

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

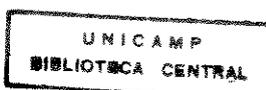
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

## Síntese de Efeitos Fotográficos em Computação de Imagens

autor: Jorge Alberto Diz

orientador: prof. Dr. Léo Pini Magalhães

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas, para preenchimento dos pré-requisitos parciais para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.



30 de Maio de 1995

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Jorge Alberto Diz e aprovada pela Comissão Julgadora em 30/05/95.

L. P. Magalhães  
Orientador

BC  
DA:  
AMP  
Es.  
C/ 27059  
667196  
D X  
R\$ 11,00  
103196

CM-00085600-0

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

D648s Diz, Jorge Alberto  
Síntese de efeitos fotográficos em computação de  
imagens / Jorge Alberto Diz.--Campinas, SP: [s.n.], 1995.

Orientador: Léo Pini Magalhães.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica.

1. Computação gráfica. 2. Fotografia.  
3. Processamento de imagens. I. Magalhães, Léo Pini.  
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Elétrica. III. Título.

# Abstract

Photography, like other visual communication media, allows for manipulations that extend the repertoire of its expressive language, in order to surprise or mislead the viewer. These manipulations are often called "special effects".

The production of synthetic images, using a computer, is a fairly recent visual communication medium subject to a sustained technological development, that may, with varying degrees of success, imitate the languages of more traditional media. The special effects techniques previously applied in those media may provide the Computer Graphics community with useful elements to broaden the expressive range available to them, not only through the imitation of other media as well as in the search for a characteristic visual identity for synthetic imaging.

The present work discusses the inclusion of some classes of effects in an image computing system. We concentrate on in-camera special effects, which are obtained during film exposition. For this, we take advantage of techniques originally developed in the area of Realistic Image Synthesis, mainly the ones related to Stochastic Ray Tracing. We propose the adaptation of these techniques for producing special effects.

Other kinds of image manipulation are done after exposition, by laboratory processes, composition and other post-processing techniques. The use of Digital Image Processing techniques to emulate those used by photographers and artists is also discussed.

We believe this dissertation may contribute to lessen the scarcity of academic publications on the subject, despite the availability of special effects resources in commercially available implementations.

# Resumo

A Fotografia, assim como os outros meios de comunicação visual, admite manipulações que estendem o repertório da linguagem própria do meio de maneira a iludir e/ou surpreender o espectador. Estas são chamadas de "efeitos especiais".

A produção de imagens sintéticas utilizando computadores é um meio bastante recente, em avanço tecnológico constante e que permite imitar, com graus diversos de sucesso, a linguagem visual de meios mais tradicionais. As técnicas de efeitos especiais já aplicadas em meios tradicionais podem prover o usuário de Computação Gráfica de elementos úteis para aumentar seu leque expressivo, não só na imitação de outros meios como na busca de uma identidade visual própria de imagens sintéticas.

Este trabalho estuda como incluir algumas classes de efeitos especiais, utilizados em Fotografia, em um sistema de Computação de Imagens. Tratamos principalmente os efeitos obtidos por manipulações da câmera no momento da exposição do filme sensível. Aproveitamos, para isto, as técnicas originalmente desenvolvidas na área de Síntese de Imagens Realistas, principalmente as derivadas de *Ray Tracing* Estocástico. Propomos aqui a adaptação dessas técnicas para a confecção de efeitos especiais.

Outros tipos de manipulação da imagem são realizados depois da exposição, por meio de processos de laboratório, composição e outras técnicas de pós-produção. Discutimos o uso de técnicas de Processamento Digital de Imagens que emulam aquelas utilizadas por fotógrafos e artistas plásticos.

Creemos que esta dissertação pode contribuir para amenizar a escassez de trabalhos acadêmicos sobre o assunto, a qual ocorre apesar de uma variedade de recursos de efeitos especiais em implementações disponíveis comercialmente.

## Agradecimentos

a Jorge e Evi, meus pais, que me apoiaram;

a Alzira, minha companheira, que não deixou de acreditar que este dia chegaria;

a Léo, meu orientador, que confiou no meu trabalho;

aos amigos que me alentaram;

à FAPESP, que financiou esta pesquisa;

Este trabalho contou com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), que financiou a pesquisa através de uma Bolsa de Mestrado (processo 89/3349-3).

# Índice

<b>Abstract</b>	<b>i</b>
<b>Resumo</b>	<b>ii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 O que é efeito especial ? . . . . .	1
1.2 Efeitos dependentes da modelagem . . . . .	3
1.3 Efeitos dependentes da visualização . . . . .	4
1.4 Efeitos de pós-processamento . . . . .	4
1.5 Escopo e organização da dissertação . . . . .	5
<b>2 Efeitos Especiais nos Meios Tradicionais</b>	<b>7</b>
2.1 Introdução. . . . .	7
2.2 Efeitos Dependentes da Visualização em Fotografia. . . . .	8
2.2.1 Simulação de câmeras fotográficas comuns. . . . .	9
2.2.2 Simulação de câmeras e objetivas especiais. . . . .	12
2.2.3 Filtros de cromaticidade. . . . .	19
2.2.4 Filtros e acoplamentos especiais. . . . .	24
2.2.5 Efeitos de iluminação. . . . .	33
2.3 Efeitos de pós-processamento em Fotografia. . . . .	36
2.3.1 Efeitos de alteração de imagem em laboratório. . . . .	36
2.3.2 Composição de Imagens. . . . .	42
2.4 Efeitos de pós-processamento em Vídeo. . . . .	43
2.4.1 Efeitos de transição entre cenas. . . . .	43
2.4.2 Composição de sinais de vídeo. . . . .	45
2.4.3 Efeitos de temporização. . . . .	45
2.4.4 Deformação de imagens. . . . .	45
2.4.5 Tratamento local de imagens. . . . .	46
2.4.6 Simulação de efeitos de vídeo. . . . .	47

<b>3</b>	<b>Teoria de suporte à geração de efeitos visuais</b>	<b>48</b>
3.1	Introdução. . . . .	48
3.2	Síntese de imagens realistas. . . . .	49
3.3	Abordagens teóricas da função de síntese por <i>ray tracing</i> . . . . .	51
3.3.1	Processamento de Sinais. . . . .	52
3.3.2	Estimativa Estatística. . . . .	54
3.3.3	Integração Numérica. . . . .	55
3.3.4	Fenômenos de Transporte . . . . .	56
3.4	O processo de amostragem no <i>ray tracing</i> . . . . .	58
3.5	Classificação de técnicas de amostragem. . . . .	61
3.6	Critérios de refinamento da amostragem. . . . .	63
3.6.1	Critérios do espaço da imagem. . . . .	63
3.6.2	Critérios do espaço dos objetos e textura. . . . .	64
3.7	Padrões básicos de amostragem regular. . . . .	66
3.7.1	Ortogonal. . . . .	66
3.7.2	Hexagonal. . . . .	66
3.7.3	Quincunx. . . . .	67
3.8	Padrões básicos de amostragem estocástica. . . . .	67
3.8.1	Poisson . . . . .	68
3.8.2	Disco de Poisson ( <i>Poisson-disk</i> ). . . . .	68
3.8.3	Tiro de dardos ( <i>dart-throwing</i> ). . . . .	69
3.8.4	Difusão de Pontos. . . . .	69
3.8.5	Seqüencial de disco de Poisson. . . . .	70
3.8.6	Estratificada. . . . .	70
3.8.7	Estratificada não correlacionada. . . . .	71
3.8.8	N-torres ( <i>N-Rook</i> ). . . . .	71
3.9	Problemas na amostragem discreta por pontos. . . . .	72
<b>4</b>	<b>Especificação e implementação dos efeitos.</b>	<b>74</b>
4.1	Introdução: . . . . .	74
4.2	Fases da Simulação Fotográfica. . . . .	76
4.2.1	Escolha do ponto no filme sensível e tempo da amostra. . . . .	76
4.2.2	Cálculo do raio primário. . . . .	77
4.2.3	Geometria do obturador. . . . .	78
4.2.4	Sistema óptico da objetiva. . . . .	79
4.2.5	Suplementos na frente da objetiva. . . . .	80
4.2.6	Iluminação de curta duração. . . . .	82
4.2.7	Modelagem temporal da cena. . . . .	82
4.2.8	Revelação e tratamento do negativo. . . . .	83
4.2.9	Cópia e tratamento da cópia em papel. . . . .	83
4.2.10	Adaptação para o dispositivo de saída. . . . .	84
4.3	Esquema do Algoritmo de Simulação. . . . .	85
4.4	Implementação . . . . .	86
4.4.1	Efeito de <i>zooming</i> . . . . .	87

---

<b>5</b>	<b>Proposta de algoritmo de síntese</b>	<b>92</b>
5.1	Introdução . . . . .	92
5.2	A dependência do pixel . . . . .	93
5.3	Amostragem e reamostragem da função de síntese . . . . .	93
5.4	Uma proposta de representação para a imagem latente. . . . .	97
5.5	Poda da árvore binária . . . . .	100
5.6	O processo de amostragem . . . . .	101
5.7	Reamostragem . . . . .	102
<b>6</b>	<b>Conclusões e trabalhos futuros</b>	<b>103</b>
6.1	Histórico . . . . .	103
6.2	Resultados . . . . .	104
6.3	Trabalhos futuros . . . . .	105
	<b>Bibliografia</b>	<b>107</b>

## Lista de Figuras

4.1	Observador fixo . . . . .	88
4.2	Observador em movimento: efeito de <i>zooming</i> . . . . .	89

# Lista de Tabelas

3.1	Abordagens teóricas para a síntese de imagens . . . . .	51
-----	---	----

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 O que é efeito especial ?

Em grande parte da produção de material visual são utilizadas técnicas que procuram surpreender o espectador através de recursos adicionais àqueles ditos "normais" do próprio meio de comunicação visual, seja ele qual for. Assim, podemos considerar como "efeito especial" uma técnica vista como inusitada para aquele meio.

O significado da expressão "efeito especial" varia de acordo com o veículo. Em Fotografia, refere-se ao uso de objetivas com distâncias focais não usuais, uso de filtros, exposição através de anteparos, transposição de filme, múltipla exposição, borrão de movimento proposital, iluminação não usual, composição de imagens por projeção e todo tipo de truques de laboratório (ex: solarização).

Em outras artes visuais, similares à Fotografia, há também técnicas que são consideradas efeitos especiais. Em Cinematografia, além daqueles efeitos comuns à fotografia, são considerados efeitos especiais: o uso de animação em 2 e 3 dimensões, confecção de maque-

tes e miniaturas, composição de cenas por máscaras (*matte*s) ou projeção traseira, efeitos especiais mecânicos (pirotecnia, neve, etc.) e computação gráfica (cf. [Imes 84], [Smith 86]).

Já em Vídeo, é aproveitada a característica eletrônica do meio para criar diversos efeitos, a maioria deles envolvendo algum tipo de processamento digital de imagens, como posterização, mosaico, solarização e também recursos para a passagem entre cenas (*fade-in*, *fade-out*). As imagens podem também ser deformadas por dispositivos de *warping* (deformação contínua em 2-D) e *ADO* (processamento de imagens 2-D para sugerir tridimensionalidade).

A Síntese de Imagens tridimensionais utilizando computadores constitui-se em uma espécie de fotografia virtual. Neste caso, é mais difícil estabelecer uma distinção entre o que seria ou não um efeito especial, pois o próprio uso de computação gráfica, no contexto de formas de produção visual pré-existentes, é considerado uma ferramenta para gerar efeitos especiais. Contudo, existe até certo ponto uma linguagem visual particular do meio, na qual os objetos são "exatos", "matemáticos", "irreais". Ou, melhor, não atingiram um grau de realismo que permita confundí-los com imagens de cenas reais. Assim, as técnicas que visam o melhoramento do realismo, incluindo as simulações de profundidade de campo, translucência, penumbra, borrão de movimento, textura e diversos fenômenos naturais podem ser consideradas em um sentido amplo como efeitos especiais, por tratar-se de uma transgressão da linguagem convencional do meio. De acordo com esta definição, porém, a diferenciação do que seria ou não efeito especial mudaria ao compasso do estado da arte, cujo avanço é particularmente rápido no caso desta tecnologia.

O presente estudo pretende incorporar, em um sistema de síntese de imagens,

técnicas de efeitos especiais nos meios de produção visual similares à Fotografia. Para limitar o escopo do trabalho, faz-se necessária uma classificação do conjunto de efeitos destes meios.

Assim, podemos considerar basicamente três classes de efeitos visuais:

- Classe 1: Efeitos dependentes da modelagem;
- Classe 2: Efeitos dependentes da visualização;
- Classe 3: Efeitos de pós-processamento.

A expressão Computação Gráfica, neste trabalho, designa sistemas que incluem tanto a síntese como o processamento de imagens digitais por meios computacionais. Síntese refere-se à geração de imagens a partir da descrição de um mundo virtual, que existe apenas enquanto modelo abstrato. Por processamento entende-se a manipulação de imagens digitais, sejam estas sintéticas ou captadas do mundo real.

## 1.2 Efeitos dependentes da modelagem

Em Cinema e Vídeo, esta classe de efeitos corresponde aos que são obtidos por meio de elementos mecânicos (deformação de objetos de borracha, tanques de água colorida para simulação de nuvens) ou químicos, como as simulações de chuva, neve ou pirotecnia.

Para a simulação deste tipo de efeito em Síntese de Imagens, é necessário alterar a modelagem da cena tratada. É efetuada a simulação de fenômenos naturais, baseada em métodos de modelagem não convencionais, tais como sistemas de partículas, funções potenciais e de densidade (para *soft objects*). Dentro daqueles que podemos considerar efeitos próprios do meio, e que são tratados por modelagem, podemos incluir o tratamento de textura

---

e o uso de métodos estocásticos para modelagem de terreno, ondas na água e simulação de crescimento de plantas.

### 1.3 Efeitos dependentes da visualização

Incluem aqueles efeitos gerados por meio de artifícios ópticos, tais como a alteração dos parâmetros da câmera (diafragma, velocidade, distância focal), de forma a obter um efeito não usual, o uso de objetivas especiais ou a inclusão de filtros ou anteparos com o intuito de alterar a imagem no momento da exposição do meio de registro (filme ou fita magnética). Na terminologia de Cinema, denominam-se *in-camera effects*.

Em síntese de imagens, estes efeitos corresponderiam à simulação dos elementos ópticos para incluir profundidade de campo e borrão de movimento e o aperfeiçoamento do modelo de iluminação para incluir as alterações produzidas por filtros ou anteparos. Alternativamente, algumas técnicas de pós-processamento (classe 3) podem ser usadas para simular filtros de difração ou de estrela.

### 1.4 Efeitos de pós-processamento

Alguns deles correspondem às técnicas utilizadas para compor imagens obtidas em mais de uma exposição. Em muitos casos, estes efeitos procuram iludir o espectador de modo que perceba a composição apenas como um registro do mundo real e não para causar estranheza. Para sua confecção podem ser utilizadas máscaras, projeção traseira, *sandwiching* ou dispositivos eletrônicos do tipo *chroma-key* (no caso do vídeo). Outro tipo de efeito obtido em laboratório (ou pós-produção em vídeo) inclui a alteração das propriedades da imagem

plana por meio de solarização ou alteração das suas cores.

Em Computação Gráfica, a simulação destes efeitos envolve técnicas de Processamento Digital de Imagens e também o uso de sistemas de síntese adaptativos, onde as imagens de cada objeto da cena podem ser geradas por métodos diferentes e compostas utilizando informações de buffers adicionais, que permitem inclusive o efeito de translucência (imagem fantasma) ([Duff 85]).

## 1.5 Escopo e organização da dissertação

Este trabalho abrange principalmente os efeitos da classe (2), estudando em menor medida aqueles da classe (3). Não tratamos de assuntos referentes à modelagem de objetos, limitando desta maneira o escopo do trabalho. A exclusão dos efeitos dependentes da modelagem foi motivada pela não afinidade com o plano de trabalho original e pelo desenvolvimento de outra dissertação dentro de nosso grupo visando a modelagem por partículas.

Dividimos a dissertação em seis capítulos, cujo conteúdo discutimos brevemente a seguir. Assim, o presente capítulo descreve uma classificação de efeitos visuais e delimita o escopo desta pesquisa.

No capítulo 2, cada efeito é explicado quanto a seu resultado e sua confecção por meios convencionais. Depois da descrição de cada efeito, são indicadas as técnicas possíveis para sua simulação em um ambiente de Síntese e Processamento de Imagens por computador.

O capítulo 3 trata do embasamento teórico necessário à compreensão dos problemas envolvidos na geração de efeitos visuais. Quatro paradigmas subjacentes à teoria apresentada na literatura de Síntese de Imagens são apresentados. É dada particular atenção aos processos

---

de amostragem que permeiam os algoritmos do tipo *ray tracing*, pois a modelagem dos efeitos visuais é proposta aqui em termos daqueles processos.

A especificação da simulação dos efeitos visuais, modelada a partir do processo fotográfico, é tratada no capítulo 4. Cada fase deste processo é descrita, incluindo tanto a visualização (*rendering*) como a pós-produção da imagem. Inclui-se também um esquema do algoritmo de simulação. É interessante notar que, em tal ambiente, os efeitos podem ser combinados e acumulados com relativa facilidade, assim como é possível criar efeitos impraticáveis por outros meios. Trata-se, no final do capítulo, de uma implementação piloto para esta especificação, através da adição de características estocásticas a um *ray tracer* previamente implementado no nosso grupo.

No capítulo 5, são apresentadas algumas idéias que surgiram durante o andamento do trabalho, para o desenvolvimento de um novo algoritmo de síntese, baseado em *ray tracing* estocástico, que permitiria tratar de maneira consistente um modelo de câmera mais próximo do real.

As conclusões obtidas ao longo deste trabalho são sumarizadas no capítulo 6, sugerindo também linhas para a continuação das pesquisas na área de efeitos visuais.

## Capítulo 2

# Efeitos Especiais nos Meios Tradicionais

### 2.1 Introdução.

Este capítulo apresenta uma compilação de efeitos especiais, tal como utilizados em alguns meios tradicionais de comunicação visual: Fotografia, Vídeo e Cinema. Respeitando a classificação apresentada no capítulo 1, distinguimos os efeitos produzidos durante o processo de visualização (*in-camera*) daqueles gerados numa etapa de produção posterior ao registro químico ou magnético da imagem. Para cada uma destas duas categorias, organizamos a discussão dividindo-a segundo o meio de comunicação no qual os efeitos são empregados.

## 2.2 Efeitos Dependentes da Visualização em Fotografia.

Nesta seção, trataremos dos efeitos visuais originários de técnicas de Fotografia. Os meios de registro de imagens nas filmadoras e câmeras de vídeo são derivados daqueles da Fotografia, portanto a maioria das manipulações efetuadas são muito similares. Exceções notórias são aquelas que dependem da disposição física do filme na câmera fotográfica, tais como as câmeras panorâmicas e de fenda.

Muitos dos chamados efeitos especiais, em Fotografia, são gerados por meio da utilização criativa dos controles de uma câmera comum, sem necessidade de equipamento adicional. Pode-se, por exemplo, utilizar velocidades baixas para borrar partes da imagem por movimento, ou aberturas grandes de diafragma para desfocar partes selecionadas de uma cena. Assim, para gerar uma boa parcela destes efeitos em um sistema de síntese de imagens por computador, é suficiente simular adequadamente o comportamento de uma câmera.

Outros efeitos, no entanto, dependem de objetivas especiais, como por exemplo as do tipo "olho de peixe" (*fish-eye*), que tem uma distância focal muito curta e abarcam uma imagem de 180°, deformando-a significativamente. Para se obter estes efeitos, é necessário simular o comportamento diverso desta e de outras objetivas. A simulação de câmeras de fenda e panorâmicas requer, adicionalmente, a modelagem diferenciada do mapeamento para o filme sensível.

Outra classe de efeitos é o daqueles normalmente obtidos por meio de filtros ópticos ou anteparos colocados entre a objetiva e a cena a ser registrada. Estes filtros são utilizados para bloquear seletivamente a luz com respeito a alguma característica, como o balanceamento de cores, contraste e suavização ou destaque das luzes fortes (*highlights*). Também

podem ser usados filtros especiais para múltiplas imagens ou luzes em estrela.

### 2.2.1 Simulação de câmeras fotográficas comuns.

Para a realização de alguns efeitos especiais, já indicamos que basta a utilização de uma câmera comum. Tais efeitos dependem, basicamente, da regulagem de três parâmetros da câmera: foco, abertura e tempo de exposição. Assim, por exemplo, a utilização de um longo tempo de exposição para fotografar uma avenida à noite faz com que as luzes dos automóveis apareçam como linhas luminosas. Trataremos neste ítem apenas as objetivas ditas normais, com diferentes distâncias focais mas sem distorções apreciáveis da projeção retilínea. Incluem-se as do tipo *zoom*, que podem variar sua distância focal. Assim, nas câmeras de formato 35 *mm*, este tipo corresponderia aproximadamente às lentes de distâncias focais em torno de 50 *mm* para objetiva padrão, menores até 20 *mm* para grande angular, e maiores para tele-objetivas, disponíveis comercialmente até 2000 *mm*.

Para a simulação destas características da câmera em um sistema de Síntese de Imagens devemos utilizar um modelo completo de câmera, que considere a geração da imagem em termos destes parâmetros. Porém, até recentemente, o único modelo de câmera virtual disponível era o que corresponderia a uma câmera primitiva cuja objetiva é apenas um furo suficientemente pequeno (*pinhole camera model*[Foley 90]). Neste, todos os objetos da cena estão sempre em perfeito foco, o que é uma suposição irreal tanto para o sistema óptico de uma câmera moderna quanto para o funcionamento do olho humano. Também, em geral, assumiam-se objetos estáticos em cada tomada, sem haver borrão de movimento devido ao deslocamento dos objetos durante um tempo finito de exposição.

A inclusão de uma lente simples no modelo de câmera foi necessária para a simula-

ção do efeito de profundidade de campo. Potmesil e Chakravarty ([Potmesil 81]) propuseram uma técnica em dois passos. Em primeiro lugar, é resolvido o problema de visibilidade por meio de um método convencional (no caso, *ray casting*), sendo guardada a informação de profundidade (coordenada  $z$ ) dos pontos amostrados nos objetos. No segundo passo (*focus processor*), as amostras são borradas levando-se em conta a abertura do diafragma (que determina a profundidade de campo) e a distância  $z$  da lente ao ponto amostrado. Estes parâmetros determinam o tamanho de um círculo de confusão que espalha a intensidade do *pixel* sobre os *pixels* vizinhos. O tamanho deste círculo é mínimo para os objetos em foco, aumentando para aqueles desfocados. Mais tarde, os mesmos autores ([Potmesil 83]) propuseram um método similar para tratar borrão de movimento, amostrando regularmente os pontos no tempo de exposição e utilizando círculos de confusão para borrá-los num segundo passo. Note-se, no entanto, que a amostra calculada representa um raio no centro da lente, não sendo considerada esta uma área finita para efeitos do cálculo da visibilidade. Esta é uma deficiência do algoritmo, pois partes da cena podem ser invisíveis do centro da lente, mas visíveis fora deste, produzindo-se uma imagem incorreta nestes casos ([Mazzuca 91]).

