

Tecnologias de inspeção

CONTEÚDO DO CAPÍTULO

- 22.1 Inspeção metrológica
 - 22.1.1 Características dos instrumentos de medição
 - 22.1.2 Padrões e sistemas de medição
- 22.2 Técnicas de inspeção com contato *versus* sem contato
 - 22.2.1 Técnicas de inspeção com contato
 - 22.2.2 Técnicas de inspeção sem contato
- 22.3 Medição convencional e técnicas de calibragem
- 22.4 Máquinas de medição por coordenadas (MMCs)
 - 22.4.1 Construção de MMCs
 - 22.4.2 Operação e programação de MMCs
 - 22.4.3 Outros softwares de MMCs
 - 22.4.4 Aplicações e benefícios de MMCs
 - 22.4.5 Sondas de inspeção em máquinas-ferramenta
 - 22.4.6 MMCs portáteis
- 22.5 Medição de superfície
 - 22.5.1 Instrumentos com agulha
 - 22.5.2 Outras técnicas de medição de superfície
- 22.6 Visão de máquina
 - 22.6.1 Aquisição e digitalização de imagens
 - 22.6.2 Análise e processamento de imagens
 - 22.6.3 Interpretação
 - 22.6.4 Aplicações de visão de máquina
- 22.7 Outros métodos de inspeção ótica
- 22.8 Técnicas de inspeção não óticas sem contato

Os procedimentos de inspeção descritos no capítulo anterior são capacitados por vários sensores, instrumentos e calibradores. Algumas dessas técnicas de inspeção envolvem equipamentos operados manualmente que já são

utilizados há mais de um século, como, por exemplo, micrômetros, paquímetros e calibradores passa/não passa. Outras são baseadas em tecnologias modernas, como máquinas de medição por coordenadas e visão de máquina.

As técnicas mais novas exigem sistemas computacionais para controlar sua operação e analisar os dados coletados. Baseadas em computadores, essas tecnologias permitem que os procedimentos de inspeção sejam automatizados. Em alguns casos, permitem que cem por cento da inspeção seja alcançada de maneira econômica. Neste capítulo, enfatizaremos as tecnologias modernas, começando com a discussão de um tópico que é pré-requisito na tecnologia de inspeção: a metrologia.

22.1 INSPEÇÃO METROLÓGICA¹

A *medição* é um procedimento no qual uma quantidade desconhecida é comparada a um padrão conhecido, utilizando um sistema de unidades aceito e consistente. A medição pode envolver uma simples regra linear para graduar o comprimento de uma peça ou pode exigir a medição da força por uma deflexão durante um teste de tensão. A medição fornece um valor numérico da quantidade de interesse, dentro de determinados limites de exatidão e precisão. É o meio pelo qual a *inspeção por variáveis* é realizada (Seção 21.1.1).

A *metrologia* é a ciência da medição. Ela se preocupa com sete quantidades básicas: comprimento, massa, tempo, corrente elétrica, temperatura, intensidade luminosa e quantidade de matéria. A partir delas, outras quantidades físicas são derivadas, como área, volume, velocidade, aceleração, força, voltagem elétrica, energia etc. Na metrologia de manufatura, a principal preocupação normalmente é medir a quantidade de comprimento nas muitas maneiras em que ela se manifesta em uma peça ou em um produto, as quais incluem comprimento, largura, profundidade, diâmetro, retilidade, planicidade e circularidade. Mesmo a rugosidade superficial (Seção 22.5) é definida em termos de quantidades de comprimento.

22.1.1 Características dos instrumentos de medição

Todos os instrumentos de medição possuem determinadas características que os tornam úteis nas aplicações particulares a que servem. As principais são exatidão e precisão, mas outros aspectos incluem velocidade de resposta, intervalo operacional e custo. Esses atributos podem ser usados como critérios na escolha de um dispositivo de medição para determinada aplicação, a qual deve enfatizar os critérios mais importantes.

Exatidão e precisão. A *exatidão* da medição é o grau para o qual o valor medido concorda com o verdadeiro valor da quantidade de interesse. Um procedimento de medição é preciso quando *erros sistemáticos* não constam dele, que são desvios positivos ou negativos do valor verdadeiro e que são consistentes de uma medida para a próxima.

A *precisão* é uma medida da repetibilidade em um processo de medição. Uma boa precisão significa que erros aleatórios no procedimento de medição são minimizados. Erros aleatórios ocorrem seguidamente devido à participação humana no processo de medição. Exemplos incluem variações no ajuste, leitura imprecisa da escala, aproximações de arredondamento e assim por diante. Contribuintes não humanos para erros aleatórios incluem mudanças na temperatura, desgaste gradual e/ou desalinhamento nos elementos funcionais do dispositivo e outras variações. Geralmente, presume-se que erros aleatórios obedecem a uma distribuição estatística normal com uma média zero e um desvio padrão (σ) que indique o montante de dispersão que exista na medição. A distribuição normal tem determinadas propriedades bem definidas, como o fato de que 99,73 por cento da população está incluída dentro de $\pm 3\sigma$ em torno da média da população. Normalmente a precisão de um instrumento de medição é definida como $\pm 3\sigma$.

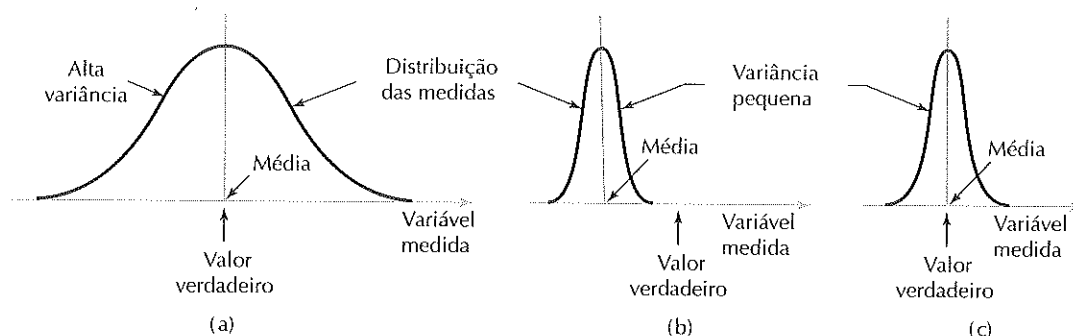
A distinção entre exatidão e precisão é descrita na Figura 22.1. Em (a), o erro aleatório na medição é grande, indicando uma baixa precisão, mas o valor médio da medição coincide com o valor verdadeiro, indicando alta exatidão. Em (b), o erro de medição é pequeno (boa precisão), mas o valor medido difere substancialmente do valor verdadeiro (baixa exatidão). Em (c), tanto a exatidão como a precisão são boas.

Nenhum instrumento de medição tem exatidão perfeita (sem erros sistemáticos) e precisão perfeita (sem erros aleatórios). A perfeição na medição, como em qualquer outra coisa, é impossível. A exatidão do instrumento é mantida por meio de uma calibração regular e apropriada (explicada a seguir). A precisão é alcançada selecionando a tecnologia de instrumento apropriada para a aplicação. Uma diretriz normalmente aplicada para se determinar o nível certo de precisão é a *regra de dez*, o que significa que o dispositivo de medição tem de ser dez vezes mais preciso do que a tolerância especificada. Desse modo, se a tolerância a ser medida é $\pm 0,25$ milímetro ($\pm 0,01$ polegada), então o dispositivo de medição deve ter uma precisão de $\pm 0,025$ milímetro ($\pm 0,001$ polegada).

Outras características de instrumentos de medição. Outro aspecto de um instrumento de medição é a capacidade de distinguir diferenças muito pequenas na

¹ Esta seção é baseada em Groover [10], Seção 45.1.

Figura 22.1 Exatidão versus precisão na medição: (a) alta exatidão, mas baixa precisão, (b) baixa exatidão, mas alta precisão e (c) alta exatidão e alta precisão



quantidade de interesse. A indicação dessa característica é a menor variação da quantidade que pode ser detectada pelo instrumento e os termos *resolução* e *sensibilidade* descrevem esse atributo de um dispositivo de medição. Outras características desejáveis incluem estabilidade, velocidade de resposta, ampla faixa operacional, alta confiabilidade e baixo custo.

Algumas medições, especialmente em um ambiente de manufatura, têm de ser feitas rapidamente. A capacidade que um instrumento de medição tem para indicar a quantidade com um mínimo de atraso de tempo é chamada de *velocidade de resposta*. Teoricamente, o atraso de tempo deve ser zero, mas isso é um ideal impossível. Para um dispositivo de medição automático, a velocidade de resposta é normalmente tomada como sendo um lapso de tempo entre o momento quando a quantidade de interesse muda e o momento quando o dispositivo é capaz de indicar a mudança dentro de determinada porcentagem do valor verdadeiro.

O instrumento de medição deve possuir uma *ampla faixa operacional* ou capacidade para medir a variável física através de todo o intervalo de interesse prático para o usuário. *Alta confiabilidade*, que pode ser definida como ausência de falhas e enguiços frequentes do dispositivo, e baixo custo são atributos desejáveis de qualquer equipamento de engenharia.

Instrumentos analógicos versus digitais. Um instrumento de medição analógico proporciona uma saída analógica; isto é, o sinal de saída do instrumento varia com a variável sendo medida. Como a saída varia continuamente, ela pode assumir um número infinito de valores possíveis no intervalo em que ela foi projetada para operar. É claro, quando a saída é lida pelo olho humano, há limites sobre a resolução, que pode ser discriminada. Quando dispositivos de medição analógicos são utilizados para o controle de processo, o sinal de saída comum é

a voltagem (tensão elétrica). Já que a maioria dos controladores de processo modernos é baseada em computadores digitais, o sinal de voltagem tem de ser convertido para a forma digital por meio de um conversor analógico-digital (do inglês, *analog-to-digital converter* — ADC, Seção 6.3).

Um instrumento de medição digital fornece uma saída digital; isto é, ela pode assumir qualquer número distinto de valores incrementais correspondendo ao valor da quantidade sendo medida. O número de valores de saída possíveis é finito. O sinal digital pode consistir de um conjunto de *bits* paralelos em um registrador de armazenamento ou uma série de pulsos que podem ser contados. Quando *bits* paralelos são usados, o número de valores de saída possíveis é determinado pelo número de *bits* como:

$$n_o = 2^B \quad (22.1)$$

em que n_o é o número de valores de saída possíveis do dispositivo de medição digital e B é o número de *bits* no registrador de armazenamento. A resolução do instrumento de medição é dada por:

$$MR = \frac{L}{n_o - 1} = \frac{L}{2^B - 1} \quad (22.2)$$

em que MR é a resolução de medição, o menor incremento que pode ser distinguido pelo dispositivo; L é sua faixa de medição e B é o número de *bits* usados pelo dispositivo para armazenar a leitura, como antes. Apesar de um instrumento de medição digital proporcionar um número finito de valores de saída possíveis, isso dificilmente é uma limitação na prática, já que o contador de memória pode ser projetado com um número suficiente de *bits* para alcançar a resolução necessária para quase qualquer aplicação.

Dispositivos de medição digitais estão encontrando utilização cada vez maior na prática industrial por duas boas

razões: (1) eles podem ser lidos com facilidade como instrumentos independentes e (2) a maioria dos dispositivos digitais pode ser conectada diretamente a um computador, evitando a necessidade de conversão analógico-digital.

Calibração. Dispositivos de medição têm de ser calibrados periodicamente. A calibragem é um procedimento no qual o instrumento de medição é checado em relação a um padrão conhecido. Por exemplo, calibrar um termômetro pode envolver checar sua leitura na água (pura) fervendo na pressão atmosférica padrão, condições em que se sabe que a temperatura é 100 °C (212 °F). O procedimento de calibragem deve incluir checar o instrumento através de toda sua faixa operacional. Se o padrão conhecido for um instrumento físico, ele deve ser usado somente para fins de calibração e não deve servir como instrumento de fábrica sobressalente quando um extra é necessário.

Por conveniência, o procedimento de calibragem deve ser o mais rápido e simples possível. Uma vez calibrado, o instrumento deve ser capaz de reter sua calibragem — continuando a medir a quantidade sem afastar-se do padrão por um período de tempo prolongado. Essa capacidade de reter a calibragem é chamada de *estabilidade*, e a tendência do dispositivo de gradualmente perder sua exatidão em relação ao padrão é chamado de *derivação*. Razões para a derivação incluem fatores como (1) desgaste mecâ-

nico, (2) sujeira e poeira, (3) vapores e produtos químicos no ambiente e (4) envelhecimento dos materiais dos quais o instrumento é feito. Uma boa cobertura da questão de calibragem de medição é fornecida em Morris [14].

22.1.2 Padrões e sistemas de medição

Uma característica comum a qualquer procedimento de medição é a comparação do valor desconhecido com um padrão conhecido. Dois aspectos de um padrão são críticos: (1) deve ser constante, não mudar com o tempo e (2) deve ser baseado em um sistema de unidades que seja consistente e aceito pelos usuários. Em tempos modernos, padrões para comprimento, massa, tempo, corrente elétrica, temperatura, luz e quantidade de matéria são definidos em termos de fenômenos físicos nos quais confia-se que permaneçam inalterados. Esses padrões, definidos por acordo internacional, são apresentados na Tabela 22.1.

