posições exigidas no espaço de trabalho.

Coordenar as articulações individuais com caixão painel de programação é uma maneira desajeitada e tediosa de inserir comandos de movimento para o robô. Por exemplo, é difícil coordenar as articulações individuais de um robô de braço articulado (configuração TRR) para dirigir a extremidade do braço e um movimento de linha reta. Portanto, muitos dos robôs que utilizam ensinamento acionado fornecem dois métodos alternativos para controlar o movimento do manipulador durante a programação, além de controles para articulações individuais. Com esses métodos, o programador pode mover a extremidade do punho do robô em percursos de linha

reta. Os nomes dados para essas alternativas são (1) sistema de coordenadas da base e (2) sistema de coordenadas da ferramenta. Ambos fazem uso de sistemas de coordenadas cartesianas. Em um sistema de *coordenadas da base*, a origem e eixos são definidos em relação à base do robô, como ilustrado na Figura 8.14(a). Em um sistema de *coordenadas da ferramenta*, mostrado na Figura 8.14(b), o alinhamento dos eixos é definido em relação à orientação da placa do punho (na qual o efetuator está fixado). Dessa maneira, o programador pode orientar a ferramenta da maneira desejada e, então, controlar o robô para fazer movimentos lineares em direções paralelas ou perpendiculares à ferramenta.

Os sistemas de coordenadas da base e de ferramenta são úteis somente se o robô tem capacidade de mover a extremidade de seu punho em um movimento de linha reta, paralelo a um dos eixos do sistema de coordenadas. Movimento de linha reta é bastante natural para um robô de coordenadas cartesianas (configuração LOO), mas pouco para robôs com qualquer combinação de articulações rotacionais (tipos R, T e V). Executar movimento de linha reta exige que esses manipuladores com esses tipos de articulações executem um processo de interpolação linear. Na *interpolação de linha reta*, o computador de controle calcula a se-

Figura 8.14 (a) Sistema de coordenadas da base (b) Sistema de coordenadas da ferramenta



quência de pontos endereçáveis no espaço através do qual a extremidade do punho tem de se deslocar para realizar um percurso reto entre dois pontos.

Outros tipos de interpolação estão disponíveis. Mais comum do que a interpolação de linha reta é a das juntas. Quando um robô é comandado para mover sua extremidade de punho entre dois pontos utilizando *interpolação de juntas*, ele aciona cada uma das articulações simultaneamente em sua própria velocidade constante, de maneira que todas as articulações partam e parem ao mesmo tempo. A vantagem de uma interpolação das juntas sobre uma de linha reta é a de que normalmente menos energia de movimento total é necessária para realizar o movimento. Isso significa que o movimento poderia ser feito em menos tempo. Deve ser observado que, no caso de um robô de coordenadas cartesianas, a interpolação de articulações e a interpolação de linha reta resultam no mesmo percurso de movimento.

Ainda assim, outra forma de interpolação é usada na programação de ensinamento manual. Nesse caso, o robô deve seguir a sequência de pontos proximoamente espaçados que são definidos durante o procedimento de programação. Na realidade, esse é um processo de interpolação para um percurso que normalmente consiste de movimentos suaves irregulares, como a pintura pulverizada.

A velocidade do robô é controlada por meio de um indicador, ou outro mostrador, localizado no painel de programação e/ou no painel de controle principal. Certos movimentos do ciclo de trabalho devem ser realizados em altas velocidades (por exemplo, mover peças através de distâncias substanciais na célula de trabalho), enquanto outros movimentos exigem operações de baixa velocidade (por exemplo, movimentos que exigem alta precisão na colocação da peça). O controle de velocidade também permite que um dado programa seja testado a uma baixa velocidade, segura, e, então, utilizado a uma velocidade mais alta durante a produção.

**Vantagens e desvantagens.** A vantagem oferecida pelos métodos de ensinamento é que podem ser prontamente aprendidos pelo pessoal do chão de fábrica. Programar o robô movendo seu braço através do percurso de movimento exigido é uma maneira lógica para alguém ensinar o ciclo de trabalho. As linguagens de robôs descritas na próxima seção, especialmente as mais avançadas, são facilmente aprendidas por alguém cuja formação inclui programação de computadores.