Uma solução mais elegante para estes efeitos, e que permite modelar outros, é a de *ray tracing* distribuído ou estocástico ([Cook 84]). Neste método, vários parâmetros do processo de *rendering*, são tratados como funções num domínio finito e amostrados neste domínio de acordo com uma distribuição probabilística, como na integração por métodos de Monte Carlo. No *ray tracing* clássico, era pressuposto que uma única amostra representava o valor do parâmetro. Estes parâmetros incluem a área da lente (para profundidade de campo), tempo de exposição (para borrão de movimento) e aqueles dependentes do modelo de

iluminação para simular reflexão borrada (*gloss*), translucência e penumbras. Em [Cook 84] os autores indicam, sem aprofundar a discussão, que as mesmas técnicas foram adaptadas para algoritmos do tipo *scan-line*.

A utilização de amostragem estocástica em várias dimensões do problema permite generalizar estas questões como problemas da classe de *aliasing*. O processo de rendering pode ser considerado como uma função que leva do domínio da cena ao domínio da imagem (mapa  $(x, y)$ ). Esta função não é, em geral, possível de ser calculada analiticamente para cada dimensão do problema (geometria, iluminação, cor, tempo), portanto é necessário estimá-la a partir de um conjunto de amostras para o qual a função é calculada. Os algoritmos de rendering que atuam no espaço da cena (*ray tracing*, *scan-line*, *Z-Buffer*, etc.) provêm diversos compromissos de custo e desempenho na discretização desta função. O mapeamento da amostragem para uma função estimada pode ser visto como um problema de processamento de sinais, e assim serem aplicados métodos estocásticos desenvolvidos nessa área para resolver problemas de *aliasing* (sinais de alta frequência aparecendo erroneamente como sinais de baixa frequência), ruídos, etc.

Tradicionalmente, fala-se em *aliasing* como sinônimo de *aliasing* espacial, que aparece na forma de serrilhado (*jaggies*) ou é evidenciado pelo desaparecimento de detalhes ou objetos pequenos por causa de amostragem insuficiente. Mas, como já dissemos, este conceito se estende a outros parâmetros na síntese da cena. Assim, a falta de profundidade de campo (foco infinito) é tratada como *aliasing* na amostragem da área da lente; o borrão de movimento corresponde ao tratamento do *aliasing* temporal e assim também para os parâmetros de iluminação. Note-se que o conceito de *aliasing* em Computação Gráfica é mais

amplo que a definição original do fenômeno no contexto de processamento de sinais.

Vários trabalhos, depois de [Cook 84], generalizaram este ponto de vista para o tratamento de outros problemas no processo de *rendering*. Assim, a amostragem da cor em somente três comprimentos de onda discretos (vermelho, verde e azul) dá lugar a fenômenos de *aliasing* de cor ([Turkowski 86], [Glassner 89], [Hall 90]). Outro desenvolvimento interessante neste sentido é o de [Ward 88], que estende o método de *ray tracing* para o tratamento de interreflexão difusa utilizando amostragem estocástica. A deficiência do modelo original provém do fato de se utilizar uma medida constante como componente difusa na iluminação, analogamente ao que ocorre com a simplificação da óptica da câmera ao ser tratada como pontual.

Outros trabalhos analisaram ainda os processos estocásticos no contexto do *ray tracing* distribuído ([Dippé 85], [Lee 85], [Cook 86], [Mitchell 87], [Mitchell 90]). É particularmente destacável a formalização do processo de *rendering* proposta na equação de Kajiya ([Kajiya 86]), que permite unificar diversos métodos de síntese e empresta especial atenção ao processo de amostragem nas várias dimensões do problema.

Seguindo diferentes direções, outras soluções para o problema do borrão de movimento são propostas em [Korein 83], [Reeves 83], [Catmull 84], [Grant 85], [Max 85] e [Heckbert 86], e para o de profundidade de campo em [Catmull 84] e [Chen 87a].

### 2.2.2 Simulação de câmeras e objetivas especiais.

Algumas câmeras e objetivas fotográficas possuem características que não podem ser modeladas adequadamente pelos métodos acima indicados.

**Objetivas de fole.**

Permitem controlar o grau de perspectiva da imagem. Isto é conseguido mudando os ângulos da parte frontal da objetiva com respeito ao plano do filme. A parte frontal da objetiva, que determina um marco de perspectiva, pode oscilar ou deslocar-se lateralmente em relação ao corpo da câmera por meio de um sistema de trilhos e é separada deste por um fole estanque à luz. Em geral, são utilizadas para negativos de grande formato, nas chamadas *view cameras*.

São muito empregadas em fotografia arquitetônica, pois é possível determinar, até certo ponto, o grau de convergência das linhas da composição. Isto faz com que seja possível, por exemplo, fotografar um arranha-céu a partir do nível da rua, mantendo suas linhas verticais como paralelas na imagem.

**Câmeras panorâmicas.**

Este tipo bastante engenhoso de câmera é utilizado para fotografias que devem abranger um grande ângulo na horizontal, produzindo imagens mais largas que o formato comum. O funcionamento desta objetiva é baseado no conceito de *pontos nodais*. Dado um raio de luz, proveniente do sujeito, cuja direção aponta para um ponto  $P$  no eixo da objetiva, este raio é desviado pelo sistema óptico, emergendo do outro lado com uma direção que também intersecta o eixo num ponto  $Q$ . Em geral, o ângulo do raio incidente e o do emergente são diferentes, mas existem dois pontos especiais, localizados no eixo da objetiva, para os quais estes ângulos são iguais, independentemente do valor destes. Estes pontos  $P$  e  $Q$  são, respectivamente, os pontos nodais *anterior* e *posterior* ([Cox 77]).

---

Para a câmera panorâmica, é aproveitada a seguinte propriedade óptica: a rotação de uma objetiva em torno de um eixo que passa pelo ponto nodal posterior não provoca o deslocamento da imagem de um ponto distante sobre um anteparo próximo. Mantendo-se o filme sobre um suporte cilíndrico, cujo eixo coincide com o de rotação da objetiva e cujo raio corresponde à distância focal da objetiva, o que permite que a imagem de objetos distantes esteja em foco. A exposição do filme é realizada enquanto a objetiva pivota, tornando o ângulo de visão dependente não apenas das características ópticas das lentes na objetiva, mas também do ângulo de rotação desta na montagem da câmera.

Este tipo de câmera permite obter imagens estendidas horizontalmente, cujo emprego principal é em fotografias de paisagens ou em cenas urbanas. Note-se que o tipo de montagem especial do filme torna impossível a utilização do esquema acima descrito em corpos de câmeras comuns. Existem, porém, truques para aproximar este resultado, como a exposição de múltiplos negativos de formato comum, controlados através de um tripé especial, com marcas de registro de deslocamento angular.

### **Câmeras de fenda.**

Nestas câmeras, o filme é exposto através de uma fenda estreita, ao mesmo tempo que se desloca mecanicamente. Assim, uma das duas dimensões da fotografia passa a representar o intervalo de tempo de exposição, ao invés de uma dimensão espacial do mundo real.

Este tipo de dispositivo é aplicado, por exemplo, para determinar o vencedor de corridas de cavalos, fotografando-se a linha de chegada: a dimensão horizontal do filme indica o tempo de finalização de cada animal. Outra possibilidade é a fotografia de objetos

em 360°, fotografando-os sobre um suporte giratório; esta técnica é utilizada para estudo de peças arqueológicas.

Davidhazy ([Davidhazy 70]) tem adaptado a utilização de câmeras *reflex* comuns para a obtenção deste tipo de efeitos com fins artísticos, alterando a forma de avanço do filme no corpo da máquina fotográfica.

### **Objetivas olho-de-peixe.**

As lentes do tipo olho-de-peixe são grande-angulares de distância focal muito curta (geralmente entre 6 e 17 *mm* para câmeras de formato 35 *mm*) e provocam distorção significativa em barril (as linhas retas na cena aparecem como curvas côncavas para dentro na imagem). Este tipo de objetiva aumenta grandemente o campo de visão, sendo este, em geral, de 180°. A distorção em barril não pode ser corrigida adequadamente para campos de visão de mais de 100°, e existem olhos-de-peixe de até 220°. Ao invés de objetivas específicas, pode-se utilizar conversores (suplementos afocais) olho-de-peixe na parte anterior das objetivas normais. Este tipo de objetiva é utilizado para fins técnicos em fotografias do céu e aerofotografia, assim como para fotografias de arquitetura. Em publicidade, costuma ser usada para produzir impacto visual através da distorção exagerada ([Langford 80],[Langford 81a]).

### **Objetivas de espelho.**

Outras objetivas problemáticas são as de espelho, que provocam que as luzes fortes desfocadas não apareçam como círculos e sim como argolas com seu centro escuro. Estas formam a imagem principalmente por meio de um sistema de superfícies reflexivas, e não por refração da luz através de lentes. Isto permite eliminar a aberração cromática (que é

produzida por refração) e reduzir o número de elementos ópticos. Na prática, porém, estas em geral incluem uma lente ("placa") de pequena refração para corrigir a aberração esférica. Estas objetivas atingem uma distância focal grande (até mais de 500 *mm* para câmeras de formato 35 *mm*) com aberturas da ordem de  $f:4,5$ . Outra característica interessante é a de não possuírem diafragma, devendo regular-se a luminosidade da imagem através de filtros de densidade neutra ([Langford 81a]).

### **Objetivas suavizadoras.**

As objetivas suavizadoras (*soft lenses*) geram uma imagem na película onde cada ponto possui um halo em torno de si. A suavização difere do desfocamento obtido com uma objetiva comum, pelo fato do ponto de luz produzir um núcleo definido no centro do halo, ao contrário da imagem desfocada, onde o ponto desfocado produz um círculo de confusão homogêneo. Em algumas objetivas deste tipo, o efeito é obtido através de sistemas de lentes propositalmente subcorrigidos para aberração esférica, muitas vezes permitindo regular, por meio do movimento relativo dos componentes do sistema, o grau de suavização.

Outra maneira de regulagem oferecida é a abertura de diafragma, pois sabe-se que a aberração esférica, e portanto o grau de suavização, aumenta com a abertura. Outra forma de suavizar a imagem é incluir um disco metálico com um grande número de pequenos furos, cada furo fornecendo um círculo de confusão. Mudando de discos, com diversos tamanhos e densidade de furos, consegue-se alterar a qualidade da imagem. Por fim, existem suplementos difusores acopláveis frontalmente a objetivas comuns, como filtros planos com anéis concêntricos gravados no vidro. Outra possibilidade é utilizar um filtro neutro com manchas de gordura propositas, que permitem suavizar seletivamente partes da imagem.

### Simulação por síntese de imagens.

Uma abordagem para simular os vários tipos de lentes incomuns poderia ser simular, geometricamente, a passagem dos raios de luz através do sistema de lentes da objetiva, colocando este como um objeto adicional diante da cena cuja imagem vai ser gerada por um algoritmo do tipo de *ray tracing* estocástico. Afortunadamente, por facilidade de construção, a grande maioria das objetivas é composta por um conjunto de lentes com superfícies esféricas, o que facilita sua modelagem. Este modelo teria a vantagem adicional de possibilitar a simulação de aberrações ópticas da objetiva (esférica, cromática, etc.).

Aliás, os termos "*ray tracing*" e "síntese de imagens", anteriormente à sua aplicação em Computação Gráfica, referiam-se a técnicas utilizadas para o projeto e teste de sistemas de lentes em Óptica. Assim, era simulado o comportamento das lentes através do cálculo de diagramas de pontos, às vezes utilizando cálculos por computador ([Cox 77]).

A desvantagem da simulação extensiva poderia ser a sua ineficiência, pois é sabido que o tempo de execução de um *ray tracer* aumenta bastante com o número de interseções calculadas. Não raro, algumas objetivas incluem mais de 20 lentes (i.e. até mais de 40 interseções com primitivas, isto para cada raio amostrado). Porém, como a imagem, num sistema de síntese, não precisa ser focada num plano, podendo ser projetada sobre qualquer superfície analítica, seria razoável substituir o sistema de lentes por outro mais simples.

Um exemplo interessante é o sistema óptico no olho humano. Este focaliza a imagem em parte da superfície de uma esfera (a retina), podendo ser tratado como um sistema de apenas quatro lentes (córnea, humor aquoso, cristalino e humor vítreo) unidas, i.e. somente 4 interfaces entre meios diferentes ([Guy 73]).

Outra abordagem possível é o pós-processamento das imagens geradas na simulação de uma objetiva normal. Assim, o comportamento da objetiva olho-de-peixe pode ser simulado em dois passos, gerando primeiramente uma imagem de perspectiva corrigida com ângulos grandes de visão (note-se que isto não se constitui em um problema para um sistema de síntese) e grande profundidade de foco. Em um segundo passo, a esta imagem seria aplicada uma forma de *warping*, que é uma deformação contínua realizada na imagem bidimensional, para simular a distorção em barril. Esta abordagem, no entanto, só é possível para campos menores que  $180^\circ$ .

Para a simulação de lentes suavizadoras, poderia ser utilizado um filtro passa-baixa, que diminui o contraste da imagem, modificado para modelar mais adequadamente a definição do núcleo luminoso. Já no caso das objetivas de espelho seria possível, em princípio, identificar as manchas de luz forte na imagem 2-D e tratá-las individualmente para transformá-las em argolas ou então idealizar um filtro baseado em luminosidade e contraste, que tratasse seletivamente as regiões desfocadas e muito luminosas, que é onde ocorre o fenômeno das argolas. Para técnicas de filtragem e processamento de imagens, ver [Dawson 89], [Gonzalez 87], [Fonseca 91].

Podemos notar, finalmente, que a flexibilidade fornecida por um sistema de síntese de imagens nos permitiria modelar efeitos impossíveis de serem realizados fisicamente, como por exemplo um olho-de-peixe de  $360^\circ$ . Também poderíamos simular estes efeitos seletivamente na imagem, aplicando-os sobre determinados segmentos ou ainda localmente de acordo com algum critério que pudesse ser testado automaticamente ou fornecido em forma interativa.

### 2.2.3 Filtros de cromaticidade.

Em Fotografia, principalmente a partir do advento da fotografia a cores, a correção das tonalidades tem influência direta sobre a imagem obtida. Para uma reprodução realista das cores, deve ser considerado o comportamento da objetiva para as diferentes regiões do espectro visível e próximo do visível, a sensibilidade do filme para estas regiões, os tipos de fontes de iluminação e, em algumas situações, a polarização da luz que chega à objetiva.

Quanto às objetivas, em geral elas acham-se suficientemente corrigidas quanto a aberração cromática e sensibilidade ao espectro para fornecer um desempenho aceitável na maioria dos casos. Uma película fotográfica colorida possui normalmente três camadas, cada uma delas sensível a uma faixa do espectro visível, centradas essas faixas nos comprimentos de onda do azul, verde e vermelho, e com uma curva de sensibilidade aproximadamente gaussiana. O problema é que pode acontecer de alguma camada ser sensível a uma parte do espectro não visível. Estes filtros são tratados em [Cox 77], [Imes 84], [Tressider 86], [Tressider 88b], [Tressider 88a], [Langford 80], [Langford 81a] e [Hanke 81].

#### **Filtros ultra-violetas.**

Assim, em geral, a camada sensível ao azul possui uma região de sensibilidade apreciável ao ultra-violeta próximo. Em fotografias ao ar livre, dadas certas condições, tais como céu encoberto ou grande altitude, a presença de radiação ultra-violeta pode sobre-expor o filme na camada do azul, produzindo uma imagem de tom azulado. Para corrigir esta deficiência, utilizam-se os chamados filtros U.V. ou anti-nevoeiro, que absorvem radiação do ultra-violeta próximo. Analogamente, existem também os filtros de absorção de

infra-vermelho. Um tipo mais recente de filtros de cor é aquele baseado no princípio de interferência da luz e que permite, quando formado por várias camadas, a passagem de bandas de transmissão muito estreitas, sendo usados estes filtros em fotografia científica.

### **Filtros de correção cromática.**

Outra situação em que é necessária correção através de filtros é quando o filme utilizado não corresponde à iluminação na qual é feita a exposição. Existem dois tipos principais de filmes para fotografia a cores, dependendo da luz que deve ser usada: filmes para luz diurna (mais azulada) e para luz de tungstênio (mais amarelada). Quando um filme precisa ser exposto em condições diferentes daquelas para as quais foi projetado, deve utilizar-se um filtro corretor.

Assim, por exemplo, quando um filme para luz de tungstênio for utilizado com luz de dia, deve ser adicionado um filtro amarelo-alaranjado na frente da objetiva ou, no caso inverso, um filtro azulado. Um filtro corretivo similar, de cor magenta, deve ser adicionado quando um filme para luz de tungstênio for empregado em ambientes iluminados com luz fluorescente. Ademais, existem filmes com faixas de sensibilidade ao infra-vermelho, utilizados em aplicações técnicas ou de visualização científica, mas que também podem ser utilizados experimentalmente.

### **Filtros de Densidade Neutra.**

Os filtros de densidade neutra (cinzas) são aqueles que diminuem uniformemente a quantidade de luz para todas as regiões do espectro visível. São utilizados para diminuir a luz incidente no filme sem alterar tempo de exposição ou abertura do diafragma, mantendo-

se portanto inalterados o borrão de movimento e a profundidade de campo. No caso das objetivas de espelho, que não possuem diafragma por motivos de construção, são utilizados necessariamente para regular a entrada de luz.

Dispositivos de pares de polarizadores (cf. itens 2.2.4.4 e 2.2.5.3) são também utilizados com fins similares. Existem ainda os chamados filtros *sky-control*, que são divididos em duas regiões: uma de filtro de densidade neutra e outra transparente; são úteis para alterar seletivamente a iluminação relativa do céu em fotografias de paisagens.

### **Filtros de cor para efeitos.**

Finalmente, existem aqueles filtros utilizados não para garantir fidelidade na reprodução das cores e sim para provocar mudanças propositais na cor da cena. Esses filtros podem ser de cor e densidade uniformes ou variar ambos os parâmetros de modo a obter *degradés* de uma ou mais cores, em sentido vertical ou radial. Para a utilização de filtros de mais de uma cor, deve tomar-se especial cuidado em evitar que objetos cruzem as fronteiras de cor, pois isto revelaria o truque. Os filtros multicolores são geralmente utilizados para dramatizar paisagens, utilizando o horizonte como fronteira entre as cores.

### **Problemas na reprodução das cores.**

O fotógrafo profissional utiliza corriqueiramente estes efeitos de cores como mais um parâmetro no registro das imagens. Pode ser usado filme não apropriado para a iluminação presente, por exemplo, como um recurso de linguagem, do mesmo modo em que são utilizados filtros de cores.

Ademais, deve ser levado em conta o comportamento do sistema visual humano

com respeito à cor. A percepção da cor muda de um indivíduo para outro, com a idade, com a intensidade luminosa e com a temperatura da fonte de iluminação, além de sermos influenciados pela experiência. A adaptação do olho humano à cor, quando ocorre uma mudança brusca de intensidade luminosa, por exemplo, parece dever-se parcialmente a diferentes mecanismos receptores; assim, em condições de pouca iluminação, a principal contribuição é a dos bastonetes (receptores não sensíveis à cor) comparando-se à dos cones (receptores sensíveis à cor).

Outro exemplo é a adaptação para perceber o branco mesmo sob fontes de luz de diferente temperatura cromática, como luz de tungstênio (lâmpadas comuns) ou luz diurna. Em Fotografia, para cada caso utilizam-se filmes de diferente formulação ou filtros para compensação, mas algumas fontes, como os tubos fluorescentes, são problemáticas para a exposição do filme colorido, pois não emitem luz em todos os comprimentos de onda do espectro visível.

### **Tratamento da cor em Síntese de Imagens.**

Um sistema de Síntese de Imagens deve levar em conta todas estas particularidades no comportamento da cor e assim fornecer ao comunicador visual uma flexibilidade pelo menos similar à da fotografia, e inclusive ampliá-la aproveitando as novas possibilidades do instrumento. O sistema MIRALab ([Magnenat-Thalmann 85], [Magnenat-Thalmann 87]), por exemplo, fornece a possibilidade de inclusão de filtros de cor na definição de uma câmera virtual.

A maioria dos sistemas de *rendering*, porém, não trata as nuances de cor de maneira adequada. Na maioria dos casos, são apenas amostrados três comprimentos de onda discretos

do espectro (correspondentes às cores vermelha, verde e azul), o que pode ser considerado uma causa de *aliasing* de cor. Este esquema não modela a sensibilidade dos filmes fotográficos coloridos para domínios finitos no espectro visível e próximo do visível e nem trata satisfatoriamente as diferenças de temperatura de cor entre as fontes luminosas. Recentemente, tem-se dado mais importância ao problema do *aliasing* de cor, havendo sido propostas soluções baseadas em amostragem estocástica ([Hall 89], [Hall 90], [Meyer 88], [Glassner 89]), onde cada cor na descrição da cena passa a ser identificada em termos de sua distribuição espectral de energia, e não apenas pelo triplete RGB.

Outra representação das cores é através do Sistema Internacional padronizado pela CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*) em 1931, chamado CIE-XYZ, que permite identificar cores que não podem ser compostas por uma tripla de estímulos luminosos monocromáticos (RGB). Esta representação é muito utilizada em Fotografia ([Langford 81a]). Outro sistema bastante usado é o de Munsell, que define a cor em termos de uma tripla *HSV* (*hue, saturation, value*), i.e. cromaticidade, saturação cromática e luminância.

Ao contrário dos filmes fotográficos, que não conseguem adaptar seu comportamento às mudanças de percepção do sistema visual humano, em um sistema de Síntese de Imagens poderíamos modelar algumas particularidades da visão da cor. Isto é possível por não estarmos presos a uma determinada formulação físico-química, como no caso do filme. Outra aplicação, pouco praticável em Fotografia, é a alteração de cor seletivamente por segmentos, o que permitiria, por exemplo, simular o efeito de um filtro bicolor para fronteiras irregulares entre as regiões da imagem. A técnica seria a mesma utilizada para colorização de filmes preto-e-branco ([Fonseca 91]).

Um problema particular acontece, porém, na reprodução das cores no sistema RGB, pois a combinação dos fósforos vermelho, verde e azul de um monitor colorido não consegue representar todos os tons possíveis na representação CIE-XYZ. O conjunto de cores representáveis por uma dada tripla denomina-se *gamut*. Além disso, o comprimento de onda correspondente a cada cor primária e, portanto, o *gamut* varia de monitor para monitor, e o correto seria ajustar a imagem de acordo com o monitor em que será exibida ([Glassner 89], [Hall 90]).

#### 2.2.4 Filtros e acoplamentos especiais.

Além de filtros que alteram de forma contínua a cromaticidade da imagem, existem outros destinados a provocar alterações no aspecto ou na composição da imagem. Podem ser divididos em dois grupos: os que alteram uniformemente o aspecto da imagem e aqueles que tratam seletivamente as regiões da imagem.

No primeiro grupo, podemos incluir os filtros de difusão, fumaça, de baixo contraste, polarizadores, de difração e de estrela. No segundo grupo, temos os filtros de imagem dividida e os bifocais. Referências ao uso destes filtros podem ser encontradas em [Cox 77], [Imes 84], [Tressider 88b], [Tressider 88a], [Langford 81a] e [Hanke 81].