Dois sistemas de unidades se desenvolveram a ponto de predominar no mundo: (1) o sistema usual norte-americano (do inglês, *U.S. customary system* — USCS) e (2) o Sistema Internacional de Unidades (do francês, *Le Système International d'Unités* — SI), popularmente conhecido como sistema métrico. Em todo este livro, usamos paralelamente ambos os sistemas, que são bem conhecidos. O sistema métrico (Tabela 22.1) é amplamen-

Tabela 22.1 Unidades padrão para quantidades físicas básicas (Sistema Internacional)

Quantidade	Unidade padrão	Símbolo	Unidade padrão definida
Comprimento	Metro	m	A distância percorrida pela luz em um vácuo em 1/299.792.458 de um segundo.
Massa	Quilograma	kg	Um cilindro de uma liga de platina-irídio que é mantida pelo Bureau Internacional de Pesos e Medidas em Paris. Uma 'duplicata' é mantida pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (do inglês, National Institute of Standards and Technology — NIST) próximo de Washington, DC.
Tempo	Segundo	s	Duração de 9.192.631.770 ciclos da radiação associada a uma mudança no nível de energia do átomo de célio.
Corrente elétrica	Ampère	A	Magnitude da corrente que, quando fluindo através de dois cabos paralelos longos a uma distância de um metro um do outro em espaço livre, resulta em uma força magnética entre os cabos de 2×10^{-7} N para cada metro de comprimento.
Temperatura termodinâmica	Kelvin	K	A escala de temperatura Kelvin tem seu ponto zero no zero absoluto e tem um ponto fixo de 273,15 K no ponto triplo de água, que é a temperatura e pressão na qual o gelo, água líquida e vapor de água estão em equilíbrio. A escala da temperatura Celsius é derivada do Kelvin como $C = K - 273,15$.
Intensidade da luz	Candela	cd	Definida como a intensidade luminosa de 1/600.000 de um metro quadrado de um corpo negro irradiante na temperatura de fusão da platina (1.769 °C)*.
Quantidade de matéria	Mol	mol	Definida como o número de átomos em 0,012 quilograma de massa de carbono 12.

* Devido à dificuldade de realização desse experimento, em 1979 a intensidade luminosa foi redefinida como: a intensidade luminosa, em uma direção dada, de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540 1012 Hertz e cuja intensidade energética naquela direção é 1/683 Watts por esterradiano (Nota do Consultor Técnico).

te aceito em quase todas as partes do mundo industrializado, com exceção dos Estados Unidos, que teimosamente ainda não deixam o USCS. Gradualmente, os Estados Unidos estão utilizando o sistema métrico e adotando o SI.

22.2 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO COM CONTATO VERSUS SEM CONTATO

Técnicas de inspeção podem ser divididas em duas categorias amplas: (1) com contato e (2) sem contato. Na inspeção com contato, o contato físico é feito entre o objeto e o instrumento de medição ou calibração, enquanto na inspeção sem contato nenhum contato físico é feito.

22.2.1 Técnicas de inspeção com contato

A inspeção com contato envolve o uso de uma sonda mecânica ou outro dispositivo que faz contato com o objeto sendo inspecionado. A finalidade da sonda é medir ou calibrar o objeto de alguma maneira. Devido à sua natureza, a inspeção com contato normalmente se preocupa com alguma dimensão física da peça. Como consequência, essas técnicas são amplamente utilizadas nas indústrias de manufatura, em particular na produção de peças de metal (usinagem, estampagem e outros processos de beneficiamento de metal). A inspeção com contato também é utilizada em testes de circuitos elétricos. As principais tecnologias de inspeção com contato são:

- Instrumentos de medição e calibragem convencionais.
- Máquinas de medição por coordenadas (MMCs) e técnicas relacionadas para medir dimensões mecânicas.

- Máquinas de medição de textura de superfícies do tipo agulha para medir características de superfícies como rugosidade e ondulação.
- Sondas elétricas de contato para testar circuitos integrados e placas de circuitos impressos.

Técnicas convencionais e MMCs competem umas com as outras na medição e na inspeção de dimensões de peças. A gama de aplicações gerais para os diferentes tipos de equipamentos de inspeção e medição são apresentados no diagrama de *PQ* da Figura 22.2, em que *P* e *Q* referem-se à variedade e quantidade de peças inspecionadas.

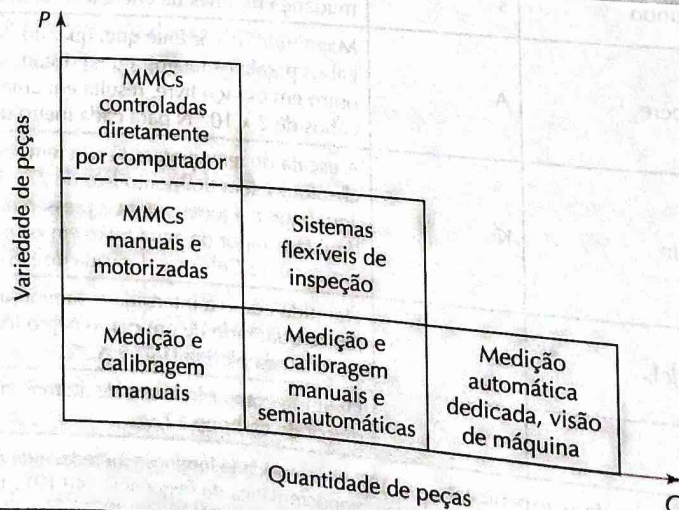
As razões pelas quais esses métodos de inspeção com contato são tecnológica e comercialmente importantes incluem as seguintes:

- São as tecnologias de inspeção mais utilizadas atualmente.
- São precisos e confiáveis.
- Em muitos casos, representam os únicos métodos disponíveis para realizar a inspeção.

22.2.2 Tecnologias de inspeção sem contato

Métodos de inspeção sem contato utilizam um sensor localizado a uma determinada distância do objeto para medir ou calibrar as características desejadas. As tecnologias de inspeção sem contato podem ser classificadas em duas categorias: (1) óticas e (2) não óticas. As *tecnologias de inspeção óticas* utilizam a luz para realizar o ciclo de medição ou calibração. A tecnologia ótica mais importante é a visão de máquina; entretanto, outras são importantes em determinadas indústrias. As *tecnologias*

Figura 22.2 Diagrama *PQ* indicando o equipamento de medição mais apropriado como função da variedade e quantidade de peças (adaptado de Bosch [3])



gias de inspeção não óticas utilizam outras formas de energia diferentes da luz para realizar a inspeção, as quais incluem campos elétricos, radiação (diferente da luz) e ultrassom.

A inspeção sem contato oferece determinadas vantagens sobre as técnicas de inspeção com contato. Essas incluem as seguintes:

- Evitam dano à superfície que podem resultar da inspeção com contato.
- Os tempos de ciclo da inspeção são inerentemente mais rápidos. Procedimentos de inspeção com contato exigem que a sonda de contato esteja posicionada contra a peça, o que leva tempo. A maioria dos métodos sem contato utilizam uma sonda estacioná-

ria que não precisa de reposicionamento para cada peça.

- Muitas vezes os métodos sem contato podem ser realizados na linha de produção sem a necessidade de manuseio adicional das peças, enquanto a inspeção com contato normalmente exige manuseio e posicionamento especial das peças.
- É mais exequível conduzir uma inspeção cem por cento automatizada, já que os métodos sem contato têm tempos de ciclo de inspeção mais rápidos e necessidade reduzida para manuseio especial.

Uma comparação de algumas das características das várias tecnologias de inspeção com contato e sem contato é apresentada na Tabela 22.2.

Tabela 22.2 Comparação da resolução e velocidade relativa de várias tecnologias de inspeção

Tecnologia de inspeção	Resolução típica	Velocidade relativa de aplicação
Instrumentos convencionais:		
Régua de aço	0,25 mm (0,01 pol)	Velocidade média (tempo de ciclo médio)
Paquímetro	0,025 mm (0,001 pol)	Velocidade lenta (tempo de ciclo alto)
Micrômetro	0,00025 mm (0,0001 pol)	Velocidade lenta (tempo de ciclo alto)
Máquina de medir por coordenadas	0,0005 mm (0,00002 pol)*	Tempo de ciclo lento para medição única. Velocidade alta para múltiplas medições sobre o mesmo objeto.
Visão de máquina	0,25 mm (0,01 pol)**	Velocidade alta (tempo de ciclo muito baixo por peça)

* Veja Tabela 22.5 para outros parâmetros em máquinas de medição por coordenadas.

** Precisão na visão de máquina é altamente dependente do sistema de lentes da câmera e a ampliação usada nas aplicações.

22.3 MEDIÇÃO CONVENCIONAL E TÉCNICAS DE CALIBRAGEM²

As técnicas convencionais de medição e calibragem utilizam dispositivos manualmente operados para dimensões lineares como comprimento, profundidade e diâmetro, assim como características como ângulos, planicidade e circularidade. Os *dispositivos de medição* fornecem um valor quantitativo da característica de interesse da peça, enquanto *calibradores* determinam se a característica da peça (normalmente uma dimensão) cai dentro de uma determinada gama aceitável de valores. A medição leva mais tempo, mas proporciona mais informações a respeito da característica da peça. A calibragem pode ser realizada mais rapidamente, mas não proporciona tanta informação. Ambas as técnicas são amplamente utilizadas para a inspeção pós-processo de peças na manufatura.

Dispositivos de medição tendem a ser utilizados na base de inspeção de amostragem. Alguns dispositivos são portáteis e podem ser utilizados no processo de produção. Outros exigem bancadas posicionadas distantes do processo, nas quais os instrumentos de medição possam ser configurados de maneira precisa sobre uma superfície de referência plana chamada de *desempeno*. Calibradores são utilizados para amostragem ou inspeção cem por cento, tendem a ser mais portáteis e se prestam à aplicação no processo de produção. Determinadas técnicas de medição e calibração podem ser incorporadas em sistemas de inspeção automatizada para permitir um controle de realimentação do processo ou para fins de controle estatístico de processo.

A facilidade de uso e a exatidão dos instrumentos e calibradores de medição foram incrementadas nos últimos anos pela eletrônica. Os *calibradores eletrônicos* são uma família de instrumentos de medição e calibração baseados

² Esta seção é baseada em Groover [10], Seção 45.3.

em transdutores capazes de converter um deslocamento linear em um sinal elétrico proporcional, o qual, por sua vez, é então amplificado e transformado em um formato de dados adequado como um dispositivo de leitura digital. Por exemplo, micrômetros modernos e paquímetros graduados estão disponíveis com um mostrador digital para a medição de interesse. Esses instrumentos são mais fáceis de ler e eliminam grande parte do erro humano associado à leitura de dispositivos graduados convencionais.

Aplicações dos calibradores eletrônicos cresceram rapidamente em anos recentes, impulsionadas pelos avanços em tecnologia de microprocessadores. Os avanços de calibradores eletrônicos, que estão substituindo firmemente muitos dos dispositivos de calibração e medição convencionais, incluem: (1) boa sensibilidade, exatidão, precisão,

repetibilidade e velocidade de resposta; (2) capacidade de sentir dimensões muito pequenas — até uma micropolegada (0,025 micron); (3) facilidade de operação; (4) redução do erro humano; (5) capacidade de exibir sinais elétricos em vários formatos e (6) capacidade de se conectar com sistemas de computadores para processamento de dados.

Para referência, listamos os instrumentos e calibradores de medição convencionais comuns com breves descrições na Tabela 22.3. Não é a finalidade deste livro proporcionar uma discussão exaustiva desses dispositivos. Uma pesquisa abrangente pode ser encontrada em livros sobre metrologia, como [4] e [7], ou para um tratamento mais conciso [10]. A finalidade aqui é a concentração em tecnologias modernas, como máquinas de medição por coordenadas.

Tabela 22.3 Instrumentos e calibradores de medição convencionais comuns (adaptado de Groover [10])
(Alguns dispositivos podem ser incorporados a sistemas de inspeção automatizados)

Instrumento	Descrição
Régua de aço	Escala de medição graduada linear utilizada para medir dimensões lineares. Disponível em vários comprimentos, normalmente varia de 150 milímetros a mil milímetros, com graduações de um milímetro ou 0,5 milímetro. (Réguas USCS disponíveis de seis polegadas a 36 polegadas, com graduações de 1/32 polegada ou 0,01 polegada.)
Calibre (compasso)	Família de dispositivos de medição graduados e não graduados que consistem de duas pernas unidas por um mecanismo de articulação. As extremidades das pernas contam as superfícies do objeto para fornecer uma medida comparativa. Podem ser usados para medições internas (por exemplo, diâmetro interno) ou externas (por exemplo, diâmetro externo).
Calibre deslizante	Régua de aço para a qual dois mordentes são adicionados, um fixo e o outro móvel. Mordentes são forçados a contatar as superfícies das peças medidas e a posição do mordente móvel indica a dimensão de interesse. Podem ser utilizados para medições internas ou externas.
Paquímetro	Refinamento dos calibres deslizantes, no qual uma escala com nônio é utilizada para obter medidas mais precisas (tão próximas quanto 0,001 polegada).
Micrômetro	Dispositivo comum que consiste de uma haste rosqueada e um corpo em formato de C (similar a uma braçadeira em C). A haste é aproximada em relação ao corpo fixo por meio de uma rosca para contatar as superfícies do objeto sendo medido. Uma escala a nônio é utilizada para obter precisões de 0,1 milímetro em SI (0,0001 em USCS). Disponível como <i>micrômetro externo</i> , <i>micrômetro interno</i> ou <i>micrômetro de profundidade</i> . Também disponível como calibradores eletrônicos para obter leitura digital da dimensão de interesse.
Relógio comparador	Calibrador mecânico que converte e amplifica o movimento linear de um indicador de contato para a rotação de uma agulha de mostrador. O mostrador é graduado em unidades de 0,01 milímetro em SI (0,001 em USCS). Pode ser usado para medir a retilidade, a planicidade, o paralelismo e a cilindridade.
Calibrador	Família de calibradores, normalmente do tipo passa/não passa, que conferem se uma dimensão de uma peça se encontra dentro dos limites aceitáveis definidos pela tolerância especificada no desenho da peça. Inclui: (1) <i>calibrador de boca</i> para dimensões externas como espessura, (2) <i>calibrador anelar</i> para diâmetros cilíndricos, (3) <i>calibrador de encaixe</i> para diâmetros de furos e (4) <i>calibrador de rosca</i> .
Goniômetro	Dispositivo para medir ângulos. Transferidor simples que consiste em uma lâmina reta e uma cabeça semicircular formada em unidades angulares (por exemplo, graus). O transferidor Bevel é composto por duas lâminas retas que giram uma para a outra, o mecanismo de articulação tem uma escala de transferidor para medir o ângulo das duas lâminas.

