

Capítulo 11

Textura

Embora seja intuitivamente fácil reconhecer texturas numa imagem, é difícil definir uma textura de forma precisa. Além de ser um termo utilizado com conotação ligeiramente diferenciada em distintas áreas relacionadas com sistemas gráficos, a definição de uma textura está intimamente relacionada com a escala dos objetos visíveis numa imagem. Algumas definições de textura encontradas na literatura são:

- variação local da luminância entre os *pixels* dentro de uma região pequena da imagem;
- medidas das propriedades da superfície de um objeto;
- consiste de um conjunto de elementos mutuamente relacionados;
- consiste de detalhes de uma superfície que não “compensa” ser modelados com rigor geométrico.

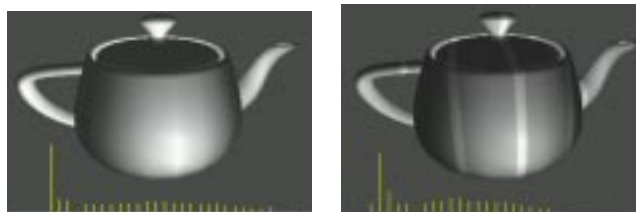
Considerando a textura como um conjunto de elementos mutuamente relacionados, chamamos os elementos constituintes de **primitivas de textura** ou **elementos de textura** – *texels*. Cada *texel*, por sua vez, é definido por um grupo de *pixels* contíguos com certas propriedades geométricas e/ou de luminância que podem ser interpretadas como rugosidade e/ou dos padrões de uma superfície. Uma outra forma de ver a textura é considerá-la como um conjunto de elementos que modificam a aparência da superfície de um objeto, através das alterações diretas nas brilhâncias/luminâncias dos *pixels* ou nos vetores normais da superfície.

Sem um consenso na sua definição, a textura é, porém, considerada consensualmente um elemento importante na síntese de imagens foto-realistas com relativo baixo custo computacional.

11.1 Propriedades de Textura

Olhando a textura como um grupo de *pixels* com uma certa distribuição $p(x)$ de luminâncias, podemos utilizar três classes de medidas para caracterizá-la ou descrevê-la:

Estatísticas : medidas estatísticas da distribuição das brilhâncias dos *pixels* de uma textura. Observe que as duas imagens abaixo, uma com textura e outra sem textura, apresentam diferentes distribuições no histograma.



Estruturais : medidas geométricas dos *texels* quando for possível identificar uma certa regularidade na repetição dos padrões como ilustram as seguintes imagens obtidas do *site* <http://textures.forrest.cz/>.

Exercício 11.1 *Como você descreveria o texel da primeira textura da sequência acima?*

Espectrais : propriedades espectrais, como a periodicidade dos sinais e máximos e mínimos no espectro de frequência da imagem. Muitas vezes, aplicando filtros lineares sobre imagens, consegue-se identificar certas estruturas locais, como ilustra a seguinte sequência de imagens na qual *pixels* de intensidade mais clara tem uma resposta mais “forte”.



No caso de imagens monocromáticas, as medidas estatísticas invariantes às transformações lineares da imagem podem ser levantadas com uso do

histograma de níveis de cinza de uma imagem (função de distribuição de frequências $p(x_i)$ de cada valor x_i do conjunto de L luminâncias/brilhâncias) ou de uma região, como a luminância média

$$m = \sum_{i=1}^L x_i p(x_i).$$

O k -ésimo momento dos valores de luminância em torno da média é dado por

$$\mu_n = \sum_{i=1}^L (x_i - m)^k p(x_i).$$

Particularmente, o segundo momento

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^L (x_i - m)^2 p(x_i)$$

é muito utilizado para medir contraste/homogeneidade de nível de cinza como na função

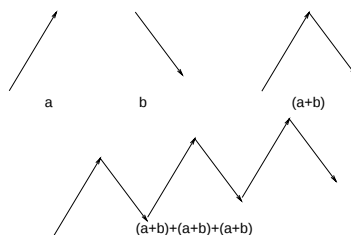
$$R = 1 - \frac{1}{1 + \sigma^2}.$$

O terceiro momento é uma medida de anti-simetria do histograma e o quarto momento, uma medida de seu achatamento ou planura.

