

EDUARDO AZEVEDO

AURA CONCI

CRISTINA VASCONCELOS

# COMPUTAÇÃO & GRÁFICA

TEORIA E PRÁTICA:  
GERAÇÃO DE IMAGENS

VOL. 1



ALTA BOOKS  
EDITORA  
Rio de Janeiro, 2022

# Sumário

## CAPÍTULO 1

<b>VISÃO GERAL</b>	<b>1</b>
1.1. Um breve histórico	3
1.2. Áreas	4
1.3. Características da percepção visual	5
1.3.1. Informações monoculares	5
1.3.1.1. Perspectiva ou posicionamento face ao horizonte	5
1.3.1.2. Familiaridade com a cena ou tamanho relativo	6
1.3.1.3. Oclusão	7
1.3.1.4. Densidade das texturas	7
1.3.1.5. Variação da reflexão da luz e sombras	8
1.3.2. Informações visuais óculo motoras	9
1.3.2.1. Acomodação	10
1.3.2.2. Convergência	11
1.3.3. Informações visuais estereoscópicas	12
1.4. Representação de dados em CG	13
1.4.1. <i>Aliasing</i>	15
1.5. Modelagem e estrutura de dados	16
1.5.1. Sólidos	17
1.5.2. Sólidos realizáveis	18
1.5.3. Formas de representação de sólidos	19
1.5.3.1. Representação aramada ( <i>wire frame</i> )	19
1.5.3.2. Representação por faces (ou superfícies limitantes)	20
1.5.3.3. Representação por faces poligonais	22
1.5.3.4. Fórmula de Euler	23
1.5.3.5. Estrutura de dados baseada em vértices	25
1.5.3.6. Estrutura de dados baseada em arestas	25
1.5.3.7. Considerações finais sobre as listas de dados	26

## CAPÍTULO 2

<b>TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS NO PLANO E NO ESPAÇO</b>	<b>29</b>
2.1. Sistemas de coordenadas	31
2.1.1. Sistemas de coordenadas cartesianas	31
2.2. Sistemas de coordenadas e a Computação Gráfica	35
2.2.1. Sistema de coordenadas do objeto	36
2.2.2. Sistema de coordenadas do mundo	37

2.2.3. Sistema de coordenadas da câmera	38
2.2.4. Sistema de coordenadas normalizado	40
2.2.5. Sistema de coordenadas do dispositivo	41
2.3. Escalares, pontos e vetores	42
2.4. Aritmética de vetores	44
2.5. Produto interno e produto vetorial	45
2.6. Matrizes	48
2.7. Transformações lineares	52
2.7.1. Transformação de escala	54
2.7.2. Transformação de rotação	56
2.7.3. Outras transformações lineares	61
2.7.3.1. Transformação de reflexão	61
2.7.3.2. Transformação de cisalhamento	63
2.7.3.3. Descoberta de uma transformação linear qualquer	66
2.8. Transformações afins	67
2.8.1. Transformação de translação	67
2.8.2. Coordenadas homogêneas	68
2.8.3. Combinações de transformações	70
2.8.3.1. Escala ao longo de uma direção qualquer	71
2.8.3.2. Reescrevendo as rotações com cisalhamentos	71
2.8.3.3. Rotação ao redor de um ponto qualquer	72
2.9. Quatérnios – representação alternativa para rotações	72
2.9.1. Números complexos	74
2.9.2. Quatérnios	77
2.9.2.1. Adição de dois quatérnios	78
2.9.2.2. Multiplicação de quatérnios por valores reais	79
2.9.2.3. Produto de elementos da base de $\mathbb{H}$	80
2.9.2.4. Produto de dois quatérnios	80
2.9.2.5. Conjugado de um quatérnio	82
2.9.3. Utilizando quatérnios	83
2.10. Câmera virtual	86
2.10.1. Câmera como objeto virtual 3D	87
2.10.1.1. Posicionando a câmera em relação à cena	88
2.10.1.2. Sistema de coordenadas da câmera	89
2.10.2. Projeção	91
2.10.2.1. Projeção paralela	91
2.10.2.2. Projeção em perspectiva	95
2.10.2.3. Especificação dos pontos de fuga	100
2.10.3. Câmera virtual (parâmetros intrínsecos)	102

## CAPÍTULO 3

### **CURVAS E SUPERFÍCIES** **105**

3.1. Representação de curvas	107
3.1.1. Conjunto de pontos	107
3.1.2. Representação analítica	109
3.1.3. Forma não paramétrica de representar curvas	109
3.1.4. Forma paramétrica de representar curvas	111