22.4 MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS (MMCS)

A *metrologia por coordenadas* diz respeito à medição do formato e das dimensões reais de um objeto e à comparação desses resultados com a forma e as dimensões desejadas, como especificadas no desenho da peça. Nesse sentido, a metrologia por coordenadas consiste da avaliação da posição, da orientação, das dimensões e da geometria da peça ou do objeto. Uma *máquina de medição por coordenadas* (MMC; do inglês, *coordinate measuring machines* — CMM) é um sistema eletromecânico projetado para realizar metrologia por coordenadas. Uma MMC tem uma sonda de contato (apalpador) que pode ser posicionada em três dimensões relativas às superfícies de uma peça. As coordenadas x , y , e z do apalpador podem ser registradas de maneira exata e precisa para obter os dados dimensionais a respeito da geometria da peça. Ver Figura 22.3. A tecnologia das MMCs data de meados dos anos de 1950.

Para realizar as medições no espaço tridimensional, a MMC básica consiste dos componentes a seguir:

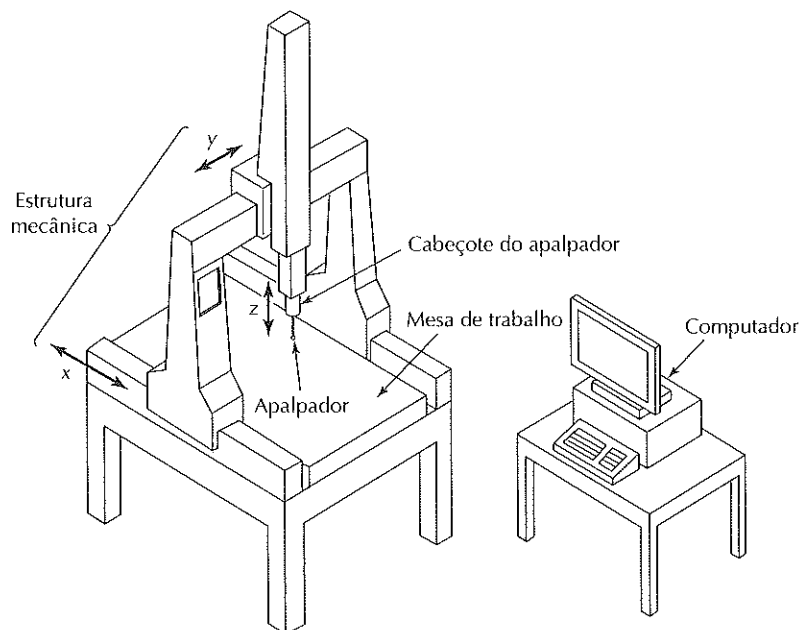
- Cabeçote do apalpador e apalpador para tocar as superfícies da peça.
- Estrutura mecânica que proporciona movimento do apalpador em três eixos cartesianos e transdutores de deslocamento para medir os valores das coordenadas de cada eixo.

Além disso, muitas MMCs têm os seguintes componentes:

- Sistema motriz e unidade de controle para mover cada um dos três eixos.
- Sistema computacional com software de aplicação.

Nesta seção, discutimos (1) as características de construção de uma MMC, (2) a operação e programação da máquina, (3) os tipos de software de aplicação que a capacitam a medir mais do que apenas as coordenadas x - y - z , (4) as aplicações e os benefícios da MMC sobre a inspeção manual, (5) o uso de apalpadores de inspeção de contato em máquinas ferramentas e (6) as MMCs portáteis.

Figura 22.3 Máquina de medição por coordenadas



22.4.1 Construção de MMCs

Na construção de uma MMC, o apalpador é preso a uma estrutura mecânica que permite seu movimento em relação à peça. A peça está normalmente localizada em uma mesa conectada à estrutura. Vamos examinar os dois componentes básicos da MMC: (1) seu apalpador e (2) sua estrutura mecânica.

Apalpador. O apalpador de contato é um componente-chave de uma MMC. Ele indica quando o contato foi feito com a superfície da peça durante a medição. A ponta do apalpador geralmente é uma esfera de rubi. O rubi é uma forma de corindon (óxido de alumínio), cujas propriedades desejáveis nessa aplicação incluem alta dureza para resistência ao desgaste e baixa densidade para

na indústria. Ele é bastante apropriado para a gama de tamanhos de peças comumente encontradas nas fábricas de produção de máquinas.

- c. *Ponte fixa.* Nessa configuração, Figura 22.6(c), a ponte é fixada ao suporte da MMC e a mesa é movida na direção x embaixo da ponte. Essa construção elimina a possibilidade de guinada, aumentando assim a rigidez e a exatidão. Entretanto, a produtividade é afetada devido à energia adicional necessária para mover a mesa pesada com a peça montada sobre ela.
- d. *Braço horizontal.* A configuração do braço horizontal consiste de um braço horizontal em balanço montado em uma coluna vertical. O braço se desloca verticalmente para dentro e para fora para realizar os movimentos dos eixos y e z . Para realizar o movimento do eixo x , a coluna é deslocada horizontalmente passando pela mesa (chamado de projeto do *arfete móvel*) ou a mesa é deslocada passando pela coluna (chamado de projeto de *mesa móvel*). O projeto do arfete móvel é ilustrado na Figura 22.6(d). O projeto de cantiléver da configuração do braço horizontal o torna menos rígido e, portanto, menos preciso do que outras estruturas MMC. Do lado positivo, ele permite boa acessibilidade para a área de trabalho. Máquinas de braço horizontal grandes são adequadas para a medição de chassis de automóveis, e algumas MMCs são equipadas com braços duplos de maneira que medições independentes possam ser tomadas de ambos os lados do chassi do carro ao mesmo tempo.
- e. *Ponte rolante.* Essa construção, ilustrada na Figura 22.6(e), geralmente é utilizada para inspecionar grandes objetos. O eixo do apalpador (eixo z) se desloca em relação ao braço horizontal estendendo-se entre os dois trilhos da ponte rolante. O espaço de trabalho de uma MMC tipo ponte rolante grande pode ser tão grande quanto 25 metros (82 pés) na direção x por oito metros (26 pés) na direção y por seis metros (20 pés) na direção z .
- f. *Coluna.* Essa configuração, na Figura 22.6(f), é similar à construção de uma máquina-ferramenta. Os movimentos dos eixos x e y são realizados deslocando a mesa, enquanto o eixo do apalpador é deslocado verticalmente ao longo de uma coluna rígida para realizar o movimento do eixo z .

Em todas essas construções, características de projeto especiais são utilizadas para que tenham alta exatidão e precisão em suas estruturas. Essas características incluem rolamentos de esferas de precisão e rolamentos hidrostáticos, suportes para isolar a MMC e reduzir a transmissão

de vibrações da fábrica pelo piso e vários esquemas para contrabalançar o braço projetado da estrutura do cantiléver [6], [17].

22.4.2 Operação e programação de MMCs

O posicionamento do apalpador em relação à peça pode ser realizado de várias maneiras, desde a operação manual ao controle direto por computador (do inglês, *direct computer control* — DCC). MMCs controladas por computador operam de maneira muito semelhante a máquinas-ferramenta CNC (do inglês, *computer numerical control*), e essas máquinas têm de ser programadas. Nesta seção, consideramos (1) tipos de controles MMC e (2) programação de MMCs controladas por computador.

Controles MMC. Os métodos de operar e controlar uma MMC podem ser classificados em quatro categorias principais: (1) transmissão manual, (2) transmissão manual com processamento de dados assistido por computador, (3) transmissão motorizada com processamento de dados assistido por computador e (4) DCC com processamento de dados assistido por computador.

Em uma MMC com transmissão manual, o operador humano fisicamente move o apalpador ao longo dos eixos da máquina para fazer contato com a peça e registrar as medidas. Os três eixos ortogonais são projetados para praticamente não ter atrito a fim de permitir que o apalpador flutue livremente nas direções x , y e z . As medições são fornecidas por um dispositivo de leitura digital, pelo qual o operador pode registrar manualmente ou com saída impressa em papel. Quaisquer cálculos sobre os dados (por exemplo, calcular o centro e o diâmetro de um furo) têm de ser feitos pelo operador.

Uma MMC com transmissão manual e processamento de dados assistido por computador proporciona algum processamento de dados e alguma capacidade computacional para desempenhar os cálculos exigidos para avaliar uma característica da peça. Os tipos de processamento de dados e cálculos variam de simples conversões entre unidades americanas e o sistema métrico a cálculos de geometria mais complicados, como determinar o ângulo entre dois planos. O apalpador ainda está flutuando livre para permitir que o operador o coloque em contato com as superfícies desejadas das peças.

Uma MMC com transmissão motorizada e com processamento de dados assistido por computador utiliza motores elétricos para mover o apalpador ao longo dos eixos da máquina sob controle do operador. Um operador controla o movimento usando um *joystick* ou dispositivo similar. Características como motores de passo de baixa

potência e embreagens de fricção são utilizadas para reduzir os efeitos das colisões entre o apalpador e a peça. A transmissão do motor pode ser desligada para permitir que o operador mova fisicamente o apalpador como no método de controle manual. As MMCs com transmissão motorizada são geralmente equipadas com processamento de dados para realizar os cálculos geométricos exigidos na avaliação de características.

Uma MMC com controle direto por computador (DCC) opera como uma máquina-ferramenta CNC. Ela é motorizada e os movimentos dos eixos coordenados são controlados por um computador dedicado sob controle de um programa. O computador também desempenha as várias funções de cálculo e processamento de dados e compila um registro das medidas tomadas durante a inspeção. Assim como em uma máquina ferramenta CNC, a MMC DCC exige a programação das peças.

Programação DCC. Há dois métodos principais de se programar uma máquina de medição DCC: (1) ensinamento manual e (2) programação off-line. No método por *ensinamento manual* (do inglês, *manual leadthrough*), o operador leva o apalpador da MMC através dos vários movimentos exigidos na sequência de inspeção, indicando os pontos e as superfícies que devem ser medidos e registrando-os na memória de controle. Isso é similar à técnica de programação de robôs de mesmo nome (Seção 8.6.1). Durante a operação regular, o controlador MMC executa de novo o programa para realizar o procedimento de inspeção.

A *programação off-line* é realizada como uma programação de peças de controle numérico (do inglês, *numerical control* — NC) assistida por computador. O programa é preparado off-line com base no desenho da peça e então transferido ao controlador MMC para execução. Isso permite que a programação seja realizada em novos trabalhos enquanto a própria MMC está trabalhando em peças previamente programadas. Comandos de programação para uma MMC controlada por computador incluem comandos de movimento, comandos de medição e comandos de formatação de relatório. Os comandos de movimento são utilizados para direcionar a sonda para uma posição de inspeção desejada, da mesma maneira que uma ferramenta de corte é direcionada em uma operação de usinagem. Os comandos de medição são utilizados para controlar as funções de medição e inspeção da máquina, comandando as várias rotinas de cálculo e processamento de dados. Por fim, as rotinas de formatação permitem que a especificação dos relatórios de saída documentem a inspeção.

A maior parte da programação off-line de MMCs hoje em dia é baseada em sistemas de projeto assistido por computador (do inglês, *computer-aided design* —

CAD) [24], nos quais o ciclo de medição é gerado a partir de dados geométricos CAD representando a peça em vez da cópia de um desenho da peça. A programação off-line em um sistema CAD é facilitada pela *especificação de interface de medição dimensional* (do inglês, *dimensional measuring interface specification* — DMIS), um padrão ANSI. A DMIS é um protocolo que permite a comunicação em duas vias entre sistemas CAD e MMCs. O uso de DMIS tem as seguintes vantagens [3]: (1) Permite que qualquer sistema CAD se comunique com qualquer MMC, (2) reduz os custos de desenvolvimento de software para empresas de MMC e CAD porque apenas um tradutor é exigido para comunicar-se com o DMIS, (3) usuários têm uma chance maior de escolha entre os fornecedores MMC e (4) as exigências de treinamento dos usuários são reduzidas.

22.4.3 Outros softwares de MMCs

Um software de MMC é o conjunto de programas e procedimentos (com documentação de apoio) utilizados para operar a MMC e seus equipamentos associados. Além do software de programação de peças utilizado para programar máquinas DCC, discutidas acima, outros softwares também são necessários para alcançar a funcionalidade completa de uma MMC. Além disso, é o software que capacitou a MMC a tornar-se uma máquina de inspeção altamente produtiva. Softwares adicionais podem ser divididos nas categorias a seguir [3]: (1) software principal além da programação DCC, (2) software pós-inspeção e (3) software de engenharia reversa e aplicação específica.

Softwares principais além da programação DCC. O software principal consiste dos programas básicos mínimos exigidos para que a MMC funcione, além dos softwares de programação de peças, que se aplicam somente a máquinas DCC. Esse software é geralmente aplicado antes ou durante o procedimento de inspeção. Programas principais normalmente incluem os seguintes:

- **Calibração dos apalpadores.** É a função necessária para definir os parâmetros do apalpador (como o raio da ponta, as posições da ponta para um apalpador de pontas múltiplas e os coeficientes de flexão elástica). A calibração dos apalpadores permite que medições por coordenadas compensem automaticamente as dimensões do apalpador quando a ponta toca a superfície da peça, evitando os cálculos de ponta do apalpador do Exemplo 22.1. A calibração é normalmente realizada fazendo com que o apalpador toque um cubo ou uma esfera de dimensões conhecidas.

- **Definição do sistema de coordenadas das peças.** Permite que medições da peça sejam feitas sem exigir um procedimento de alinhamento que consuma tempo na mesa da MMC. Em vez de alinhar fisicamente a peça aos eixos MMC, os eixos de medição são matematicamente alinhados a ela.
- **Construção da característica geométrica.** Aborda os problemas associados às características geométricas cuja avaliação exige mais do que a medição de um ponto, as quais incluem planicidade, circularidade, determinação do centro de um furo ou o eixo de um cilindro e por aí fora. O software integra as múltiplas medições de maneira que uma determinada característica geométrica seja avaliada. A Tabela 22.4 lista algumas das características geométricas comuns, indicando como as características podem ser avaliadas pelo software MMC. Os exemplos 22.2 e 22.3 ilustram a aplicação de duas das técnicas de avaliação de características. Para uma maior confiabilidade estatística, é comum medir mais do que o número teoricamente mínimo de pontos necessários para avaliar a característica e então aplicar algoritmos adequados a curvas (como a análise de mínimos quadrados) no cálculo da melhor estimativa dos parâmetros das características geométricas. Uma revisão dos algoritmos adequados às curvas é apresentada em Lin *et al.* [13].
- **Análise de tolerância.** Compara medições tomadas da peça com as dimensões e tolerâncias especificadas no desenho de engenharia.