Há várias desvantagens inerentes aos métodos de programação guiada. Primeiro, a produção regular tem de ser interrompida durante os procedimentos de programação. Em outras palavras, a programação guiada

resulta em tempo ocioso da célula do robô ou linha de produção. A consequência econômica disso é que os métodos guiados têm de ser usados para sequências de produção relativamente longas e são inapropriados para lotes pequenos.

Segundo, o painel de programação utilizado com o ensinamento guiado e os dispositivos de programação utilizados com o ensinamento manual são limitados em termos da lógica de tomada de decisões que pode ser incorporada ao programa. É muito mais fácil escrever instruções lógicas utilizando as linguagens de robô semelhantes a computadores do que os métodos guiados.

Terceiro, já que os métodos guiados foram desenvolvidos antes de o controle de computadores tornar-se comum para robôs, esses métodos não são prontamente compatíveis com modernas tecnologias baseadas em computadores para robôs como CAD/CAM, bancos de dados de manufatura e redes de comunicações locais. A capacidade de conectar prontamente os vários subsistemas automatizados de computadores da fábrica para transferência de dados é considerada exigência para se chegar à manufatura integrada por computadores.

## 8.6.2 Linguagens de programação de robôs

O uso de linguagens de programação textuais tornou-se um método de programação apropriado à medida que computadores digitais assumiram a função de controle na robótica. Seu uso foi estimulado pela complexidade cada vez maior das tarefas que os robôs desempenham, com a necessidade concomitante de se embutir decisões lógicas no ciclo de trabalho do robô. Essas linguagens de programação semelhantes a de computadores são realmente métodos de programação on-line/off-line porque o robô ainda tem de ser ensinado sobre suas localizações utilizando o método guiado. Linguagens de programação textual para robôs proporcionam a oportunidade de realizar as seguintes operações que a programação guiada não pode conseguir prontamente:

- Acentuadas capacidades sensórias, incluindo o uso de dados de entrada e de saída analógicos, assim como digitais.
- Capacidade de execução incrementada para controlar equipamentos externos.
- Lógica de programa que está além das capacidades dos métodos guiados.
- Cálculos e processamento de dados similares a linguagens de programação de computadores.
- Comunicação com outros sistemas de computadores.

**Cálculos e lógica de programas.** Muitas linguagens de robôs possuem capacidade de realizar cálculos e operações de processamento de dados similares a linguagens de programação de computadores. A maioria das aplicações de robôs atuais não exige alto nível de potência computacional. À medida que a complexidade das aplicações de robôs cresce, espera-se que no futuro essas capacidades sejam mais bem utilizadas do que no presente.

Atualmente, muitas das aplicações de robôs exigem o uso de derivações e sub-rotinas no programa. Declarações como

GO TO 150

e

IF GO TO 150

fazem com que o programa derive para alguma outra linha no programa (por exemplo, para a linha número 150 nas ilustrações acima).

Uma sub-rotina em um programa de robô é um grupo de declarações que devem ser executadas separadamente quando chamadas do programa principal. No exemplo anterior, a sub-rotina SAFESTOP foi indicada na declaração REACT para uso em monitoramento de segurança. Outros usos de sub-rotinas incluem fazer cálculos ou realizar sequências de movimento repetitivas em um número de diferentes lugares no programa. Utilizar uma sub-rotina é mais eficiente do que escrever os mesmos passos várias vezes no programa.

### 8.6.3 Simulação e programação off-line

O problema com os métodos guiados e as técnicas de programação textual é que o robô tem de ser tirado da produção por um determinado período de tempo para que a programação seja feita. A programação off-line (desconectada) permite que o programa do robô seja preparado em um terminal de computador distante e que o download seja feito para o controlador do robô para execução sem interromper a produção. Na verdadeira programação off-line, não há necessidade de localizar fisicamente as posições no espaço de trabalho para o robô como é exigido nas atuais linguagens de programação textual. Alguma forma de simulação gráfica de computador é requisitada para validar os programas desenvolvidos off-line, similares aos procedimentos off-line utilizados na programação de peças CN.