Observação 11.1 *É possível visualizar as medidas estatísticas em “cada pixel” i , aplicando as mediadas acima para um grupo de $n \times n$ pixels centrado em i .*

Observação 11.2 *Foi mostrado que com estas medidas estatísticas é possível segmentar as regiões florestais das regiões urbanas de uma imagem aérea, como mostra no site <http://www.aerialimages.com/>.*

As medidas estruturais são dadas em função de um conjunto de **descritores relacionais** dependentes de aplicação. Os descritores relacionais definem, de fato, uma linguagem que estabelece certas regras sintáticas para concatenação/combinção de um conjunto de elementos primitivos (usualmente, figuras geométricas). Por exemplo, a partir de dois segmentos a e b e uma operação definida entre eles, pode-se construir figuras geométricas complexas.



As medidas espectrais, por sua vez, revelam a direção dos padrões e a periodicidade dos padrões fundamentais de uma textura. Estas características são geralmente difíceis de serem reveladas com as medidas estatísticas e estruturais. Estas medidas podem ser utilizadas complementarmente para modelar uma textura. Por exemplo, utilizar as medidas espectrais para descrever padrões fundamentais e as medidas estatísticas para caracterizar os elementos não-periódicos.

Observação 11.3 *Espera-se que estas propriedades possam se evoluir em modelos de textura, a partir dos quais possamos sintetizá-la automaticamente.*

11.2 Textura Sintética

Uma textura pode ser uma imagem adquirida por um dispositivo de captura (como câmaras fotográficas, vídeos e escaneadores) ou gerada proceduralmente por computadores. Devido à variedade das texturas (até porque não há consenso sobre o que seja uma textura), encontram-se na literatura propostas para modelagem de texturas para uma específica finalidade. Para facilitar a modelagem de texturas no domínio espacial, é introduzido o conceito de **espaço de textura** definido por um **sistema de coordenadas (homogêneas) de textura**, usualmente s , t , p e q . Neste espaço os elementos de textura são passíveis a todas as transformações que vimos nos Capítulos 4 e 5.

Observação 11.4 *Em OpenGL as coordenadas de textura efetivamente utilizadas são as resultantes da transformação das coordenadas definidas pela aplicação ou das geradas internamente através da função especificada pelo comando `glTexGen` pela matrix no topo da pilha de matrizes de textura da unidade de textura corrente. As matrizes de transformação das coordenadas de textura podem ser manipuladas depois de chavear o contexto para o modo `GL_TEXTURE` com uso do comando `glMatrixMode(GL_TEXTURE)`.*

Nesta seção apresentamos algumas formas para obter texturas comumente encontradas na literatura.

Texturas de padrões regulares : podem ser obtidas através das repetições de um padrão 2D gerado sinteticamente ou obtido por um dispositivo de aquisição.

Exercício 11.2 *Qual seria o texel da “textura” de uma folha quadriculada?*

Observação 11.5 *Em OpenGL há uma memória de textura (espaço de textura) onde são armazenados os valores de pixels que definem uma textura (não gerada proceduralmente). Para definir uma imagem como uma textura de OpenGL, deve-se criar um objeto de textura com o comando `glBindTexture` e especificar os dados da imagem através do comando `glTexImage*D`. Este objeto de textura pode ser acessado ao longo do programa de aplicação, desde que seja conectado, também pelo comando `glBindTexture`, a uma unidade de textura ativa, ativada pelo comando `glActiveTexture`. Para especificar a forma como um objeto de textura deve ser processado (com repetição ou sem repetição, com uso de níveis de detalhes – mipmap), deve-se utilizar o comando `glTexParameter`.*

Texturas projetivas : São obtidas com uso das coordenadas homogêneas do sistema de referência de textura, dividindo as coordenadas s , t e p pela quarta coordenada homogênea q .

Texturas de turbulência : conhecidas também como **texturas procedurais** por serem geradas através de uma **função de ruídos** ou como **texturas sólidas** por serem geralmente definidas no espaço de coordenadas 3D. A idéia básica consiste em definir um reticulado de valores aleatoriamente distribuídos (o espaçamento dos nós do reticulado é conhecido como frequência da função) e aplicar uma interpolação dos valores dos três nós mais próximos para obter o valor de qualquer ponto no espaço de textura. Os valores em cada ponto interpolado pode ainda ser alterado por uma função de potência ou trigonométrica ou de turbulência para obter efeitos especiais (amplitude da função de turbulência). Devido à natureza aleatória do domínio dos valores, consegue-se através desta técnica simular aparências dos fenômenos naturais como nuvem, fogo, madeira e mármore.