##### **Filtros de difusão.**

Um filtro de difusão diminui a definição da imagem, produzindo um efeito similar ao das objetivas de foco suave. A superfície do filtro é levemente esmerilhada ou gravada com um padrão irregular de pontos que difundem localmente a luz, borrando a região vizinha. Quanto maior a densidade de pontos, maior a difusão e mais borrada a imagem. Este tipo

de filtro costuma ser utilizado para suavizar detalhes desagradáveis e também para simular o comportamento da atmosfera em cenas de estúdio, sugerindo profundidade.

### **Filtros de fumaça.**

Já os filtros de fumaça (*fog filters*) também suavizam a imagem, só que de modo diferente, criando uma espécie de véu luminoso. A luz é espalhada suavemente para as regiões em sombra, simulando assim o comportamento da fumaça, que difunde a luz de maneira uniforme. Isto é conseguido por meio de vidro óptico que é riscado por meio de pequenos traços distribuídos irregularmente na sua superfície que difundem a luz incidente no filtro. Existem filtros com diversos graus de embaçamento por fumaça, sendo chamados os mais densos de *double-fog*.

Deve-se tomar especial cuidado com a composição da cena quando for empregado um filtro de fumaça, pois os objetos próximos também aparecem embaçados. Num ambiente com fumaça real, apenas as regiões afastadas são borradas. Este problema pode ser resolvido parcialmente com um filtro de fumaça em *degradé*, colocando a região mais próxima ali onde a densidade do filtro é menor. Mesmo assim, não se devem colocar objetos próximos na região mais densa do filtro.

### **Filtros de baixo contraste.**

Os filtros deste tipo reduzem o contraste mas sem difundir as luzes, ao contrário do que ocorre nos filtros de fumaça. A diferença com os filtros de difusão é a de alterar o contraste de uma maneira mais local, sem gerar círculos de confusão muito grandes.

### Filtros polarizadores.

O efeito dos filtros polarizadores é baseado numa propriedade da luz, tratada pela teoria ondulatória, chamada polarização (cf. [Hecht 77]). Uma onda de luz não polarizada vibra da mesma maneira em qualquer dos planos perpendiculares ao plano da onda. Uma luz polarizada linearmente tem planos preferenciais de vibração. Existe também a polarização circular, mas os filtros utilizados em fotografia são geralmente para polarização linear. A luz pode ser polarizada por reflexão em superfícies polidas dielétricas (i.e. não metálicas), por dispersão de pequenas partículas ou por meio de filtros artificiais.

Na Fotografia a cores, um filtro polarizador é a única maneira de provocar um escurecimento seletivo do céu; isto porque as partículas de pó e as moléculas de gás presentes na atmosfera polarizam parcialmente a luz, cuja direção depende da posição do sol. Outra aplicação é a de absorver a porção polarizada dos reflexos de superfícies especulares não metálicas, como as vitrines ou a superfície da água. A diminuição da porção de luz refletida é útil também para melhorar a saturação de objetos coloridos de superfície brilhante, como por exemplo automóveis ([Langford 81a]).

A polarização pode ser aproveitada também para efeitos de iluminação (cf. item 2.2.5.3). Pares de polarizadores são utilizados também como uma forma de regular a intensidade da luz incidente na objetiva, pois esta é função do ângulo entre os polarizadores. O conjunto funcionaria, assim, como uma espécie de filtro regulável de densidade neutra. Uma utilização bastante comum dos pares de polarizadores é a sua colocação em câmeras de cinema para amadores, de modo a funcionar como dispositivo de dissolvência (*fade*, cf. item 2.4.1.1). Também podem ser empregados polarizadores temporários (polarizam quando

submetidos a um campo elétrico) para a fabricação de obturadores sem peças móveis (células de Kerr) [Langford 81b]. Estes atingem tempos de obturação de até  $10^{-3}$  s e são utilizados para fotografia ultra-rápida.

Ademais, é aproveitado o comportamento de certos plásticos com respeito à luz polarizada. Estes materiais possuem a propriedade de bi-refringência, i.e. podem deslocar o plano de polarização da luz. Geralmente, as regiões onde aparecem tensões internas afetam seletivamente certos comprimentos de onda. Assim, quando colocadas entre dois polarizadores, peças de plástico bi-refringente podem ser fotografadas de modo a localizar as zonas de maior solicitação aos esforços em modelos em escala de estruturas ou peças mecânicas. Esta propriedade é aproveitada também por meio da colocação de películas de celofane ou fita adesiva (materiais bi-refringentes) entre polarizadores, para obter desenhos coloridos empregados como uma forma de efeitos.

Finalmente, a polarização é utilizada para a observação de imagens estereoscópicas, por meio da colocação de filtros perpendiculares (ou de polarização circular inversa) em cada olho do observador. Assim, cada olho pode ver uma imagem diferente do par estéreo projetado sobre uma tela que deve ser metalizada (para não alterar os planos de polarização).

### **Filtros de difração.**

Um filtro de difração consiste basicamente em uma ou mais redes de difração, i.e. linhas finamente gravadas sobre um suporte de vidro óptico ou plástico. Estas linhas atuam microscopicamente como prismas que difratam (desviam) a luz incidente, em ângulos diferentes de acordo com o seu comprimento de onda. A maior parte da luz, contudo, passa com pouca difração, e o efeito é mais aparente nas vizinhanças das luzes fortes, provocando

o aparecimento de estrelas cujo número de pontas ou faixas radiais depende da orientação relativa das linhas de difração. Estas faixas são, cada uma delas, multicoloridas como um arco-íris. Quando o seu número é suficientemente grande para perceber um contínuo, o filtro é chamado de auréola de difração (*halo diffraction filter*).

Este tipo de filtro provoca também uma certa difusão, portanto não é aconselhado quando se deseja registrar detalhes dos objetos. Em geral, é utilizado para sugerir fantasia ou para destacar luzes muito fortes em cenas noturnas ou fotografia de logotipos.

### **Filtros de estrela.**

Os filtros de estrela (*starburst filters*) difundem a luz preferencialmente em uma ou poucas direções, formando linhas ou estrelas luminosas em torno das luzes fortes. Diferentemente dos filtros de difração, no entanto, os de estrela não dividem as faixas de luz em suas componentes espectrais. O efeito é obtido por meio de vidros riscados de maneira regular, mas não microscopicamente (o espaçamento das grades é normalmente entre 1 e 3 mm). A quantidade de direções dos riscos é igual à metade do número de pontas de cada estrela (em geral entre 2 e 8 pontas).

Sua aplicação como meio de expressão é similar à dos filtros de difração quanto ao destaque de luzes fortes. Ademais, são adequados para efeitos tais como cintilações na superfície da água. Vale também a restrição de provocar um certo embaçamento das imagens, que é maior para grades mais finas.

**Anteparos não convencionais.**

Outros efeitos não-convencionais podem ser conseguidos apelando à criatividade do fotógrafo, tomando as imagens através de anteparos criados especialmente. Estes podem ser improvisados com materiais translúcidos, plásticos ou panos de malha muito aberta ou semi-transparentes como tule, náilon ou gaze.

Podem ser utilizados vidros texturados ou cobertos com substâncias que difundam a luz (tais como graxa, óleo ou vaselina). Também é possível prepará-los de modo a criar uma textura bidimensional na imagem exposta, criando tal textura no suporte.

Outra possibilidade interessante é o efeito de "lentes líquidas". É sabido que cada substância líquida tem um determinado menisco na forma da sua superfície. Se colocarmos gotas, por exemplo de água ou de xarope, num suporte de vidro estas formarão lentes com uma certa distância focal. Focalizando nas imagens geradas sobre as gotas, podemos obter múltiplas imagens de um objeto colocado atrás ou, melhor, embaixo do anteparo.

**Acoplamentos de imagem múltipla.**

Estes acoplamentos, também chamados prismas, são colocados na frente da objetiva para refratar seletivamente a luz de maneira a gerar várias imagens deslocadas do objeto. Constam de faces planas em número e disposição variável. Existem basicamente três desenhos de prismas, de acordo com a disposição de suas faces: radiais (R), paralelos (P) e concêntricos. São codificados de acordo com o número de faces, seguido do tipo; por exemplo, 6P corresponde a um prisma de 6 faces cujas normais são coplanares (i.e. 6 imagens paralelas). Os prismas radiais, em geral, possuem uma face adicional na sua parte central,

paralela ao plano do filme fotográfico, truncando a pirâmide formada pelas outras faces.

O comprimento focal da objetiva afeta o padrão obtido. Assim, uma lente de distância focal longa aumenta o tamanho relativo da parte central, enquanto que uma lente grande-angular provoca o efeito contrário. Em geral, os prismas são projetados para seu uso em lentes de distância focal moderadamente curta. As imagens secundárias são muitas vezes mais borradas e menos saturadas que a imagem central, efeito que é influenciado diretamente pela abertura do diafragma.

Existem para estes prismas montagens tipo carrossel, que permitem girar o prisma para ajustar o efeito, ou inclusive durante a exposição, produzindo um efeito de "órbita" das imagens secundárias em volta da principal. Também podem ser combinados em montagens duplas para obter diversos efeitos. Por exemplo, podem ser montados dois prismas 2P colocados perpendicularmente para gerar o efeito de um 4R.

### **Foco dividido.**

Este tipo de acoplamento divide o campo visual em duas regiões com focos diferentes. Isto é conseguido por meio de metade de uma lente macro, que permite focalizar objetos próximos, enquanto o restante da imagem é focalizada de acordo com a objetiva principal e a fronteira entre ambos permanece, em geral, borrada. Existem lentes deste tipo de +1/2 até +4 dioptrias.

O dispositivo permite criar o aspecto de uma grande profundidade de campo se a imagem for composta de maneira adequada, fazendo com que o borramento da fronteira não interfira demais na ilusão. Não é conveniente permitir que algum objeto cruze a fronteira entre ambos os campos.

### **Simulação de Filtros.**

A simulação de filtros em Computação Gráfica admite duas abordagens. Na primeira, o comportamento do filtro é incluído no processo de visualização, sendo necessário modificar a modelagem dos elementos da câmera virtual ou alterar o método de iluminação para simular adequadamente o efeito. Esta abordagem permite, em princípio, uma simulação mais rigorosa das propriedades ópticas dos filtros. Suas principais desvantagens são, em geral, a maior dificuldade de implementação (pois é preciso alterar o comportamento do *renderer*) e um custo computacional mais elevado.

Uma outra abordagem é a de tratar a imagem 2-D gerada para modificá-la de modo a criar alterações similares às provocadas pelos filtros e acoplamentos. São aplicáveis a qualquer imagem (inclusive às digitalizadas do mundo real), mais simples de implementar e mais baratas computacionalmente. Porém, certos comportamentos da luz (tais como polarização) não são diretamente implementáveis. As técnicas utilizadas baseiam-se no uso de filtros digitais.

A seguir, são propostas diversas alternativas de simulação para os filtros apresentados nos sub-ítems anteriores.

**Filtros de fumaça, difusão e baixo contraste:** Todos eles diminuem, de formas um pouco diferentes, o contraste da imagem. A simulação poderia ser feita por meio de processamento digital de imagens, empregando diferentes projetos de filtros passa-baixa que modelem as características de cada tipo (cf. [Dawson 89]). No caso dos filtros de fumaça, a informação da distância pode servir para alterar o resultado e, portanto, poderia ser incorporado na visualização (cf. [Magnenat-Thalmann 85], [Magnenat-Thalmann 87] para filtros

de fumaça).

**Polarizadores:** A simulação de filtros polarizadores deve ser feita através da inclusão do comportamento da luz polarizada dentro do modelo de iluminação adotado. Wolff e Kurlander (cf. ítem 2.2.5.3 e também [Wolff 90]) apresentaram um método baseado no modelo de Torrance-Sparrow.

**Filtros de difração e de estrela:** Pelo fato de atuarem preferencialmente sobre as luzes fortes (*highlights*), é possível uma abordagem de processamento de imagens. Assim, as faixas de luz e os espectros de tipo arco-íris podem ser superpostos à imagem previamente gerada para aquelas regiões cuja luminância esteja acima de um certo limiar. Um método mais apurado para a simulação de filtro estrela, na etapa de visualização, foi proposto por Shinya et al ([Shinya 89]). Nakamae et al ([Nakamae 90]) propõem também a simulação de difração em um diafragma e em uma rede de difração, através de um novo modelo de iluminação. A aplicação sugerida é um simulador para dirigir veículos à noite, onde esses fenômenos influem diretamente na visão do motorista. As luzes fortes dos faróis dos outros veículos provocam difração na pupila (que é um diafragma) e nos cílios das pestanas (que formam uma rede de difração).

**Foco dividido e imagem múltipla:** Neste caso, existem regiões separadas da cena, que podem ser tratadas independentemente e depois compostas para gerar a imagem desejada. No caso da imagem múltipla, a similaridade entre as imagens pode admitir a síntese de uma única imagem para ser combinada posteriormente com ela própria. Para compor estes efeitos com outros, porém, pode ser útil realizar uma simulação completa na etapa de visualização.

### 2.2.5 Efeitos de iluminação.

Outra possibilidade de obtenção de efeitos é o controle da iluminação de modo a expor seletivamente algumas partes da composição nas variáveis espaço e tempo. A utilização de fontes de luz de grande intensidade e curta duração é comum em fotografia. Os tipos mais utilizados são o *flash* e a luz estroboscópica. Outra maneira de regular a iluminação é por meio de luz polarizada.

Para que uma imagem gerada por uma câmera sintética possa incluir estes efeitos, deve ser possível modelar não só a intensidade, como também o comportamento destas fontes de luz no tempo.

#### Flash.

É um dispositivo que gera uma luz intensa, de curta duração. Os dois tipos básicos são os de lâmpadas descartáveis (*flash* simples) e os reutilizáveis (*flash* eletrônico). Os *flashes* descartáveis são ainda utilizados devido ao seu fluxo luminoso ser muito grande para um dispositivo portátil, à sua robustez e ao fato de não necessitar tempo de recarga, apesar do retardo na produção da luz depois do disparo.

Já no tipo de *flash* eletrônico, que é o mais utilizado hoje em dia, a menor potência é compensada com uma maior praticidade, economia, e um tempo de disparo muito mais curto, que possibilita o uso de menores tempos de exposição e facilita a sincronização com o disparador da câmera. Para obter níveis de luminosidade similares aos dos descartáveis, porém, deve sacrificar-se a portabilidade, exigindo equipamentos que devem ser conectados a uma rede elétrica.

A utilização corriqueira do *flash*, até incorporado em algumas câmeras, pode mascarar seu potencial de uso para a geração de efeitos. A luz de relâmpago (como é também chamada) pode ser empregada para "congelar" objetos na composição, pelo fato do intervalo de atuação do *flash* ser, em geral, pequeno em relação ao tempo de exposição. A sua influência é, também, restrita aos objetos próximos, o que permite um tratamento seletivo destes. O emprego do *flash* em exposições longas é útil para isolar os objetos iluminados pelo *flash* em relação a um fundo escuro ou borrado por movimento ([Tressider 86],[Tressider 88a]).

#### **Luz estroboscópica.**

Sua concepção é similar ao *flash*, mas permite múltiplos disparos de luz de relâmpago em um intervalo muito curto de tempo. É útil para congelar diversas fases do movimento de um objeto na mesma imagem, com fins expressivos ou de análise, por exemplo, do desempenho de um atleta.

#### **Luz polarizada.**

A iluminação do estúdio fotográfico pode ser controlada aproveitando as propriedades da luz polarizada (cf. ítem 2.2.4.4). É possível empregar polarizadores para filtrar as fontes de luz e, através de um filtro polarizador na câmera, controlar o registro dos reflexos, seletivamente para materiais metálicos e dielétricos. Conjuntos de pares de polarizadores são utilizados também como um filtro regulável na frente das fontes de luz ([Langford 81a]).

### Iluminação em Síntese de Imagens.

A geração de imagens realistas requer modelos de iluminação que simulem uma boa parcela dos comportamentos da luz em uma cena. Os modelos mais empregados em Síntese de Imagens são os de Phong ([Phong 75]), Torrance-Sparrow (aplicado ao cálculo de imagens sintéticas em [Blinn 77]) e Cook-Torrance ([Cook 82]), baseados em óptica geométrica. Outras abordagens, como a baseada em teoria ondulatória da luz, foram tentadas ([Moravec 81], [Bahar 87]). Uma abordagem alternativa, baseada em troca de calor em ambientes fechados, é a de Radiosidade ([Goral 84]), que permite modelar reflexão difusa. Mais recentemente, sistemas híbridos que aproveitam vantagens de mais de um modelo foram apresentados ([Wallace 87], [Ward 88]). Um excelente compêndio de modelos de iluminação é [Hall 89], mas os textos gerais como [Foley 90], [Rogers 85], [Magenat-Thalmann 87] e [Joy 88] também oferecem boas introduções ao assunto.

A modelagem adequada dos efeitos de *flash* e luz estroboscópica requer o tratamento do tempo de exposição como um intervalo finito, dentro do qual o comportamento das fontes de luz também deve ser variável no tempo. O algoritmo de síntese mais adequado como base para esta simulação parece ser novamente o de *Ray Tracing* Estocástico, que incorpora naturalmente o conceito de grandezas finitas, em contraste com a aproximação do valor dos parâmetros de iluminação, considerando-os fixos durante o tempo de exposição, como ocorre no *ray tracing* clássico.

Quanto à luz polarizada, podemos destacar que o modelo físico de Torrance-Sparrow, aplicado posteriormente à Síntese de Imagens por Blinn, permite a sua simulação. No entanto, até recentemente, não havia um formalismo que permitisse incorporar, de maneira simples,

parâmetros de polarização em um sistema de *rendering*. Wolff e Kurlander ([Wolff 90]) propuseram a utilização de uma matriz de coerência que define a forma de polarização linear, incorporando-a ao modelo de Torrance-Sparrow.

## 2.3 Efeitos de pós-processamento em Fotografia.

No processo fotográfico tradicional, uma imagem não é disponível imediatamente, mas sim após o filme em que esta foi exposta ser revelado e, no caso do negativo, copiado para um positivo em papel, sendo este também revelado. Sem dúvida, toda esta manipulação pode ser, e é, alterada para a obtenção de diversos efeitos em uma ou várias destas etapas.

É possível também compormos, de diversas maneiras, mais de uma fotografia, ou então uma fotografia com uma imagem gerada por outro meio, seja ele desenho, síntese de imagem ou qualquer outro. Podemos, então, dividir os efeitos de pós-processamento em dois tipos básicos: aqueles de alteração de uma imagem e os de composição de imagens.

### 2.3.1 Efeitos de alteração de imagem em laboratório.

O controle mais preciso no processo de laboratório ocorre na etapa de cópia, onde podemos especificar o tipo de papel a ser usado, os filtros de cor, o tempo de exposição e a objetiva da ampliadora, entre outros parâmetros. A seguir são descritas algumas técnicas usuais de alteração de imagem na cópia: alto contraste, baixo-relevo, conversão de tom contínuo para traço, solarização e posterização. As técnicas aqui descritas são apresentadas em [Langford 81a], [Langford 81b] e [Tressider 88a].

**Cópia em alto contraste.**

Para conseguir um alto contraste na imagem copiada, podem ser utilizados materiais para confecção de fotolitos para as artes gráficas. Sabe-se que nas técnicas de impressão normais, todo material original deve ser convertido a alto contraste pois, em última instância, cada ponto no papel pode ser impresso ou não impresso, sem graus intermediários.

É verdade que é possível a reprodução de tons de cinza por meio de uma trama (rede) de pontos pretos de diferentes tamanhos (representando meios-tons) e que isto pode ser estendido para permitir a reprodução colorida por combinação de tramas para várias cores, mas a emulsão dos materiais fotolitográficos só admite dois níveis: branco e preto.

Esta característica pode ser aproveitada para copiar fotografias comuns, de meios tons, em papéis ou transparências para fotolito, dando à imagem um aspecto de grafismo. Com respeito a uma cópia obtida pelo processo normal, os cinzas mais claros passam para branco, e os mais escuros, para preto.

Também podem ser aproveitadas as particularidades do filme com rede para reprodução de meios-tons e obter, exagerando o tamanho dos pontos, um efeito tipo "gibi".

**Baixo-relevo.**

É conseguido por meio da composição entre um positivo e seu próprio negativo, combinando ambos no momento da reprodução, com um pequeno deslocamento entre eles. O efeito sugere uma cópia em 3 dimensões, pois as bordas entre tons diferentes passam a ter tons mais claros ou mais escuros, criando "sombas" para sugerir um baixo-relevo.

O efeito depende da densidade e contraste do positivo e do negativo (quanto menor

a diferença, mais marcado o efeito), do tipo de cena registrado (melhor com uma boa escala de meios-tons) e da forma do deslocamento.

### **Conversão para traço.**

Consiste em transformar uma fotografia de tom contínuo em um desenho de traço, tipo nanquim, de suas bordas. Para isto é preciso compor um positivo com o seu próprio negativo perfeitamente ajustado em densidade e contraste de maneira a constituir uma máscara 100% (i.e. que bloqueia totalmente a luz). Os tons deveriam ser perfeitamente neutralizados, de modo que a composição não permitiria a passagem de luz. Porém, se utilizada uma luz oblíqua, uma parte desta consegue dispersar-se pelas bordas da imagem, pelo fato do suporte (filme) ter uma certa espessura. A cópia é feita sobre material de alto contraste do tipo utilizado para fotolitos. A luz oblíqua deve ser movimentada em torno da montagem, ou vice-versa, para conseguir espessura uniforme em todas as bordas.

A largura das linhas depende da espessura dos suportes, do ângulo da luz incidente, do movimento relativo entre a montagem e a fonte de luz, do tempo de exposição e revelação da cópia e do grau de ampliação. Um interessante efeito alternativo consiste em fazer uma máscara inferior a 100%, permitindo a exposição dos objetos mais escuros, que apareceriam como pretos.

### **Solarização.**

Uma sobre-exposição pode provocar a inversão total ou parcial dos tons da imagem registrada. Para simular este efeito em laboratório, utiliza-se um processo de pseudo-solarização baseado no chamado efeito Sabattier ([Langford 81b]). Este processo provoca, além da

inversão das regiões de menor densidade, a formação de bordas escuras em torno das regiões de tons mais fortes.

Para obter isto, um material (negativo ou cópia) é revelado parcialmente e depois velado à luz, para em seguida continuar a revelação. O efeito é devido a certas propriedades químicas dos materiais da emulsão (halogenetos de prata), mas a sua explicação não é bem conhecida. A solarização de um positivo provoca a inversão das zonas iluminadas e gera bordas brancas; enquanto que a solarização de um negativo inverte as sombras da imagem positiva e gera bordas pretas na cópia positiva final. Se forem solarizados ambos, é possível obter um efeito interessante, gerando-se linhas duplas nas bordas.

O processo não é facilmente controlável, e funciona melhor para objetos detalhados e com contornos bem definidos. A solarização pode adicionar impacto a fotografias desinteressantes.

### **Posterização.**

Consiste na separação da imagem em um pequeno número de tons, tal como é necessário para a confecção de cartazes de rua (*posters*). Assim, uma imagem de tom contínuo resulta em uma série de zonas de cor sólida. Quando o número de tons é apenas dois, chama-se grafismo e para um grande número de cores aproxima-se do tom contínuo.