3.1.5. Curvas paramétricas de terceira ordem	114
3.1.6. Curvas de Hermite	114
3.1.7. Curvas de Bézier	120
3.1.8. Curvas Splines	126
3.1.8.1. B-Splines uniformes e periódicas	128
3.1.8.2. B-Splines não periódicas	129
3.1.8.3. B-Splines não uniformes	130
3.1.8.4. Desenvolvimento da formulação genérica de B-Splines	130
3.1.8.5. Interpolação com Splines	133
3.1.9. Curvas racionais	135
3.2. Superfícies	138
3.2.1. Superfícies de revolução	139
3.2.2. Superfícies geradas por deslocamento	140
3.2.3. Superfícies geradas por interpolação bilinear	141
3.2.4. Interpolações trilineares	143
3.2.5. Superfícies de formas livres	145
3.2.6. Superfícies paramétricas bicúbicas	145
3.2.7. Superfícies de Hermite	146
3.2.8. Superfícies de Bézier	147
3.2.9. Superfícies de B-Spline	149
3.2.10. Tangentes e normais às superfícies	149
3.2.11. Superfícies racionais	150
3.2.12. NURBS	151

## CAPÍTULO 4

### **CORES** **153**

4.1. Fundamentos básicos	155
4.1.1. Percepção tricromática	155
4.1.2. A luz	157
4.1.3. Reflexão $\times$ absorção	160
4.2. Formas de descrição das cores	161
4.2.1. Espaço RGB de representação de cores	162
4.2.2. Funções de combinação de cores	164
4.2.3. O espaço de cores XYZ	168
4.2.4. Os espaços de cores CMK e CMYK	172
4.2.5. Tipos de espaço de cores	173
4.2.6. Outros espaços de cor	175

## CAPÍTULO 5

### **RENDERIZAÇÃO** **181**

5.1. Etapas da renderização	184
5.1.1. O pipeline gráfico e o hardware gráfico	190
5.2. Rasterização	192
5.2.1. Rasterização de retas	192
5.2.1.1. Algoritmo de Bresenham para traçado de retas	195
5.2.2. Rasterização de polígonos	197

5.3. Tratamento de visibilidade	200
5.3.1. Recorte e remoção de primitivas	200
5.3.2. Algoritmo de eliminação de faces ocultas pela orientação em relação ao observador ( <i>culling</i> )	204
5.3.3. Tratamento de oclusão	209
5.3.3.1. Algoritmo de visibilidade por prioridade	209
5.3.3.2. Algoritmo <i>z-buffer</i>	211
5.4. Iluminação	214
5.4.1. Fontes emissoras de luz	215
5.4.1.1. Luz ambiente	216
5.4.1.2. Luz direcional	217
5.4.1.3. Luz pontual	219
5.4.1.4. Holofote	220
5.4.1.5. Outros tipos de fonte de luz	222
5.4.2. Interação da luz com diferentes meios	222
5.4.3. Modelo de iluminação local	227
5.4.4. Sombreamento ( <i>Shading</i> )	233
5.4.4.1. Sombreamento constante	234
5.4.4.2. Sombreamento de Gouraud	236
5.4.4.3. Sombreamento de Phong	238
5.4.5. Modelos de iluminação global	239
5.4.5.1. <i>Ray tracing</i>	240
5.4.5.2. Trabalhando com <i>ray tracing</i>	250
5.4.5.3. Refrações	250
5.4.5.4. Metais com <i>ray tracing</i>	250
5.4.5.5. <i>Ray tracing</i> em real-time rendering	251
5.4.5.6. <i>Caustic</i>	251
5.4.5.7. Radiosidade	253
5.5. Texturas	256
5.5.1. Mapeamento de texturas	260
5.5.1.1. Mapeamento de texturas 2D	262
5.5.2. Mapeamento do ambiente	267
5.5.3. Mapeamento de rugosidade e mapeamento de deslocamento	270
5.5.4. Amostragem de textura	274
Conclusões	284

## CAPÍTULO 6

### **ANIMAÇÃO** **285**

6.1. Histórico	287
6.2. Aplicações da animação	291
6.2.1. Diversão	291
6.2.2. Comunicação, instrução e treinamento	291
6.2.3. Visualização	292
6.3. Animação por computador	292