Observação 11.6 *Variantes das funções de ruídos com uso de funções trigonométricas são também muito utilizadas. Embora menos versáteis, elas conseguem produzir efeitos interessantes, como mostra o seguinte código em C:*

```
wood_grain(s,t,p,R,G,B)
double s, t, p;
double R, G, B;
{
    double radius, angle;
    int grain;

    radius = sqrt(s*s+t*t);
    if p==0 then angle = pi / 2
        else angle = arctan(s,p);
    radius = radius + 2*sin(20*angle+t/150);
        /* fator de multiplicidade = 2 */
        /* velocidade de rotacao de ondluacoes = 1/150 */
    grain = round(radius) mod 60;
    if grain < 40 then {
        R = R_CLARO; G = G_CLARO; B = B_CLARO;
    } else {
        R = R_ESCURO; G= G_ESCURO; B = B_ESCURO;
    }
}
```

Observação 11.7 *No site <http://www.sgi.com/software/opengl/advanced98/notes/node73.html> há uma série de dicas para gerar texturas procedurais com uso do OpenGL.*

Texturas de rugosidade : dão aparência rugosa para as superfícies. A melhor forma de criar esta aparência é perturbar aleatoriamente os vetores normais N_v em cada ponto da superfície $S: (u, v) \rightarrow R^3$ e utilizar os novos vetores normais N_n no cômputo da luminância em cada ponto. Assim, a textura de rugosidade é tal que adiciona a cada ponto de S um ruído $b(u, v)$ na direção do vetor normal N_v . Com isso, o novo vetor N_n é dado aproximadamente por

$$N_n \approx N_v + b_v(S_u \times N_v) + b_u(N_v \times S_v)$$

A aparência da rugosidade depende da função de ruído escolhido.

Observação 11.8 *Na literatura a aplicação desta textura é conhecida como bump mapping. Vale comentar que as derivadas podem ser aproximadas por diferenças finitas na implementação.*

Exercício 11.3 *Por que perturbações aleatórias nos vetores normais produzem efeitos visuais de rugosidade para os modelos de iluminação Phong?*

Textura de Ambiente : é uma imagem de abertura de 360° de um ambiente que pode ser adquirida com uma lente do tipo de olho de peixe. Esta textura permite criar efeitos de superfícies perfeitamente refletivas, como a superfície de uma bola de metal.

Textura de Reflexão : é gerada uma imagem com o observador na posição espelhada em relação ao plano de reflexão. Esta textura, ao ser combinada apropriadamente com a imagem, cria efeitos equivalentes a um chão bem lustrado ou a um espelho.

(Ver Fig. 16.38 do livro-texto Foley.)

Textura de Sombra : é gerada uma imagem cujos *pixels* tem a brilhância proporcional à visibilidade às fontes luminosas, isto é, os pontos visíveis pelas fontes são mais claros e os pontos não visíveis mais escuros. Esta textura, ao ser adicionada à imagem, cria efeitos de sombras.

(Ver Fig. 16.33 do livro-texto Foley.)

Observação 11.9 *Recomendamos as seguintes páginas onde são apresentados os detalhes de implementação de algumas texturas:*

- <http://mrl.nyu.edu/~perlin/doc/oscar.html>;
- <http://www.cns.bu.edu/~lavanya/Graphics/cs580/p4/web-page/p4.html>;
- <http://cs-people.bu.edu/jisidoro/proj/syntex/txdemo.html>;
- http://www.wowwebdesigns.com/power_guides/jean_cloth/e
- http://www.aliaswavefront.com/en/Tmpl/Maya/html/index.jhtml?page=/en/Community/Download/shaders/metals/metal_grid/metal_grid_m.html.

Observação 11.10 Em OpenGL as coordenadas de textura efetivamente utilizadas são as resultantes da transformação das coordenadas definidas pela aplicação ou das geradas internamente através da função especificada pelo comando `glTexGen` pela matrix no topo da pilha de matrizes de textura da unidade de textura corrente. As matrizes de transformação das coordenadas de textura podem ser manipuladas depois de chavear o contexto para o modo `GL_TEXTURE` com uso do comando `glMatrixMode(GL_TEXTURE)`.