O processo tradicional consiste em realizar vários internegativos, com diferentes graus de exposição, sobre filme fotolitográfico (de alto contraste), para depois compô-los em um positivo de tom contínuo. O número de negativos separados necessário é sempre um a menos que o número de tons (incluídos o preto e o branco) desejados. As principais dificuldades são o registro exato requerido na composição dos negativos e a correta regulagem

entre as variações de tons.

### **Viragem a cores.**

É um conjunto de técnicas utilizado, na fotografia a preto-e-branco, para converter os sais de prata fixados (pretos) da cópia positiva (já revelada) em pigmentos de cor, através de processos químicos. Existem três tipos de viragem a cores: sépia, metálica e de reveladores de cor.

A viragem para sépia produz um positivo mais permanente do que o de prata negra, em tons quentes (amarronzados). O tom exato depende do tipo de emulsão original do papel, do tempo empregado na revelação original e do processo químico adotado.

Nos processos de viragem metálica, a prata é convertida em metal de outra cor. Estes produzem cores vivas (verde, vermelho, azul ou amarelo) que dependem dos sais metálicos utilizados, mas o resultado não é permanente. Uma parcela da prata pode permanecer negra, mas o processo é de difícil controle.

O resultado da viragem por reveladores de cor é similar. Porém, o processo químico, baseado em uma sucessão de branqueamentos e revelações, é bastante diferente. Esta técnica é mais flexível, tornando prática a viragem parcial que possibilita o controle da quantidade de preto e de cor na imagem final. Outra vantagem é a maior permanência da imagem.

### **Tintagem e colorização.**

A tintagem consiste na lavagem de cor da cópia positiva, que coloriza indistintamente as partes claras e escuras da imagem. Não deve ser confundida com a viragem, que afeta somente os pigmentos da cópia.

Já a colorização consiste na pintura seletiva de porções da imagem preto-e-branco, por meio de aquarela (cores suaves) ou tintas transparentes do tipo *Photo-tint* (cores mais fortes). Recentemente têm sido empregados métodos de processamento de imagens para colorização de filmes cinematográficos.

### **Máscaras.**

Durante o processo de cópia, podem ser aplicadas máscaras para as regiões da imagem que desejam ser destacadas ou escurecidas. Assim, cartões de papelão no formato desejado podem ser utilizados, opcionalmente com movimento para borrar as bordas ou até com as próprias mãos para exposições longas na ampliadora.

Estas técnicas permitem um controle da composição posterior à tomada da fotografia e podem ser aplicadas com bordas duras (quando colocadas no plano da cópia) ou suaves. As máscaras podem ser de destaque (*burn-in mattes*), quando mascaram o fundo da imagem com respeito a algum sujeito; ou de ocultação (*dodges*), quando mascaram algum sujeito ao qual se deseja tirar importância.

### **Simulação de efeitos de laboratório.**

Todas estas técnicas podem ser simuladas por meio de processamento digital de imagens. Os métodos passíveis de serem utilizados são a simulação passo a passo do processo manual e o aproveitamento de técnicas usuais de processamento de imagens. Assim, por exemplo, a conversão de tom contínuo para fotografia de traço é realizada por algoritmos conhecidos de detecção de bordas e não pela simulação do processo físico de laboratório.

Note-se, ademais, que a geração de efeitos por Processamento Digital de Imagens

é muito mais flexível, permitindo a aplicação de certos efeitos utilizando cores que seriam inviáveis por meios químicos. Além disso, permite aplicar os efeitos seletivamente por segmentos, como ocorre no caso da colorização ([Fonseca 91]). A aplicação automática dos efeitos viabilizaria seu uso em sequências, tal como é necessário para imagens em movimento (cinema).

### 2.3.2 Composição de Imagens.

Muitas vezes é conseguido um efeito bastante atraente por meio da composição de duas ou mais imagens geradas em forma separada. Existem duas técnicas principais de composição: a projeção de imagens e o *sandwiching* ([Tressider 88a]).

#### Composição de imagens por projeção.

Neste caso, utiliza-se pelo menos uma transparência (*slide*), que é projetada sobre um anteparo de maneira a se fundir com outra imagem. No caso mais simples, as duas imagens são projetadas ao mesmo tempo sobre um anteparo branco e sua projeção é fotografada. Em outro caso, um sujeito contracena ao vivo com uma imagem projetada por trás dele, tal como ocorre nos passeios de carro em filmes de cinema. Por último, a imagem pode ser projetada sobre um sujeito que faz o papel de anteparo, como um objeto texturado ou um corpo nu.

#### Sandwiching.

Consiste simplesmente na montagem combinada de duas transparências (*slides*), uma das quais, pelo menos, necessita ser subexposta. O resultado pode ser projetado dire-

tamente ou duplicado como uma fotografia normal.

### **Simulação de composição de imagens.**

Para o *sandwiching* e a projeção sobre anteparos planos, pode ser empregado processamento digital de imagens, tal como nos processos de laboratório. No caso da projeção sobre planos texturados e superfícies não planas, porém, podem ser utilizadas técnicas de mapeamento de reflexão e da aplicação de textura bidimensional (cf. [Catmull 80]).

Sobre composição de imagens sintetizadas, podem ser consultados [Wallace 81], [Porter 84], [Duff 85], [Max 85], [Nakamae 86] e [Nakamae 89].

## **2.4 Efeitos de pós-processamento em Vídeo.**

Em vídeo doméstico, a maioria dos chamados efeitos especiais refere-se a recursos de passagem entre cenas (*wipe, fade*) e de manipulação das cores globais da cena. Já nas produções para veiculação massiva, existe um número maior de efeitos possíveis, baseados muitos deles em técnicas de Computação Gráfica.

Vamos considerar como efeitos próprios de vídeo àqueles que são normalmente realizados em tempo real. Assim, os dividiremos em efeitos de transição entre cenas, de composição de imagens, de temporização, de deformação e de tratamento local da imagem.

### **2.4.1 Efeitos de transição entre cenas.**

Na transição entre duas cenas, a possibilidade mais simples é o corte seco, ou seja, a entrada do primeiro quadro de uma cena logo após o último da anterior, sem nenhum tipo de mistura. No entanto, são possíveis transições durante um certo intervalo de tempo.

Os dois tipos básicos são o de transição por *fade* (dissolvência) e o de transição por *wipe* (apagamento).

#### **Transição por *fade*.**

O *fade-in* é o aparecimento gradual e suave de uma imagem a partir de um fundo uniforme (em geral preto), enquanto que o *fade-out* é o processo inverso. Combinando ambos teremos, na transição, imagens compostas por quadros de uma cena com os da seguinte, onde as imagens da segunda cena vão ficando gradualmente mais definidas, até desaparecerem as imagens da primeira cena.

Este tipo de efeito é comum em equipamentos de edição, incluindo os aparelhos de vídeo doméstico de preço mais alto e inclusive *camcorders*.

#### **Transição por *wipe*.**

O processo de *wipe* consiste na passagem em que as imagens da segunda cena aparecem como um padrão geométrico, cuja área aumenta até apagar a imagem anterior. A forma mais simples é a de cortina, na qual a nova cena começa a varrer a imagem a partir de uma das bordas da imagem, por exemplo, de cima para baixo. Outro padrão comum é a janela veneziana, onde a nova imagem aparece na forma de faixas horizontais cada vez mais largas. Finalmente, a imagem pode crescer a partir de uma figura geométrica (retângulo, círculo, elipse, etc.) até tomar conta de toda a tela.

Muitos efeitos podem ser criados segundo esta abordagem, porém, um excesso destes torna cansativo o resultado final. Os *wipes* também começam a se generalizar nos equipamentos domésticos de vídeo.

### 2.4.2 Composição de sinais de vídeo.

Manipulando sinais separados para cada cor de vídeo (vermelho, verde e azul), torna-se possível apagar partes da imagem que contenham uma das componentes em um valor acima de um certo limiar. Assim, estas partes podem ser substituídas por imagens originárias de outras fontes de vídeo. Este é o princípio básico do *chroma-key*, que é muito utilizado nos programas de TV para compor imagens de estúdio com outras em exteriores.

Em uma primeira análise, qualquer cor poderia ser processada para conseguir este efeito mas, na prática, a cor azul mostrou-se a mais adequada. A percepção humana é especialmente sensível à artificialidade da cor da pele, e o processamento baseado no azul não afeta demasiadamente esses tons. Assim, para mostrar a imagem secundária, a parte posterior da cena primária é pintada ou forrada em cor azul-França.

As outras formas de composição são derivadas das abordagens de *wipe* e *fade*.

### 2.4.3 Efeitos de temporização.

O efeito mais conhecido é o de alteração da velocidade, em geral como câmera lenta. Aqui, a cena é reproduzida em um número menor de quadros por unidade de tempo. Outro efeito comum é o de estroboscopia, que exibe imagens fixas a intervalos de aproximadamente meio segundo, provocando um efeito similar ao das luzes estroboscópicas empregadas nas discotecas.

### 2.4.4 Deformação de imagens.

Este tipo de recurso não é encontrado em equipamentos para vídeo doméstico e sim na produção de programas para veiculação massiva. A geração destes recursos envolve a

manipulação de imagens em forma digital, para um processamento em tempo real. Exceto o caso do *ADO*, as outras técnicas são bastante recentes, e nem todas as emissoras dispõem destes recursos.

Um recurso bastante comum em TV é o de *ADO*. Consiste na manipulação de imagens bidimensionais sobre um suporte plano que é manipulado aparentemente em três dimensões. É um efeito útil para transições rápidas, como em chamadas para a programação da emissora.

Outra técnica interessante que é disponível em tempo real é o chamado *warping*. Consiste na deformação contínua da imagem a partir de alguns pontos de controle que podem ser manipulados interativamente. Assim, é possível deformar figuras como em um espelho de parque de diversões.

Um recurso mais recente é o de embrulhar figuras tridimensionais com uma imagem de vídeo 2-D. Este efeito, chamado de *wrapping* (embrulho), foi empregado na veiculação dos desfiles de carnaval. Tem analogia com o mapeamento de textura 2-D em Síntese de Imagens.

#### 2.4.5 Tratamento local de imagens.

Os recursos mais comuns, disponíveis inclusive em alguns vídeos domésticos de alto padrão, consistem no tratamento da cor, que permite manipulações similares às do laboratório fotográfico. É possível o controle do contraste e do balanceamento de cores. Dispõe-se de recursos para gerar imagens posterizadas em diferentes cores, solarizadas, imagens de traço e viradas para diversas cores. Um efeito próprio de Vídeo é o de mosaico.

À diferença do laboratório fotográfico, porém, a confecção dos efeitos é realizada em tempo real, em qualquer cor e controlada interativamente. Estes recursos são denominados

genericamente de Vídeo-Arte. Um tipo de tratamento interessante entre estes é o que dá à imagem um aspecto de pintura a óleo (*oil-painting*), assim como a transformação da imagem para negativo.

#### 2.4.6 Simulação de efeitos de vídeo.

Devido ao fato das técnicas apresentadas serem baseadas em processamento de imagens (exceto o *wrapping*, que requer modelagem 3D do objeto em cima do qual a imagem original é mapeada), a simulação é feita aplicando os mesmos métodos a partir das imagens geradas por um sistema de síntese. Não é necessária, porém, a execução em tempo real, o que abre outras possibilidades interessantes.

A aplicação de *warping* (cf. [Dawson 89]) pode ser dirigida por um procedimento, o que permitiria, por exemplo, simular a visão através da superfície da água. Outra possibilidade é aplicar *warping* na composição de imagens, tal como é proposto em [Wolberg 89]. Outros trabalhos sobre o assunto são [Williams 83], [Catmull 80], [Fournier 88] e [Frederick 90].

Outras técnicas de tratamento de imagem podem ser realizadas aproveitando a flexibilidade das ferramentas computacionais. Assim, Haeberli ([Haeberli 90]) apresenta uma série de recursos para simular técnicas de pintura tradicional, que podem ser estendidas para criar novas técnicas. Dawson ([Dawson 89]) também apresenta efeitos criativos que expandem o repertório de linguagens visuais.

Finalmente, para a simulação de recursos tais como *ADO* e embrulho de objetos 3D (*wrapping*), utilizam-se métodos de mapeamento de textura 2D sobre superfícies tridimensionais ([Catmull 80], [Fournier 88]).

## Capítulo 3

# Teoria de suporte à geração de efeitos visuais

### 3.1 Introdução.

Este capítulo pretende fornecer uma resenha dos fundamentos teóricos para compreensão dos problemas envolvidos na geração de imagens sintéticas, com vistas à produção de efeitos sob um enquadramento de ray tracing estocástico. No capítulo 1, quando tratamos da classificação dos efeitos especiais, estabelecemos o escopo do trabalho ao restringirmos a simulação aos efeitos dependentes da visualização, comentando também aqueles de pós processamento.

Observamos que estas duas classes de efeitos correspondem a ferramentas teóricas diversas. Assim, na visualização, estamos tratando do mapeamento do espaço tridimensional (contínuo) da cena para o espaço bidimensional (discreto) da imagem. Estamos interessados

em métodos de síntese realistas, particularmente naqueles envolvendo simulação do percurso de raios de luz (*ray tracing*). Estes métodos podem ser considerados como processos de amostragem por pontos, o que nos leva a tratar as questões de escolha da amostragem, da função de cálculo das amostras (que chamamos *função de síntese*) e da reconstrução da imagem a partir dos valores calculados em pontos discretos. Nas seções seguintes, expomos o ferramental para tratar estes problemas, enfatizando as técnicas estocásticas de amostragem, que são utilizadas nos métodos de Monte Carlo para a avaliação de integrais no cálculo da função de síntese da imagem.

No caso dos efeitos de pós-processamento trata-se, no entanto, de mapear uma imagem bidimensional para outra imagem bidimensional, ambas definidas para valores discretos, correspondentes a cada pixel. As técnicas relevantes, neste caso, são as clássicas de processamento digital de imagens, tais como a teoria de transformadas de Fourier, filtragem de bandas de frequência, detecção de bordas, segmentação, questões de discretização no espaço de cores e composição de imagens. Não trataremos separadamente destas técnicas, pois damos ênfase aos efeitos dependentes da visualização, mas a discussão sobre processamento de sinais e sobre os problemas na amostragem por pontos é relevante para este tipo de efeitos.

## 3.2 Síntese de imagens realistas.

Antes de relacionar as técnicas de geração de imagens aplicáveis à simulação de efeitos especiais, devemos esclarecer o que entendemos por síntese de imagens realistas. [Hall 83] se propunham "gerar uma imagem que evocasse do sistema visual uma resposta indistinguível daquela evocada pelo ambiente real". [Neumann 89] propõem um objetivo

mais modesto: "produzir imagens que não possam ser distinguidas daquelas produzidas por meios fotográficos". Este conceito é o tão comentado "foto-realismo", que se supõe ser um objetivo importante na pesquisa de síntese de imagens.

No presente trabalho, não estamos exclusivamente interessados no realismo das imagens, no sentido buscado por Hall e Greenberg. O objetivo desta pesquisa é prover os usuários de sistemas de computação gráfica de ferramentas similares às aquelas de outros meios de comunicação visual, em particular os chamados efeitos especiais. Assim, muitas vezes o realismo da imagem é propositalmente deturpado para que a mensagem visual possa comunicar o conteúdo desejado.

Características não realistas podem ser incluídas em imagens sintéticas, tais como projeções de fachos de luz ([Gerfelder 91]), adição de linhas de contorno ([Saito 90]) ou ainda tratamentos pictóricos ([Haeberli 90]). Analogamente, em Fotografia, utilizam-se filtros especiais para destacar regiões em imagens (ex: altas luzes por meio de um filtro de difração, região central por filtro *spot*) ([Hanke 81]).

No entanto, muitas técnicas desenvolvidas originalmente para o melhoramento do realismo são também úteis para o objetivo de aumentar o leque expressivo do comunicador visual. A simulação mais apurada do processo fotográfico, que possibilita um maior realismo, pode permitir também modelar as manipulações efetuadas pelos fotógrafos para gerar imagens com efeitos especiais, sem precisar recorrer a técnicas *ad hoc* para cada efeito.

Dentre as diversas técnicas de síntese de imagens realistas, descreveremos aquelas derivadas da abordagem de rastreamento de raios (*ray tracing*), que permitem modelar de maneira sistemática uma série de efeitos ópticos, e que foram escolhidas justamente pela sua

	Processamento de Sinais	Estimativa Estatística	Integração Numérica	Fenômeno de Transporte
<b>Função de síntese</b>	sinal	variável aleatória	função integral	equação de transporte
<b>Escolha dos raios</b>	amostragem	amostragem	quadratura	caminhada aleatória
<b>Cálculo da intensidade no pixel</b>	reconstrução do sinal	estimativa de estatísticas	integração numérica	simulação de partículas
<b>Referências</b>	[Crow 77] [Mitchell 87] [Mitchell 88] [Mitchell 90]	[Lee 85] [Dippé 85] [Purgathofer 87] [Kirk 91]	[Cook 84] [Kajiya 86] [Shirley 90]	[Kajiya 86] [Arvo 90] [Shirley 90]
<b>Vantagens</b>	<i>anti-aliasing</i> , reconstrução da imagem	critérios de qualidade, medida do erro, vício estatístico	generalidade, medida do erro	proximidade com o modelo físico
<b>Desvantagens</b>	supõe-se amostragem regular ou semi-regular ( <i>jittered</i> ), função de síntese não é limitada por banda	maior necessidade de armazenamento, não específica do problema	trata apenas objetos matemáticos, não utiliza informação do problema	simulações em Física tratam ambientes simples

Tabela 3.1: Abordagens teóricas para a síntese de imagens

versatilidade e fácil incorporação de novos efeitos.

### 3.3 Abordagens teóricas da função de síntese por *ray tracing*

Ao estudarmos o algoritmo de síntese por *ray tracing*, podemos utilizar diversas abordagens teóricas para o cálculo da função de síntese. Notamos que esta função guarda semelhança com conceitos de outras áreas do conhecimento e o ferramental teórico construído

nestas pode nos auxiliar a desenvolver técnicas que otimizem o cálculo.

Distinguimos quatro áreas, cujos conceitos têm sido aplicados na literatura de Computação Gráfica: Integração Numérica, Estimativa Estatística, Processamento de Sinais e Fenômenos de Transporte. Dependendo do autor, é dada maior ênfase a um ou outro ponto de vista, mas eles são complementares, no sentido que todos eles podem ser aplicados na análise de um dado algoritmo. As características de cada abordagem são resumidas na tabela 3.1.

### 3.3.1 Processamento de Sinais.

Para estudar a função de síntese, é útil considerar sua representação num domínio alternativo ao do mapeamento  $f(x, y) \mapsto \textit{intensidade}$ . Na área de processamento de sinais, uma tal representação é fornecida pela transformada de Fourier (mostrada aqui em uma dimensão):

$$F(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)(\cos 2\pi ux - i \sin 2\pi ux) dx \quad (3.1)$$

Aqui,  $F(u) : \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{C}$  representa  $f(x)$  no domínio da freqüência. A função imagem é tratada como um sinal multidimensional. O cálculo do valor de intensidade luminosa de um raio é equivalente à amostragem da amplitude deste sinal num dado ponto do domínio espacial. Para gerar uma imagem sintética, devemos reconstruir, a partir destas amostras, uma aproximação do sinal "original". Este sinal é, no entanto, uma abstração, já que dispomos apenas das amostras (raios calculados) para tentar uma reconstrução.

O conceito de *aliasing* é associado a esta abordagem. O aparecimento de serrilhados

e outras imperfeições na imagem são decorrentes deste fenômeno. As frequências mais altas da representação de Fourier para a função de síntese são as responsáveis pelos fenômenos de *aliasing* quando a imagem (sinal) é amostrada a uma frequência muito baixa. Para reconstruir adequadamente o sinal, é necessário que a taxa de amostragem seja maior que o dobro do componente de mais alta frequência presente na imagem (limite de Nyquist) ([Crow 77], [Foley 90]). Isto pressupõe a existência de um limite máximo de frequência, o que genericamente não é verdade para imagens sintéticas.

Uma técnica utilizada em processamento de sinais é pré-filtrar as frequências mais altas, de forma a evitar a ocorrência de *aliasing*. Para o algoritmo de ray tracing, esta abordagem não é possível, pelo fato da amostragem ser discreta. No entanto, as variantes de *cone tracing*[Amanatides 84], *beam tracing*[Heckbert 84] e *pencil tracing*[Shinya 87], que amostram uma área extensa, são equivalentes a uma pré-filtragem, mas os tipos de primitivas que podem ser tratados são mais limitados.

Outra forma de amenizar o problema de *aliasing* é utilizar uma amostragem não regular no espaço da imagem, pois desta maneira os padrões regulares de *aliasing* são trocados por ruído, que não é tão incômodo para o sistema visual humano.

A imagem digital resultante de um processo de síntese é uma função escada, que mantém-se constante para uma grade de áreas discretas (os pixels). As amostras pontuais calculadas devem ser combinadas para se obter o valor particular para cada pixel, atribuindo um peso para cada amostra, de acordo com uma função filtro. Esta operação é chamada pós-filtragem e é análoga à reconstrução do sinal. No caso mais simples, calcula-se a média aritmética das amostras contidas em cada pixel, o que equivale a utilizar um filtro caixa.

[Mitchell 88] e [Mitchell 91] estudaram as propriedades de diversos filtros para reconstrução em síntese de imagens.

O estudo da síntese de imagens como um problema de processamento de sinais tem como vantagem um bom enquadramento dos problemas de *aliasing* e reconstrução da imagem. No entanto, a teoria supõe amostragem regular ou semi-regular. Ademais, alguns resultados dependem de características do sinal que não correspondem à função de síntese por ray tracing, tais como a limitação por bandas de frequência e a possibilidade de pré-filtragem do sinal.

### 3.3.2 Estimativa Estatística.

Podemos também considerar a função de síntese como uma variável aleatória, os raios como pontos amostrais multidimensionais e os valores de intensidade luminosa retornados pelo ray tracer como amostras. Os cálculos envolvidos na determinação da cor do pixel são estudados como estimativas de parâmetros estatísticos de uma distribuição de probabilidade ([Dippé 85], [Lee 85], [Purgathofer 87]). Neste caso, tentamos minimizar o erro no valor do pixel, que é igual à esperança da variável aleatória em questão. Assim, a intensidade  $I$  do pixel, a partir de  $n$  amostras calculadas nos raios  $X_i$  pode ser estimada pela média amostral:

$$I = \varepsilon(F(X)) \approx \frac{\sum_{i=1}^n F(X_i)}{n} \quad (3.2)$$

se  $n$  (número de amostras) for suficientemente grande, onde "suficientemente grande" depende das propriedades estatísticas da cena cuja imagem é calculada. Medidas estatísticas, como variância amostral e confiança, são utilizadas para medir a qualidade da

estimativa da média e determinar um ponto de corte para o processo de amostragem.

Note-se que a escolha das amostras deve seguir uma adequada distribuição de probabilidade, como acontece no ray tracing estocástico. Quando a amostragem é regular, ocorre um vício estatístico, e algumas premissas utilizadas nesta abordagem carecem de validade.