6.4. Formas de animação	293
6.4.1. Animação quadro a quadro	293
6.4.1.1. <i>Straight ahead</i>	294
6.4.1.2. Pose-to-pose	294
6.4.2. Animação por rotoscopia	294
6.4.3. Animação por interpolação	295
6.4.4. Animação automática, por intermédio de Programas de computador	296
6.4.4.1. Animação por programas do tipo script	296
6.4.4.2. Animação por intermédio de simuladores	296
6.4.4.3. Animação por captura de movimento	297
6.4.5. Animação representacional	297
6.4.6. Animação <i>track based</i>	298
6.4.6.1. <i>Tracking</i> de um ponto	298
6.4.6.2. <i>Tracking</i> de dois pontos	298
6.4.6.3. <i>Tracking</i> de quatro pontos	298
6.4.6.4. <i>Tracking</i> planar	299
6.4.6.5. <i>Tracking</i> 3D	299
6.5. Captura de movimento	299
6.5.1. Aplicações	299
6.5.2. Sistemas de captura de movimento	300
6.5.2.1. Ótico	302
6.5.2.2. Mecânico	302
6.5.2.3. Magnético	303
6.6. Animação de personagens 3D	304
6.6.1. Cinemática	307
6.6.1.1. Cinemática direta	308
6.6.1.2. Cinemática inversa	309
6.6.2. Ossos ( <i>Bones/Joints</i> )	309
6.6.3. Articulações	310
6.6.3.1. Grau de liberdade	310
6.6.3.2. Junta de revolução	311
6.6.3.3. Junta esférica	312
6.6.4. Esqueleto	312
6.6.4.1. Controladores IK	314
6.6.4.2. Ciclo de animação	317
6.6.5. Músculo flexor	317
6.6.6. Animação facial	319
6.6.6.1. Sincronização labial	320
6.6.6.2. Sequência de texturas	320
6.6.6.3. <i>Morphing</i>	320
6.6.6.4. Esqueleto	320
6.6.6.5. Free form deformation	320
6.6.6.6. Weighted morphing	320

6.7. Animação de superfícies deformáveis _____	321
6.8. Produção de animação _____	324
6.9. Princípios da animação _____	325
<b>REFERÊNCIAS _____</b>	<b>329</b>
<b>ÍNDICE _____</b>	<b>333</b>

AMOSTRA

## CAPÍTULO 1

# Visão Geral

- 1.1** Um breve histórico
- 1.2** Áreas
- 1.3** Características da percepção visual
  - 1.3.1** Informações monoculares
  - 1.3.2** Informações visuais óculo motoras
  - 1.3.3** Informações visuais estereoscópicas
- 1.4** Representação de dados em CG
  - 1.4.1** *Aliasing*
- 1.5** Modelagem e estrutura de dados
  - 1.5.1** Sólidos
  - 1.5.2** Sólidos realizáveis
  - 1.5.3** Formas de representação de sólidos

## 1.1. UM BREVE HISTÓRICO

O primeiro computador a possuir recursos gráficos foi o *Whirlwind I*, desenvolvido pelo MIT (em 1950) com finalidades acadêmicas e militares. Um sistema de monitoramento e controle de voos, voltado para a defesa aérea dos Estados Unidos, que utilizava este computador, foi desenvolvido em 1955. Este sistema convertia as informações capturadas por radar em imagem usando tubo de raios catódicos. O termo *Computer Graphics* surgiu em 1959 em um projeto para simulação de voos. Em 1962, a tese de Sutherland (*Sketchpad – A Man-Machine Graphical Communication System*), introduziu as estruturas de dados e os conceitos de computação gráfica interativa que levaram ao desenvolvimento dos primeiros sistemas de projetos auxiliados por computador (*Computer Aided Design-CAD*). Depois, grandes corporações passaram a desenvolver esses sistemas e, no final da década de 1960, eles já eram de uso comum na indústria automobilística e aeroespacial.

Na década de 1970, a computação gráfica passou a ser entendida como uma área específica da ciência da computação com o surgimento dos grupos específicos de interesse em computação gráfica (SIGGRAPH), e também várias técnicas e algoritmos utilizados até hoje, como os modelos de sombreamento e o z-buffer, bem como a tecnologia dos circuitos integrados, o que permitiu o barateamento das máquinas. Em 1975, surgiu o primeiro computador com interface visual.

Os anos 1980 são marcados pelas tentativas de normalizar a forma de escrever programas gráficos com as propostas dos padrões CORE, GKS, PHIGS e com o desenvolvimento das técnicas de iluminação global como o *ray-tracing* e a *radiosidade*, que levaram o nível do realismo gráfico à qualidade de fotografias.

Nos anos 1990, surgiu o OpenGL e os recursos gráficos passaram a estar embutidos nas linguagens de programação, o que, adicionado ao desenvolvimento das placas gráficas para PC, contribuiu para a retirada da computação gráfica das estações de trabalho, sua popularização e massificação junto aos PCs e GPUs.

A grande mudança da primeira década deste século foi o uso generalizado de câmeras e outras formas de capturas. O uso dos dispositivos móveis e da internet em todos os novos dispositivos (IoT) marca a década atual. Esses novos conceitos aumentam incrivelmente a diversidade de dispositivos para os quais se podem esperar fazer aplicativos com interfaces e recursos gráficos.

