

Capítulo 8

Modelos de Iluminação

Uma imagem planar (bidimensional) pode ser modelada como uma função f que depende de duas variáveis (duas coordenadas u e v). Para a percepção visual, é suficiente que a função seja uma função de cor, representada por exemplo pelos três componentes R, G e B, conforme vimos no capítulo 7. Se a cor em cada ponto for próxima à cor que uma superfície real emitirá, a imagem produzirá um efeito visual (cor) próximo o de uma foto obtida por uma câmara fotográfica. Portanto, entender o processo físico de propagação da luz e a sua interação com os objetos de uma cena, incluindo o observador, nos ajuda tanto na utilização apropriada dos modelos de iluminação disponíveis na maioria dos sistemas de informações gráficas, como na extração de informações contidas numa imagem.

A luz é um conjunto de radiações capazes de estimular o sistema de visão humano. O estudo da luz pode ser dividido em três partes:

1. Óptica geométrica: estuda as consequências do princípio de propagação retilínea dos raios luminosos,
2. Óptica energética: estuda o comportamento radiante dos raios luminosos e sua interação com a matéria.
3. Óptica física: estuda a dispersão, a interferência, a difração e a polarização da luz.

Na seção 8.1 sintetizamos alguns conceitos físicos relacionados com a luz.

As interações entre os raios luminosos, os objetos de interesse e o sistema perceptual de um observador é um processo complexo. O procedimento que nos permite determinar/aproximar a cor de um ponto sob o efeito de uma ou mais fontes de luz é denominado **modelo de iluminação**. O modelo de

iluminação que considera a interação de um feixe luminoso com um ponto da superfície é chamado **modelo de iluminação local** (seção 8.2) e o modelo que tenta levar em consideração as interações deste feixe com todas as superfícies existentes num ambiente é conhecido como **modelo de iluminação global** (seção 8.3). Em seguida, apresentamos algumas classes de fontes de luz mais comuns nos algoritmos de imageamento na seção 8.4. Finalmente, na seção 8.5 mostramos que, por eficiência, é comum aplicar somente o modelo de iluminação numa amostra de pontos e interpolar os valores obtidos para o resto dos pontos da superfície.

8.1 Luz

Existem vários modelos para descrever o comportamento da luz. A maioria dos algoritmos utilizados em Sistemas de Informações Gráficas é o modelo de ondas eletromagnéticas. Neste modelo, a luz é constituída por ondas eletromagnéticas transversais que se propagam no vácuo com uma velocidade aproximada de 3.0×10^8 m/s. O comprimento de onda, λ , determina a cor que percebemos, como vimos no capítulo 7.

Uma onda eletromagnética é constituída de dois campos oscilantes perpendiculares entre si: elétrico e magnético. Ambos são perpendiculares à direção de propagação da onda. A energia da onda é proporcional ao quadrado da amplitude da onda.

Chamamos de **fluxo (de energia) luminoso** Φ (em lúmens) de um objeto a razão entre a quantidade de energia radiante que um objeto emite durante um certo intervalo de tempo. A **intensidade luminosa** (em candelas) de um objeto em uma determinada direção refere-se à razão entre o fluxo luminoso que ele emite através de um ângulo sólido cujo eixo é a direção considerada. A **luminância** ou **brilhância** I de um objeto em uma determinada direção é a razão entre a intensidade luminosa $\frac{\Phi}{\omega}$ do objeto na direção considerada e a área A_p percebida do objeto percebida pelo observador nesta direção

$$I = \frac{\Phi}{A_p \omega}$$

Observação 8.1 *Se o fluxo percebido pelo observador não for perpendicular à superfície, isto é ter em relação ao vetor normal da superfície um ângulo $\theta \neq 0$, a luminância será dada por*

$$I = \frac{\Phi}{A_p \cos \theta \omega} \quad (8.1)$$

(Ver Fig. 16.40 do livro-texto de Foley.)

Observação 8.2 A **Fotometria** trata do estudo das grandezas relativas à emissão e à recepção de **radiações luminosas (visíveis)** e da medição dessas grandezas. A **Radiometria**, por sua vez, trata do estudo das radiações visíveis ou não. Neste caso, o qualitativo “luminoso” é trocado para “energético” ou “radiante”; a unidade energética como **watts** (W), ou outra unidade usual de potência, é utilizada para medir o **fluxo radiante** no lugar de lúmens; a intensidade radiante passa a ser medida por $\frac{W}{sr}$, onde sr é em esferorradianos; e a radiação por $\frac{W}{sr\text{m}^2}$.