11.3 Texturização

Entendemos aqui por **texturização** a transformação T associada a uma textura que se aplica nas propriedades geométricas, em especial nos vetores normais às superfícies, e/ou nas lumiancias/brilhâncias dos *pixels* para obter detalhes nas superfícies de interesse. Considerando que as texturas são dadas em sistema de coordenadas de textura, o processo de texturização requer que

1. seja estabelecida a correspondência entre os *texels* do domínio de textura e os *pixels* do domínio espacial da imagem – daí o uso do termo *texture map* para denominar o processo de texturização; e
2. seja indicado como a a textura deve afetar os *pixels*.

11.3.1 Mapeamento de Textura

Essencialmente existem duas formas para fazer a correspondência entre os *texels* no domínio de textura e os pontos sobre a superfície de interesse:

- *texture scanning*: do domínio de textura $([s/q \ t/q \ p/q]^t)$ para a superfície do objeto $([x \ y \ z]^t)$ antes da projeção desta superfície num plano uv e
- *pixel-order scanning*: do domínio espacial de *pixels* $([u \ v]^t)$ para a superfície do objeto $([x \ y \ z]^t)$ para então obter o ponto correspondente no domínio de textura $([s/q \ t/q \ p/q]^t)$.

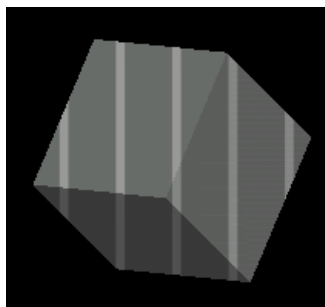
(Ver Fig. 16.26 do livro-texto do Foley.)

As funções de correspondência mais conhecidas são:

Funções Lineares : Cada ponto $[s \ t \ r \ q]^t$ do espaço de textura é relacionado com um ponto $[x \ y \ z \ w]^t$ por uma função linear, isto é:

$$\begin{aligned}
 s &= a_{00}x + a_{01}y + a_{02}z + a_{03}w \\
 t &= a_{10}x + a_{11}y + a_{12}z + a_{13}w \\
 r &= a_{20}x + a_{21}y + a_{22}z + a_{23}w \\
 q &= a_{30}x + a_{31}y + a_{32}z + a_{33}w
 \end{aligned}$$

Exercício 11.4 Dada uma textura constituída de 10 pixels alinhados horizontalmente, sendo os 7 primeiros pixels vermelhos e 3 últimos azuis. Defina uma função que mapeia esta textura sobre um cubo como ilustra a seguinte imagem:

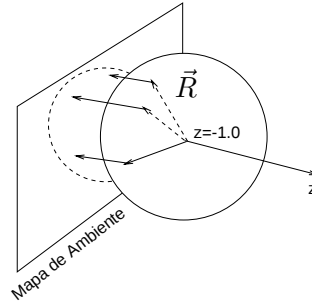


Função Cilíndrica : obtém-se um ponto do espaço de textura definido no domínio $s \in [0, 2\pi]$ e $t \in [0, 1]$ através da relação

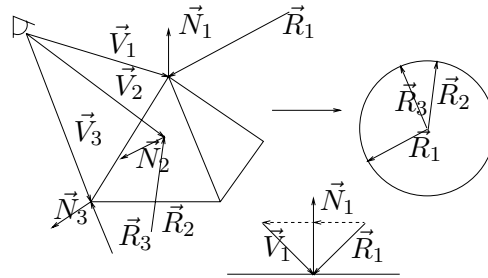
$$\begin{aligned}
 s &= \arctg\left(\frac{y}{x}\right) \\
 t &= z \\
 r &= 0 \\
 q &= 1
 \end{aligned}$$

Função de mapeamento (de textura) de ambiente : relaciona a direção de reflexão de um raio luminoso normalizada no ponto $[x \ y \ z \ 1]^t$ com um ponto do espaço de textura $[s \ t]^t$ definido no domínio $s, t \in [0, 1]$ através da relação

$$\begin{aligned}
 s &= \frac{x}{2\sqrt{x^2 + y^2 + (z+1)^2}} + \frac{1}{2} \\
 t &= \frac{y}{2\sqrt{x^2 + y^2 + (z+1)^2}} + \frac{1}{2} \\
 r &= 0 \\
 q &= 1
 \end{aligned}$$



Esta relação é derivada ao aplicarmos os vetores de direção (normalizadas) dos raios refletores sobre uma esfera unitária centrada em $[0 \ 0 \ -1]^t$, de forma que a origem do raio esteja no centro da esfera.