Hoje não há mais tempo para esperar a criação de grandes bibliotecas com recursos prontos. Volta-se a pensar na programação a partir do

conhecimento dos algoritmos fundamentais de computação gráfica com o mínimo de recurso computacional disponível para programação, ou seja, melhor que dispor de tempo aprendendo a usar qualquer biblioteca pronta, é fundamental o conhecimento de como programar os algoritmos básicos, pois é com eles que se mantém a computação gráfica ativa e viável aos programadores formados pelos cursos de graduação, que são os desenvolvedores das aplicações para a maioria dos novos dispositivos. Apresentar esses algoritmos e conceitos com os quais é possível construir a maioria das aplicações de CG é o objetivo desta obra.

## 1.2. ÁREAS

A computação gráfica atualmente é uma área que engloba, para melhor descrição didática, duas grandes subáreas: a Síntese de Imagens (SI) e Análise de Imagens (AI). A primeira é também chamada de Computação Gráfica Gerativa e envolve a criação de imagens sintéticas pelo computador a partir de dados, ou seja, ela transforma dados em imagens. A segunda considera cenas depois de capturadas por dispositivos que as tornam digitais (câmeras, scanners, tomógrafos, radares, satélites, sensores infravermelho, ultrassom etc.) e se dedica a desenvolver teorias e métodos voltados à extração de informações de seus conteúdos visuais.

Outra forma de separar essas áreas é quanto ao tipo de dado que se considera na maioria das aplicações de cada uma delas. Na Síntese de Imagens ou Computação Gráfica Gerativa eles geralmente estão na forma vetorial (objetivo principal deste volume), ou seja, são considerados como parte de um espaço contínuo (o espaço tridimensional Euclidiano, normalmente), e a quantidade dos dados depende da quantidade de pontos ou elementos que se está representando. Na Análise de Imagens os dados são predominantemente matriciais ou discretizados: sua resolução ou número de amostras e tons define seu tamanho e qualidade.

A SI gera imagens, objetos e cenários usando primitivas geométricas como linhas, círculos e superfícies, buscando uma representação de objetos do mundo real. A AI pode ser considerada como o processo inverso onde se estima a geometria e outras características a partir dos dados capturados do mundo real. No entanto, cada vez mais estas duas áreas têm se aproximado e integrado. AI vem usando curvas, representação de superfície e algumas outras técnicas de SI na redução do tamanho dos dados e seu entendimento. Por outro lado, a criação de imagens realísticas em CG utiliza técnicas de AI que inserem elementos reais nos modelos, como textura, movimentos, comportamentos de objetos nas cenas geradas e as misturam aos personagens virtuais.

## 1.3. CARACTERÍSTICAS DA PERCEPÇÃO VISUAL

Pensar um pouco sobre nossa percepção visual é útil para melhor geração de objetos em ambientes virtuais nas telas bidimensionais dos dispositivos de visualização e interação. A percepção tridimensional se relaciona com a capacidade humana de distinguir formas, contornos, contrastes e a interpretação da relação espacial existente entre os objetos de uma cena. Pode-se considerar que há três categorias de informações visuais usadas na formação de uma imagem: as monoculares, as ligadas ao movimento dos olhos e as estereoscópicas.

### 1.3.1. Informações Monoculares

As informações visuais provenientes de apenas um dos olhos (monocular) são inerentes à imagem formada na retina, e são também chamadas de informações estáticas de profundidade (*static depth cues*) ou informações de profundidade da imagem (*pictorial depth cues*). A visão **monocular** obtém uma percepção da profundidade valendo-se da perspectiva, da ideia de que os objetos mais próximos escondem os objetos mais distantes que se encontram sobre o mesmo alinhamento em relação ao observador e da variação dos detalhes com a distância e posição. Entre essas últimas informações podemos especificar: a perda de nitidez dos detalhes com a distância, as mudanças nas totalidades (variação da reflexão da luz e as sombras); as variações nas densidades, formas, configurações e organização das texturas.

#### 1.3.1.1. Perspectiva ou posicionamento face ao horizonte

Considerada como a descoberta mais importante da Idade Média para o desenho, a perspectiva, estabelecida por Brunelleschi (Filippo Brunelleschi, arquiteto e escultor florentino; 1377-1446) em 1425, passou a ser muito utilizada para o desenho de obras realísticas. O desenho em perspectiva é feito como se somente um olho estivesse vendo a cena (pois juntos os olhos vêem estereoscopicamente).

A noção de perspectiva se relaciona com nossa interpretação de que um objeto diminui de tamanho, aparente, à medida que esse se afasta do observador. Essa noção é importante para representar e entender cenas tridimensionais em projeções planas (papel, tela do computador e outros). Baseia-se no fato de que tamanho e distância são sempre interpretados juntos no nosso sistema visual, que espera um mundo em perspectiva na direção do ponto de fuga e lados paralelos na direção onde não há ponto de fuga. Essa expectativa resulta na criação de diversas ilusões de ótica;

uma das mais interessantes é “o quarto de Ames”, mostrado na Figura 1.1. Neste ambiente, ao trocar a posição dos ocupantes, a “ideia” de suas alturas muda. O efeito fica mais interessante em filmes quando é possível ver o movimento dos ocupantes na cena (procure na internet por “Ames room” para ver esse efeito).