As vantagens decorrentes desta abordagem são as de fornecer um enquadramento adequado para medir o erro com respeito ao valor real de intensidade no pixel, fornecendo critérios para a avaliação da qualidade no cálculo de uma imagem. Uma desvantagem é que, dependendo da quantidade de estatísticas armazenadas, pode haver a necessidade de mais memória na implementação do programa de síntese.

### 3.3.3 Integração Numérica.

O valor do pixel pode ser analisado em termos de uma função integral, que descreve a iluminação global na cena. A intensidade pode ser vista como uma função do seguinte tipo:

$$I(x, y) = \int \int \cdots \int f(x, y, z, \theta, \phi, t, \lambda) dx dy d\theta d\phi dt d\lambda \quad (3.3)$$

onde  $f(\dots)$  é a função de síntese,  $(x, y, z)$  é a origem do raio,  $\theta$  e  $\phi$  definem a direção do raio,  $t$  indica o tempo, e  $\lambda$  é o comprimento de onda do raio. O problema consiste em calcular uma aproximação desta integral de forma eficiente, a partir de amostras da função  $f$ . O método de escolha das amostras em integração numérica é chamado de *quadratura*.

Se utilizarmos uma quadratura inadequada para o cálculo, a aproximação da integral não será boa. No caso mais simples, apenas um raio (amostra) aproximará a integral acima. A amostragem deficiente da função dá lugar a fenômenos de *aliasing*. O algoritmo de *ray*

*tracing* estocástico consiste em calcular a integral acima por quadratura de Monte Carlo, onde as amostras são fornecidas por uma distribuição de probabilidade. Outro tipo de quadratura, a gaussiana, foi proposta por Meyer ([Meyer 88]) para a escolha de comprimentos de onda no espaço de cor, em substituição à tripla RGB.

A vantagem desta abordagem é sua generalidade, aproveitando técnicas utilizadas em integração numérica para estimar o número de amostras necessárias para um certo nível de erro. O estudo dos métodos de Monte Carlo e as técnicas de redução de variância a eles associadas é fundamental para a eficiência do algoritmo de *ray tracing* estocástico. No entanto, o uso de técnicas numéricas não aproveita as especificidades do problema de síntese de imagens.

### 3.3.4 Fenômenos de Transporte

O processo de síntese de uma imagem pode ser estudado como um fenômeno de transporte de energia luminosa. Kajiya ([Kajiya 86]) propôs uma formalização deste tipo, e indica vários algoritmos de síntese como aproximações desta formulação abstrata:

$$I(x, x') = g(x, x')[\varepsilon(x, x') + \int_S \rho(x, x', x'')I(x', x'')dx''] \quad (3.4)$$

onde  $I(x, x')$  representa a intensidade luminosa que passa do ponto  $x'$  ao ponto  $x$ ,  $g(x, x')$  é um termo geométrico de oclusão, que é inversamente proporcional ao quadrado da distância se  $x$  e  $x'$  forem visíveis entre si, e zero caso contrário.  $\varepsilon$  descreve a luz emitida e  $\rho(x, x', x'')$  a dispersão de energia no ponto  $x'$  de uma superfície intermediária entre  $x''$  e  $x$ . Esta equação foi por ele chamada de "equação de *rendering*" e tem servido de referência

para a formalização de diversas variantes de algoritmos de cálculo da iluminação global ([Shirley 90], [Arvo 90]).

O algoritmo original de radiosidade [Goral 84] favorece uma formulação semi-analítica, na qual o transporte de energia luminosa é amostrado em áreas finitas (*patches*). Já no caso dos algoritmos do tipo *ray tracing*, por sua natureza de amostragem em pontos discretos, o transporte é analisado em termos de partículas carregadas de energia (no caso, os fótons), que descrevem uma caminhada aleatória na cena a ser visualizada. Os chamados métodos zonais de iluminação são definidos também em termos de equações de transporte.

Os métodos de Monte Carlo ([Hammersley 64], [Rubinstein 81]), originalmente utilizados para a simulação de difusão nêutrons durante o desenvolvimento da bomba atômica, fornecem algumas técnicas de redução de variância diretamente aplicáveis à simulação de fótons em síntese de imagens por amostragem discreta. [Arvo 90] propuseram a eliminação de raios não primários por "roleta russa" e [Kajiya 86] discute, no seu algoritmo de *path tracing*, a escolha probabilística de um único raio secundário (refração ou reflexão), o que torna o cálculo do raio similar às simulações de partículas comumente empregadas na física.

Uma vantagem desta análise é a forte correspondência com o modelo físico, o que permite um estudo mais elegante do comportamento da luz, assim como a simulação de outras formas de energia, o que pode ser útil em aplicações de visualização científica. No entanto, nem todas as técnicas são diretamente aplicáveis, pois as simulações de partículas estudadas na física pressupõem, em geral, ambientes geometricamente mais simples que aqueles de interesse na síntese de imagens, e algumas simplificações deixam de ser válidas.

### 3.4 O processo de amostragem no *ray tracing*

Na técnica de *ray tracing*, apresentada por [Whitted 80], é efetuada a simulação do percurso dos raios que, provenientes de fontes de luz (em geral pontuais), interagem com os objetos da cena tridimensional, e atingem o plano da imagem. Para determinar a cor do ponto na imagem, calcula-se o valor da intensidade da iluminação durante este processo, utilizando-se um modelo que trata a iluminação localmente em cada interseção do raio com os objetos da cena. Por uma questão de eficiência, o acompanhamento dos raios é executado em sentido inverso ao percurso dos raios de luz, i.e. desde o plano de imagem até as fontes de luz.

Uma das características relevantes dos algoritmos de *ray tracing* é a de que a função que calcula o mapeamento do espaço da cena para o espaço da imagem é amostrada apenas em pontos discretos de seu domínio. A esta função chamamos de *função de síntese* ou *função imagem*, que inclui tanto o cálculo da iluminação dos objetos da cena quanto o *rendering* ou visualização (neste caso: o lançamento do raio primário, chamado de *ray casting*). Note-se que, em outros métodos de síntese não baseados no método de *ray tracing* (ex: Radiosidade, que trata apenas da iluminação), esta distinção entre iluminação e visualização é explícita.

A dimensionalidade do domínio da função de síntese depende da qualidade da simulação. Assim, por exemplo, se quisermos tratar fenômenos de polarização da luz, deveremos incluir esta dimensão no nosso modelo de iluminação local ([Wolff 90]).

A filosofia de *Ray Tracing Estocástico* (também chamado probabilístico ou *distribuído* [Cook 84]) torna explícita esta característica de amostragem. A função de síntese é expressa na forma de uma integral múltipla, cuja formulação analítica não é possível.

Esta função só pode ser avaliada em pontos discretos do seu domínio por meio do cálculo recursivo da iluminação a partir do raio primário. Aliás, a função de síntese é definida apenas implicitamente através do procedimento computacional que executa este cálculo. O problema, então, reduz-se à estimativa do valor da função integral nas várias dimensões. Para isto, foi proposta a utilização de métodos de integração de Monte Carlo, os quais fazem uso de técnicas probabilísticas para o cálculo aproximado de funções integrais a partir da avaliação do integrando em pontos discretos. Estes pontos são amostrados estocasticamente de acordo com uma distribuição de probabilidade.

A importância da escolha do método de amostragem vem do fato do custo computacional do cálculo para cada amostra ser muito alto nos métodos de *ray tracing*. Ao mesmo tempo, um número reduzido de amostras ou uma estratégia inadequada de amostragem se traduzem em defeitos claramente visíveis na imagem gerada, tais como *aliasing* e ruído. No caso do presente trabalho, a questão do custo das amostras é exacerbada, pois deseja-se modelar parâmetros da visualização que se, por um lado, são essenciais para a geração de efeitos, também aumentam a complexidade computacional da função de síntese.

Outro problema relacionado é o da reconstrução da imagem unicamente a partir das amostras discretas. Note-se que, para a visualização da imagem, existe um novo passo de quantização, pois aquela é discretizada tanto no domínio do plano imagem quanto no espaço de cor e no tempo. Mitchell [Mitchell 88] chama isto de reamostragem (*resampling*). Ademais, geralmente a representação contínua da imagem não é explícita, e o mapeamento dos valores calculados (de uma amostragem não necessariamente regular) para a representação discretizada em pixels, triplas RGB e quadros de animação é definido apenas pelo método

de cálculo.

Para um tratamento correto destes casos, deve ser efetuada a filtragem das amostras para evitar o *post-aliasing* e outros problemas que afetam a qualidade visual da imagem, tais como *ringing*, *ripple*, borrado e anisotropia ([Mitchell 88]). Devido a, nesta pesquisa, tratarmos também de explorar supostas falhas, as características destes filtros são estudadas "para o bem e para o mal", i.e. tanto para corrigir defeitos quanto para provocar alterações de qualidade de imagem interessantes do ponto de vista expressivo. No caso mais simples, a animação é modelada como uma seqüência de instantes de tempo, lançando um único raio primário por pixel e efetuando os cálculos de iluminação apenas para três valores discretos de comprimento de onda, correspondentes às cores componentes do dispositivo gráfico de saída (em geral: vermelha, verde e azul).

O arredondamento dos valores de intensidade, calculados em ponto flutuante, para os valores inteiros de cada componente do dispositivo de saída torna-se significativo se o sistema de saída gráfica não fornecer uma representação que permita considerar o espaço de cores como perceptualmente contínuo, i.e. menos de 8 bits para cada componente, sendo o caso mais crítico o dos dispositivos gráficos binários. Para tratar esta questão, foram desenvolvidas técnicas de *dithering* ([Knuth 87], [Velho 91]) e de escolha das cores mais representativas da imagem ([de Moura Villaça 89]). Alternativamente, este mapeamento pode ser explorado como fonte de efeitos de pós-processamento, tais como posterização e grafismos

.

Finalmente, a presença de textura nos objetos de uma cena implica também na amostragem, reconstrução e reamostragem no espaço da textura [Mitchell 88]. Diversas

técnicas de mapeamento entre espaços bidimensionais, tais como *warping* (deformação de regiões), incorporam mais processos do mesmo tipo. Isto leva à constatação de que as diversas passagens, explícitas ou não, entre representações contínuas e discretas, podem introduzir um grau considerável de erro na imagem final, cujo caráter pode também ser aproveitado com fins expressivos.

### 3.5 Classificação de técnicas de amostragem.

Podemos considerar duas formas para esta classificação, as quais podem ser combinadas. A primeira leva em conta a geração do padrão básico de amostragem: se este for regular, dizemos que a amostragem é determinística. Se, pelo contrário, fazemos uso de seqüências de números pseudo-aleatórios para introduzir uma componente não regular na geração da amostragem, denominámo-la probabilística ou estocástica.

Outra forma de classificação refere-se à adaptatividade da amostragem em regiões críticas do espaço amostrado. Se a técnica permitir um refinamento nestas regiões, i.e. uma densidade de amostras maior que no restante do espaço, dizemos que a técnica é adaptativa. Caso contrário, a densidade local pode ser considerada aproximadamente regular.

A adaptatividade de uma técnica de amostragem requer critérios pelos quais decide-se o refinamento ou não do cálculo numa determinada região do espaço amostrado. Estes critérios podem ser visualizados como uma função de importância, no contexto do cálculo da função (integral) de síntese por métodos de Monte Carlo ([Kajiya 86]). Esta função de importância altera o processo de amostragem para se concentrar nas áreas mais relevantes do domínio da função amostrada, e assim reduzir a variância do resultado obtido para um mesmo

número de amostras. Na literatura de Monte Carlo ([Rubinstein 81], [Hammersley 64]) esta técnica é denominada *amostragem por importância*.

Outra questão relevante é a granularidade do processo de refinamento, i.e. se a adaptatividade permite que densidade de amostragem mude continuamente ou em degraus. Algumas das técnicas apresentadas na literatura ([Cook 86], [Mitchell 87]) utilizam apenas duas densidades de amostragem para cada pixel, utilizando padrões calculados previamente à execução do processo de síntese. Outros trabalhos apresentam técnicas que mudam a densidade num maior número de degraus, como no caso da amostragem *N-rook* ([Shirley 91]) ou de maneira recursiva ([Whitted 80]).

Estratégias de amostragem que permitem mudar a densidade local de maneira contínua foram apresentadas em [Dippé 85], [Kajiya 86], [Painter 89] e [Mitchell 91]. As estratégias de refinamento contínuo permitem, em princípio, obter uma melhor aproximação da função de síntese para o mesmo número total de amostras. No entanto, as características de ruído do padrão básico de amostragem não têm garantia de serem mantidas, e o maior custo da geração das amostras durante a execução do processo de síntese (tanto em tempo computacional quanto em armazenamento) pode eliminar as vantagens da redução do número de amostras calculadas.

Finalmente, outra distinção deve ser feita entre o refinamento local ou global da imagem. A maior parte da literatura supõe um refinamento apenas ao nível de pixel ou subpixel, i.e. a decisão é referente a tomar ou não mais amostras no pixel sendo tratado. Uma variante deste conceito é a utilizada por [Akimoto 89], onde são amostrados apenas alguns pixels numa região, e o refinamento consiste em tomar amostras nos pixels interme-

diários.

O refinamento a nível global, pelo contrário, considera amostras em todo o espaço sendo amostrado, e permite melhorar a qualidade da imagem de maneira uniforme ([van Walsum 91]). Porém, requer grandes estruturas de dados, tais como a árvore  $k - d$ , utilizada por [Painter 89] no espaço da imagem.

### 3.6 Critérios de refinamento da amostragem.

Para as técnicas adaptativas existem diversos critérios de refinamento que têm sido propostos na literatura. [Kajiya 86] propõe combiná-los numa função onde cada critério é pesado para decidir qual a região onde devem ser calculadas novas amostras. [van Walsum 91] apresentam uma classificação dos critérios de acordo com o espaço pelo qual estes são determinados: da imagem, dos objetos ou da textura.

#### 3.6.1 Critérios do espaço da imagem.

Entre os critérios, os mais estudados são os que atuam no espaço da imagem. Um critério bastante utilizado é o de medir a diferença de intensidade entre as amostras, que foi proposto por Whitted ([Whitted 80]). Outros autores estimam estatísticas a partir dos valores amostrais. Assim, Lee et al. ([Lee 85]) calculam incrementalmente a variância amostral, tomando novas amostras apenas se a estimativa da variância real feita a partir daquela não cair abaixo de um limiar pré-determinado.

Uma abordagem parecida é adotada por [Purgathofer 87], que considera que a intensidade do pixel é estimada pela média das amostras e determina um intervalo de confiança

para tal estimativa aplicando o teste  $t$  de Student. [Dippé 85] aproveitam o fato da razão sinal-ruído diminuir quadraticamente com a densidade de amostras para estimar o número de amostras necessário para que aquela razão satisfaça um limiar de qualidade de imagem.

O fato do sistema visual humano ser mais sensível ao contraste (taxa de variação da intensidade luminosa), do que à diferença absoluta de intensidade, é apontado por [Mitchell 87]. Este autor propõe utilizar o contraste como critério de refinamento, e nota também que a sensibilidade ao contraste é dependente da cor, portanto outorga pesos diferentes para as componentes azul, vermelha e verde (em ordem crescente de sensibilidade).

[Painter 89] utilizam dois critérios opostos que são pesados para decidir a região de refinamento: *cobertura* (densidade local de amostras) e *localização de feições* ("feature location", i.e. a detecção de regiões onde a imagem varia rapidamente tais como bordas e altas luzes). Esta combinação de critérios é utilizada apenas para regiões maiores que um pixel; para cada pixel o único critério considerado é o de melhorar a confiança da estimativa da média da função imagem.

### 3.6.2 Critérios do espaço dos objetos e textura.

Nestes casos, aproveita-se informação adicional da cena a ser sintetizada, além do simples valor retornado pelas amostras. Os métodos baseados unicamente em critérios do espaço da imagem muitas vezes realizam cálculos redundantes (e dispendiosos) que poderiam ser evitados se as razões das mudanças locais de intensidade fossem previstas utilizando-se informação do modelo. Neste sentido, é seguida a filosofia da maioria das técnicas de redução de variância para os métodos de integração de Monte Carlo. Além do mais, uma amostragem "às cegas" pode perder características importantes da imagem, devido a iniciar-se com uma

densidade mais esparsa do que seria a adequada para a detecção de feições tais como textura ou *highlights* ("altas luzes").

Um problema deste tipo é a não-detecção de pequenos objetos, que pode ser resolvida pela utilização de envoltórias maiores do que as estritamente necessários para encerrá-las, de maneira a aumentar a probabilidade de interseção de algum raio com este envoltório. Este conceito foi introduzido por [Whitted 80] e utilizado também por [Thomas 89]. [Kajiya 86] discute brevemente utilizar funções dependentes da cena para localizar regiões onde a iluminação for maior, no que pode ser visto como uma forma de amostragem por importância pelo valor da função de síntese.

Os esquemas de *cache* de raios armazenam informação que têm sido aproveitada por alguns autores para decidir sobre o refinamento local em diversos subespaços do domínio da função de síntese. [Akimoto 89], no contexto de um sistema de *ray tracing* sub-amostrado, conservam toda a história de raios adjacentes, o que permite comparar a identidade dos objetos intersectados pelos raios, quais as fontes de luz que estão em sombra, a presença de textura nos objetos, e o valor da iluminação para cada raio. Estes critérios definem níveis de confiança que determinam quais novos cálculos ou interpolações devem ser efetuados para os pixels intermediários.

Ward et al. ([Ward 88]) fazem uso dos valores de intensidade de raios previamente calculados e só calculam uma nova amostra se o ponto de interseção correspondente ficar fora da "zona de influência" de alguma amostra para a qual a iluminação foi anteriormente calculada. Woodward, citado em [van Walsum 91], propôs incluir em cada pixel um *flag* para indicar a existência de bordas de sombras para cada fonte de luz e assim determinar o

lançamento ou não de raios de sombra. [van Walsum 91] propõe três critérios que operam sobre o espaço de textura: *uniformidade* (variação da textura no espaço entre duas amostras), *distância* (no espaço  $(u, v)$  da textura) e *filtro* (limiar de variância de cada *texel* com respeito a seus vizinhos).

### 3.7 Padrões básicos de amostragem regular.

Os padrões de amostragem regular utilizados no espaço da imagem evitam a aglomeração de amostras em algumas regiões, o que torna as imagens menos ruidosas. Porém, o maior problema é a susceptibilidade destes padrões a fenômenos de *aliasing*. Esta se deve à regularidade do padrão de amostragem, que está propenso a bater com outro padrão regular no domínio da imagem. Esta "batida" dá origem a padrões de Moiré.

#### 3.7.1 Ortogonal.

A amostragem regular mais utilizada é a *ortogonal*, na qual as amostras são ordenadas segundo uma grade retangular. Na maioria dos casos, o período da amostragem é uma fração inteira da distância entre os *pixels* em cada coordenada.

#### 3.7.2 Hexagonal.

Outro padrão menos lembrado é o *hexagonal*: as amostras são distribuídas como em uma colméia. É interessante notar que este padrão aparece na distribuição dos receptores luminosos na fóvea (parte central da retina) do olho de primatas ([Yellot 83]) e também que a distribuição de disco de Poisson parece tender a este padrão quando a distância mínima for

grande para a densidade desejada. [Bouville 91] indicam que, para uma determinada largura de banda em torno de cada amostra (no sentido da transformada de Fourier), este padrão é o que oferece a menor densidade possível de amostragem (empacotamento mais apertado).

### 3.7.3 Quincunx.

Finalmente, o padrão "quincunx", no qual as amostras são dispostas nos vértices de losangos, é proposta em [Bouville 91] a partir do fato do sistema visual humano ser mais sensível às frequências alinhadas horizontal e verticalmente do que àquelas em diagonal. Esta propriedade é explorada há muito tempo em tramas para impressão monocromática na indústria gráfica. Segundo os autores, a utilização deste padrão permite atingir a qualidade visual equivalente a uma amostragem ortogonal que fosse gerada com o dobro da densidade.

## 3.8 Padrões básicos de amostragem estocástica.

Para amenizar os problemas de *aliasing* decorrentes de uma amostragem regular, têm sido proposta a utilização de padrões probabilísticos de amostragem ([Shirley 90]). Nestes, a componente aleatória do padrão tende a quebrar possíveis "batidas" com padrões presentes na função imagem, trocando parte do erro de *aliasing* por um erro de ruído, que em geral é menos incômodo para o sistema visual humano ([Yellot 83], [Cook 86]). O padrão aleatório particular a ser escolhido depende do custo de geração do padrão (que chega a ser comparável ao custo do cálculo das amostras), à *discrepância* (que mede a regularidade da densidade local [Zeremba 68], [Shirley 91]), à pertinência de esquemas de refinamento adaptativo, ao comportamento assintótico da variância amostral (que determina a eficiência

computacional) e às características de filtragem das amostras na etapa posterior de reconstrução. A seguir são discutidos alguns dos padrões probabilísticos mais usados em síntese de imagens.

### 3.8.1 Poisson

O padrão aleatório mais simples é o de Poisson, chamado também *uniforme*, no qual as amostras são distribuídas de acordo com uma distribuição de probabilidade uniforme (retangular) no domínio de amostragem. Um dos problemas deste padrão é a tendência à aglomeração excessiva das amostras em regiões do espaço (*clumping*), deixando outras regiões com densidade de amostragem muito inferior. Isto é, a discrepância é muito alta. O custo de geração das amostras é baixo, mas a imagem resultante costuma ser muito ruidosa ([Cook 86], [Mitchell 90]).

### 3.8.2 Disco de Poisson (*Poisson-disk*).

A partir do estudo de [Yellot 83] sobre a distribuição de receptores luminosos no olho de primatas, diversos autores ([Cook 86], [Mitchell 87]) têm proposto a utilização do padrão de Poisson com restrição de distância mínima (disco de Poisson). Esta distribuição é a mesma que a dos receptores luminosos na região extrafoveal da retina onde, por razões fisiológicas decorrentes da arquitetura dos terminais nervosos, não é possível ser mantida a mesma densidade alta de receptores que ocorre na fóvea (centro da retina).

A propriedade básica desta distribuição é a restrição adicional de manter-se uma distância mínima entre as amostras, a partir da distribuição de Poisson. No limite da distância  $d$  tendendo a zero, temos o padrão de Poisson; para  $d$  tendendo ao máximo, aproximamo-

nos da distribuição regular hexagonal. A discrepância diminui com a distância mínima, e as características de ruído são excelentes, sendo a energia do ruído localizada preferencialmente nas altas frequências, as quais são precisamente responsáveis pelo fenômeno de *aliasing* quando há regularidade na amostragem e a função amostrada apresenta energia acima do limite de Nyquist (pelo teorema de amostragem) ([Crow 77]).

O problema mais sério do disco de Poisson é o do alto custo computacional necessário para sua geração. De fato, o nome "disco de Poisson" pode designar diversos tipos de distribuições. A rigor, uma distribuição de disco de Poisson deveria ser calculada gerando-se padrões de Poisson para a densidade desejada e testando-se estes padrões até que um deles satisfaça a restrição de distância mínima. Intuitivamente, pode ver-se que este algoritmo se torna computacionalmente intratável com o aumento da distância mínima e do número de amostras.