As propriedades elétricas do meio por onde a luz passa afetam a trajetória de propagação da luz. O campo magnético da onda afeta os elétrons no material e produz diferentes efeitos ópticos. De acordo com o movimento dos elétrons, distinguem-se duas classes de materiais:

1. dielétricos: os elétrons são bastante estáveis; portanto, afeta muito pouco a direção de propagação e desacelera a velocidade de propagação da onda e
2. condutores: há muitos elétrons livres; portanto, novas ondas eletromagnéticas podem ser geradas e emitidas.

Os **índices de refração** são utilizados para caracterizar as propriedades ópticas dos meios. O **índice de refração absoluto** de um meio é a razão entre a velocidade de propagação da luz no vácuo e a velocidade de propagação da luz no meio considerado.

A mudança dos meios de propagação, de índices de refração distintos, de um feixe luminoso resulta em fenômenos conhecidos como **reflexão** e **transmissão**. As **equações de Fresnel** descrevem estes fenômenos. Na superfície de separação de dois meios, uma percentagem de raios incidentes Φ_i são refletidos (Φ_r) e o restante é transmitido (Φ_t), dependendo do ângulo de incidência (em relação ao vetor normal da superfície no ponto) e dos índices de refração dos dois meios. As percentagens obedecem o princípio da conservação da energia, isto é

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_t.$$

A taxa de luz refletida $F_r = \frac{\Phi_r}{\Phi_i}$ e a taxa de luz transmitida $F_t = \frac{\Phi_t}{\Phi_i}$ são conhecidas, respectivamente, por **refletância de Fresnel** e **transmitância de Fresnel**. As direções destes feixes obedecem as leis de Snell-Descartes:

Reflexão : o raio incidente, o raio refletido e o vetor normal de S em P estão no mesmo plano e o ângulo de incidência θ_i e o ângulo de reflexão θ_r são iguais.

Refração : o raio incidente, o raio refratado (que atravessa a superfície de separação entre os 2 meios) e o vetor normal de S em P estão no mesmo plano e $n_i \text{sen} \theta_i = n_t \text{sen} \theta_t$, onde θ_r é o ângulo de refração e n_i e n_t os respectivos índices de refração.

Observação 8.3 *A lei de Snell-Descartes foi originalmente descoberta por Ibn Sahl no século VIII. Foi redescoberta por Willebrord Snell em 1621. Mais tarde, em 1637, num trabalho independente, René Descartes a descreveu em termos de senos e a utilizou para solucionar uma série de problemas ópticos.*

A **iluminância** (ou **aclaramento**) i (em lux ou lúmen/m²) de uma superfície é a razão entre o fluxo luminoso que sobre ela incide e a sua área. Segundo a **lei de Lambert**, a iluminância de uma **superfície lambertiana** é expressa por

$$i = I \cos \theta,$$

onde θ é o ângulo de incidência. Isso significa que, não importa o ângulo em que a superfície é observada, os raios “refletidos” pela superfície causarão a mesma percepção de brilhância/luminância e, conseqüentemente, o mesmo estímulo cromático. O sol é, por exemplo, um radiator (de luz) lambertiano.

Finalmente, a **emitância luminosa** (ou **radiância luminosa**) de uma fonte é a razão entre o fluxo luminoso que ela emite e a área da sua superfície.

8.2 Modelos de Iluminação Local

O modelo mais utilizado em Sistemas de Informações Gráficas é o modelo de decomposição dos raios incidentes em três componentes: ambiente ($I_{a,i}$), difusa ($I_{d,i}$) e especular ($I_{s,i}$). Assim, a cor (estímulo cromático devido a uma dada luminância/brilhância) I em cada ponto (x, y, z) é obtida por

$$I = k_a \sum_i I_{a,i} + k_d \sum_i I_{d,i} (\vec{N} \cdot \vec{L}_i) + k_s \sum_i I_{s,i} f_s(\vec{V}, \vec{L}_i, \vec{N}), \quad k_a, k_s, k_d \in [0, 1] \quad (8.2)$$

onde \vec{N} , \vec{L}_i e \vec{V} são, respectivamente, a direção do vetor normal, do raio incidente i e do observador em relação ao ponto da superfície. Este modelo é considerado o **modelo de iluminação de Phong**.