EXEMPLO 22.2

Calculando uma dimensão linear

As coordenadas nas duas extremidades de uma determinada dimensão de comprimento de um componente usinado foram medidas por uma MMC. As coordenadas da primeira extremidade são (23,47; 48,11; 0,25), e as coordenadas da extremidade oposta são (73,52; 21,70; 60,38), em que as unidades estão em milímetros. As coordenadas dadas foram corrigidas para o raio do apalpador. Determine a dimensão de comprimento que seria calculada pelo software MMC.

Solução: Utilizando a Equação (22.4) na Tabela 22.4, temos:

$$\begin{aligned}
 L &= \sqrt{(23,47 - 73,52)^2 + (48,11 - 21,7)^2 + (0,25 - 60,38)^2} \\
 &= \sqrt{(-50,05)^2 + (26,41)^2 + (-60,13)^2} \\
 &= \sqrt{2505,0025 + 697,4881 + 3615,6169} \\
 &= \sqrt{6818,1075} = 82,57 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

EXEMPLO 22.3

Determinando o centro e o diâmetro de um furo

Três pontos na superfície de uma furação foram medidos por uma MMC nos eixos x-y. As três coordenadas (em milímetros) são (34,41; 21,07), (55,19; 30,50) e (50,10; 13,18), as quais foram corrigidas para o raio do apalpador. Determine: (a) as coordenadas do centro do furo e (b) o diâmetro do furo, do modo como seriam calculados pelo software MMC.

Solução: Para determinar as coordenadas do centro do furo, temos de estabelecer três equações configuradas de acordo com a Equação (22.5) na Tabela 22.4:

$$(34,41 - a)^2 + (21,07 - b)^2 = R^2 \quad (i)$$

$$(55,19 - a)^2 + (30,5 - b)^2 = R^2 \quad (ii)$$

$$(50,1 - a)^2 + (13,18 - b)^2 = R^2 \quad (iii)$$

Expandindo cada uma das equações, temos:

$$\begin{aligned}
 1184,0481 - 68,82a + a^2 + \\
 443,9449 - 42,14b + b^2 = R^2 \quad (i)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3045,9361 - 110,38a + a^2 + \\
 930,25 - 61b + b^2 = R^2 \quad (ii)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 2510,01 - 100,2a + a^2 + \\
 173,7124 - 26,36b + b^2 = R^2 \quad (iii)
 \end{aligned}$$

A solução simultânea das três equações resulta nos valores a seguir: $a = 45,66$ mm, $b = 23,89$ mm e $R = 11,6$ mm. Desse modo, o centro do furo está localizado em $x = 45,66$ e $y = 23,89$, e o diâmetro do furo é $D = 23,2$ mm.

Software pós-inspeção. É um conjunto de programas aplicados após o procedimento de inspeção. Normalmente acrescenta utilidades e valores significativos para a função de inspeção. Entre os softwares incluídos, temos:

- **Análise estatística.** É utilizado para levar adiante qualquer uma das várias análises estatísticas sobre os dados coletados pela MMC. Por exemplo, dados de dimensões de peças podem ser usados para avaliar a capacidade do processo de manufatura associado (Seção 20.3.2) ou realizar um controle estatístico de processo (Seção 20.4). Duas abordagens alternativas foram adotadas pelos fabricantes de MMCs nessa área. A primeira é fornecer um software que cria um banco de dados das medições tomadas e facilita a exportação desse banco para outros pacotes de softwares. O que torna isso exequível é o fato de que os dados coletados por uma MMC já estão codificados em forma digital. Essa abordagem permite que o usuário escolha entre muitos pacotes de análise estatística comercialmente disponíveis. A segunda abordagem é incluir um programa de análise

Tabela 22.4 Características geométricas que exigem a medições de pontos múltiplos para sua avaliação: sub-rotinas para avaliar essas características são comumente disponíveis por meio dos softwares de MMC

Dimensões. Uma dimensão de uma peça pode ser determinada tomando a diferença entre as duas superfícies que definem a dimensão. As duas superfícies podem ser definidas por um ponto localizado em cada superfície. Em dois eixos (x - y), a distância L entre dois pontos (x_1, y_1) e (x_2, y_2) é dada por:

$$L = \pm \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (22.3)$$

Em três eixos (x - y - z), a distância L entre os dois pontos (x_1, y_1, z_1) e (x_2, y_2, z_2) é dada por:

$$L = \pm \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (22.4)$$

Ver Exemplo 22.1.

Localização e diâmetro do furo. Medindo três pontos em torno da superfície de um furo circular, as coordenadas do centro (a, b) do furo e seu raio R que melhor se ajustam aos dados podem ser calculados. O diâmetro é duas vezes o raio. No plano x - y , os valores das coordenadas dos três pontos são usados na equação de uma circunferência para estabelecer três equações com três incógnitas:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2 \quad (22.5)$$

em que a é a coordenada x do centro do furo, b é a coordenada y do centro do furo e R é o raio da circunferência do furo. Solucionando as três equações, temos os valores de a , b e R . $D = 2R$. Ver Exemplo 22.2.

Eixo e diâmetro do cilindro. Similar ao problema anterior, exceto pelo fato de que o cálculo lida com uma superfície externa em vez de uma superfície interna (furo).

Centro e diâmetro de esfera. Ao medir quatro pontos na superfície de uma esfera, as coordenadas do centro (a, b, c) e o raio R (diâmetro $D = 2R$) que melhor se ajustam aos dados podem ser calculados. Os valores das coordenadas dos quatro pontos são utilizados na equação da esfera para estabelecer quatro equações com quatro incógnitas:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2 = R^2 \quad (22.6)$$

em que a é a coordenada x da esfera, b é a coordenada y da esfera, c é a coordenada z da esfera e R é o raio da esfera. Solucionando as quatro equações, temos os valores de a , b , c e R .

Definição de uma linha no plano x - y . Com base em um mínimo de dois pontos de contato na linha, o melhor ajuste para a linha é determinado. Por exemplo, a linha pode ser a borda de uma superfície reta. Os valores de coordenadas dos dois pontos são usados na equação da linha para estabelecer duas equações com duas incógnitas:

$$x + Ay + B = 0 \quad (22.7)$$

em que A é um parâmetro indicando a inclinação da linha na direção do eixo y e B é uma constante indicando a interseção do eixo x . A solução das duas equações resulta nos valores de A e B , que definem a linha. Essa forma de equação pode ser convertida na equação convencional mais familiar de uma linha reta, que é:

$$y = mx + b \quad (22.8)$$

em que inclinação $m = -1/A$ e interseção $yb = -B/A$.

Ângulo entre as duas linhas. Baseado nas equações convencionais das duas linhas, isto é, Equação (22.8), o ângulo entre elas em relação ao eixo x positivo é dado por:

$$\text{Ângulo entre linha 1 e linha 2} = \alpha - \beta \quad (22.9)$$

em que $\alpha = \tan^{-1}(m_1)$, em que m_1 é a inclinação da linha 1; e $\beta = \tan^{-1}(m_2)$, em que m_2 é a inclinação da linha 2.

Definição de um plano. Com base em um mínimo de três pontos de contato em uma superfície plana, o plano que melhor se ajusta é determinado. Os valores das coordenadas dos três pontos são usados na equação do plano para estabelecer três equações com três incógnitas:

$$x + Ay + Bz + C = 0 \quad (22.10)$$

em que A e B são parâmetros indicando as inclinações do plano nas direções dos eixos y e z , e C é uma constante indicando a interseção do eixo x . A solução das três equações resulta nos valores de A , B e C , que definem o plano.

Planicidade. Ao medir mais de três pontos de contato em uma superfície supostamente plana, o desvio de um plano perfeito pode ser determinado.

Ângulo entre dois planos. O ângulo entre dois planos pode ser descoberto definindo cada um dos dois planos com a utilização do método de definição de plano acima e o cálculo do ângulo entre eles.

Paralelismo entre dois planos. É uma extensão da função anterior. Se o ângulo entre dois planos é zero, então os planos são paralelos. O grau para o qual os planos se desviam do paralelismo pode ser determinado.

Ângulo e ponto de interseção entre duas linhas. Dadas duas linhas que se intersectam (por exemplo, duas arestas de uma peça que se encontram em um canto), o ponto de interseção e o ângulo entre as linhas pode ser determinado com base em dois pontos medidos para cada linha (um total de quatro pontos).

se estatística entre o software fornecido pelo construtor da MMC. Geralmente essa abordagem é mais rápida e mais fácil, mas a gama de análises disponíveis é mais limitada.

- *Representação gráfica de dados.* Sua finalidade é exibir os dados coletados durante o procedimento MMC de maneira gráfica ou pictórica, para permitir uma visualização mais fácil de erros de forma e outros dados pelo usuário.

Softwares de engenharia reversa e de aplicação específica. O software de engenharia reversa é projetado para tomar uma peça física existente e construir um modelo de computador da geometria da peça com base em um grande número de medições de sua superfície por uma MMC. A abordagem mais simples é utilizar a MMC no modo manual de operação, no qual o operador move o apalpador com a mão e examina a peça física para criar um modelo digitalizado com superfícies tridimensionais (3D). A digitalização manual pode consumir bastante tempo para geometrias de peças complexas. Métodos mais automatizados estão sendo desenvolvidos, nos quais a MMC explora as superfícies da peça com pouca ou nenhuma intervenção humana para construir o modelo 3D. O desafio aqui é minimizar o tempo de exploração da MMC e também capturar os detalhes de um contorno de superfície complexo e evitar colisões que danificariam o apalpador. Um potencial significativo existe para se utilizar apalpadores sem contato (como *lasers*) em aplicações de engenharia reversa.

Os softwares de aplicação específica referem-se a programas escritos para determinados tipos de peças e/ou produtos, cujas aplicações são geralmente limitadas a indústrias específicas. Encontramos vários exemplos importantes em [3], [4], como:

- *Checagem de engrenagens.* Utilizados em uma MMC para medir as características geométricas de uma engrenagem, como perfil, espessura, passo dos dentes e o ângulo da hélice em engrenagens helicoidais.
- *Checagem de roscas.* Usados para inspeção de roscas cilíndricas e cônicas.
- *Checagem de cames.* Software especializado usado para avaliar a exatidão de cames físicos em relação às especificações do projeto.
- *Checagem de chassis de automóveis.* Projetado para MMCs usadas para medir chapas metálicas, submontagens e chassis de carros completos na indústria automotiva. Nessa aplicação, surgem questões de medição excepcionais que a distinguem da medição de peças usinadas: (1) a falta de rigidez nos grandes painéis de chapas, (2) as superfícies curvas mistas são comuns e

(3) a definição da superfície não pode ser determinada sem medir um grande número de pontos.

Também incluídos na categoria de softwares de aplicação específica estão os programas para operar equipamentos acessórios associados à MMC. Alguns tipos de equipamentos acessórios que exigem o próprio software de aplicação incluem trocadores de apalpadores, mesas rotativas usadas na MMC e dispositivos automáticos de carga e descarga de peças.

22.4.4 Aplicações e benefícios de MMCs

Muitas aplicações de MMCs foram indicadas na discussão anterior sobre softwares de MMCs. As aplicações mais comuns são inspeção off-line e inspeção on-line/pós-processo (Seção 21.4.1). Componentes usinados são frequentemente inspecionados utilizando MMCs. Uma aplicação comum é checar a primeira peça usinada em uma máquina-ferramenta numericamente controlada. Se a primeira peça passa pela inspeção, então presume-se que as peças restantes produzidas no lote sejam idênticas à primeira. Engrenagens e chassis de automóveis são dois exemplos previamente mencionados no contexto de softwares de aplicação específica (Seção 22.4.3).

A inspeção de peças e montagens em uma MMC é geralmente realizada utilizando técnicas de amostragem. Uma razão para isso é o tempo exigido para realizar as medições. Normalmente é preciso mais tempo para inspecionar uma peça do que se leva para produzi-la. De outro lado, MMCs são às vezes utilizadas para cem por cento de inspeção se o ciclo de inspeção é compatível com o ciclo de produção e a MMC pode ser dedicada ao processo. Seja a MMC utilizada para inspeção de amostragem ou para cem por cento de inspeção, as medições de MMC são frequentemente usadas para controle estatístico de processo.

Outras aplicações de MMC incluem a inspeção de auditoria e a calibração de calibres e gabaritos. A *inspeção de auditoria* refere-se à inspeção de peças que estão chegando de um fornecedor para assegurar que o sistema de controle de qualidade do fornecedor é confiável. Isso é feito normalmente em uma base de amostragem. Na realidade, essa aplicação é a mesma que a inspeção pós-processo. A *calibração de calibres e gabaritos* envolve a medição de vários calibres, gabaritos e outras ferramentas de inspeção e a produção para validar seu uso continuado.

Um dos fatores que tornam uma MMC tão útil é sua exatidão e repetibilidade. Os valores típicos dessas medidas são dados na Tabela 22.5 para uma MMC de ponte móvel. É possível perceber que essas medidas de desempenho decaem à medida que o tamanho da máquina aumenta.

Máquinas de medição por coordenadas são mais apropriadas para aplicações possuindo as seguintes características:

Tabela 22.5 Medidas de exatidão e repetibilidade típicas para dois tamanhos diferentes de MMCs; os dados aplicam-se a uma MMC de ponte móvel

Característica da MMC		MMC pequena	MMC grande
Faixa de medição:	x	650 mm (25,6 in)	900 mm (35,4 in)
	y	600 mm (23,6 in)	1200 mm (47,2 in)
	z	500 mm (19,7 in)	850 mm (33,5 in)
Exatidão:	x	0,004 mm (0,00016 in)	0,006 mm (0,00024 in)
	y	0,004 mm (0,00016 in)	0,007 mm (0,00027 in)
	z	0,0035 mm (0,00014 in)	0,0065 mm (0,00026 in)
Repetibilidade		0,0035 mm (0,00014 in)	0,004 mm (0,00016 in)
Resolução		0,0005 mm (0,00002 in)	0,0005 mm (0,00002 in)

Fonte: Bosch [3].