### 3.8.3 Tiro de dardos (*dart-throwing*).

A aproximação que geralmente é utilizada para o estudo da distribuição é a geração de amostras candidatas com distribuição de probabilidade uniforme, testando-se a distância mínima entre estas e as amostras anteriormente eleitas e gerando-se uma nova candidata se esta restrição não for cumprida. Mesmo esta aproximação, apelidada de "*dart-throwing*" (tiro de dardos) e que aparece na maior parte da literatura como sinônimo de "disco de Poisson", é extremamente dispendiosa computacionalmente ([Mitchell 87]), sendo utilizada apenas para gerar padrões pré-calculados a serem repetidos em sub-regiões do espaço amostrado, geralmente em cada pixel.

#### 3.8.4 Difusão de Pontos.

Outra aproximação é a de *difusão de pontos*, proposta por [Mitchell 87], cujo menor custo computacional torna viável a geração dos pontos amostrais durante a execução do programa de síntese. Neste algoritmo, os pontos são escolhidos de uma grade ortogonal regular de *subpixels* com base na técnica de Floyd-Steinberg para a tonalização em dispositivos gráficos de apenas dois níveis de intensidade. A posição dentro do subpixel é perturbada aleatoriamente, com distribuição uniforme.

#### 3.8.5 Seqüencial de disco de Poisson.

Mais recentemente, o mesmo autor ([Mitchell 91]) apresentou mais uma aproximação, que denominou "*seqüencial de disco de Poisson*". Para cada amostra a ser escolhida, é gerado um número fixo de candidatos. O candidato com a maior distância mínima a qualquer uma das amostras previamente aceitas é o escolhido. Este algoritmo é da ordem de  $n^2$ , onde  $n$  é o número de amostras. A probabilidade de duas amostras ficarem muito perto entre si é maior que zero, porém muito menor do que no caso da distribuição uniforme.

#### 3.8.6 Estratificada.

Esta distribuição estocástica, também chamada de *jittering*, é a mais utilizada em *ray tracing* estocástico ([Hammersley 64], [Cook 86]). Nesta técnica, o domínio de amostragem é dividido em subregiões regulares (*estratos*) e a amostragem em cada estrato é feita por uma distribuição probabilística, em geral com função de distribuição uniforme. Outras distribuições utilizadas são a gaussiana e a uniforme restrita à parte central do estrato (*semi-jittering*, [Shirley 90]). As vantagens desta distribuição são sua baixa discrepância (por partir

de uma amostragem regular) e o baixo custo de geração dos pontos amostrais. As características de ruído, porém, são piores que na de disco de Poisson, apresentando ruído a partir de um limiar mais baixo de frequências da sua transformada de Fourier ([Mitchell 87]). Outra desvantagem é a necessidade do número de amostras total ser igual ao número de estratos por dimensão elevado ao número de dimensões, o que faz com que cada passo de aumento da densidade aumente muito o número de amostras (ex: para duas dimensões, a série é 4, 9, 16, 25, ...).

### 3.8.7 Estratificada não correlacionada.

Uma alternativa para este último problema é o chamado "jittering não correlacionado" ([Cook 86]) onde, para amostrar num certo número de dimensões, é utilizado um vetor ou uma matriz de mapeamento dos estratos de um subespaço para os de outro subespaço, efetuando uma permutação aleatória para evitar correlação entre subespaços. Por exemplo, se desejamos amostrar no espaço de (imagem + tempo), utilizamos uma matriz para ligar cada estrato do subespaço da imagem ( $x, y$ ) com um estrato correspondente no subespaço do tempo  $t$ ; uma correlação previsível entre os estratos pode provocar *aliasing*. [Mitchell 90]) propõe um esquema similar utilizando o chamado quadrado latino (*Latin square*), que é um método utilizado em análise de experimentos.

### 3.8.8 N-torres (*N-Rook*)

Outra variante é a de N-torres (*N-rook*, [Shirley 91]), na qual o espaço é dividido em  $n \times d$  estratos, onde  $n$  é o número de amostras e  $d$  é o número de dimensões do espaço. Em duas dimensões, divide-se o espaço em  $n \times 2$  estratos, e as amostras são escolhidas de

maneira que nenhum par de amostras coincida na mesma linha ou na mesma coluna (evitando correlação entre estratos), analogamente às torres no jogo de xadrez (ver problema clássico das rainhas em [Wirth 75]). É possível ver que a projeção em cada subespaço (eixo  $x$  ou  $y$ ) inclui todos os estratos unidimensionais.

A escolha do padrão particular é feita por meio de permutações aleatórias. Em um número maior de dimensões, segue-se o mesmo princípio. Uma vantagem desta técnica é que o número de amostras não precisa ser uma potência inteira e independe do número de dimensões do espaço; o crescimento do número de amostras é linear. Além disso, a medida de discrepância para este método é a menor entre as diversas amostragens estocásticas ([Shirley 91]). No entanto, a adaptatividade desta estratégia fica limitada a adicionar uma quantidade de amostras igual à densidade original de cada vez, e o máximo de amostras para uma região é igual ao do *jittering* original.

### 3.9 Problemas na amostragem discreta por pontos.

O processo de amostragem em pontos discretos implica necessariamente um certo grau de perda de informação referente à função imagem. Para pontos da função fora do conjunto amostrado, o valor da função deve ser aproximado, portanto é inevitável a ocorrência de erro.

Tal erro pode ser introduzido tanto por características do processo de amostragem como por uma reconstrução pouco apropriada. A forma na qual este erro aparece na imagem reconstruída (aproximada) pode acontecer em diversas formas. Utilizaremos a convenção adotada em [Cook 86] para distinguir dois tipos básicos de erro: *aliasing* e *ruído*.

No caso do *aliasing*, padrões regulares, que tornam aparente a natureza discreta da amostragem, estão presentes na imagem reconstruída. Os exemplos clássicos deste tipo de erro são os *jaggies* ou "escadinhas" nas bordas de alto contraste e os padrões de Moiré em imagens de texturas regulares. Quando, ao contrário, o erro manifesta-se em forma desorganizada e aleatória, dizemos que ocorre *ruído não correlacionado*, ou simplesmente *ruído*, na imagem reconstruída.

A rigor, na literatura de Processamento de Sinais o conceito de *aliasing* tem um significado muito mais restrito. Nós utilizaremos este termo num sentido mais amplo. Assim, distorções tais como *ripple* (ondulação) da frequência de amostragem e *anisotropia* do filtro de reconstrução são considerados como pertencentes a esta categoria ([Mitchell 87]).

Ao mesmo tempo, o termo *ruído* é utilizado na literatura para designar diversos tipos de erro, que podem até incluir a ocorrência de padrões regulares (ver *ruído coerente* em [Gonzalez 87]). No entanto, convencionamos aqui o uso do termo *ruído* para designar apenas erros de natureza aleatória. O sistema visual humano é muito mais sensível a fenômenos de *aliasing* do que à ocorrência de ruído aleatório. Diversas técnicas de amostragem aproveitam este fato.

Finalmente, outras distorções que afetam a qualidade da imagem não podem ser incluídas em nenhuma das duas categorias acima, tais como *clamping* (truncamento) e *blurring* (borramento) ([Mitchell 87]).

## Capítulo 4

# Especificação e implementação dos efeitos.

### 4.1 Introdução:

O presente capítulo especifica um sistema que utiliza técnicas de *ray tracing* estocástico para simular o processo fotográfico. Diversas fases do processo fotográfico são modeladas, permitindo as manipulações descritas no capítulo 2.

Para a geração de efeitos visuais, utiliza-se um modelo de câmera que combina as distribuições (não necessariamente probabilísticas) de cada fase da geração da imagem. A cada uma destas fases correspondem diversos tipos e qualidades de modelagem.

A confecção dos efeitos é realizada pela combinação de procedimentos apropriados para cada etapa. Estes procedimentos são indicados pelo usuário quando da escrita do arquivo de *script*. A cada efeito corresponde a escolha de uma seqüência de procedimentos

particular, cada um dos quais é chamado em tempo de execução pelo sistema.

Toma-se como paradigma da simulação o processo fotográfico, incluindo todos os componentes da câmera que influenciam o registro do material sensível, assim como seu processamento posterior. Note-se que a seqüência de processos é respeitada, no sentido de que as técnicas computacionais de processamento de imagens são aplicadas pelo usuário apenas nas etapas posteriores ao registro da imagem, de maneira a manter consistência com o processo.

Assim, é possível distinguir entre a aplicação de filtros cromáticos no registro da imagem (efeitos *in-camera* e a manipulação da cor em cima da imagem obtida (pós-produção), cujos resultados podem ser comparados. Outro caso é a utilização de algoritmos de dois passos para a simulação de profundidade de campo [Potmesil 81]: este processo é especificado na etapa de pós processamento pelo usuário, e não como parâmetro de qualidade da simulação da objetiva.

Toda a simulação do processo fotográfico é baseada em abordagens derivadas da filosofia de *ray tracing* estocástico. Assim, são modeladas as distribuições apropriadas das variáveis que determinam o comportamento dos raios de luz nos diversos espaços em que estes devem ser amostrados (euclideano, temporal, de cor, de intensidade, de sensibilidade do filme, etc).

Evidentemente, as distribuições de amostragem devem ser conjugadas, pois só é viável um número limitado de amostras no total, devido ao alto custo computacional desta abordagem. No futuro, devem ser adotadas técnicas adaptativas baseadas em medidas estatísticas para refinar a amostragem só quando for necessário.

As etapas posteriores de revelação e cópia em laboratório da imagem latente, assim como manipulações pictóricas e químicas da cópia obtida são também modeladas através de técnicas de Processamento Digital de Imagens.

Na última parte deste capítulo, descreveremos a implementação de um protótipo para a simulação de efeitos fotográficos e detalharemos dois exemplos.

## 4.2 Fases da Simulação Fotográfica.

A seguir, são detalhadas cada uma das etapas da simulação do processo fotográfico. Nas fases de (1) até (7), a ordem é inversa àquela do percurso do raio, da mesma maneira que no algoritmo clássico de *ray tracing* (*backward ray tracing*) [Whitted 80]. Nas etapas de (8) a (10), segue-se a ordem lógica de processamento da imagem já exposta.

### 4.2.1 Escolha do ponto no filme sensível e tempo da amostra.

É definido um mapeamento do plano da imagem para a superfície do filme. No caso mais simples (sem superamostragem e considerando uma câmera normal) esse mapeamento consiste em tomar uma amostra no centro do *pixel* cuja cor deseja-se calcular.

Quando é aplicado algum tipo de distribuição no processo de rendering, porém, torna-se necessária a superamostragem do *pixel*. As amostras podem ser regularmente espaçadas ou então geradas por um processo estocástico que segue a distribuição de probabilidade apropriada para cada efeito.

O espaçamento das amostras pode ser adaptativo, refinando a amostragem conforme alguma métrica. Já no algoritmo original de Whitted (cf. [Whitted 80]), utilizava-se

a variação de quatro pontos para determinar a necessidade de lançamento de raios adicionais. Trabalhos posteriores propuseram testes baseados em medidas estatísticas ([Lee 85], [Dippé 85], [Purgathofer 87], [Mitchell 87]).

Nas câmeras de fenda e panorâmicas, nas quais a porção do filme exposta muda durante o tempo de exposição, é necessário incluir a modelagem do avanço do filme ou do movimento relativo entre este e a objetiva. Ademais, a distribuição temporal é importante para gerar outros efeitos derivados de borrão de movimento, devido às mudanças de posição ou orientação dos atores da cena (incluindo a própria câmera). A correlação ou não destas distribuições afeta o registro da imagem.

A escolha do ponto no filme é implementada por meio de uma função que, dada a posição do ponto  $(x, y)$  no plano imagem, retorna o valor do ponto no espaço 3-D da câmera e o instante de tempo da amostra. Este procedimento é chamado pelo *renderer*, que escolhe dentre os diversos mapeamentos, de acordo com o tipo especificado pelo usuário através das opções adequadas no arquivo de *script*.

#### 4.2.2 Cálculo do raio primário.

Nesta etapa, definem-se os dados do raio primário, que é lançado em sentido contrário à incidência de luz no filme. Seus parâmetros incluem direção, comprimento de onda, direção de polarização e peso devido a sensibilidade do filme.

No caso mais simples de tratamento de cor escolhem-se, para a imagem inteira, três comprimentos de onda discretos, conhecidos como tripla RGB (vermelho, verde e azul), e o cálculo é efetuado para cada uma destas cores, a partir do ponto escolhido na fase 1.

Porém, este modelo sofre de problemas de *aliasing* de cor, devido ao pequeno número

---

de amostras e ao espaçamento regular dos comprimentos de onda, que viciam o cálculo da iluminação (ver exemplo em [Hall 89]).

Para melhorar a qualidade da simulação, um número maior de amostras deve ser gerado estocasticamente. A modelagem adequada das características do filme necessita da especificação das curvas de resposta de cada camada sensível para os comprimentos de onda da luz visível e dos infra-vermelhos e ultra-violeta próximos.

A distribuição da granularidade do filme, mapeada ou calculada estocasticamente, utilizando as técnicas usuais de modelagem de textura, é também importante no caso do grão do filme ser grande com respeito à resolução da imagem gerada.

Quanto à interface, adota-se a mesma filosofia que no item anterior, i.e. a função apropriada é escolhida em tempo de execução pelo *renderer*. Dado um ponto no filme  $(x, y)$ , esta retorna a estrutura do raio.

### 4.2.3 Geometria do obturador.

É variável no tempo, tornando-se importante quando o tempo de obturação é grande com respeito ao período de exposição do material sensível. Isto é significativo na fotografia ultra-rápida. Nas exposições utilizando luzes de disparo rápido (*flash* ou estroboscópicas), o tempo de disparo da fonte precisa ser sincronizado adequadamente, caso contrário a geometria do obturador pode influir na imagem registrada.

O procedimento para modelar o obturador consiste apenas de uma função que retorna a pertinência ou não da máscara para uma posição  $(x, y)$  e um instante de tempo  $t$ , de acordo com o movimento do obturador.

#### 4.2.4 Sistema óptico da objetiva.

O modelo mais simples é o que corresponde à primitiva câmera obscura (objetiva estenopeica). Os raios de luz provenientes da cena convergem em um ponto ideal (*pinhole camera model*). Assim, os objetos da cena estão sempre em foco.

Este modelo, porém, é inadequado quando se deseja incluir efeitos derivados da manipulação da profundidade de campo. Todavia, Potmesil [Potmesil 81] simulou profundidade de campo por meio de uma técnica de dois passos, que aproveita no segundo passo a informação de profundidade gerada por um *renderer* cujo modelo de câmera é pontual. O cálculo da visibilidade continua o mesmo, portanto as mudanças de visibilidade para objetos muito desfocados não podem ser tratadas pelo modelo.

Chen ([Chen 87b]) introduziu uma técnica para tratar objetos muito desfocados, mas sem resolver outro problema, que é a combinação desta técnica com outras amostragens (por exemplo, temporal) que podem mudar a visibilidade dos objetos.

Uma simulação mais exata foi apresentada por Cook ([Cook 84] [Cook 88]), que utiliza, no lugar da objetiva pontual, um modelo de lente fina. A direção dos raios que chegam no filme sensível é amostrada na área da lente por meio de uma distribuição de probabilidade. Esta distribuição pode ser combinada com outras, que operam sobre parâmetros diferentes do *renderer*, seguindo a filosofia de *ray tracing* estocástico. Uma abordagem mais completa é proposta no presente trabalho: efetuar a simulação do comportamento dos raios no sistema óptico da objetiva, que na realidade é formado por várias lentes e/ou espelhos e um diafragma. Esta simulação consiste no acompanhamento dos raios através dos elementos ópticos acima indicados.

A principal vantagem deste método é a de permitir modelar naturalmente distorções e aberrações das objetivas, que são exploradas para gerar efeitos. De fato, a maioria das objetivas especiais exercem sua função por meio de aberrações ou distorções propositais. Por exemplo, algumas objetivas de foco suave baseiam-se em aberração esférica subcorrigida, assim como o efeito do olho-de-peixe consiste em uma exagerada distorção em barril.

Para o tratamento adequado da cor, visando simulação da aberração cromática, os índices de refração e de transparência das componentes devem ser modelados espectralmente. Finalmente, as regulagens do sistema óptico, tais como diafragma, foco e outros parâmetros (dependentes do tipo de objetiva), podem ter uma certa distribuição temporal, que é utilizada para a geração de efeitos. Um exemplo disto é o *zooming*, obtido pela distribuição conjugada do instante de tempo e da distância focal variável das objetivas tipo *zoom*.

A escolha pelo *renderer* do procedimento que modela cada objetiva é feita em tempo de execução, de acordo com a opção especificada no arquivo de *script*. Assim, dado como entrada o raio que vem do filme através do obturador (em sentido contrário ao percurso da luz), é retornado o raio incidente na superfície do elemento mais externo da objetiva.

#### 4.2.5 Suplementos na frente da objetiva.

Estes incluem montagens de filtros, suplementos afocais, anteparos e/ou máscaras. Cada tipo de suplemento deve ser modelado separadamente e colocado em uma lista ordenada para a modelagem de efeitos combinados.

É possível simular a maioria destes efeitos por pós-processamento, mas, em termos de especificação, tratamos aqui da simulação integrada ao *renderer*, que permite a combinação destes efeitos com os de outras etapas de uma maneira mais elegante.

Os filtros, anteparos e máscaras podem ser, na maioria dos casos, tratados como elementos sem espessura, ou seja, bidimensionais. Procedimentos para calcular o novo raio a partir do raio inicial são programados especificamente para cada filtro. Em alguns casos, como nos filtros de cores, este procedimento consiste apenas na atenuação da intensidade do raio, dependendo de seu comprimento de onda. Os polarizadores, todavia, requerem modificações no modelo de iluminação.

Já para os filtros que incluem mudança na geometria do raio, os procedimentos devem utilizar técnicas de modelagem mais apuradas. Na maioria destes, um padrão regular ou irregular é gravado na superfície do filtro. Este pode ser modelado por um procedimento computacional. Exemplos deste tipo, ainda que aplicados em procedimentos de dois passos, aparecem em [Shinya 89] (filtro estrela) e [Nakamae 89] (difração).

Note-se que para a modelagem precisa do filtro de difração, seria preciso modificar o modelo de iluminação, pois este fenômeno depende da fase da onda luminosa, o que não é considerado nos modelos usuais. Dias ([Dias 91]) propõe um tal modelo para interferência em filmes finos. A polarização da luz também deve ser incluída no modelo de iluminação, como proposto por Wolff e Kurlander ([Wolff 90]).

Outros suplementos, tais como os bifocais ou prismas, requerem modelagem em três dimensões. Existem, ainda, suplementos para teleobjetiva ou grande-angular cuja complexidade é maior e que podem requerer simulação completa da passagem dos raios através deles.

Finalmente, é necessário notar que, para cada filtro, a orientação pode variar durante o tempo de exposição, o que é utilizado para efeitos combinados. Por exemplo, o efeito de

órbita é atingido girando um prisma na sua montagem.

Uma lista de filtros e suplementos é especificada no arquivo de *script*, sendo os procedimentos apropriados chamados pelo *renderer*, de acordo com a ordenação dada. Cada um destes procedimentos retorna o raio incidente a partir do raio refratado que se dirige para a objetiva ou para o suplemento anterior na lista (lembre-se que o percurso do algoritmo é contrário ao da luz).

#### 4.2.6 Iluminação de curta duração.

As fontes de luz de disparo rápido, i.e. *flashes* e estroboscópicas, são utilizadas corriqueiramente como fonte de efeitos. O problema na sua modelagem é o fato dos modelos de iluminação existentes não incluírem a mudança da intensidade da fonte de luz durante o tempo de exposição.

Isto é resolvido mediante uma função de atenuação no tempo, que permite modelar os picos de intensidade das fontes de iluminação de duração menor que o tempo de exposição, e que entra no cálculo da iluminação.

#### 4.2.7 Modelagem temporal da cena.

É necessária para aqueles efeitos derivados da movimentação apreciável dos atores da cena, incluindo a própria câmera, que provocam um borramento na imagem (*motion blur*). Assim, deve modificar-se a definição das primitivas e a orientação da câmera de modo que seja possível consultar os parâmetros (geométricos e outros) dos atores em qualquer instante discreto durante o tempo finito de exposição.

Assim, cada objeto deve incluir, não uma matriz, mas um procedimento de trans-

formação geométrica parametrizado por tempo. No caso mais simples (objeto estático) este procedimento retorna sempre a mesma transformação. Neste caso, o objeto pode ser borrado apenas pela ação de outros efeitos, como movimento de câmera ou *zooming*. Note-se que a movimentação de objetos da cena requer mudanças na modelagem da descrição da cena com respeito à usual em um *ray tracer* tipo Whitted.

#### 4.2.8 Revelação e tratamento do negativo.

Inclui os diversos efeitos referentes a técnicas de laboratório, tais como a utilização de reveladores ou processos inadequados para o tipo de filme sensível utilizado. Outros exemplos são a solarização do negativo e a manipulação de material de fotografia instantânea (processo *Polaroid*).

Todos estes efeitos, por tratar em processos sobre a imagem latente, podem ser modelados por técnicas de processamento digital de imagens. A interface com o sistema é uma família de funções, sendo as instâncias particulares escolhidas pelo sistema de acordo com a lista de processos especificados pelo usuário. Cada uma destas funções recebe um mapa  $(x, y)$  da imagem e retorna o mapa transformado.

#### 4.2.9 Cópia e tratamento da cópia em papel.

A maioria das manipulações em laboratório acontece no processo de cópia ou em cima da cópia já obtida. Os efeitos incluem o de alto contraste, baixo-relevo, conversão para traço, solarização, posterização, aumento do grão e diversos tipos de retoques.

Incluem-se aqui, também, as composições de imagens geradas por diversos meios e a imitação de meios de geração emparentados com a fotografia, tais como fotocópia (*Xerox*)

e impressão por tramas fotolitográficas.

Neste item, consideramos adicionalmente os efeitos próprios do vídeo, tais como mosaico, *fade* e *wipe*, assim como a imitação automática de técnicas de pintura, do estilo das apresentadas em [Haeberli 90].

Todos estes efeitos se utilizam de técnicas de processamento digital de imagens. A interface é similar à da etapa anterior.

#### 4.2.10 Adaptação para o dispositivo de saída.

A última etapa é a adaptação da imagem gerada. O sistema de cores para cálculo não é necessariamente o mesmo que aquele utilizado no dispositivo de saída (monitor, impressora, *film-printer*, etc.), conforme já foi discutido no capítulo 2.

Em geral, as cores entendidas pelo dispositivo são descritas por uma tripla RGB (vermelho, verde e azul), definida para determinados comprimentos de onda ( $\lambda$ ) enquanto que, para fins de cálculo, podem vir a ser utilizados outros valores de  $\lambda$ , outros sistemas de cores (CIE-XYZ, HSV, etc.) ou uma representação espectral, tal como se indica na fase (2). Outro problema é a não linearidade da escala de intensidades para cada componente de cor RGB, precisando ser corrigida de acordo com um parâmetro próprio do equipamento (correção *gamma*).