Exercício 11.5 O vetor normal em $[x \ y \ z \ 1]^t$ sobre uma esfera centrada na origem é $[x \ y \ z \ 0]^t$. Qual é o vetor normal em cada ponto sobre uma esfera centrada em $[0 \ 0 \ -1]^t$?

A função de mapeamento de ambiente é muito utilizada para o conhecido *environment mapping* que aplica uma textura de ambiente sobre um objeto (ver <http://www.opengl.org/developers/code/sig99/advanced99/notes/node174.tml>). Neste caso, as coordenadas (x, y, z) definem o vetor do raio incidente que é especularmente refletido, $\vec{R}$. Tal vetor pode ser obtido através da seguinte relação

$$\vec{R} = \vec{V} - 2(\vec{N} \cdot \vec{V})\vec{N},$$

onde $\vec{V}$ e $\vec{N}$ são vetores normalizados da direção do observador em relação ao ponto da superfície e do vetor normal no ponto, respectivamente.

Observação 11.11 Determine as coordenadas dos pontos do espaço de textura de ambiente correspondentes aos vértices de um cubo unitário

com as faces paralelas aos planos xy , yz e xz entrado em $z = -5$ com o observador na origem e o eixo óptico coincidente com o eixo z .

Exercício 11.6 A textura de ambiente para environment mapping é dependente do observador? Justifique.

Observação 11.12 Há outras funções para emular os efeitos luminosos sobre superfícies altamente espaciais.

Função Paramétrica : associação direta entre os dois parâmetros da representação paramétrica de uma superfície de interesse com as coordenadas s e t do espaço de textura.

Se o espaço da textura for discreto como o espaço dos *pixels*, é difícil obter uma correspondência um-a-um. Podem surgir problemas de buracos e sobreposição. Neste caso, podemos aplicar a técnica de interpolação ou filtragem para contornar estes problemas.

Observação 11.13 Em OpenGL pode-se associar explicitamente para cada vértice um ponto do espaço de textura através da função `glTexCoord` ou então utilizar correspondências existentes para gerar automaticamente as coordenadas de textura a partir das coordenadas do espaço de objeto com o uso da função `glTexGen`). Funções lineares e esféricas são suportadas desde a primeira versão do OpenGL.

11.3.2 Função Modificadora

Existem várias formas de uma textura afetar os valores gráficos e/ou geométricos de um *pixel*. A modificação varia entre uma simples substituição conveniente dos valores dos *pixels* pelos dos *texels* (conhecida como a técnica de **decals**) e alterações nas propriedades geométricas da superfície de interesse como *bump mapping*. Existem ainda técnicas que utilizam o conteúdo da textura para **modular** a luminância/brilância dos *pixels* (isto é, multiplicar a luminância pelo valor do *texel* correspondente) e técnicas que utilizam os valores dos *texels* para **interpolar** cada valor dos *pixels* com um valor pré-estabelecido.

Observação 11.14 Em OpenGL o modo como os valores do espaço de textura devem ser aplicados sobre as primitivas gráficas é controlado pelos parâmetros do comando `glTexEnv`.

11.4 Pirâmide de Texturas

A análise de uma textura ou síntese de uma imagem com uso de texturas pode ser mais eficiente se utilizarmos um conjunto de texturas de níveis de resolução monotonicamente decrescente, de tal sorte que a textura de nível de resolução $i - 1$ é o resultado da filtragem e subamostragem da textura de nível de resolução i . Tipicamente, cada nível de textura é a metade do tamanho do nível anterior. Daí o nome sugestivo de **pirâmide** de texturas.

Aparentemente redundante, uma vez que cada nível pode ser obtido através da filtragem do nível anterior e, portanto todos os níveis podem ser obtidos, de forma recorrente, da textura original, a pirâmide pode otimizar o processamento. No caso da análise, ao invés de trabalhar com a textura original, de melhor resolução, é suficiente processar apenas o nível que revela as propriedades desejadas. E na síntese de imagens, pode-se evitar filtra-gens e subamostragens adicionais quando ocorrem correspondência m a n de *texels* para *pixels* com $m \gg n$,

Observação 11.15 *A técnica de síntese de textura que faz uso da pirâmide de texturas é conhecida como mipmapping. A palavra Mip é acrônimo de multum in parvo.*

(Ver Fig. 17.10 do livro-texto do Foley.)