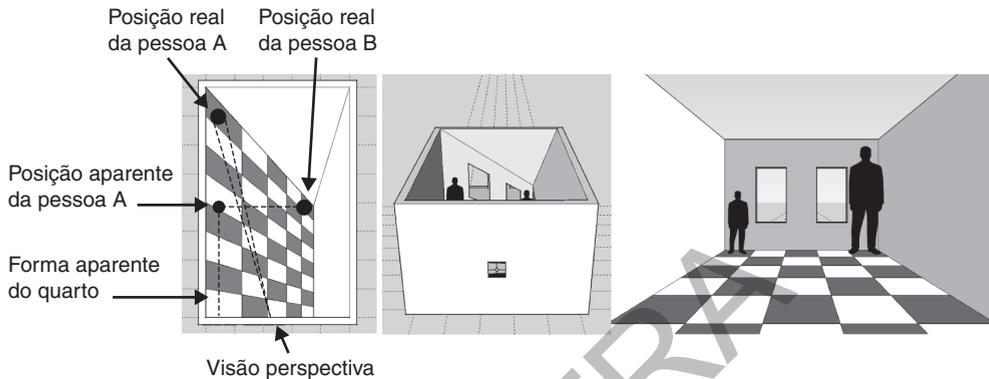


FIGURA 1.1. Quarto ou sala de Ames e a percepção de altura.

### 1.3.1.2. Familiaridade com a cena ou tamanho relativo

O conhecimento prévio do tamanho de um objeto serve tanto para determinar a distância absoluta a partir do observador, quanto as distâncias relativas entre os diversos objetos de uma cena. Ou seja, quando há dois ou mais objetos no mesmo campo de visão, e o observador tem noção de seus tamanhos relativos, o tamanho aparente serve para determinar qual deles está mais próximo ou mais distante.

Quando olhamos os objetos à esquerda na Figura 1.2, conseguimos de imediato estabelecer qual é o maior e qual deve estar mais à frente ou mais longe. Quando olhamos o desenho à direita na mesma figura, que poderia ser o percurso de um rio, ou um galho de árvore, nosso cérebro não consegue perceber as profundidades, não consegue compreender ou avaliar se há partes na frente de outras. Isso se deve ao fato de reconhecermos de imediato os blocos como coisas conhecidas, enquanto a outra imagem pode não ser algo conhecido, se não houver uma referência para auxiliar a percepção. Esse problema pode causar uma limitação em sistemas de realidade virtual ou jogos, quando há interação com objetos nunca vistos e que podem causar percepções errôneas da cena. A familiaridade com a cena serve tanto para determinar a distância absoluta a partir do observador, quanto as distâncias relativas entre os objetos.

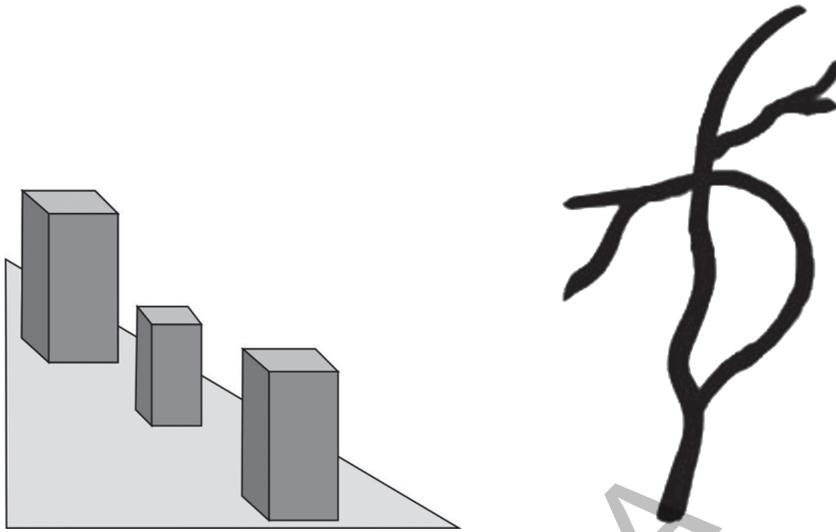


FIGURA 1.2. *Percepção de profundidade e familiaridade.*

### 1.3.1.3. Oclusão

A oclusão pode fornecer uma informação da posição relativa dos objetos. Este fenômeno, também chamado de interposição ou interrupção de contorno, é descrito como a obstrução da visão de um objeto por outro que está mais próximo do observador e sobre uma mesma direção de visão. Assim, pelo objeto que esconde partes do outro, visto na Figura 1.3, temos uma ideia de qual é o objeto mais próximo em cada situação.