1. *Muitos inspetores estão atualmente realizando operações de inspeção manual repetitivas.* Se a função de inspeção representa um custo de mão de obra significativo para a planta, então automatizar os procedimentos de inspeção vai reduzir esse custo e aumentar o rendimento.
2. *A aplicação envolve inspeção pós-processo.* MMCs são úteis somente em operações de inspeção realizadas após o processo de manufatura.
3. *A medição das características geométricas exige múltiplos pontos de contato.* Esse tipo de característica é identificado na Tabela 22.4, e o software MMC disponível facilita sua avaliação.
4. *Múltiplas preparações de inspeção seriam necessárias se as peças fossem manualmente inspecionadas.* Inspeções manuais são geralmente realizadas em desempenos utilizando blocos padrão, calibradores de altura e dispositivos similares, e uma configuração diferente é normalmente exigida para cada medição. O mesmo grupo de medidas na peça pode normalmente ser realizado em uma só montagem em uma MMC.
5. *A geometria da peça é complexa.* Se muitas medições devem ser feitas em uma peça complexa e muitas posições de contato são necessárias, então o tempo de ciclo de uma MMC DCC será significativamente menor do que o tempo correspondente para um procedimento manual.
6. *Uma ampla variedade de peças tem de ser inspecionada.* Uma MMC DCC é uma máquina programável, capaz de lidar com uma alta variedade de peças.
7. *Ordens repetidas são comuns.* Uma vez que o programa de peças tenha sido preparado para a primeira peça, peças de pedidos repetidos podem ser inspecionadas posteriormente utilizando o mesmo programa.

Quando aplicada à gama de variedade e quantidade apropriadas de peças, as vantagens de se usar MMCs sobre métodos de inspeção manual são as seguintes [17]:

- *Tempo de ciclo de inspeção reduzido.* Devido às técnicas automatizadas incluídas na operação de uma MMC, procedimentos de inspeção são mais rápidos e a produtividade da mão de obra é melhorada. Em comparação com técnicas manuais, uma MMC DCC é capaz de realizar muitas das tarefas de medição listadas na Tabela 22.4 em um décimo do tempo ou menos. O tempo de ciclo de inspeção reduzido traduz-se em rendimento mais alto.
- *Flexibilidade.* Uma MMC é uma máquina para múltiplos fins que pode ser usada para inspecionar uma variedade de diferentes configurações de peças com tempo de troca mínimo. No caso da máquina DCC, em que a programação é realizada off-line, o tempo de troca na MMC envolve apenas a preparação física.
- *Erros reduzidos de operadores.* Automatizar o procedimento de inspeção obviamente reduz os erros humanos nas medições e nas configurações.
- *Maior exatidão e precisão inerentes.* Uma MMC é inerentemente mais exata e precisa que os métodos manuais sobre desempenos que são tradicionalmente usados para inspeção.
- *Múltiplas configurações são evitadas.* Normalmente técnicas de inspeção tradicionais exigem múltiplas preparações para medir múltiplas características e dimensões das peças. Em geral, todas as medições podem ser feitas em uma única preparação em uma MMC, aumentando, desse modo, o rendimento e a exatidão da medição.

22.4.5 Sondas de inspeção em máquinas-ferramenta

Em anos recentes houve um crescimento significativo no uso de apalpadores táteis como sistemas de inspeção on-line em aplicações de centros de usinagem CNC. Chamado de 'inspeção na máquina', os apalpadores nesses sistemas são montados em porta-ferramentas, inseridos no fuso da máquina ferramenta, armazenados no tambor de ferramentas e manuseados pelo trocador automático de ferramentas da mesma maneira que as ferramentas de corte são manuseadas. Quando o apalpador é montado no fuso, a máquina-ferramenta é controlada de maneira muito semelhante a uma MMC. Sensores no apalpador determinam quando o contato foi feito com a superfície da peça. Sinais do sensor são transmitidos para o controlador, que realiza o processamento de dados exigido para interpretá-los e utilizá-los.

Às vezes os apalpadores sensíveis ao toque são referidos como dispositivos de inspeção em processo, mas por nossas definições são dispositivos on-line/pós-processo (Seção 21.4.1) porque são empregados imediatamente após a operação de usinagem em vez de durante o corte. Entretanto, às vezes esses apalpadores são utilizados entre passos da usinagem na mesma preparação/fixação, por exemplo, para estabelecer um ponto de referência antes ou depois da usinagem inicial de maneira que cortes posteriores possam ser realizados com mais exatidão. Algumas das outras características de cálculos de apalpadores de inspeção montados em máquinas são similares às capacidades de MMCs com processamento de dados assistidos por computador. Essas características incluem determinar a linha central de uma peça cilíndrica ou um furo e determinar as coordenadas de um canto interno ou externo. Dadas as aplicações apropriadas, o uso de apalpadores permite que a usinagem e a inspeção sejam realizadas em uma preparação em vez de em duas.

Um dos aspectos controversos dos apalpadores de inspeção montados em máquinas é que a mesma máquina-ferramenta fazendo a peça também está realizando a inspeção. O argumento é que determinados erros inerentes à operação de corte também serão manifestados na operação de medição. Por exemplo, se há um mau alinhamento entre os eixos da máquina-ferramenta produzindo peças fora de esquadro, essa condição não será identificada pelo apalpador montado na máquina porque o movimento dele é afetado pelo mesmo mau alinhamento de eixo. Generalizando, erros que são comuns a ambos (processo de produção e procedimento de medição) passarão despercebidos pelo apalpador de inspeção montado na máquina. Eles incluem erros de geometria da máquina-ferramenta (como o problema de mau alinhamento do eixo identificado acima), distorções térmicas nos eixos da máquina-ferramenta e erros em quaisquer procedi-

mentos de correção térmica aplicados à máquina-ferramenta [3]. Erros que não são comuns a ambos os sistemas devem ser detectáveis pelo apalpador de medição. Esses erros mensuráveis incluem deformação da ferramenta e/ou porta-ferramentas, deflexão da peça, erros de *offset* de ferramenta e efeitos de desgaste da ferramenta sobre a peça. Na prática, o uso de apalpadores de inspeção montados em máquinas provou-se efetivo na melhoria de qualidade e economia de tempo como alternativa para operações de inspeção off-line caras.

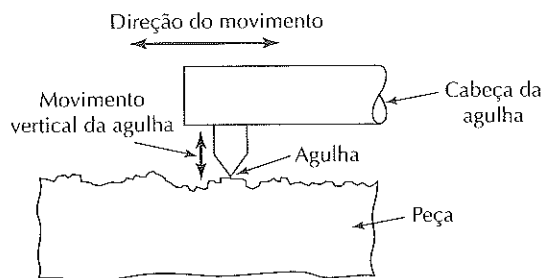
Outra objeção para o uso de apalpadores de inspeção montados em máquinas é o de que elas levam um tempo acima e além do ciclo de usinagem regular [5], [19]. Tempo é necessário para programar as rotinas de inspeção e tempo é perdido durante a sequência de medição para o apalpador desempenhar sua função. Fornecedores de software desenvolveram pacotes avançados para agilizar a tarefa de programação, mas as interrupções durante o ciclo de usinagem seguem sendo um impedimento para usuários em potencial. Essas perdas de tempo devem ser ponderadas contra o tempo adicional que seria necessário para realizar uma inspeção da peça em separado ao fim do ciclo de usinagem e o custo de retrabalho ou descarte se a peça for usinada incorretamente.

22.4.6 MMCs portáteis

Na aplicação convencional de uma máquina de medição por coordenadas, as peças têm de ser removidas da máquina de produção em que foram feitas e levadas para uma sala de inspeção especial na qual a MMC está localizada. Novos dispositivos de medição por coordenadas permitem que os procedimentos de inspeção sejam realizados no local onde as peças são feitas, eliminando a necessidade de movê-las. Os principais produtos nessa área no momento que escrevo são o Faro gage e o Faro arm, ambos da empresa europeia Faro. O Faro gage, apelidado de MMC pessoal, é um braço de seis articulações, cuja configuração é similar, na parte superior, ao antebraço e ao punho humanos. Completamente estendido, tem alcance de em torno de 1,2 metro (47 polegadas). Na extremidade do braço há um apalpador de toque para realizar as medições de coordenadas, similares a um MMC. A diferença é que o Faro gage é assentado na máquina-ferramenta que faz as peças. Desse modo, o procedimento de inspeção pode ser realizado direto na máquina. A inspeção *in situ* tem as seguintes vantagens:

- Não é necessário mover as peças da máquina-ferramenta para a MMC e de volta. O manuseio de materiais é reduzido.
- Os resultados do procedimento de inspeção são conhecidos imediatamente.

Figura 22.7 Desenho ilustrando a operação de um instrumento com agulha. A cabeça da agulha se desloca horizontalmente através da superfície, enquanto se desloca verticalmente para seguir o perfil da superfície. O movimento vertical é convertido em (1) um perfil da superfície ou (2) no valor de rugosidade médio



Fonte: Groover [10]

- O operador da máquina que faz a peça realiza o procedimento de inspeção (um mínimo de treinamento é exigido para usar o Faro gage).
- Como a peça ainda está fixada à máquina enquanto está sendo inspecionada, as posições dos pontos de referência estabelecidos durante a operação de usinagem não são perdidas. Quaisquer operações de usinagem posteriores usam as mesmas referências sem necessidade de refixar a peça.

Diz-se que a capacidade de precisão do Faro gage é de cinco micrômetros (0,0002 polegadas). Essa exatidão é alcançada por meio do uso de codificadores de eixo altamente precisos nas articulações do braço. Um computador usa os valores do codificador para calcular a posição do apalpador no espaço *x-y-z*. Os apalpadores podem ser trocados prontamente para várias tarefas de medição, do mesmo modo que podem ser trocadas quando usam uma MMC convencional. Vários tipos de montagens estão disponíveis, incluindo ligação fixa com a máquina e montagens magnéticas ou a vácuo.

Proximamente relacionado ao Faro gage é o Faro arm, que tem alcance mais longo do que a unidade menor, mas tem configuração de braço de seis articulações. Vários tamanhos diferentes são disponíveis, com o alcance mais longo sendo de 3,7 metros (145 polegadas). A precisão e a repetibilidade são reduzidas à medida que o alcance aumenta. O tamanho maior do Faro arm o capacita a ser usado em produtos muito maiores, como chassis de automóveis e de caminhões.

22.5 MEDIÇÃO DE SUPERFÍCIE³

As tecnologias de medição e inspeção discutidas nas seções 22.3 e 22.4 dizem respeito à avaliação de

dimensões e características relacionadas de uma peça ou um produto. Outro atributo mensurável é a superfície. A medição de superfícies normalmente é realizada por instrumentos que usam uma agulha de contato. Consequentemente, a metrologia de superfície é mais apropriadamente incluída dentro do escopo das tecnologias de inspeção com contato.

22.5.1 Instrumentos com agulha

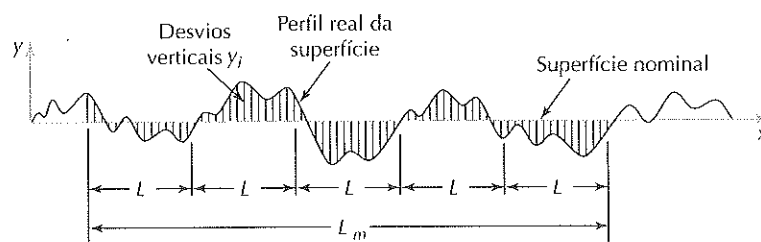
Instrumentos do tipo agulha (do inglês, *stylus-type instruments*) são comercialmente disponíveis para medir a rugosidade de superfícies. Esses dispositivos eletrônicos têm diamante no formato de um cone com raio de ponta de em torno de 0,005 milímetro (0,0002 polegada) e um ângulo de ponta de 90 graus, que é passado transversalmente através da superfície de teste a uma velocidade lenta constante. A operação é descrita na Figura 22.7. À medida que a cabeça da agulha se desloca horizontalmente, ela também se desloca verticalmente para seguir os desvios da superfície. Os movimentos verticais são convertidos em um sinal eletrônico que representa a topografia da superfície ao longo da trajetória tomada pela agulha. Isso pode ser exibido como (1) um perfil da superfície ou (2) como um valor médio de rugosidade.

Os dispositivos para a realização de perfis utilizam um plano liso em separado como a referência nominal contra a qual desvios são medidos. A saída é uma representação gráfica do contorno da superfície ao longo da linha atravessada pela agulha. Esse tipo de sistema pode identificar a aspereza, a ondulação e outras medidas da superfície de teste. Ao atravessar sucessivas linhas paralelas e proximamente espaçadas umas em relação às outras, os dispositivos podem criar um 'mapa topográfico' da superfície.

Os dispositivos de determinação de médias reduzem os desvios verticais a um valor único de rugosidade da su-

³ Partes dessa seção são baseadas em Groover [10], seções 5.2 e 45.4.

Figura 22.8 Desvios da superfície nominal utilizados na definição da rugosidade da superfície



Fonte: Groover [10]

perície. Como ilustrado na Figura 22.8, a *rugosidade superficial* é definida como a média dos desvios verticais da superfície nominal sobre um comprimento de superfície especificado. Uma média aritmética (do inglês, *arithmetic average* — AA) é geralmente usada, com base nos valores absolutos dos desvios. Em forma de equação,

$$R_a = \int_0^L \frac{|y|}{L} dx \quad (22.11)$$

em que R_a é o valor médio aritmético de rugosidade (metros, polegadas); y é o desvio vertical da superfície nominal convertido para um valor absoluto (metros, polegadas) e L é a distância de amostragem, chamada de *comprimento de amostragem* (do inglês, *cutoff length*), sobre o qual é realizada uma média dos desvios de superfície. A distância L_m na Figura 22.8 é a distância de medição total que é traçada pela agulha. Um dispositivo de determinação de médias do tipo agulha realiza a Equação (22.11) eletronicamente. Para estabelecer o plano de referência nominal, o dispositivo usa patins (do inglês, *skids*) rodando sobre a própria superfície. Os patins atuam como um filtro mecânico para reduzir o efeito da ondulação na superfície.