A distinção de raios luminosos em três parcelas decorre do fato de que no modelo de Phong somente os objetos capazes de emitir energia luminosa,

independentemente das condições luminosas do ambiente, são considerados **fontes de luz** (seção 8.4). A reflexão e a refração nestes objetos são normalmente ignoradas. Os raios refletidos por um objeto, que não seja uma fonte de luz, são classificados em dois grupos: raios provenientes dos outros objetos (I_a) e raios oriundos diretamente das fontes luminosas, ou seja interações de primeira ordem. Os raios refletidos de primeira ordem são, por sua vez, classificados em I_d (difusas) e I_s (especulares). As reflexões difusas correspondem ao comportamento de superfícies lambertianas, para as quais os raios incidentes são refletidos difusamente em todas as direções; enquanto o modelamento dos efeitos especulares, comuns em materiais condutores, considera somente os raios “espelhados” dos raios incidentes.

Observação 8.4 A componente $I_{d,i}(\vec{N} \cdot \vec{L}) = I_{d,i} \cos \theta$, onde θ é o ângulo de incidência, é a iluminância no ponto segundo a Lei de Lambert.
(Ver Fig. 16.2 do livro-texto de Foley.)

Existem várias propostas para computar o fator de atenuação f_s da componente especular \vec{R} à medida que este se afasta da direção do observador \vec{V} . Podemos citar o modelo de

Romney: $f_s = \frac{(\vec{N} \cdot \vec{L})^2}{d^4}$.

Phong: $f_s = (\vec{V} \cdot \vec{R})^n$,
sendo $\vec{R} = 2\vec{N}(\vec{N} \cdot \vec{L}) - \vec{L}$.

(Ver Figs. 16.9 do livro-texto de Foley.)

Blinn: $f_s = (\vec{V} \cdot \vec{H})^n$,
com $n = -\frac{\ln(2)}{\ln(\vec{N} \cdot \vec{H})}$ e \vec{H} o bissetor dos vetores \vec{L} e \vec{V} .

(Ver Figs. 16.12 do livro-texto de Foley.)

O escalar n é chamado **expoente de reflexão especular**.

(Ver Figs. 16.8 do livro-texto de Foley.)

Os coeficientes k_a , k_d e k_s são denominados **coeficiente de reflexão (dos raios do) ambiente**, **coeficiente de reflexão difusa** e **coeficiente de reflexão especular** do material. Embora os valores que atribuímos a estes coeficientes sejam de forma totalmente empírica, vamos tentar dar uma interpretação física a eles.

Se as superfícies forem perfeitamente polidas, estes coeficientes são similares às reflectâncias de Fresnel, definindo a percentagem dos raios incidentes que são refletidos em função do índice de refração do meio.

(Ver Figs. 16.3 – 16.5 do livro-texto de Foley.)

Quando as superfícies forem rugosas, devemos levar em consideração o fato de que quando aumenta a rugosidade, os raios de um feixe luminoso podem ser bloqueados pela própria superfície, reduzindo o fluxo luminoso visível por área. Com isso o valor destes coeficientes deve ser menor. Além disso, de acordo com a lei de Snell-Descartes, as direções dos feixes luminosos refletidos dependem da direção do vetor normal à superfície, o que reforça a dependência destes coeficientes do grau de rugosidade da superfície. Sintetizando, estes coeficientes são funções tanto da geometria da superfície quanto do índice de refração do material.

Embora possamos encontrar na literatura propostas para modelar os coeficientes de reflexão, refração e especular em função rugosidade da superfície e os coeficientes de Fresnel, as suas aplicações são ainda limitadas em vista do balanço entre a complexidade e a qualidade da imagem produzida.

(Ver Figs. 16.41–16.46 do livro-texto de Foley.)

Observação 8.5 *As reflectâncias de Fresnel podem ser variar muito para os materiais dielétricos e produzir efeitos que não podem ser ignorados quando um dos objetivos almejado é o realismo, como mostra a imagem extraída do site <http://www.rendermanacademy.com/docs/Fresnel.htm>.*



Observação 8.6 *Infelizmente, não há ainda nenhum procedimento que nos ajuda na escolha dos valores dos coeficientes k_a , k_d e k_s para obter um efeito visual específico. Uma regra muito utilizada é:*

- $k_a \approx k_d$.
- $k_d + k_s = 1$.

8.2.1 Modelo de Phong

O modelo de iluminação local mais popular para determinar a intensidade luminosa de objetos refletivos não-perfeitos como maçãs é o de Phong

$$I = k_a \sum_i I_{a,i} + f_{at} \sum_i I_i \{k_d(\vec{N} \cdot \vec{L}_i) + k_s(\vec{R} \cdot \vec{V})^n\}, \quad k_a, k_s, k_d \in [0, 1]. \quad (8.3)$$

Observação 8.7 Se a fonte de luz for uma fontes distante, o termo $\vec{N} \cdot \vec{L}$ é constante.