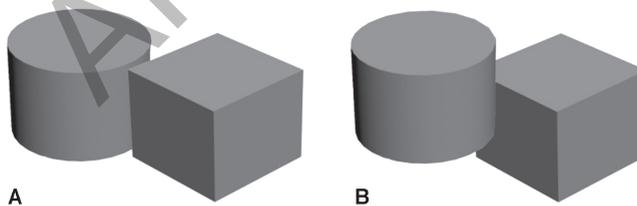


FIGURA 1.3. *Sabemos qual objeto está mais longe pois seu contorno está interrompido.*

### 1.3.1.4. Densidade das texturas

Conhecida também como “gradiente de texturas”, esta característica visual baseia-se no fato de que muitos objetos possuem em sua aparência algum tipo de padrão com certa regularidade e variações neste padrão são associadas às variações das superfícies do mesmo, proporcionando um conhecimento da forma destes objetos e da noção de direções e profundidades (Figura 1.4

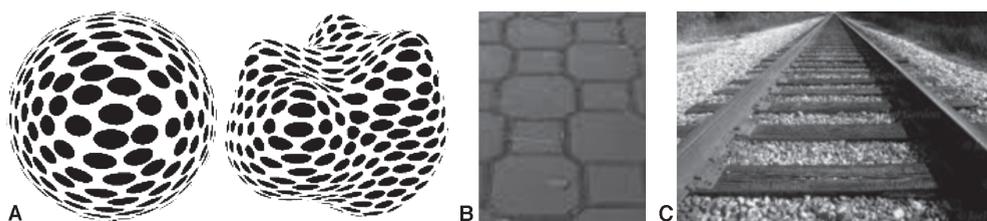


FIGURA 1.4. Densidade e nitidez das texturas.

A). Ainda, à medida que os padrões aparecem mais densos e menos detalhados, mais distantes estarão do observador (Figura 1.4 B). Por exemplo, uma diminuição nos tamanhos dos trilhos da Figura 1.4 nos dá uma ideia da profundidade da imagem e define o ponto de fuga. As texturas também auxiliam na percepção do movimento, como, por exemplo, se girarmos um círculo sem textura, nosso sistema de visão terá alguma dificuldade para perceber o seu movimento, o que não ocorre se esse círculo tiver raios, como as rodas de uma bicicleta.

### 1.3.1.5. Variação da reflexão da luz e sombras

A mudança na intensidade da luz refletida, ou o sombreamento ao longo da superfície de um objeto, fornece informações sobre a forma e a curvatura da superfície desse objeto. Se não for gerada uma variação na cor dos pontos da superfície, a identificação da forma do objeto pode se tornar difícil. A variação de iluminação da cena adiciona uma noção da forma dos objetos presentes, contribuindo com sua melhor interpretação. Note que na Figura 1.5 (A) parece que existem um círculo e um hexágono, enquanto que na Figura 1.5 (B) pode-se observar que são objetos de três dimensões.

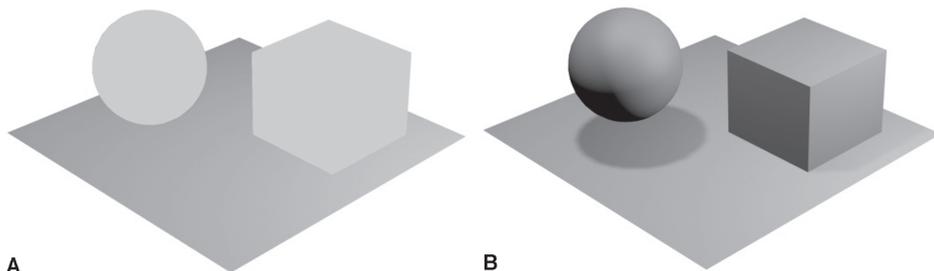


FIGURA 1.5. Maior nitidez visual com os sombreamentos e sombras.

A sombra é útil na determinação da posição de um objeto em relação a um piso colocado abaixo deste, ou na definição relativa entre objetos. Por exemplo, sabemos na Figura 1.5 (B) que o primeiro objeto está longe da superfície e o segundo está sobre ela pelas suas sombras. Se um objeto está distante da sombra que ele projeta sobre um plano é porque não está apoiado neste plano.