Uma das dificuldades na medição de rugosidade de superfície é a possibilidade de a ondulação ser incluída na medição de R_a . Para lidar com esse problema, o comprimento de amostragem é utilizado como um filtro que separa a ondulação dos desvios de rugosidade. Como definido acima, o comprimento de amostragem é uma distância de amostra ao longo da superfície. Ele pode ser estabelecido em qualquer um de vários valores no dispositivo de medição, normalmente variando entre 0,08 milímetro (0,003 polegada) e 2,5 milímetros (0,1 polegada). Um comprimento de amostragem mais curto do que a largura da ondulação elimina os desvios verticais associados à ondulação e inclui apenas aqueles associados à rugosidade. O comprimento de amostragem mais comum utilizado na prática é 0,8 milímetro (0,03 polegada). O comprimento de amostragem deve ser estabelecido em um valor que é ao menos 2,5 vezes a distância entre su-

cessivos picos de rugosidade. O comprimento de medida L_m é normalmente estabelecido em cinco vezes o comprimento de amostragem.

Uma aproximação da Equação (22.11), talvez mais fácil de se visualizar, é dada por:

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i|}{n} \quad (22.12)$$

em que R_a tem o mesmo significado indicado anteriormente; y_i são os desvios verticais identificados pelo subscrito i , convertidos para o valor absoluto (metros, polegadas) e n é o o número de desvios incluídos em L . Indicamos as unidades nessas equações em metros (polegadas). Entretanto, a escala de desvios é muito pequena, de maneira que as unidades mais apropriadas são os microns, iguais a 10^{-6} metros ou 10^{-3} milímetros, ou micropolegadas, iguais a 10^{-6} polegadas, ambas unidades comumente usadas para expressar a rugosidade superficial.

A rugosidade superficial sofre os mesmos tipos de deficiências de qualquer medida única utilizada para avaliar um atributo físico complexo. Uma deficiência dela é não levar em consideração a posição relativa das marcas deixadas na superfície; desse modo, a rugosidade superficial pode variar significativamente dependendo da direção na qual é medida. Esses tipos de questões são abordados em livros que lidam especificamente com textura de superfícies, suas caracterizações e medições, como em Mumery [15].

22.5.2 Outras técnicas de medição de superfície

Dois métodos adicionais para medir a rugosidade superficial e as características relacionadas são disponíveis. Um é uma espécie de procedimento de contato, enquanto o outro é um método sem contato. Para completar a abordagem, mencionamo-os nesta seção.

A primeira técnica envolve uma comparação subjetiva da superfície da peça com blocos com acabamento superficial padrão produzidos para valores de rugosidade especificados. Nos Estados Unidos, eles têm superfícies com valores de rugosidade de duas, quatro, oito, 16, 32, 64 e 128 micropolegadas. Para estimar a rugosidade de um dado espécime em teste, a superfície é comparada ao padrão tanto visualmente como utilizando um 'teste de unha'. Nesse teste, o usuário delicadamente arranha as superfícies do espécime e do padrão, julgando qual padrão é o mais próximo do espécime. Testes de superfície padrão são uma maneira conveniente para um operador de máquina obter uma estimativa da rugosidade superficial. Também são úteis para engenheiros de projeto de produtos julgar qual valor de rugosidade superficial especificar no desenho da peça. A desvantagem desse método é a subjetividade.

A maioria dos outros instrumentos de medição de superfície emprega técnicas óticas para avaliar a rugosidade. Essas técnicas são baseadas no reflexo da luz pela superfície, dispersão ou difusão da luz e tecnologia a *laser*. Elas são úteis em aplicações nas quais o contato da agulha com a superfície é indesejável. Algumas das técnicas permitem uma operação em velocidade muito alta, tornando a inspeção de cem por cento das peças exequível. Um sistema descrito em Aronson [2] utiliza um *laser* para escanear uma área de superfície de 300 por 300 milímetros em um minuto e fornecer um holograma colorido tridimensional da superfície. A imagem consiste de mais de quatro milhões de pontos de dados, prontamente mostra variações de superfície e permite que sejam feitas medições dos desvios. Uma desvantagem das técnicas óticas é que seus valores medidos nem sempre se correla-

cionam bem com a métrica de rugosidade obtida por instrumentos do tipo agulha.

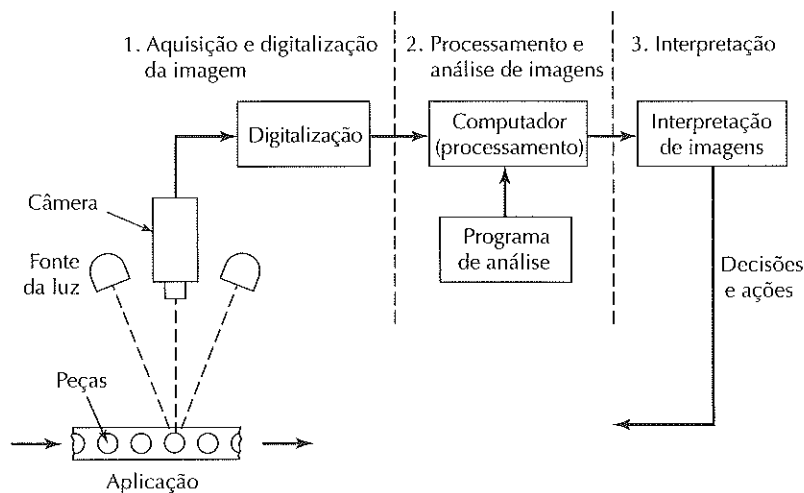
22.6 VISÃO DE MÁQUINA

A visão de máquina é a aquisição de dados de imagem, seguidos pelo processamento e pela interpretação desses dados pelo computador para alguma aplicação útil. A visão de máquina (também chamada de *visão de computador*, já que um computador digital é necessário para processar os dados das imagens) é uma tecnologia em crescimento, com a principal aplicação na inspeção industrial. Nesta seção, examinamos como a visão de máquina funciona e discutimos suas aplicações em inspeção de controle de qualidade (CQ; do inglês, *quality control* — QC) e outras áreas.

Os sistemas de visão são classificados como 2D ou 3D. Os sistemas bidimensionais veem a cena como uma imagem 2D. Isso é bastante adequado para a maioria das aplicações industriais, já que muitas situações envolvem cenas 2D. Exemplos incluem a medição e calibragem dimensional, a verificação da presença de componentes e a verificação das características em uma superfície plana (ou semiplana). Outras aplicações exigem análise 3D da cena, e sistemas de visão 3D são necessários para essa finalidade. Nossa discussão enfatizará os sistemas 2D mais simples, embora muitas das técnicas também sejam aplicáveis em trabalhos de visão 3D.

A operação de um sistema de visão de máquina pode ser dividida nas três funções a seguir: (1) aquisição e digitalização de imagem, (2) processamento e análise de imagens e (3) interpretação. Essas funções e sua relação são ilustradas esquematicamente na Figura 22.9.

Figura 22.9 Funções básicas de um sistema de visão de máquina



22.6.1 Aquisição e digitalização de imagens

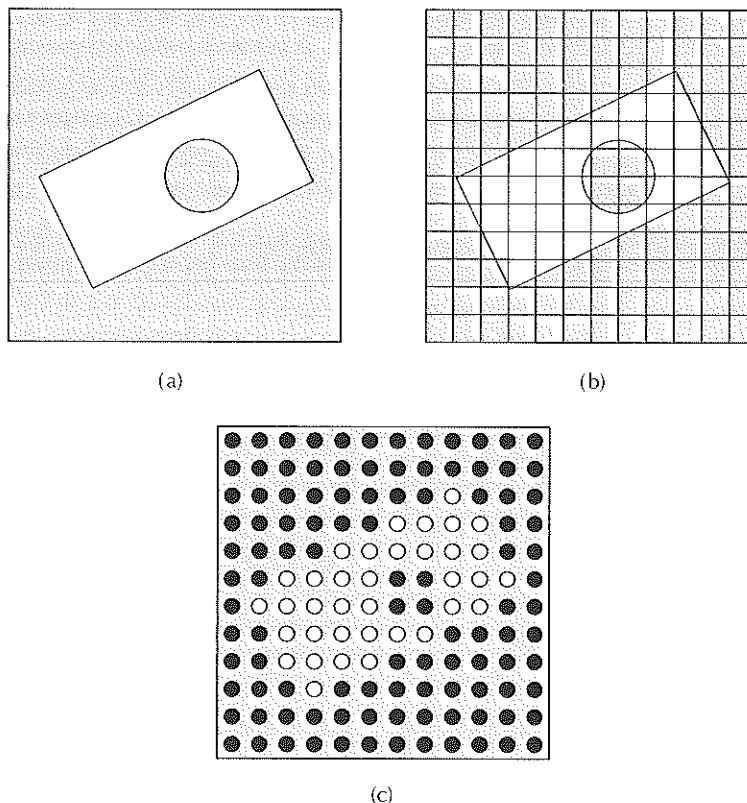
A aquisição e a digitalização de imagens são alcançadas com uma câmera de vídeo e um sistema de digitalização para armazenar os dados de imagens para análise posterior. A câmera concentra-se no assunto de interesse e uma imagem é obtida dividindo a área de visão em uma matriz de elementos de imagem (chamados *pixels*), nos quais cada elemento tem um valor proporcional à intensidade de luz daquela porção da cena. O valor de intensidade para cada pixel é convertido em seu valor digital equivalente por um conversor analógico-digital (do inglês, *analogal-to-digital converter* — ADC, Seção 6.3). A operação de ver uma cena consistindo de um objeto simples que contrasta substancialmente com seu fundo e dividindo a cena em uma matriz correspondente de elementos de imagem é descrita na Figura 22.10.

A figura ilustra a imagem provável obtida do tipo de sistema mais simples, chamado de sistema binário de visão. Na *visão binária*, a intensidade da luz de cada pixel é, em última análise, reduzida a um de dois valores, preto

ou branco, dependendo se a intensidade da luz excede um determinado nível de limiar. Um sistema de visão mais sofisticado é capaz de distinguir e armazenar diferentes tonalidades de cinza na imagem. Isso é chamado de *sistema em escala cinza*, o qual pode determinar não apenas o contorno de um objeto e as características de área, mas também suas características de superfície, como textura e cor. Os sistemas de visão em escala cinza normalmente usam quatro, seis ou oito *bits* de memória. Oito *bits* correspondem a $2^8 = 256$ níveis de intensidade, o que geralmente são mais níveis que uma câmera de vídeo pode distinguir e certamente mais do que o olho humano pode discernir.

Cada conjunto de valores dos *pixels* digitalizados é referido como um quadro. Cada quadro é armazenado em um dispositivo de memória do computador chamado de *memória de quadros* (do inglês, *frame buffer*). O processo de leitura de todos os valores dos *pixels* em um quadro é realizado com uma frequência de trinta vezes por segundo. As câmeras de alta resolução normalmente operam em frequências mais baixas (por exemplo, quinze quadros por segundo).

Figura 22.10 Dividindo a imagem em uma matriz de elementos de imagem, em que cada elemento tem um valor de intensidade de luz correspondendo àquela porção da imagem: (a) a cena; (b) 12 x 12 matriz sobreposta sobre a cena e (c) valores de intensidade de *pixels*, sejam pretos ou brancos, para a cena



Câmeras. As câmeras de estado sólido são os principais tipos usados em aplicações de visão de máquina. Elas substituíram em grande parte as câmeras de tecnologia vidicon, tradicionalmente usadas como câmeras de televisão. Câmeras de estado sólido operam concentrando a imagem em uma disposição 2D de elementos fotossensíveis finamente espaçados, muito pequenos. Os elementos fotossensíveis formam a matriz de *pixels* mostrada na Figura 22.10. Uma carga elétrica é gerada por cada elemento de acordo com a intensidade da luz que atinge o elemento. A carga é acumulada em um dispositivo de armazenamento que consiste de uma matriz de elementos de armazenamento que correspondem um a um aos elementos fotossensíveis do quadro. Esses valores de cargas são lidos sequencialmente no processamento de dados e função de análise da visão de máquina.

Comparando a câmera vidicon e a câmera de estado sólido, a segunda é fisicamente menor e mais robusta, e a imagem produzida é mais estável. Essas vantagens resultaram na crescente dominância de seu uso em sistemas de visão de máquina. Os tipos de câmeras de estado sólido incluem (1) o dispositivo de carga acoplada (do inglês, *charge-coupled device* — CCD), (2) o dispositivo de injeção de carga (do inglês, *charge-injected device* — CID) e (3) o *charge-priming device* (CPD). Eles são comparados em Galbiati [8].

As disposições das típicas matrizes de *pixels* são 640 (horizontal) $\times$ 480 (vertical), 1024 $\times$ 768, e 1040 $\times$ 1392 elementos da imagem. A *resolução* do sistema de visão é a sua capacidade de perceber detalhes e características precisas na imagem. A resolução depende do número de elementos da imagem utilizados; quanto maior o número de *pixels* projetados no sistema de visão, maior a sua resolução. Entretanto, o custo da câmera aumenta à medida que o número de *pixels* é aumentado. Ainda mais importante, o tempo exigido para ler sequencialmente os elementos da imagem e processar os dados aumenta à medida que o número de *pixels* cresce. O exemplo a seguir ilustra o problema.

EXEMPLO 22.4

Visão de máquina

Uma câmera de vídeo tem uma matriz de *pixels* de 640 $\times$ 480. Cada pixel tem de ser convertido de um sinal analógico para o sinal digital correspondente por um ADC. A conversão analógico-digital leva 0,1 microssegundo ($0,1 \times 10^{-6}$ s) para completar, incluindo o tempo para mover entre *pixels*. Quanto tempo é gasto para reunir os dados de imagem para um quadro? Esse tempo é compatível com o processamento na taxa de 30 quadros por segundo?

Solução: Há $640 \times 480 = 307.200$ *pixels* que serão digitalizados e convertidos. O tempo total para completar o processo de conversão analógico-para-digital é:

$$(307.200 \text{ pixels}) (0,1 \times 10^{-6} \text{ s}) = 0,0307 \text{ s}$$

A uma taxa de processamento de 30 quadros por segundo, o tempo de processamento para cada quadro é de 0,0333 s, o que é mais longo do que o 0,0307 necessário para realizar as 307.200 conversões analógico-para-digital.