Porém, no contexto deste trabalho, não se pretende estudar as características de cada dispositivo de saída, e sim estabelecer uma mecânica para o cálculo. Ou seja, a tradução é feita para uma tripla RGB dada pelo usuário (a partir de informações técnicas) e não para medidas experimentais do dispositivo de saída, como seria correto, mas fora do escopo deste trabalho devido ao esforço exigido para a calibração adequada de monitores.

Os pontos de (1) até (7) determinam a distribuição geométrica, temporal e de comprimento de onda dos raios percorridos. A correlação entre distribuições torna-se importante, pois é impraticável lançar uma multidão de raios para cada distribuição.

Simplificações podem ser efetuadas em uma ou mais destas etapas, mas os resultados devem ser consistentes. Por exemplo, quando o sistema óptico da objetiva for aproximado por um orifício de agulha, ainda assim o campo angular que seria captado por uma lente de uma distância focal equivalente deve ser o mesmo. Isto é, a interface deve ser a mesma, seja qual for o grau de qualidade da simulação efetuada.

Os pontos (8) e (9) operam sobre um mapa de *pixels*, e são independentes do processo anterior, a não ser pelas características do filme empregado quanto ao tipo de processo (negativo ou diapositivo), sensibilidade e granularidade.

### 4.3 Esquema do Algoritmo de Simulação.

A seguir é especificado, em pseudo-código, o algoritmo de geração da imagem, incorporando os efeitos visuais. Os comentários referem-se aos itens da seção anterior.

```
Programa Gera_Imagem (<arquivo>)
{
render.parametros = Ler_Parametros (<arquivo>.script);
cena= Ler_Geometria (<arquivo>.script);

para cada pixel
{
pixel.cor = ZERO;

para cada raio amostrado
{
raio.tempo      = escolhe_tempo_raio  ();      /* etapa 1 */
raio.cor        = escolhe_cor_raio    ();      /* etapa 1 */
raio.inicio     = escolhe_inicio_raio ();      /* etapa 1 */
```

```
raio.direcao = escolhe_direcao_raio ();      /* etapa 2 */
raio = obturador (raio);                    /* etapa 3 */

se (raio.cor == ZERO)
{
    va´ para o proximo raio
}

raio = objetiva (raio);                      /* etapa 4 */

para cada suplemento
{
    raio = suplemento (raio);                /* etapa 5 */
}

raio = calcula_iluminacao (raio, cena);     /* etapas 6 & 7 */

pixel.cor = integra (raio.cor);
}

imagem[#pixel] = pixel.cor;
}

revela_filme ();                             /* etapa 8 */

para cada processo da copia
{
    imagem = processo_copia (imagem)        /* etapa 9 */
}

Grava (<arquivo>.rgb) = imagem;
}
```

## 4.4 Implementação

A implementação do sistema de geração de efeitos visuais insere-se no contexto de um projeto maior, sendo desenvolvido desde 1989 no DCA/FEE/UNICAMP, denominado ProSim ([Bannwart 89], [Diz 91], [Queiroz 91]). Este projeto visa a construção de um sistema completo de Síntese de Imagens, incluindo modelagem de sólidos, *rendering* e animação.

A incorporação dos efeitos na etapa de visualização é dada utilizando-se *Ray Tracing* Estocástico. O ProSim já incluía uma implementação clássica de *Ray Tracing*, e o presente sistema utiliza esta implementação para o cálculo das amostras (raios).

Na verdade, o *ray tracer* original do ProSim necessitou ser modificado, mas conceitualmente consideramos o cálculo da iluminação por *ray tracing* como uma caixa preta. O *ray tracer* do ProSim foi reformulado como um conjunto de classes em C++.

Algumas técnicas básicas de amostragem foram implementadas: Poisson, Jitter e disco de Poisson seqüencial, assim como geradores de números aleatórios para as distribuições de probabilidade uniforme, normal, multinormal, gamma e exponencial. A seguir, descrevemos em detalhe um tipo de efeito obtido utilizando-se esta implementação.

Foi estendida a linguagem de descrição de cenas do ProSim e implementado um analisador sintático para o *ray tracer*, contendo estas extensões.

#### 4.4.1 Efeito de *zooming*

Implementou-se a amostragem estocástica no tempo de exposição, permitindo a simulação do efeito de *zooming*. Para a obtenção deste efeito, considerou-se uma objetiva estenopeica (câmera de furo) e um tempo de exposição finito. A posição do observador foi deslocada uniformemente durante este tempo de exposição, mantendo-se, no entanto, fixa a janela de visualização no plano da imagem.

O afastamento do observador provoca, então, o fechamento da pirâmide de visualização. Isto é similar a manipular uma objetiva do tipo *zoom* em uma câmera fotográfica real, durante o tempo de exposição. A amostragem no tempo de exposição (que determina a posição do observador) é feita utilizando-se jittering não correlacionado com a distribuição

espacial no pixel.

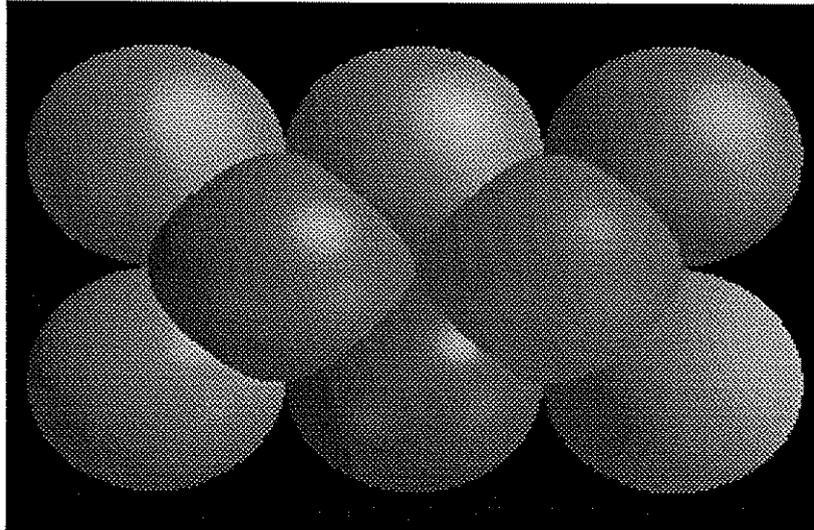


Figura 4.1: Observador fixo

A figura 4.1 mostra uma imagem obtida com o observador em uma posição fixa (sem *zooming*) e a figura 4.2 com o observador em movimento, provocando o efeito aqui descrito.

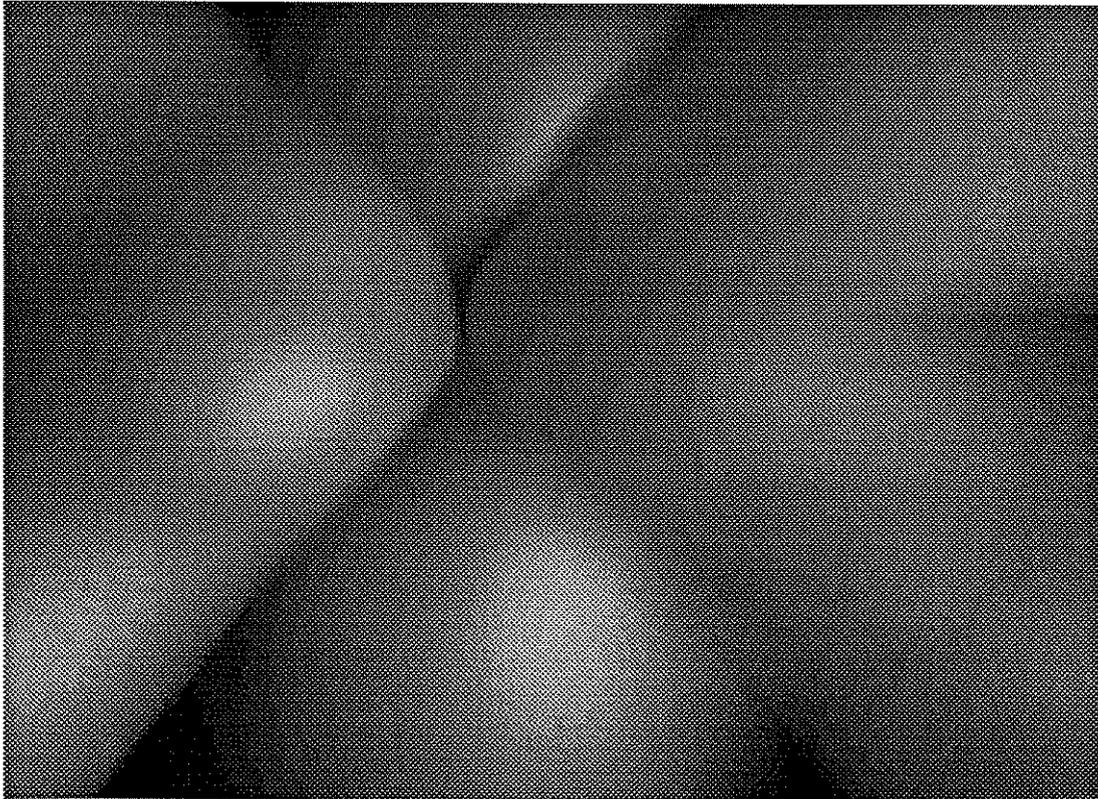


Figura 4.2: Observador em movimento: efeito de *zooming*

```
Programa Gera_Imagem (<arquivo>)
{
render.parametros = Ler_Parametros (<arquivo>.script);
cena= Ler_Geometria (<arquivo>.script);

para cada pixel
{
pixel.cor = ZERO;

para cada raio amostrado
{
raio.tempo      = escolhe_tempo_raio  ();      /* item 1 */
raio.cor        = escolhe_cor_raio    ();      /* item 1 */
raio.inicio     = escolhe_inicio_raio ();      /* item 1 */
raio.direcao    = escolhe_direcao_raio ();     /* item 2 */
raio = obturador (raio);                  /* item 3 */

se (raio.cor == ZERO)
{
va´ para o proximo raio
}

raio = objetiva (raio);                    /* item 4 */

para cada suplemento
{
raio = suplemento (raio);                 /* item 5 */
}

raio = calcula_iluminacao (raio, cena);    /* itens 6 & 7 */

pixel.cor = integra (raio.cor);
}

imagem[#pixel] = pixel.cor;
}

revela_filme ();                          /* item 8 */

para cada processo da copia
{
imagem = processo_copia (imagem)         /* item 9 */
}
```

```
Grava (<arquivo>.rgb) = imagem;  
}
```

## Capítulo 5

# Proposta de algoritmo de síntese

### 5.1 Introdução

Neste capítulo, desenvolvemos algumas idéias para um novo algoritmo de síntese, a partir de observações sobre os algoritmos de amostragem por pontos. Este algoritmo é baseado nos métodos de *ray tracing* estocástico. A novidade principal é a adoção de uma estrutura de dados intermediária para a armazenagem de amostras representativas, independente da resolução, que chamamos de *imagem latente*. O algoritmo é dividido em dois passos: o primeiro constrói a imagem latente e o segundo calcula, a partir desta, a imagem digital que pode ser visualizada nos dispositivos gráficos.

Este algoritmo não foi ainda implementado integralmente, mas achamos importante incluir sua discussão pois, se confirmada nossa intuição, proporcionaria um enfoque consistente para a implementação das etapas do processo fotográfico especificadas no capítulo anterior. A parametrização da amostragem deve permitir um ajuste, pelo usuário do sistema de síntese, da relação custo computacional/qualidade da imagem, dentro de um mesmo

algoritmo.

## 5.2 A dependência do pixel

Na maioria dos algoritmos do tipo *ray tracing*, a amostragem no espaço da imagem é feita localmente (*pixel a pixel*). Quando se deseja melhorar a qualidade da imagem gerada, realiza-se uma amostragem múltipla para cada pixel (*Ray Tracing* estocástico [Cook 84]). Isto acarreta duas conseqüências principais:

**Custo de cálculo mínimo:** A quantidade mínima de raios primários (amostras no espaço objeto) é igual ao número de *pixels*, portanto temos um limite rígido para a complexidade de cálculo computacional, que independe das características da cena.

**Vício estatístico:** A adaptatividade da função de amostragem é limitada, já que as medidas estatísticas da amostragem são viciadas pelo fato de termos que coletar pelo menos uma amostra por pixel, mesmo quando se trate de uma região de pouco interesse.

As duas características acima expressas limitam a eficiência do método de *ray tracing*, o que se torna patente quando o número de amostras é incrementado, como no *ray tracing* estocástico e na geração de animações.

## 5.3 Amostragem e reamostragem da função de síntese

Analisaremos o processo de síntese de imagens, de forma a tentar estabelecer um ponto de vista alternativo que nos permita atacar os problemas colocados no item acima. A síntese de imagens realistas pode ser definida em termos do mapeamento entre dois modelos:

- 1 ) A **cena**, entendida como um modelo abstrato que representa a geometria e as propriedades físicas de um ambiente virtual. É análoga ao sujeito da fotografia.
- 2 ) A **imagem digital**, que constitui um recorte da cena virtual, dada por uma representação visual plana, discretizada em pixels. É análoga a uma cópia fotográfica.

O algoritmo clássico de *ray tracing* executa o mapeamento de (1) para (2) num único passo. Dado seu alto custo computacional, diversas técnicas de aceleração têm sido propostas na literatura:

- 1 ) Maior eficiência no cálculo da interseção de raios com objetos da cena pelo uso de volumes envoltórios e *octrees*.
- 2 ) Separação dos cálculos de iluminação dos cálculos de visibilidade, utilizada nos chamados algoritmos de dois passos (*bi-directional ray tracing*[Chattopadhyay 87] [Arvo 86], técnicas mistas com radiosidade [Wallace 87]).
- 3 ) Generalização do raio (amostra discreta) para amostragens de áreas extensas. Em vez de lançar raios, calcula-se a interseção dos objetos da cena com cones (*cone tracing*[Amanatides 84]) ou cilindros (*beam tracing*[Heckbert 84]).
- 4 ) Parametrização dos cálculos de iluminação, de forma a aproveitar os cálculos em outras imagens similares quando há certas variações no ambiente e nas propriedades óticas dos objetos.
- 5 ) Limitação no número de raios não primários, pelo corte da recursividade no cálculo da iluminação.

Contudo, quando se trata de seqüências de animação e de *ray tracing* estocástico, a limitante é o aumento do número absoluto de raios primários que devem ser calculados. Esta relação direta de aumento do tempo de cálculo com o aumento da resolução se deve a dois fatores:

- 1 ) O processo de cálculo dos raios primários é atrelado à resolução espacial, temporal e cromática da imagem digital.
- 2 ) Para o cálculo de cada raio, não é levada em consideração a história global do conjunto de raios anteriormente calculado.

Portanto, vemos que a relação custo/benefício computacional de incrementar o número de amostras no espaço objeto (raios primários) é sempre limitada pelas ineficiências próprias da abordagem clássica de *ray tracing*. Na prática, toda a informação gerada no processo de cálculo da iluminação para um raio primário é aproveitada, no máximo, a nível do pixel (uma exceção é a ideia de *pixel-selected ray tracing* [Akimoto 89]).

O algoritmo clássico de *ray tracing*, ao mesmo tempo que é dispendioso quanto ao uso da capacidade de cálculo do processador, é bastante econômico quanto ao uso de memória. A saída natural é procurar meios de reduzir o custo de cálculo para uma dada qualidade de imagem, utilizando mais memória.

Poderíamos pensar em armazenar explicitamente todas as amostras e procurar uma forma de otimizar o cálculo utilizando a informação armazenada. No entanto, isto não seria prático, dada a enorme quantidade de memória necessária para uma imagem em alta resolução.

Outra abordagem possível é calcular estatísticas globais (a nível da imagem) e compará-las com outras locais, que seriam armazenadas para cada pixel. Assim, escolheríamos o pixel mais adequado para o cálculo de uma nova amostra com base na comparação de ambas medidas estatísticas. Isto ainda envolveria o armazenamento de informação para cada pixel, dependendo ainda da resolução.

A solução proposta é criar uma representação intermediária que permita armazenar eficientemente o resultado dos cálculos de iluminação e visibilidade, independentemente da discretização final da imagem. Esta representação seria reamostrada e filtrada, gerando-se a imagem digital.

Chamaremos esta representação intermediária de *imagem latente*, por analogia ao processo fotográfico. Trata-se do registro da imagem por meio da exposição à luz, que provoca transformações químicas no filme sensível. Este registro só é visível após a revelação e a cópia, análogos ao processo de reamostragem. Distinguímos, assim, dois passos no algoritmo de *ray tracing* modificado:

- 1 ) No primeiro, temos como entrada a descrição da cena, e como saída uma estrutura de dados representando um conjunto de amostras (cálculo de raios) da função de visualização, independentes da discretização da imagem final.
- 2 ) Num segundo passo, esta representação intermediária é mapeada para a imagem discretizada, tal como pode ser representada num dispositivo gráfico de saída.

Esta abordagem teria as seguintes vantagens, decorrentes dos cálculos de iluminação e visibilidade serem independentes da resolução final:

- 1 ) Aumento incremental da qualidade, baseado no número de amostras, bastando re-  
mostrar a imagem latente para se gerar uma nova imagem digital.
- 2 ) Pré-filtragem da imagem digital, se considerarmos a imagem latente como uma apro-  
ximação da função imagem contínua.
- 3 ) Possibilidade de interferir no processo de amostragem da imagem latente e filtragem  
para a imagem digital, permitindo simular de forma direta os processos de revelação e  
ampliação do negativo.
- 4 ) Reaproveitamento dos cálculos de iluminação e visibilidade.
- 5 ) Não é necessário calcular um mínimo de uma amostra para cada *pixel*. Coletar menos  
amostras significa apenas uma imagem de qualidade inferior.

Para um pequeno número de amostras, menor que o de pixels, temos uma imagem de baixa qualidade, mas gerada rapidamente. Isto é útil num sistema interativo, onde o usuário pode obter uma pré-visualização da imagem final.

#### 5.4 Uma proposta de representação para a imagem latente.

A imagem latente é o registro da cena num suporte plano, independente da resolução da imagem digital. Deseja-se que a estrutura de dados utilizada para representá-la num sistema de síntese de imagens satisfaça as seguintes características:

- 1 A estrutura deve armazenar de forma eficiente a informação referente ao cálculo dos raios (amostras), incluindo tanto o valor das amostras como medidas estatísticas referentes a conjuntos de amostras.

- 2 Deve ser possível acessar rapidamente, para escrita e consulta, as informações estatísticas relativas as amostras, tanto a nível global (toda a imagem latente) como a nível local.

Quando falamos de nível local, subentende-se que nos referimos a uma vizinhança difusa em torno do ponto de amostragem, e não a nível de pixel, pois a imagem latente é independente da discretização da imagem digital.

Propõe-se para este fim uma estrutura de dados baseada em árvore binária, onde as folhas contem informação referente as amostras individuais, e os nós internos armazenam as estatísticas do conjunto de amostras contidas na sua sub-árvore. A árvore binária é uma estrutura adequada, pois o acesso à informação global e local vem dado pela própria hierarquia da árvore, e o acesso as folhas é  $O(\log(n))$ , onde  $n$  é o número de amostras.

Uma árvore binária mínima conteria as seguintes informações, para pontos de amostragem de dimensão  $d$ :

- 1 : Na folha, o ponto de amostragem  $P(d \times 1)$  e a intensidade luminosa  $I$  calculada para esse ponto.
- 2 : Nos nós internos, a média dos pontos amostrais  $P_m(d \times 1)$ , a matriz de covariância dos pontos amostrais  $(d \times d)$ , a média e a variância dos valores amostrados (intensidade), a contagem do número de amostras, mais um apontador para cada filho.

Assim, uma árvore contendo estas informações mínimas consumiria, para cada folha,  $(d + 1)$  valores em ponto flutuante. Para cada nó interno, necessitamos  $(d^2 + d)/2$  valores em ponto flutuante para a matriz simétrica, acrescidos de  $(d + 2)$  flutuantes do vetor média

amostral, dois apontadores e um inteiro. Considerando que o número de nós internos é  $(n - 1)$ , podemos calcular o tamanho da imagem latente:

$$n_f = (n - 1)((d^2 + d)/2 + d + 2) + n(d + 1) \quad (5.1)$$

$$n_f = n((d^2 + d)/2 + 2d + 3) \quad (5.2)$$

$$n_f = n((d^2 + d + 4d + 6)/2) \quad (5.3)$$

$$n_f = n((d^2 + 5d + 6)/2) \quad (5.4)$$

$$n_i = n - 1 \approx n \quad (5.5)$$

$$n_p = 2(n - 1) \approx 2n \quad (5.6)$$

$$\text{tamanho por amostra} = ((d^2 + 5d + 6)/2)f + 2p + i$$

onde

$n_f$  = número de valores em ponto flutuante na imagem latente

$n_i$  = número de valores inteiros na imagem latente

$n_p$  = número de apontadores na imagem latente

$f$  = tamanho em bytes de um número em ponto flutuante

$i$  = tamanho em bytes de um número inteiro longo

$p$  = tamanho em bytes de um apontador em memória

$d$  = número de dimensões do ponto de amostragem

A seguir, apresentamos uma tabela com exemplos para uma arquitetura onde  $f = 8$ ,

$p = 4$  e  $i = 4$  (ex: Sun SPARC), para diversas densidades médias de amostras por pixel, referentes a uma resolução espacial de 640 x 480. O número  $d$  refere-se ao número de dimensões amostradas estocasticamente. No caso  $d = 2$ , utilizamos amostragem estocástica apenas no plano da imagem (coordenadas  $(x, y)$ ), considerando luz monocromática e exposição instantânea.

Adicionando amostragem estocástica no comprimento de onda da luz ( $\lambda$ ) e no tempo, podemos representar cor e tempo de exposição finito, tendo assim 4 dimensões  $(x, y, \lambda, t)$ .

	$d = 2$	$d = 3$	$d = 4$
Bytes / amostra	92	132	180
0.1 amostra/pixel	2.8M	4M	5.5M
0.5 amostra /pixel	14M	20M	22.5M
1 amostra/pixel	28M	40M	55M
5 amostras/pixel	140M	200M	225M
10 amostras/pixel	280M	400M	550M

Vemos que estes valores requerem, para uma alta qualidade de imagem, grandes recursos de memória. Esta limitação não é tão grave, pois é possível testar o algoritmo mediante a geração de imagens com um número relativamente pequeno de amostras.

## 5.5 Poda da árvore binária

Para amenizar o problema do alto custo de memória, propõe-se uma modificação, que consiste em podar a árvore quando for atingido um limiar máximo de uso de memória alocada. Os ramos menos úteis para o refinamento da árvore são "podados", ou seja, escolhem-se sub-árvores nos níveis mais baixos para serem eliminadas. Para estes ramos podados, mantém-se a raiz da sub-árvore, agora como folha, contendo uma amostra representativa do conjunto de amostras eliminado.

Para isso, é preciso estabelecer critérios para a eliminação das sub-árvores. Um critério razoável é a confiança estatística da média amostral, calculada a partir das estatísticas armazenadas no nó. Quanto maior a confiança, maior a probabilidade de uma sub-árvore representando um conjunto de amostras ser substituída por uma amostra única.