### 1.3.2. Informações Visuais Óculo Motoras

Os olhos, ao verem alguma cena, são mantidos em constante movimento por meio de um conjunto de sete músculos diferentes. As informações visuais oculares motoras são fornecidas pelo movimento destes músculos. Há dois tipos de informações nessa categoria: a acomodação e a convergência. Uma classe destes músculos (músculo ciliar) é responsável por focar os raios luminosos na retina (fundo do olho), mudando a curvatura e a espessura do cristalino (uma estrutura transparente e elástica que junto com a córnea funciona como uma lente). Estes músculos ciliares estão na porção anterior dos olhos, de onde partem ligamentos suspensores que prendem o cristalino (Figura 1.6). Com a atividade do músculo ciliar, a curvatura e espessura do cristalino podem ser modificadas, permitindo o foco em longe ou perto.

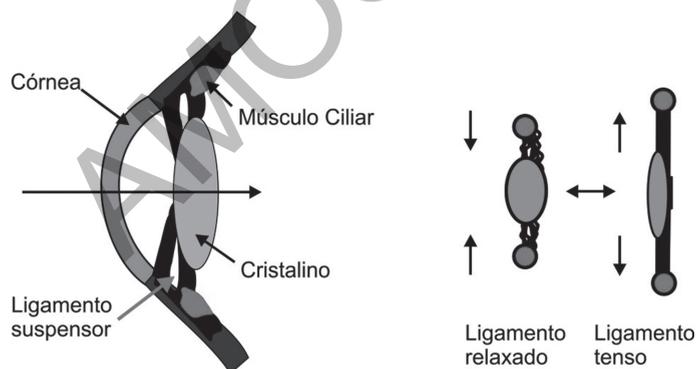
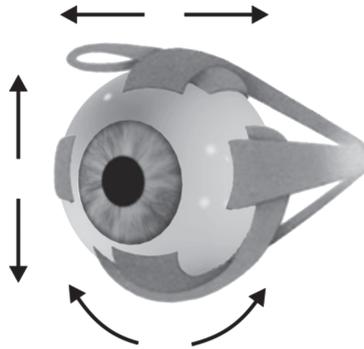


FIGURA 1.6. Músculos ciliares e ligamentos que sustentam o cristalino.

Os músculos extrínsecos do olho (Figura 1.7) são pares de músculos esqueléticos que garantem o acompanhamento dos objetos pelo movimento dos olhos. São seis músculos que trabalham aos pares e se inserem ao redor do globo ocular, circundam-no e o movem, fornecendo informações do grau de convergência dos olhos para o cérebro. Estes movimentos oculares têm quatro funções:



**FIGURA 1.7.** Seis músculos que fazem o olhar se voltar nas diversas direções indicadas pelas setas.

- **Convergência binocular:** isto é, focalizar os dois olhos sobre um mesmo objeto, compondo uma imagem com percepção de profundidade;
- **Exploração do campo visual:** na observação de detalhes de um ambiente; a imagem é projetada na retina e deslocada pelos movimentos da cabeça e dos olhos, de modo que os pontos de interesse são mais bem visualizados;
- **Acompanhamento de objetos em movimento:** a percepção de movimento envolve a detecção de deslocamentos da imagem projetada sobre a retina e o acompanhamento do objeto, procurando manter a sua imagem visível; e
- **Transformação de variações espaciais em variações temporais:** quando uma imagem é permanentemente projetada sobre a retina, imóvel, ela desaparece da percepção. Os movimentos dos olhos renovam continuamente os estímulos luminosos. O cérebro reconstrói a imagem observada a partir dessas informações, cancelando nesse processo todas as irregularidades estáticas do campo visual ocular, como por exemplo, as sombras projetadas pelos nervos e vasos sanguíneos na retina. Assim sendo, a composição da cena, ou a percepção visual propriamente dita, dá-se efetivamente no cérebro, a partir de informações fornecidas pelo olho.

### 1.3.2.1. Acomodação

No processo de acomodação, os músculos ciliares dos olhos relaxam ou contraem (Figura 1.6) para mudar o formato do cristalino (as lentes dos olhos), com o objetivo de alterar o foco dos objetos em função da distância desses objetos do observador. O olho coleta os raios luminosos emitidos