Os procedimentos de programação off-line desenvolvidos e comercialmente oferecidos utilizam simulação gráfica para construir um modelo tridimensional de uma célula de robô para avaliação e programação off-line. A célula pode consistir do robô, de máquinas-ferramentas, de transportadores e de outros equipamentos. O simulador exibe esses componentes de célula no monitor gráfico e

mostra o robô realizando seu ciclo de trabalho em uma animação computadorizada. Após o programa ter sido desenvolvido com a utilização do procedimento de simulação, ele é convertido à linguagem textual correspondente ao robô em particular empregado na célula. Esse passo no procedimento de programação off-line é equivalente ao pós-processamento na programação de peças CN.

Nos pacotes de programação off-line, algum ajuste tem de ser feito para levar em consideração as diferenças geométricas entre o modelo tridimensional no sistema de computador e a célula física real. Por exemplo, a posição de uma ferramenta de máquina no *layout* físico pode ser ligeiramente diferente do modelo utilizado para fazer a programação off-line. Para o robô carregar e descarregar a máquina de maneira confiável, ele necessita da localização precisa do ponto de carga/descarga gravado em sua memória de controle. Esse módulo é utilizado para calibrar o modelo de computador tridimensional, substituindo os dados de localização da célula real para os valores aproximados desenvolvidos no modelo original. A desvantagem da calibração da célula é que o tempo de produção é perdido no procedimento.

## 8.7 PRECISÃO E REPETIBILIDADE DE ROBÔS

A capacidade de um robô em posicionar e orientar a extremidade de seu punho com precisão e repetibilidade é um atributo de controle importante em quase todas as aplicações industriais. Algumas aplicações de montagem exigem que objetos estejam localizados com uma precisão de 0,05 mm (0,002 pol). Outras aplicações, como soldagem a ponto, normalmente exigem precisões de 0,5-1 mm (0,020-0,040 pol). Vamos examinar como um robô é capaz de mover suas várias articulações para conseguir posicionamento preciso e com repetibilidade. Vários termos têm de ser definidos no contexto dessa discussão: (1) resolução de controle, (2) precisão e (3) repetibilidade. Esses termos têm os mesmos significados básicos tanto na robótica como no CN. Na robótica, as características são definidas na extremidade do punho e na ausência de qualquer efetador fixado ao punho.

A *resolução de controle* refere-se à capacidade do sistema de posicionamento do robô de dividir o curso da articulação em pontos igualmente espaçados, chamados de *pontos endereçáveis*, para os quais a articulação pode ser movida pelo controlador. Conforme a Seção 7.5.3, lembre-se de que a capacidade de dividir o curso em pontos endereçáveis depende de dois fatores: (1) das limitações dos componentes eletromecânicos que compõem cada combinação de articulação-elo e (2) da capacidade de armazenamento de bits do controlador para aquela articulação.

Se a combinação de articulação-elo consiste em um mecanismo de parafuso de avanço, como no caso de um sistema de posicionamento CN (fuso), então os métodos da Seção 7.5.3 podem ser utilizados para determinar a resolução de controle. Identificamos essa resolução de controle eletromecânico como  $CR_1$ . Infelizmente, do nosso ponto de vista, há uma variedade muito mais ampla de articulações utilizadas em robótica do que em ferramentas de máquinas CN. E não é possível analisar detalhes mecânicos de todos os tipos aqui. Basta reconhecer que há um limite mecânico para a capacidade de se dividir o curso de cada sistema de articulação-elo em pontos endereçáveis, e que esse limite é dado por  $CR_1$ .