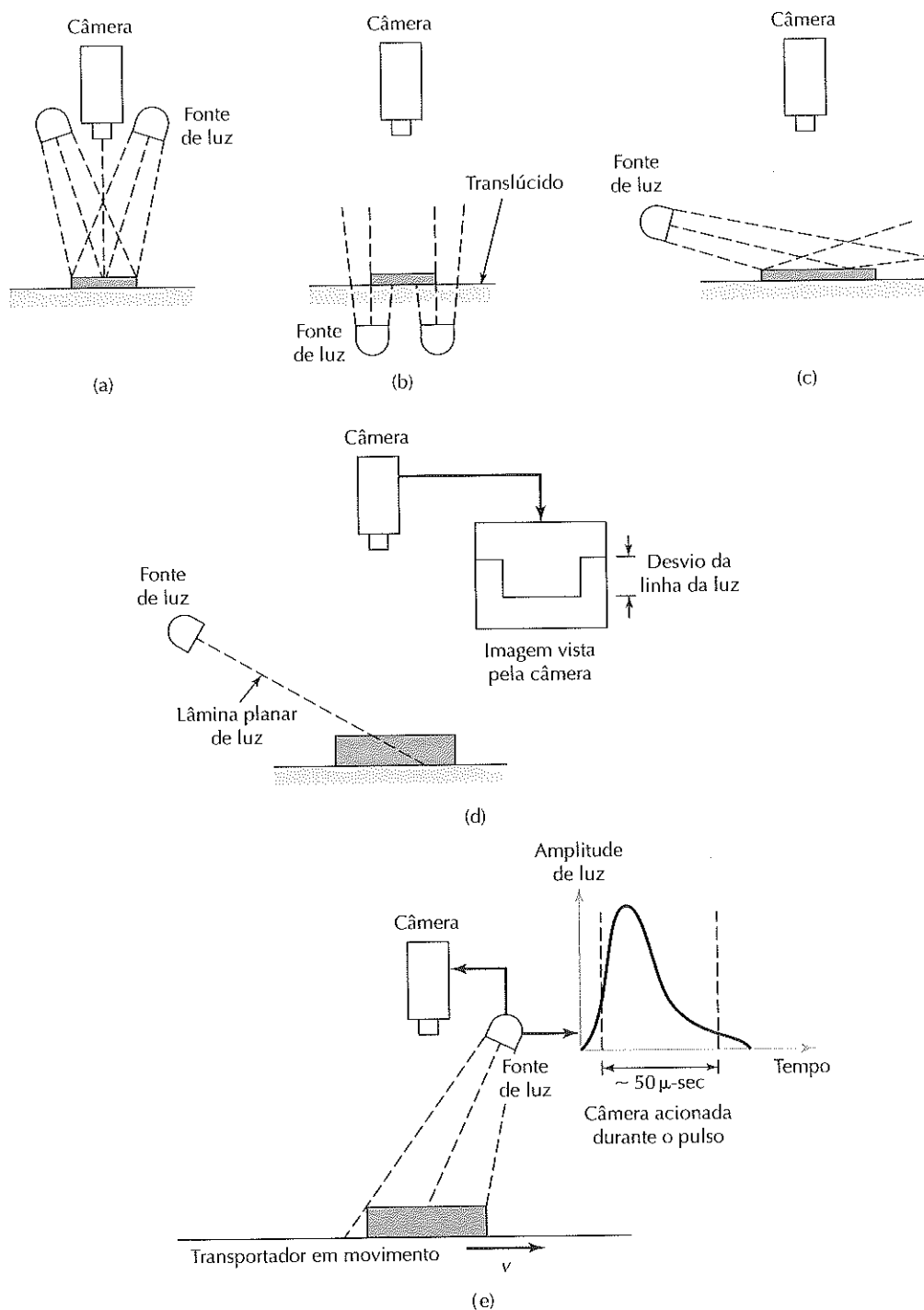
Iluminação. Outro aspecto importante da visão de máquina é a iluminação. A cena vista pela câmera de visão tem de ser bem iluminada, e a iluminação tem de ser constante. Isso quase sempre exige que uma iluminação especial seja instalada para uma aplicação de visão de máquina em vez de contar com a iluminação ambiente na instalação.

Cinco categorias de iluminação podem ser distinguidas para aplicações de visão de máquina, como descrito na Figura 22.11: (a) iluminação de frente, (b) iluminação de fundo, (c) iluminação de lado, (d) iluminação estruturada e (e) iluminação estroboscópica. Essas categorias representam tanto as diferenças nas posições da fonte da luz em relação à câmera como as diferenças em tecnologias de iluminação. As tecnologias de iluminação incluem lâmpadas incandescentes, fluorescentes, de vapor de sódio e *lasers*.

Na iluminação de frente, a fonte de luz é localizada do mesmo lado do objeto, junto com a câmera. Isso produz uma luz refletida do objeto que permite a inspeção das características da superfície, como a impressão em um rótulo, e padrões de superfície, como linhas de solda em uma placa de circuito impresso. Na iluminação de fundo, a fonte de luz é colocada atrás do objeto sendo visto pela câmera. Isso cria uma silhueta escura do objeto que contrasta fortemente com o fundo iluminado. Esse tipo de iluminação pode ser usado para sistemas de visão binária para inspecionar dimensões de peças e para distinguir entre diferentes perfis de peças. A iluminação de lado causa irregularidades em uma superfície plana lisa, pois lança sombras que podem ser identificadas pelo sistema de visão, que podem ser usadas para inspecionar defeitos e falhas na superfície de um objeto.

A iluminação estruturada envolve a projeção de um padrão de luz especial sobre o objeto para incrementar determinadas características geométricas. Provavelmente, o padrão de luz estruturada mais comum é uma lâmina planar de luz altamente concentrada direcionada contra a superfície do objeto a um determinado ângulo conhecido, como na Figura 22.11(d). A lâmina de luz forma uma linha luminosa na qual o feixe cruza com a superfície. No desenho, a câmera de visão é posicionada com sua linha de visão perpendicular à superfície do objeto, de maneira que quaisquer variações do plano geral da peça pareçam

Figura 22.11 Tipos de iluminação na visão de máquina: (a) de frente, (b) de fundo, (c) de lado, (d) estruturada utilizando uma lâmina planar de luz e (e) estroboscópica



desvios de uma linha reta. A distância do desvio pode ser determinada por medição ótica, e as diferenças de elevação correspondentes podem ser calculadas utilizando a trigonometria.

Na iluminação estroboscópica, a cena é iluminada por um pulso curto de luz de alta intensidade, que faz com que um objeto em movimento pareça estacionário. O objeto em movimento pode ser uma peça passando

pela câmera de visão em um transportador. O pulso de luz pode durar de 5 a 500 microssegundos [8]. Esse tempo é suficiente para a câmera capturar a cena, apesar do acionamento ter de ser sincronizado com aquele da luz estroboscópica.

22.6.2 Análise e processamento de imagens

A segunda função na operação de um sistema de visão de máquina é o processamento e a análise de imagens. Como indicado pelo Exemplo 22.4, o montante de dados que tem de ser processado é significativo. Os dados para cada quadro têm de ser analisados dentro do tempo exigido para completar uma digitalização (tipicamente 1/30 s). Várias técnicas foram desenvolvidas para analisar os dados das imagens em um sistema de visão de máquina. Uma categoria de técnicas no processamento e na análise de imagens é chamada de segmentação. As técnicas de *segmentação* (do inglês, *segmentation*) têm a intenção de definir e separar regiões de interesse dentro da imagem. Duas das técnicas mais comuns são a de limiar (do inglês, *thresholding*) e a de detecção de borda (do inglês, *edge detection*). A *técnica de limiar* envolve a conversão de cada nível de intensidade de pixel em um valor binário, representando branco ou preto. Isso é feito comparando o valor de intensidade de cada pixel a um valor de limiar definido. Se o valor de pixel é maior do que o limiar, ele recebe o valor de *bit* binário para branco, digamos 1; se menos do que o limiar for definido, então ele recebe o valor de *bit* para preto, digamos 0. Reduzir a imagem para forma binária por meio da técnica de limiar normalmente simplifica o problema posterior de definição e identificação de objetos na imagem. A *detecção de borda* diz respeito à determinação da localização dos limites entre um objeto e o ambiente que o cerca em uma imagem. Isso é alcançado com a identificação do contraste na intensidade de luz que existe entre *pixels* adjacentes nas bordas do objeto. Vários algoritmos foram desenvolvidos para seguir a borda em torno do objeto.

Outro conjunto de técnicas no processamento e na análise de imagens que normalmente segue a segmentação é a *extração de características*. A maioria dos sistemas de visão de máquina caracteriza um objeto na imagem por meio das características do objeto: sua área, seu comprimento, sua largura, seu diâmetro, seu perímetro, seu centro de gravidade e sua relação entre altura e largura. Os métodos de extração de características são projetados para determinar essas características baseadas na área e limites do objeto (utilizando técnicas de limiar, de detecção de borda e outras técnicas de segmentação). Por exemplo, a área do objeto pode ser determinada contando o número

de *pixels* que formam o objeto e multiplicando por um fator representando a área de um pixel. Seu comprimento pode ser encontrado medindo a distância (em termos de *pixels*) entre as duas bordas opostas extremas da peça.

22.6.3 Interpretação

Para qualquer aplicação, a imagem tem de ser interpretada baseada nas características extraídas. A função de interpretação normalmente diz respeito ao reconhecimento do objeto, tarefa denominada *reconhecimento de objeto* ou *reconhecimento de padrão*. O objetivo nessas tarefas é identificar o objeto na imagem comparando com modelos predefinidos ou valores padrão. Duas técnicas de interpretação comumente utilizadas são a correspondência de padrão e a ponderação de características. A *correspondência de padrão* é o nome dado a vários métodos que tentam comparar uma ou mais características de uma imagem às características correspondentes de um modelo ou padrão armazenado na memória do computador. A técnica de correspondência de padrão mais básica é aquela na qual a imagem é comparada, pixel a pixel, a um modelo de computador correspondente. Dentro de determinadas tolerâncias estatísticas, o computador determina se a imagem corresponde ao padrão. Uma das dificuldades técnicas com esse método alinhar a peça na mesma posição e orientação na frente da câmera, para permitir que a comparação seja feita sem complicações no processamento de imagens.

A *ponderação de características* é uma técnica na qual várias características (por exemplo, área, comprimento e perímetro) são combinadas em uma única medida, designando um peso para cada característica de acordo com sua importância relativa na identificação do objeto. A pontuação do objeto na imagem é comparada à pontuação de um objeto ideal residindo na memória do computador para conseguir a identificação apropriada.

22.6.4 Aplicações de visão de máquina

A razão para interpretar a imagem é alcançar algum objetivo prático em uma aplicação. Aplicações de visão de máquina na manufatura se dividem em três categorias: (1) inspeção, (2) identificação e (3) orientação e controle visual.

Inspeção. Decididamente, a inspeção de controle de qualidade é a maior categoria. As instalações de visão de máquina na indústria realizam uma variedade de tarefas de inspeção automatizada, a maioria das quais são on-line/em processo ou on-line/pós-processo. As aplicações são quase sempre em produção em massa, na qual o tempo exigido para programar e estabelecer o sistema de visão pode ser disseminado nos muitos milhares de unidades. As tarefas de inspeção industrial típicas incluem:

- *Medição dimensional.* Aplicações que envolvem a delimitação de determinadas características dimensionais das peças ou dos produtos que normalmente se deslocam a velocidades relativamente altas em um transportador em movimento. O sistema de visão de máquina tem de comparar as características (dimensões) às correspondentes de um modelo armazenado no computador e determinar o valor da dimensão.
- *Calibragem dimensional.* Essa tarefa é similar ao caso anterior, exceto pelo fato de que uma função de calibragem em vez de medição é realizada.
- *Verificação da presença de componentes.* É realizada em um produto montado.
- *Verificação da localização e do número de furos.* Operacionalmente, é similar à medição dimensional e à verificação de componentes.
- *Deteção de falhas e defeitos de superfície.* Falhas e defeitos na superfície de uma peça ou material normalmente revelam-se como uma mudança na luz refletida. O sistema de visão pode identificar o desvio de um modelo ideal da superfície.
- *Deteção de falhas em um rótulo impresso.* O defeito pode ser um rótulo mal colocado ou um texto mal impresso, mal numerado ou mal escrito.

Todas as aplicações de inspeção anteriores podem ser realizadas utilizando sistemas 2D. Determinadas aplicações exigem visão 3D, como a digitalização do contorno de uma superfície, a inspeção de ferramentas de corte para checar quebras e desgaste e checar depósitos de pasta de solda na superfície de placas de circuito montado. Os sistemas tridimensionais estão sendo usados cada vez mais na indústria automotiva para inspecionar contornos de superfície de peças como chassis e painéis de instrumentos.

Outras aplicações de visão de máquina. Aplicações de identificação de peças utilizam um sistema de visão para reconhecer e talvez distinguir peças ou outros objetos de maneira que alguma ação possa ser tomada. As aplicações incluem separação de peças, contagem de diferentes tipos de peças fluindo ao longo de um transportador e monitoramento de estoque. A identificação de peças normalmente pode ser realizada por sistemas de visão 2D. A leitura de códigos de barras bidimensionais e o reconhecimento de caracteres (Capítulo 12) representam aplicações de identificação adicionais realizadas por sistemas de visão 2D.

A orientação e o controle visual envolvem aplicações nas quais um sistema de visão trabalha em equipe com um robô ou uma máquina similar para controlar o movimento

da máquina. O termo sistema robótico guiado por visão (do inglês, *vision-guided robotic system* — VGR) é utilizado em conexão com essa tecnologia [28]. Exemplos de aplicações VGR incluem o rastreamento de solda na soldagem a arco contínuo, o posicionamento de peça e/ou reorientação, a busca de peças em transportadores em movimento ou em caixas estacionárias, a evitação de colisões, operações de usinagem e tarefas de montagem. Essas aplicações foram encorajadas por recentes melhorias no software que coordena as operações do sistema de visão e do robô.