Um valor alto de confiança indica que a quantidade de informação perdida ao eli-

minar a subárvore será mínima. Assim, o recurso de memória seria melhor utilizado para armazenar cálculos referentes a outra região da imagem, melhorando a qualidade desta como um todo.

## 5.6 O processo de amostragem

A escolha dos pontos de amostragem e sua organização na árvore binária deve ser feita de forma a aproveitar a história de amostras anteriormente calculadas. No entanto, devemos cuidar para que esta escolha mantenha uma componente probabilística, caso contrário a história das amostras anteriores irá determinar totalmente o processo de amostragem.

O algoritmo que propomos para a escolha das amostras navega na árvore de amostras, utilizando a informação armazenada nos nós da árvore para determinar o refinamento adaptativo da amostragem em cada sub-árvore. Mas esta escolha tem uma componente probabilística, que define o nível de profundidade da pesquisa na árvore. O ponto de parada está dado por uma distribuição de probabilidade, que pode ser parametrizada de forma a favorecer o caráter local ou global da amostragem.

Quando a pesquisa pára num nó interno, é escolhido um ponto aleatório baseado na distribuição normal de dimensão  $d$ , determinada pela média e covariância do conjunto de amostras que este representa. De forma similar, quando a pesquisa pára numa folha, é escolhido um ponto baseado na distribuição normal multidimensional com covariância que depende da distância entre a amostra e seu pai, mas com restrição de distância mínima com relação à folha, de maneira similar ao disco de Poisson.

## 5.7 Reamostragem

Uma vez calculada a imagem latente devemos, a partir desta, gerar a imagem digital. Chamamos este processo de reamostragem, pois trata-se de coletar amostras da árvore, que aproxima o contínuo da função imagem, para assim gerar uma discretização que possa ser exibida em dispositivos gráficos de saída.

O que desejamos é aproximar o valor da integral de energia luminosa que incide no pixel, entendido como um volume discreto no número de dimensões adotado para a amostragem ( $d = 2, 3, 4$ ). Este processo é similar à amostragem estocástica adotada para o ray-tracing clássico, com a diferença de que os cálculos mais custosos de interseção e visibilidade não precisam ser refeitos.

Cada amostra coletada da imagem latente, que chamaremos de re-amostra, precisa ser filtrada através de uma função de base ampla, pois, em geral, não teremos uma amostra disponível que pertença ao pixel sendo calculado. O filtro caixa, que calcula uma média aritmética das re-amostras do pixel não é, portanto, adequado.

A qualidade da re-amostragem define também a qualidade da imagem final. Quanto mais re-amostras para um dado pixel, maior será a nitidez da imagem digital resultante. A escolha do tipo de filtro nos permite interferir no processo, da mesma forma que os processos de laboratório determinam parcialmente a qualidade visual da cópia fotográfica.

## Capítulo 6

# Conclusões e trabalhos futuros

### 6.1 Histórico

Este trabalho pretendeu fornecer algumas bases teóricas para um modelo mais acurado de câmara sintética na geração de imagens realistas, que permitisse simular o tipo de manipulações associadas com a confecção de efeitos especiais.

Inicialmente, pretendia-se centrar o trabalho em uma implementação que incluísse o maior número possível de efeitos, baseada em algoritmos rápidos do tipo *scan-line* e *Z-buffer*. Logo percebemos que estes algoritmos não eram adequados para desenvolver um número amplo de efeitos, pois as técnicas seriam extremamente específicas daquele efeito particular e o esforço dispendido não poderia ser diretamente aproveitado em outros.

A abordagem de *ray tracing* estocástico mostrou-se promissora, mas a pesquisa bibliográfica mostrou que existiam poucos artigos que tratavam efeitos fotográficos. Ao mesmo tempo, cada efeito tinha um tratamento bastante diferente, não sendo definido como extensão a um modelo de câmara que servisse de base.

Assim, para poder integrar os efeitos dentro de um modelo, foi necessário definir um modelo próprio de câmera, o que exigiu um estudo mais aprofundado da teoria por trás das diferentes técnicas de síntese de imagens e dos efeitos gerados por fotógrafos, que resultou no compêndio do capítulo 2.

Para a implementação, decidiu-se estender um *ray tracer* pré-existente, aproveitando assim as rotinas de intersecção, de cálculo da iluminação, e partes do analisador sintático. O modelo de *ray tracing* estocástico é bastante dispendioso se adotarmos uma abordagem ingênua, pois a complexidade computacional cresce com o número de dimensões amostradas.

Começamos, então, a pesquisar técnicas de adaptatividade na amostragem. Surgiu a idéia de integrar a amostragem multidimensional em uma estrutura de dados eficiente, e desenvolvemos as idéias apresentadas no capítulo 5, cuja implementação está sendo ainda desenvolvida.

## 6.2 Resultados

Compilamos e classificamos um grande número de efeitos fotográficos e discutimos as técnicas computacionais passíveis de serem utilizadas na sua simulação em um sistema de Computação de Imagens.

Especificamos um modelo de câmera mais completo que o usual, o que é necessário para a confecção de efeitos fotográficos. Este modelo pode ser estendido para permitir o aproveitamento acumulativo dos trabalhos nesta área.

A geração de alguns efeitos fotográficos foi realizada a partir de um *ray tracer* estilo Whitted, através da adição de características estocásticas aos parâmetros de visualização.

Estes melhoramentos podem ser incorporados a outras implementações de *ray tracers*.

Esboçamos uma nova proposta de algoritmo utilizando o conceito de imagem latente, que deve ser mais aprofundada, a partir de idéias que surgiram estudando as limitações dos algoritmos existentes

Sentimos falta de uma base teórica unificada e de uma linguagem comum para a área de síntese de imagens. As abordagens teóricas a este problema ainda são bastante diferenciadas entre os diversos autores, talvez por tratar-se de uma disciplina relativamente nova. A discussão sobre as diversas abordagens possíveis para a Síntese de Imagens (capítulo 3) foi motivada por esta constatação.

### 6.3 Trabalhos futuros

O passo seguinte é estender o protótipo de maneira a permitir a obtenção de um maior número de efeitos visuais, fornecendo uma implementação de todas as fases do processo fotográfico especificadas no capítulo 4. Deve estudar-se a incorporação destas facilidades a um *ray tracer* público de ampla popularidade, tal como PovRay ou RayShade, para assim atingir um grande número de usuários.

Existe interesse em implementar o algoritmo proposto no capítulo 5, pois queremos aprofundar estas idéias e testá-las na prática. Devem ser melhor estudadas as características estatísticas da abordagem proposta, no sentido de obter uma melhor aproximação da imagem virtual. Também deve ser estudada a localidade no acesso à estrutura de árvore binária, de forma a evitar que amostras próximas no tempo de processamento sejam distantes em memória, provocando um uso ineficiente desta.

---

Também deve ser analisada a complexidade computacional. A extensão destas idéias para geração de animações é um caminho a ser seguido. Dado o alto custo computacional, intrínseco na geração de imagens realistas, deve ser pesquisada a possibilidade de utilizar uma arquitetura distribuída para o algoritmo da imagem latente.

# Bibliografia

- [Akimoto 89] Akimoto, T., Mase, K., Hashimoto, A., and Suenaga, Y. (1989). Pixel selected ray tracing. In Hansmann, W., Hopgood, F. R. A., and Strasser, W., editors, *Eurographics '89*, pages 39–50. North-Holland.
- [Amanatides 84] Amanatides, J. (1984). Ray tracing with cones. In Christiansen, H., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '84 Proceedings)*, volume 18, pages 129–135.
- [Arvo 86] Arvo, J. (1986). Backward ray tracing.
- [Arvo 90] Arvo, J. and Kirk, D. B. (1990). Particle transport and image synthesis. In Baskett, F., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '90 Proceedings)*, volume 24, pages 63–66.
- [Bahar 87] Bahar, E. and Chakrabarti, S. (1987). Full-wave theory applied to computer-aided graphics for 3D objects. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 7(7):46–60.
- [Bannwart 89] Bannwart, C. v. Z., Diz, J., Hartelt, H., Madeira, H., and aes, L. M. (1989). PROSIN - projeto em síntese de imagens. In *Anais do II SIBGRAP*.

- 
- [Blinn 77] Blinn, J. F. (1977). Models of light reflection for computer synthesized pictures. volume 11, pages 192–198.
- [Bouville 91] Bouville, C., Tellier, P., and Bouatouch, K. (1991). Low sampling densities using a psychovisual approach. In Purgathofer, W., editor, *Eurographics '91*, pages 167–182. North-Holland.
- [Catmull 84] Catmull, E. (1984). An analytic visible surface algorithm for independent pixel processing. In Christiansen, H., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '84 Proceedings)*, volume 18, pages 109–115.
- [Catmull 80] Catmull, E. and Smith, A. R. (1980). 3-D transformations of images in scanline order. volume 14, pages 279–285.
- [Chattopadhyay 87] Chattopadhyay, S. and Fujimoto, A. (1987). Bi-directional ray tracing. In Kunii, T. L., editor, *Computer Graphics 1987 (Proceedings of CG International '87)*, pages 335–43, Tokyo. Springer-Verlag.
- [Chen 87a] Chen, Y. C. (1987a). Lens effect on synthetic image generation based on light particle theory. *The Visual Computer*, 3(3):125–36.
- [Chen 87b] Chen, Y. C. (1987b). Lens effect on synthetic image generation based on light particle theory. In Kunii, T. L., editor, *Computer Graphics 1987 (Proceedings of CG International '87)*, pages 347–366. Springer-Verlag.
- [Cook 86] Cook, R. L. (1986). Stochastic sampling in computer graphics. *ACM Transactions on Graphics*, 5(1):51–72.

- 
- [Cook 88] Cook, R. L. (1988). Stochastic sampling in computer graphics. In Joy, K. I., Grant, C. W., Max, N. L., and Hatfield, L., editors, *Tutorial: Computer Graphics: Image Synthesis*, pages 283–304. Computer Society Press.
- [Cook 84] Cook, R. L., Porter, T., and Carpenter, L. (1984). Distributed ray tracing. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '84 Proceedings)*, volume 18, pages 137–45. Monte Carlo distribution of rays to get gloss, translucency, penumbras, depth of field, motion blur.
- [Cook 82] Cook, R. L. and Torrance, K. E. (1982). A reflectance model for computer graphics. *ACM Transactions on Graphics*, 1(1):7–24.
- [Cox 77] Cox, A. (1977). *Óptica Fotográfica*. Ediciones Omega, Barcelona.
- [Crow 77] Crow, F. C. (1977). The aliasing problem in computer-generated shaded images. *Communications of the ACM*, 20(11):799–805.
- [Davidhazy 70] Davidhazy, A. (1970). How I broke the reality barrier. *Popular Photography*, pages 74–77.
- [Dawson 89] Dawson, B. M. (1989). Changing perceptions of reality. *Byte*, pages 293–304.
- [de Moura Villaça 89] de Moura Villaça, A. (1989). Um ambiente para síntese de imagens realistas baseado na metodologia ray-tracing. In *Anais do II SIBGRAPI*, pages 113–120.
- [Dias 91] Dias, M. L. (1991). Ray tracing interference color. *IEEE Computer Graphics and Applications*, pages 54–60.

- 
- [Dippé 85] Dippé, M. A. Z. and Wold, E. H. (1985). Antialiasing through stochastic sampling. In Barsky, B. A., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings)*, volume 19, pages 69–78.
- [Diz 91] Diz, J. A., de Moraes, G. N. M., and Magalhães, L. P. (1991). Simulation of photographic lenses and filters for realistic image synthesis. In *COMPUGRAPHICS '91*, volume I, pages 197–205.
- [Duff 85] Duff, T. (1985). Compositing 3-D rendered images. In Barsky, B. A., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings)*, volume 19, pages 41–44.
- [Foley 90] Foley, J. D., van Dam, A., Feiner, S. K., and Hughes, J. F. (1990). *Computer Graphics, Principles and Practice, Second Edition*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts. Overview of research to date.
- [Fonseca 91] Fonseca, L. E. N. (1991). Desenvolvimento de um sistema para colorização de imagens digitais. Dissertação de mestrado, DCA / Faculdade de Engenharia Elétrica / UNICAMP.
- [Fournier 88] Fournier, A. and Fiume, E. (1988). Constant-time filtering with space-variant kernels. In Dill, J., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings)*, volume 22, pages 229–238.
- [Frederick 90] Frederick, C. and Schwartz, E. L. (1990). Conformal image warping. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 10(2):54–61.

- 
- [Gerfelder 91] Gerfelder, N. and Haas, S. (1991). Feature illumination for computer graphics and animation. Internal Report FAGD-91i012, Fraunhofer Arbeitsgruppe für Graphische Datenverarbeitung, Darmstadt.
- [Glassner 89] Glassner, A. S. (1989). How to derive a spectrum from an RGB triplet. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 9(4):95–99.
- [Gonzalez 87] Gonzalez, R. C. and Wintz, P. (1987). *Digital Image Processing (2nd Ed.)*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- [Goral 84] Goral, C. M., Torrance, K. E., Greenberg, D. P., and Battaile, B. (1984). Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '84 Proceedings)*, volume 18, pages 212–22.
- [Grant 85] Grant, C. W. (1985). Integrated analytic spatial and temporal anti-aliasing for polyhedra in 4-space. In Barsky, B. A., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings)*, volume 19, pages 79–84.
- [Guy 73] Guy, R. (1973). *Tratado de Fisiologia Médica*. Editora Guanabara Kogan, Rio de Janeiro, RJ.
- [Haeberli 90] Haeberli, P. E. (1990). Paint by numbers: Abstract image representations. In Baskett, F., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '90 Proceedings)*, volume 24, pages 207–214.
- [Hall 89] Hall, R. (1989). *Illumination and Color in Computer Generated Imagery*. Springer-Verlag, New York. includes C code for radiosity algorithms.

- 
- [Hall 90] Hall, R. A. (1990). Manipulating color. In *SIGGRAPH '90 Advanced Topics in Ray Tracing course notes*.
- [Hall 83] Hall, R. A. and Greenberg, D. P. (1983). A testbed for realistic image synthesis. *IEEE Computer Graphics And Applications*, 3:10–20.
- [Hammersley 64] Hammersley, I. M. and Handscomb, D. C. (1964). *Monte Carlo Methods*. Wiley, New York, NY.
- [Hanke 81] Hanke, R. (1981). *La Fascinación de los Filtros*. Hama, Mannheim.
- [Hecht 77] Hecht, E. and Zajac, A. (1977). *Óptica*. Fondo Educativo Interamericano.
- [Heckbert 86] Heckbert, P. S. (1986). Filtering by repeated integration. In Evans, D. C. and Athay, R. J., editors, *Computer Graphics (SIGGRAPH '86 Proceedings)*, volume 20, pages 315–321.
- [Heckbert 84] Heckbert, P. S. and Hanrahan, P. (1984). Beam tracing polygonal objects. In Christiansen, H., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '84 Proceedings)*, volume 18, pages 119–127.
- [Imes 84] Imes, J. (1984). *Special Visual Effects*. Van Nostrand - Reinhold, New York, NY.
- [Joy 88] Joy, K. I., Grant, C. W., and Max, N. L. (1988). Image synthesis.
- [Kajiya 86] Kajiya, J. T. (1986). The rendering equation. In Evans, D. C. and Athay, R. J., editors, *Computer Graphics (SIGGRAPH '86 Proceedings)*, volume 20, pages 143–150.

- 
- [Kirk 91] Kirk, D. B. and Arvo, J. (1991). Unbiased sampling techniques for image synthesis. In Sederberg, T. W., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '91 Proceedings)*, volume 25, pages 153–156.
- [Knuth 87] Knuth, D. E. (1987). Digital halftones by dot diffusion. *ACM Transactions on Graphics*, 6(4):245–273.
- [Korein 83] Korein, J. and Badler, N. (1983). Temporal anti-aliasing in computer generated animation. volume 17, pages 377–388.
- [Langford 80] Langford, M. (1980). *Aprendizagem da Fotografia - Aperfeiçoamento*. Ed. Presença, Lisboa.
- [Langford 81a] Langford, M. (1981a). *Manual del Laboratorio Fotográfico*. Hermann Blume, Madrid.
- [Langford 81b] Langford, M. (1981b). *Tratado de Fotografia*. Ed. Presença, Lisboa.
- [Lee 85] Lee, M. E., Redner, R. A., and Uselton, S. P. (1985). Statistically optimized sampling for distributed ray tracing. In Barsky, B. A., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings)*, volume 19, pages 61–67.
- [Magenat-Thalmann 85] Magrenat-Thalmann, N. and Thalmann, D. (1985). Special cinematographic effects with virtual movie cameras. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 6(4):43–50.
- [Magenat-Thalmann 87] Magrenat-Thalmann, N. and Thalmann, D. (1987). *Image Synthesis*. Springer-Verlag, New York.

- 
- [Max 85] Max, N. L. and Lerner, D. M. (1985). A two-and-a-half-D motion-blur algorithm. In Barsky, B. A., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings)*, volume 19, pages 85–93.
- [Mazzuca 91] Mazzuca, D. A. (1991). Profundidade de campo e motion blur no método de ray tracing distribuído. Dissertação de mestrado, Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [Meyer 88] Meyer, G. W. (1988). Wavelength selection for synthetic image generation. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 41:57–79.
- [Mitchell 87] Mitchell, D. P. (1987). Generating antialiased images at low sampling densities. In Stone, M. C., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '87 Proceedings)*, volume 21, pages 65–72.
- [Mitchell 90] Mitchell, D. P. (1990). The antialiasing problem in ray tracing. In *SIGGRAPH '90 Advanced Topics in Ray Tracing course notes*.
- [Mitchell 91] Mitchell, D. P. (1991). Spectrally optimal sampling for distributed ray tracing. In Sederberg, T. W., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '91 Proceedings)*, volume 25, pages 157–164.
- [Mitchell 88] Mitchell, D. P. and Netravali, A. N. (1988). Reconstruction filters in computer graphics. In Dill, J., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings)*, volume 22, pages 221–228.
- [Moravec 81] Moravec, H. (1981). 3D graphics and the wave theory. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '81 Proceedings)*, volume 15, pages 289–96.

- 
- [Nakamae 86] Nakamae, E., Harada, K., Ishizaki, T., and Nishita, T. (1986). A montage method: The overlaying of the computer generated images onto a background photograph. In Evans, D. C. and Athay, R. J., editors, *Computer Graphics (SIGGRAPH '86 Proceedings)*, volume 20, pages 207–214.
- [Nakamae 89] Nakamae, E., Ishizaki, T., Nishita, T., and Takita, S. (1989). Compositing 3D images with antialiasing and various effects. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 9(2):21–29.
- [Nakamae 90] Nakamae, E., Kaneda, K., Okamoto, T., and Nishita, T. (1990). A lighting model aiming at drive simulators. In Baskett, F., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '90 Proceedings)*, volume 24, pages 395–404.
- [Neumann 89] Neumann, L. and Neumann, A. (1989). Photosimulation: Interreflection with arbitrary reflectance models and illuminations. *Computer Graphics Forum*, 8(1):21–34.
- [Painter 89] Painter, J. and Sloan, K. (1989). Antialiased ray tracing by adaptive progressive refinement. In Lane, J., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Proceedings)*, volume 23, pages 281–288.
- [Phong 75] Phong, B.-T. (1975). Illumination for computer generated pictures. *Communications of the ACM*, 18(6):311–317.
- [Porter 84] Porter, T. and Duff, T. (1984). Compositing digital images. In Christiansen, H., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '84 Proceedings)*, volume 18, pages 253–259.
- [Potmesil 81] Potmesil, M. and Chakravarty, I. (1981). A lens and aperture CAM model for synthetic image generation. volume 15, pages 297–305.

- 
- [Shinya 87] Shinya, M., Takahashi, T., and Naito, S. (1987). Principles and applications of pencil tracing. In Stone, M. C., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '87 Proceedings)*, volume 21, pages 45–54.
- [Shirley 90] Shirley, P. (1990). *Physically Based Lighting Calculations for Computer Graphics*. Ph.D. thesis, Dept. of Computer Science, U. of Illinois, Urbana-Champaign. good overview of illumination algorithms to date; available on the net.
- [Shirley 91] Shirley, P. (1991). Discrepancy as a quality measure for sample distributions. In Purgathofer, W., editor, *Eurographics '91*, pages 183–194. North-Holland.
- [Smith 86] Smith, T. G. (1986). *Industrial Light and Magic - The Art of Special Effects*. Ballantine Books, Hong Kong.
- [Thomas 89] Thomas, D., Netravali, A. N., and Fox, D. S. (1989). Anti-aliased ray tracing with covers. *Computer Graphics Forum*, 8(4):325–336.
- [Tressider 86] Tressider, J., editor (1986). *La Cámara Mágica*. Salvat Editores, Barcelona.
- [Tressider 88a] Tressider, J., editor (1988a). *The Complete Kodak Book of Photography*. Salvat Editores, Barcelona.
- [Tressider 88b] Tressider, J., editor (1988b). *El Desafío del Color*. Salvat Editores, Barcelona.
- [Turkowski 86] Turkowski, K. (1986). Anti-aliasing in topological color spaces. In Evans, D. C. and Athay, R. J., editors, *Computer Graphics (SIGGRAPH '86 Proceedings)*, volume 20, pages 307–314.

- [van Walsum 91] van Walsum, T., van Nieuwenhuizen, P. R., and Jansen, F. W. (1991). Refinement criteria for adaptive stochastic ray tracing of textures. In Purgathofer, W., editor, *Eurographics '91*, pages 155–166. North-Holland.
- [Velho 91] Velho, L. (1991). Pyramid-based dithering. In *Anais do IV SIBGRAPI*, pages 169–178.
- [Wallace 81] Wallace, B. A. (1981). Merging and transformation of raster images for cartoon animation. volume 15, pages 253–262.
- [Wallace 87] Wallace, J. R., Cohen, M. F., and Greenberg, D. P. (1987). A two-pass solution to the rendering equation: A synthesis of ray tracing and radiosity methods. In Stone, M. C., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '87 Proceedings)*, volume 21, pages 311–320.
- [Ward 88] Ward, G. J., Rubinstein, F. M., and Clear, R. D. (1988). A ray tracing solution for diffuse interreflection. In Dill, J., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings)*, volume 22, pages 85–92.
- [Whitted 80] Whitted, T. (1980). An improved illumination model for shaded display. *Communications of the ACM*, 23(6):343–349.
- [Williams 83] Williams, L. (1983). Pyramidal parametrics. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '83 Proceedings)*, volume 17, pages 1–11.
- [Wirth 75] Wirth, N. (1975). *Algorithms + Data Structures = Programs*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

- 
- [Wolberg 89] Wolberg, G. and Boult, T. E. (1989). Separable image warping with spatial lookup tables. In Lane, J., editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Proceedings)*, volume 23, pages 369–378.
- [Wolff 90] Wolff, L. B. and Kurlander, D. J. (1990). Ray tracing with polarization parameters. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 10(6):44–55.
- [Yellot 83] Yellot, J. I. (1983). Spectral consequences of photoreceptor sampling in the rhesus retina. *Science*, 221:382–385.
- [Zeremba 68] Zeremba, S. K. (1968). The mathematical basis of Monte Carlo and quasi-Monte Carlo methods. *SIAM Review*, 10(3):303–314.