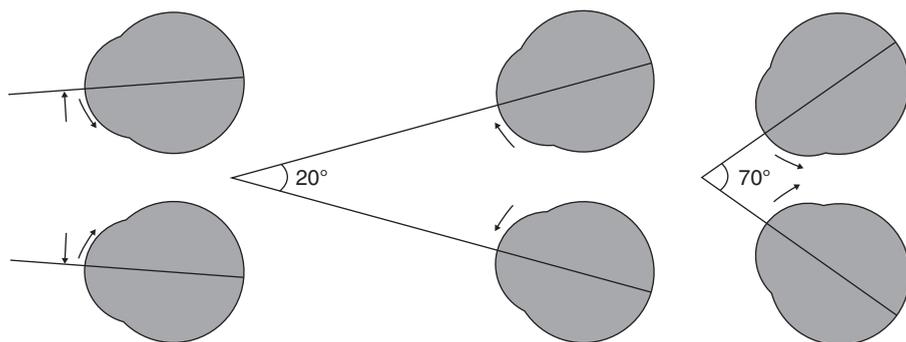
ou refletidos pelos objetos e focaliza-os sobre a retina para formar uma imagem sempre nítida. Essa alteração do poder de difração do cristalino é denominada acomodação visual. Quando estes músculos estão relaxados, a lente fica tensa pelos ligamentos (visão para objetos distantes). Quando o músculo ciliar entra em atividade, os ligamentos relaxam e o cristalino muda de forma, aumentando a sua espessura e curvatura. Este mecanismo é totalmente reflexo (automático) e é controlado pelo sistema nervoso autônomo parassimpático. Assim, quando o olho focaliza objetos a mais de 9 metros, o músculo ciliar está relaxado e os raios luminosos focalizam a imagem sem “precisar” do cristalino. Mas, à medida que o objeto começa a se aproximar, o músculo ciliar inicia a contração, o cristalino começa a se tornar esférico aumentando o seu poder de convergência luminosa.

A visão de perto ou de longe é excludente, só podemos ter um foco de cada vez: se focalizarmos objetos próximos, o fundo perde a nitidez, e se focalizarmos objetos distantes, os que estão próximos perdem o foco. Esta experiência visual também provoca uma percepção qualitativa sobre a distância relativa dos vários objetos no campo visual. É importante lembrar que, durante a formação da imagem dos objetos próximos, além da acomodação visual, ocorrem movimentos oculares (convergência) e a redução do diâmetro da pupila, nessa ordem. Esses três mecanismos garantem que um objeto, ao se aproximar, seja focalizado automaticamente de maneira nítida sobre a retina. Se ele se afastar, acontecerá exatamente o contrário: o músculo ciliar relaxa, os olhos divergem e a pupila dilata.

A acomodação visual é extremamente eficiente nos jovens, mas com a idade (a partir dos 40 anos) a elasticidade do cristalino vai sendo perdida e a visão de perto se compromete. Acuidade visual relaciona-se com a capacidade de ver com nitidez dois pontos bem próximos: depende da densidade dos receptores na retina além do poder de refração do sistema das lentes oculares (córnea + cristalino).

### **1.3.2.2. Convergência**

Nossos olhos, ao focarem um objeto, convergem sobre o mesmo em ângulos variáveis em função da distância. Os eixos visuais dos animais que têm olhos em lados opostos nunca se cruzam. Os olhos humanos estão em média a 65 milímetros um do outro e podem convergir de modo a cruzarem seus eixos a poucos centímetros à frente do nariz, ou ficar em paralelo quando se foca algo no infinito. A informação visual de convergência considera o grau de rotação dos olhos ao longo do eixo de visão (quando um objeto é focado) para obter informações a respeito da posição e da distância (Figura 1.8) de



**FIGURA 1.8.** Ao focarem um objeto, os olhos ficam paralelos quando se foca algo muito longe ou convergem seus eixos sobre o mesmo.

um objeto. Ou seja, os movimentos dos músculos dos globos oculares e o grau de convergência dos eixos visuais ajudam na noção da distância entre os olhos e um determinado objeto.

### 1.3.3. Informações Visuais Estereoscópicas

A estereoscopia (que significa “visão sólida” em grego) é útil na noção da distância de objetos colocados a até 10 metros do observador. A estereoscopia, ou visão binocular, decorre de termos nossos olhos posicionados na frente, praticamente na mesma direção e não em direção oposta, como ocorre com muitos animais, que por isso têm um campo visual muito maior que o nosso (até 360 graus). Com a perda do campo visual ganhamos à noção do tridimensional. A importância disto em nossa vida diária pode ser sentida se você tapar um dos olhos e mover objetos recém posicionados em um ambiente. Como os olhos estão na mesma direção, mas com alguma distância, cada olho vê uma cena com uma leve diferença. Isto pode ser conscientizado por uma experiência bem simples: ponha seu dedo indicador na vertical, na frente do nariz, até um palmo de distância e leia esse texto com apenas um dos olhos de cada vez. Você deixará em cada caso de ver uma parte distinta do texto e terá visões diferentes. Essa diferença é chamada **disparidade binocular**. O cérebro usa essas diferenças para obter a distância relativa dos objetos. Ou seja, a sobreposição das informações nos proporciona a experiência tridimensional do ambiente (relevo e profundidade).

O campo visual de um olho (o que se vê com um olho fechado) com a cabeça parada corresponde a 150 graus. Com os dois olhos abertos, o campo visual fica mais ampliado. Fixe um determinado ponto de observação e feche