O segundo limite sobre a resolução de controle é a capacidade de armazenamento de bits do controlador. Se  $B$  é o número de bits no registro de armazenamento de bits devotado a uma articulação em particular, então o número de pontos endereçáveis no curso daquela articulação é dado por  $2^B$ . A resolução de controle é, portanto, definida como a distância entre pontos endereçáveis adjacentes. Isso pode ser determinado como

$$CR_2 = \frac{R}{2^B - 1} \quad (8.1)$$

em que  $CR_2$  é a resolução de controle determinada pelo controlador do robô; e  $R$  é o curso da combinação articulação-junta, expressa em unidades lineares ou angulares, dependendo se a articulação fornece um movimento linear (tipos de articulação L ou O) ou um movimento rotativo (tipos de articulação R, T ou V). A resolução de controle de cada mecanismo de articulação-elo será o máximo de  $CR_1$  e  $CR_2$ , isto é,

$$CR = \text{Max} \{CR_1, CR_2\} \quad (8.2)$$

Em nossa discussão de resolução de controle para CN (Seção 7.5.3), indicamos que é desejável para ( $CR_2 \leq CR_1$ ), o que significa que o fator limitante em determinar a resolução de controle é o sistema mecânico, não o de controle computacional. Devido ao fato de a estrutura mecânica de um manipulador de robô ser muito menos rígida do que a de uma máquina-ferramenta, a resolução de controle para cada articulação de um robô será quase certamente determinada por fatores mecânicos ( $CR_1$ ).

Similar ao caso de um sistema de posicionamento CN, a capacidade de um manipulador de robô em posicionar qualquer mecanismo de articulação-elo na exata localização definida por um ponto endereçável é limitada por erros mecânicos na articulação e elos associados. Os erros mecânicos surgem de fatores como folgas em engrenagens, deformação do elo, vazamentos de fluidos e outras

fontes que dependem da construção mecânica da combinação de articulação-elo dada. Se caracterizarmos os erros mecânicos por uma distribuição normal, como fizemos na Seção 7.5.3, com a média  $\mu$  no ponto endereçável e desvio padrão  $\sigma$  caracterizando a magnitude da dispersão de erro, então podemos determinar a precisão e a repetibilidade para o eixo.

*Repetibilidade* é o termo mais fácil de definir. É uma medida da capacidade do robô em posicionar sua extremidade de punho em um ponto previamente ensinado no volume de trabalho. Cada vez que o robô retorna ao ponto programado, ele volta para uma posição ligeiramente diferente. Variações de repetibilidade têm como principal fonte os erros mecânicos previamente mencionados. Portanto, como no CN, para um mecanismo de articulação-elo único,

$$\text{Repetibilidade} = \pm 3\sigma \quad (8.3)$$

em que  $\sigma$  é o desvio padrão da distribuição de erro.

*Precisão* é a capacidade do robô de posicionar a extremidade de seu punho em uma localização desejada no volume de trabalho. Para um único eixo, utilizando o mesmo raciocínio usado para definir precisão na nossa discussão de CN, temos

$$\text{Precisão} = \frac{CR}{2} + 3\sigma \quad (8.4)$$

em que  $CR$  é a resolução de controle da Equação (8.2).

Os termos resolução de controle, precisão e repetibilidade estão ilustrados na Figura 7.15 do capítulo anterior para um eixo que é linear. Para uma articulação rotativa, esses parâmetros podem ser conceituados com um valor angular da própria articulação ou um comprimento de arco na extremidade do elo de saída da articulação.

#### EXEMPLO 8.1

##### Resolução de controle, precisão e repetibilidade na articulação de um braço robótico.

Uma das articulações de um determinado robô industrial é do tipo L, com um curso de 0,5 m. A capacidade de armazenamento de bits do controlador do robô é de dez bits para essa articulação. Os erros mecânicos formam uma variável aleatória distribuída normalmente em torno de um ponto ensinado dado. A média da distribuição é zero e o desvio padrão é 0,06 mm na direção do elo de saída da articulação. Determine a resolução de controle ( $CR_2$ ), a precisão e a repetibilidade para essa articulação de robô.