22.7 OUTROS MÉTODOS DE INSPEÇÃO ÓTICA

A visão de máquina é uma tecnologia bastante conhecida, talvez por ser similar a um dos importantes sentidos humanos e ter potencial para muitas aplicações na indústria. Entretanto, há também outras tecnologias sensoriais óticas utilizadas para inspeção, as quais esta seção se dedica. A linha divisória entre a visão de máquina e essas técnicas se embaralha às vezes (com o perdão do trocadilho). A distinção é a de que a visão de máquina tende a imitar as capacidades do sistema sensorial ótico humano, que inclui não apenas os olhos, mas também os complexos poderes interpretativos do cérebro. As técnicas descritas abaixo têm um modo de operação muito mais simples.

Instrumentos óticos convencionais. Esses instrumentos incluem projetores de perfil e microscópios [24]. Um *projetor de perfil* projeta a sombra de um objeto (por exemplo, uma peça) contra uma grande tela na frente de um operador. O objeto pode ser movido nas direções *x-y*, permitindo que o operador obtenha dados dimensionais utilizando linhas reticuladas na tela. Os projetores modernos trazem capacidades de detecção de borda e software avançados que permitem que medições sejam feitas com exatidão e rapidez. Também conhecidos como projetor de contornos, comparador ótico e esquiagramas, são mais fáceis de se usar do que máquinas de medição por coordenadas e podem ser alternativas atraentes para a tecnologia mais sofisticada em muitas aplicações exigindo medições em apenas duas dimensões. O preço de um projetor de perfil está em torno da metade do preço da MMC menos cara.

Uma alternativa para o projetor de perfil é o microscópio convencional. Enquanto o comparador é em geral uma unidade que fica parada no chão, um microscópio é normalmente uma unidade sobre uma bancada, exigindo desse modo menos espaço no piso da fábrica. Microscópios podem ser equipados com um sistema de projeção

ótico em vez de um ocular, proporcionando benefícios ergonômicos para o operador. Uma vantagem significativa sobre o projetor de perfil é que o sistema de projeção mostra a superfície real do objeto, em vez de sua sombra. O usuário pode ver sua cor, sua textura e outras características em vez de apenas um perfil.

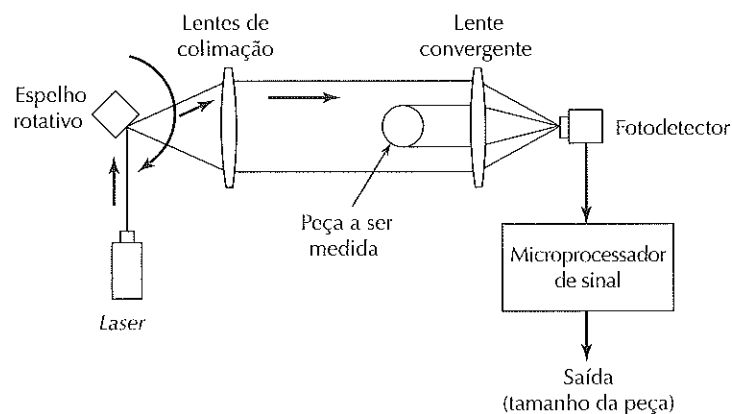
Sistemas a laser. A característica excepcional de amplificação de luz por emissão de radiação (do inglês, *light amplification by stimulated emission of radiation — laser*) é usar um feixe de luz coeso que pode ser projetado com um mínimo de difusão. Devido a isso, *lasers* têm sido usados em um grande número de aplicações de processamento e medição industrial. Feixes de *laser* de alta energia são usados para soldagem e corte de materiais, e *lasers* de baixa energia são utilizados em várias situações de medição e calibragem.

O dispositivo de varredura a *laser* cai na segunda categoria. Como mostrado na Figura 22.12, a varredura por *laser* usa um feixe que é defletido por um espelho rotativo para produzir um feixe de luz que pode ser focado para passar por um objeto (fazendo uma varredura). Um fotodetector do lado mais distante do objeto sente o feixe de luz exceto pelo período de tempo durante a varredura quando é interrompido pelo objeto. Esse período de tempo pode ser medido com grande precisão e relacionado ao tamanho do objeto na trajetória do feixe de *laser*. O dispositivo de varredura por feixe de laser pode completar sua

medição em um tempo muito curto. Consequentemente, o esquema pode ser aplicado em inspeção ou calibragem on-line/pós-processo de alta produção. Um microprocessador conta o tempo de interrupção do feixe de *laser* à medida que realiza a varredura no objeto, faz a conversão de tempo para dimensão linear e sinaliza outros equipamentos para fazer ajustes no processo de manufatura e/ou ativar um dispositivo de separação na linha de produção. Aplicações da técnica de varredura a *laser* incluem operações de laminação, extrusão de arame e processos de usinagem e retífica.

Aplicações mais sofisticadas de sistemas de inspeção a *laser* são encontradas na indústria automotiva para medição do contorno e encaixe de chassis de carros e seus componentes de chapas de metal. Essas aplicações exigem números muito grandes de medições que serão feitas a fim de capturar os formatos de contornos geométricos complexos. Tolinski [21] descreve três componentes nos sistemas de inspeção que realizam essas medições. O primeiro é um escâner a *laser* capaz de coletar mais de 15 mil pontos de dados geométricos por segundo. O segundo componente é uma máquina de medição por coordenadas móvel à qual o dispositivo a *laser* é fixado. A função da MMC é localizar com precisão os pontos escaneados no espaço tridimensional. O terceiro componente é um sistema de computador programado para comparar os pontos dos dados com um modelo geométrico da forma desejada.

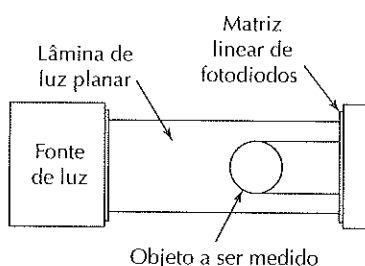
Figura 22.12 Diagrama de um dispositivo de escaneamento a *laser*.



Dispositivos de matriz linear. A operação de uma matriz linear para inspeção automotiva é similar em muitos aspectos à visão de máquina, exceto pelo fato de que os *pixels* são arranjados em apenas uma dimensão em vez de duas. Um diagrama esquemático mostrando um arranjo possível de um dispositivo de matriz linear é apresentado na Figura 22.13. O dispositivo consiste de uma fonte de

luz que emite uma lâmina planar de luz direcionada a um objeto. Do lado oposto do objeto há uma matriz linear de fotodiodos proximamente espaçados. Números comuns de fotodiodos na disposição são 256, 1024 e 2048 [23]. A lâmina de luz é bloqueada pelo objeto, e essa luz bloqueada é medida pela disposição de fotodiodos para indicar a dimensão de interesse do objeto.

Figura 22.13 Dispositivo de medição por matriz linear



O esquema de medição de matriz linear tem como vantagens: simplicidade, exatidão e velocidade. Ele não tem peças móveis e acredita-se possuir uma resolução tão pequena quanto 50 milionésimos de uma polegada [20]. Ele pode completar uma medição em um tempo de ciclo muito menor do que a máquina de visão ou a técnica de varredura por feixe de *laser*.

Técnicas de triangulação ótica. As técnicas de triangulação são baseadas nas relações trigonométricas de um triângulo reto. A triangulação é utilizada para descobrir o alcance, isto é, determinar a distância ou o alcance de um objeto a partir de dois pontos conhecidos. O uso do princípio em um sistema de medição ótico é explicado com referência à Figura 22.14. Uma fonte de luz (normalmente um *laser*) é usada para concentrar um feixe estreito em um objeto para formar um ponto de luz concentrado sobre o objeto. Uma matriz linear de fotodiodos ou outro detector ótico sensível à posição é usado para determinar a localização do ponto. O ângulo A do feixe direcionado ao objeto é fixo e conhecido, e da mesma forma é a distância L entre a fonte de luz e o detector fotossensível. Conse-

quentemente, o alcance R do objeto da linha de base definida pela fonte de luz e o detector fotossensível na Figura 22.14 podem ser determinados como uma função do ângulo das relações trigonométricas da seguinte maneira:

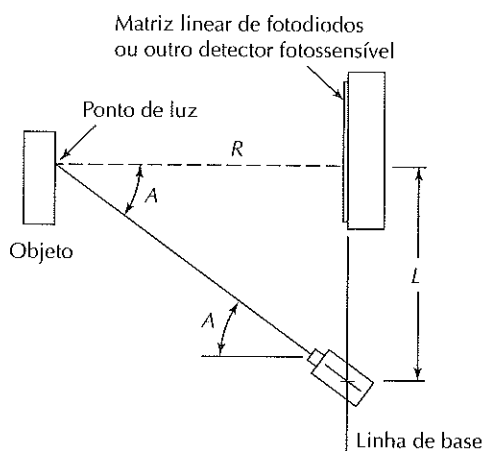
$$R = L \cot A \quad (22.13)$$

22.8 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO NÃO ÓTICAS SEM CONTATO

Além dos métodos de inspeção ótica sem contato, há também uma variedade de técnicas não óticas utilizadas para tarefas de inspeção na manufatura. Exemplos incluem técnicas sensoriais baseadas em campos elétricos, radiação e ultrassom. Esta seção revisa brevemente essas tecnologias à medida que elas possam ser utilizadas para inspeção. Elas são importantes porque são *métodos de avaliação não destrutivos*.

Técnicas de campo elétrico. Sob determinadas condições, uma sonda eletricamente ativa pode criar um campo elétrico, afetado por um objeto nos arredores da

Figura 22.14 Princípio da percepção de triangulação ótica



sonda. Exemplos de campos elétricos incluem relutância, capacitância e indutância. Na aplicação típica, o objeto (peça) é posicionado em uma relação definida para a sonda. Uma medição do efeito do objeto sobre o campo elétrico permite uma medição ou calibragem indireta de determinadas características da peça, como características dimensionais, espessura da chapa e, em alguns casos, falhas (fissuras e vazios abaixo da superfície) no material.

Técnicas de radiação. Técnicas de radiação utilizam raios X para procedimentos de inspeção sem contato sobre metais e produtos fabricados com solda. A quantidade de radiação absorvida pelo objeto de metal pode ser usada para indicar espessura e presença de falhas na peça de metal ou seção soldada. Um exemplo é o uso de técnicas de inspeção de raios X para medir a espessura da chapa de metal feito em uma laminadora. A inspeção é realizada como um procedimento on-line/pós-processo, com informações da inspeção usadas para fazer ajustes na abertura entre rolos laminadores.

Métodos de inspeção ultrassônica. As técnicas ultrassônicas fazem uso do som de alta frequência (mais de 20 mil Hertz) para várias tarefas de inspeção. Algumas das técnicas são realizadas manualmente, enquanto outras são automatizadas. Um dos métodos automatizados envolve emitir ondas ultrassônicas para uma sonda e refleti-las no objeto a ser inspecionado. Na configuração do procedimento de inspeção, uma peça-teste ideal é colocada na frente da sonda para obter um padrão de som refletido. Esse padrão de som torna-se o padrão contra o qual as peças de produção são mais tarde comparadas. Se o padrão refletido de uma determinada peça de produção casa com o padrão (dentro de uma variação estatística admissível), a peça é considerada aceitável; de outra maneira, ela é rejeitada. Um problema técnico com essa técnica envolve a apresentação de peças de produção na frente da sonda. Para evitar variações alheias aos padrões de som refletidos, as peças têm de ser sempre colocadas na mesma posição e orientação em relação à sonda.

Referências

- [1] ARONSON, R. B. "Shop-harnened CMMs". *Manufacturing Engineering*, p. 62-8, abr. 1998.
- [2] ARONSON, R. B. "Finding the flaws". *Manufacturing Engineering*, p. 81-8, nov. 2006.
- [3] BOSCH, A. (editor). *Coordinate measuring machines and systems*. Nova York: Marcel Decker, 1995.
- [4] BROWN & SHARPE. *Handbook of Metrology*. North Kingston, RI, 1992.
- [5] DESTAFANI, J. "On-machine probing". *Manufacturing Engineering*, p. 51-7, nov. 2004.
- [6] DOEBLIN, E. O. *Measurement systems: Applications and design*. 4. ed. Nova York: McGraw-Hil, 1990.
- [7] FARAGO, F. T. *Handbook of dimensional measurement*. 2. ed. Nova York: Industrial Press, 1982.
- [8] GALBIATI Jr., L. J. *Machine vision and digital image processing fundamentals*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1990.
- [9] GROOVER, M. P.; WEISS, M.; NAGEL, R. N.; ODREY, N. G. *Industrial Robotics: Technology, programming, and applications*. Nova York: McGraw-Hill, 1986. cap. 7.
- [10] GROOVER, M. P. *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems*. 3. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007. cap. 45.
- [11] HOGARTH, S. "Machines with vision". *Manufacturing Engineering*, p. 42-51, abr. 1998.
- [12] KUBEL, E. "Machine vision: Eyes for industry". *Manufacturing Engineering*, p. 42-51, abr. 1998.
- [13] LIN, S.-S.; VARGHESE, P.; ZHANG, C.; WANG, H.-P. B. "A comparative analysis of CMM form-fitting algorithms". *Manufacturing Review*, v. 8, n. 1, p. 47-58, mar. 1985.
- [14] MORRIS, A. S. *Measurement and calibration for quality assurance*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.
- [15] MUMMERY, L. *Surface texture analysis: The handbook*. Cidade, DE: Hommelwerke, 1990.
- [16] SAUNDERS, M. "Keeping in touch with probing". *Manufacturing Engineering*, p. 52-8, out. 1998.
- [17] SCHAFFER, G. H. "Taking the measure of CMMs". *American Machinist*, p. 145-60, out. 1982. Relatório especial.
- [18] SCHAFFER, G. H. "Machine vision: A sense for CIM". *American Machinist*, p. 101-20, jun. 1984. Relatório especial.
- [19] SHARKE, P. "On-machine inspecting". *Mechanical Engineering*, p. 30-3, abr. 2005.
- [20] SHEFFIELD Measurement Division. *66 centuries of measurement*. Dayton, OH: Cross & Trecker Corporation, 1984.
- [21] S. STARRETT Company. *Tools and rules*, Athol, MA: S. Starrett Company, 1992.
- [22] TOLINSKI, M. "Hands-off inspection". *Manufacturing Engineering*, p. 117-30, set. 2005.
- [23] VERNON, D. *Machine vision: Automated visual inspection and robot vision* Londres: Prentice Hall International, 1991.