8.2.2 Modelo de Blinn

Um outro modelo alternativo, apropriado para casos em que ambos o observador e a fonte serem distantes, é substituir o termo $(\vec{R} \cdot \vec{V})$ por $(\vec{N} \cdot \vec{H})$

$$I = k_a \sum_i I_{a,i} + f_{at} \sum_i I_i \{k_d(\vec{N} \cdot \vec{L}_i) + k_s(\vec{N} \cdot \vec{H})^n\}. \quad k_a, k_s, k_d \in [0, 1]. \quad (8.4)$$

8.3 Modelos de Iluminação Global

Um paradigma utilizado em Sistemas de Informações Gráficas para descrever as interações entre as superfícies e fontes de luz num ambiente é o **traçado de raio**. A partir da posição do observador, um raio é propagado até a fonte de luz ou até um nível de propagação pré-estabelecido, obedecendo a lei de Snell-Descartes. A propagação do raio pode ser representado por uma árvore binária onde os nós denotam as superfícies encontradas e um dos ramos os raios refletidos e outro, raios refratados. Entendemos por um nível de propagação o percurso de um raio entre as superfícies de dois objetos. Este paradigma é conhecido como **depedente do observador**.

(Ver Figs. 16.54 e 16.55 do livro-texto de Foley.)

Uma das funções críticas na implementação de um modelo de iluminação global é a determinação de interseção entre um raio (direção de um raio luminoso ou direção do observador) e a superfície de interesse. Esforços tem sido feitos no sentido de desenvolver algoritmos de baixa complexidade:

com um plano arbitrário definido pelo vetor normal $\vec{n} = (x_n, y_n, z_n, 0)$ e por um ponto $P_0 = (x_0, y_0, z_0, 1)$ sobre o plano. Seja um raio na direção $\vec{d} = (x_d, y_d, z_d, 0)$ que sai do ponto $P_s = (x_s, y_s, z_s, 1)$. Então, o ponto $P(t_*) = P_s + t_* \vec{d}$ deve satisfazer

$$(P(t_*) - P_0) \cdot \vec{n} = \vec{n} \cdot (P_s + t_* \vec{d}) - \vec{n} \cdot P_0 = t_* \vec{n} \cdot \vec{d} - \vec{n} \cdot (P_s - P_0) = 0.$$

Segue-se que

$$t_* \vec{n} \dot{\vec{d}} = \vec{n} \dot{(P_s - P_0)}$$

e

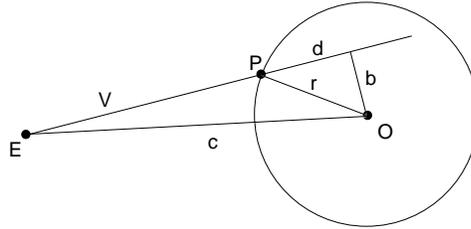
$$t_* = \frac{\vec{n} \dot{(P_s - P_0)}}{\vec{n} \dot{\vec{d}}}.$$

Portanto, para $\vec{n} \dot{\vec{d}} \neq 0$ (raio não paralelo ao plano), o raio intersecta com o plano no ponto $P = P_s + t_* \dot{\vec{d}}$ quando $t_* > 0$.

com uma esfera de raio r centrado em O , então o ponto P da sua interseção com um raio $P(t) = E + t\vec{V}$ é

$$P = E + (v - d)\vec{V},$$

onde $v = \vec{EO} \cdot \vec{V}$ e $d = \sqrt{r^2 - ((\vec{EO} \cdot \vec{EO}) - v^2)}$, se $r^2 - ((\vec{EO} \cdot \vec{EO}) - v^2) > 0$.



com uma superfície implícita em forma de $f(x, y, z) = 0$. Neste caso, determina-se as raízes da equação $f(x_s + tx_d, y_s + ty_d, z_s + tz_d) = 0$.