**Solução:** o número de pontos endereçáveis no curso da articulação é  $2^{10} = 1.024$ . A resolução de controle é, portanto,

$$CR_2 = \frac{0,5}{1,024 - 1} = 0,004888 \text{ m} = 0,4888 \text{ mm}$$

A precisão é dada pela Equação (8.4):

$$\text{Precisão} = \frac{0,4888}{2} + 3(0,06) = 0,4244 \text{ mm}$$

A repetibilidade é definida como  $\pm 3$  desvios padrão

$$\text{Repetibilidade} = 3 \times 0,06 = 0,18 \text{ mm}$$

Nossas definições de resolução de controle, precisão e repetibilidade foram descritas utilizando uma única articulação ou eixo. Para ter um valor prático, a precisão e a repetibilidade de um manipulador de robô devem incluir o efeito de todas as articulações, combinado ao efeito de seus erros mecânicos. Para um robô de múltiplos graus de liberdade, precisão e repetibilidade vão variar dependendo de onde no volume de trabalho a extremidade de punho está posicionada. A razão para isso é que determinadas combinações de articulações vão tender a aumentar o efeito da resolução de controle e dos erros mecânicos. Por exemplo, para um robô de configuração polar (TRL) com sua articulação linear completamente estendida, quaisquer erros nas articulações R ou T serão maiores do que quando a articulação estiver completamente retraída.

Robôs se movem no espaço tridimensional, e a distribuição de erros de repetibilidade é, portanto, também tridi-

mensional. Em três dimensões, nós podemos conceituar a distribuição normal como uma esfera cujo centro (média) está no ponto programado e cujo raio é igual a três desvios padrão da distribuição de erro de repetibilidade. Em prol da concisão, a repetibilidade é normalmente expressa em termos de raio da esfera: por exemplo,  $\pm 1 \text{ mm}$  ( $\pm 0,040 \text{ pol}$ ). Alguns pequenos robôs de montagem atuais têm valores de repetibilidade tão baixos quanto  $\pm 0,05 \text{ mm}$  ( $\pm 0,002 \text{ pol}$ ).

Na realidade, o formato de distribuição de erro não será uma esfera perfeita em três dimensões. Em outras palavras, os erros não serão isotrópicos. Em vez disso, o raio sofrerá variação porque os erros mecânicos associados a ele serão diferentes em determinadas direções. O braço mecânico do robô é mais rígido em curtas direções, e essa rigidez influencia os erros. A esfera não vai permanecer constante em tamanho durante todo o volume de trabalho do robô. Assim como com a resolução de controle, ela será afetada pela combinação particular das posições das articulações do manipulador. Em algumas regiões do volume de trabalho, os erros de repetibilidade serão maiores do que em outras.

A precisão e a repetibilidade foram definidas acima como parâmetros estáticos do manipulador. Entretanto, esses parâmetros de precisão são afetados pela operação dinâmica do robô. Características como velocidade, carga útil e direção de aproximação afetarão a precisão e a repetibilidade do robô.

## Referências

- [1] COLESTOCK, H. *Industrial robotics: selection, design, and maintenance*. Nova York, NY: McGraw-Hill, 2004.
- [2] CRAIG, J. J. *Introduction to Robotics: mechanics and control*. 2. ed. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [3] CRAWFORD, K. R. "Designing robot end effectors". *Robotics Today*, p. 27-29, out. 1985.
- [4] ENGELBERGER, J. F. *Robotics in practice*. Nova York, NY: Amacom (American Management Association), 1980.
- [5] GROOVER, M. P.; WEISS, M.; NAGEL, R. N.; ODREY, N. G. *Industrial robotics: technology, programming, and applications*. Nova York, NY: McGraw-Hill Book Company, 1986.
- [6] NIEVES, E. "Robots: more capable, still flexible". *Manufacturing Engineering*, p. 131-143, maio 2005.
- [7] SHREIBER, R. R. "How to teach a robot". *Robotics Today*, p. 51-56, jun. 1984.
- [8] SPROVIERI, J. "Arc welding with robots". *Assembly*, p. 26-31, jul. 2006.
- [9] TOEPPERWEIN, L. L.; BLACKMAN, M. T. et al. "ICAM robotics application guide". *Technical report AFWAL-TR-80-4042*, Ohio: Material Laboratory, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, abr. 1980. v. II.
- [10] WAURZYNIAK, P. "Robotics Evolution". *Manufacturing Engineering*, p. 40-50, fev. 1999.
- [11] \_\_\_\_\_. "Masters of manufacturing: Joseph F. Engelberger". *Manufacturing Engineering*, p. 66-75, jul. 2006.
- [12] ZENS JR., R. G. "Guided by vision". *Assembly*, p. 52-58, set. 2005.