Outro paradigma é a **radiosidade** na qual aplica-se a Teoria de Transferência de Calor para modelar a troca de fluxo luminoso entre as superfícies, consideradas lambertianas. Ou seja, o fluxo luminoso ϕ_k (**radiosidade**) emitido por uma faceta k é igual à soma do fluxo $\phi_{E,k}$ irradiado (se a superfície k não for uma fonte luminosa, $\phi_{E,k} = 0$) e o fluxo $\phi_{H,k}$ refletido pela superfície

$$\phi_k = \phi_{E,k} + \rho\phi_{H,k} = \phi_{E,k} + \rho\phi_k F_{kk} + \sum_{j \neq k} \rho\phi_j F_{jk}, \quad (8.5)$$

O fluxo refletido é, por sua vez, uma percentagem F_{jk} dos fluxos emitidos pelas superfícies j no ambiente. O parâmetro F_{jk} é conhecido como **fator de forma** entre as áreas A_j e A_k através das quais ocorre a troca de energia.

(Ver Figs. 16.65 e 16.66 do livro-texto de Foley.)

Observação 8.8 Uma vez determinado o fluxo luminoso “irradiado” por cada objeto, é necessário determinar a luminância, ou intensidade luminosa, percebida por um observador localizado numa posição e orientação especificada. Para isso, pode-se computar essa luminância com uso da Eq. 8.1, que requer o cômputo do ângulo sólido. Existem várias aproximações para ângulos sólidos ω .



Uma das mais conhecidas é considerar a razão da área esférica subtendida pelo ângulo sólido e o quadrado do raio:

$$d\omega = \frac{dA_p}{r_0^2} = \sin\phi d\phi d\theta,$$

onde A_p é a área projetada da superfície do objeto visível pelo observador (contida no ângulo sólido), r_0 é a distância do objeto em relação ao observador e ϕ e θ as coordenadas polares da área projetada sobre a calota esférica. Por exemplo, o ângulo sólido de uma esfera é 4π .

(Ver Fig. 16.39 do livro-texto de Foley.)

8.4 Modelos de Fontes de Luz

As fontes de luz são tratadas de forma diferenciada dos objetos geométricos na síntese de imagens. Os objetos não são capazes de produzir fluxos luminosos, enquanto as fontes são emissores de raios.

Uma fonte de luz pode ser classificada em:

distante : a energia luminosa flui uniformemente no espaço numa direção específica. Neste caso, o fluxo luminoso/luminância irradiado por ela é constante.

pontual : (ou fonte puntiforme) distribui radialmente o fluxo luminoso/luminância que atenua à medida que se afasta da fonte através de um **fator de atenuação** f_{at} . As duas expressões mais usuais para computar este fator em função da distância d são

- $f_{at} = \frac{1}{d^2}$, e
- $f_{at} = \min\left(\frac{1}{c_1 + c_2 d + c_3 d^2}, 1\right)$.

spot : simula um feixe cônico ou pincel de raios luminosos apontado para uma direção específica \vec{d} com a abertura γ . O controle do decaimento da luminância I é através do **expoente da fonte spot** c

$$I \cos^c \theta \quad \theta \in [0, \gamma].$$

Como a fonte pontual, a luminância pode ser atenuada à medida que aumenta a distância do objeto em relação à fonte através de um fator de atenuação.

(Ver Figs. 16.13 – 16.16 do livro-texto de Foley.)

extensa : (ou distribuída) simula uma área de luminância. Este tipo de fonte pode gerar efeitos de penumbras ao interagir com um objeto.

(Ver Figs. 16.48 e 16.49 do livro-texto de Foley.)

8.5 Tonalização

Sendo o processo de determinação da cor em cada ponto um processo complexo, é comum em Sistemas de Informações Gráficas determinar a cor com uso da Eq. 8.2 somente em algumas amostras (usualmente os vértices) e replicá-la simplesmente para todos os pontos restantes. Este tipo de tonalização é conhecida por **tonalização constante**.

Uma segunda alternativa é interpolar linearmente as cores das amostras, determinadas pela Eq. 8.2, para obter as cores do restante dos pontos. Este procedimento é conhecido como **tonalização de Gouraud**.

(Ver Fig. 16.19 do livro-texto de Foley.)

Um dos problemas de tonalização de Gouraud é perda de pontos de brilho no meio de uma superfície. Para evitar isso, recomenda-se aumentar o número de vértices na malha que a representa.

(Ver Fig. 16.21 do livro-texto de Foley.)

Um segundo tipo de interpolação utilizada é a interpolação dos vetores normais de alguns pontos escolhidos e determinar a brilhância do resto dos pontos com uso destes vetores normais. Chamamos este tipo de interpolação **tonalização de Phong**.

(Ver Fig. 16.20 do livro-texto de Foley.)

A tonalização de Phong pode falhar quando a superfície não é suave, com descontinuidades nos vetores normais.

(Ver Fig. 16.24 do livro-texto de Foley.)