

# Hogramas Gerados por Computador Aplicados à Visualização Tridimensional em Computação Gráfica

RUI MANUEL RIBEIRO DE BASTOS<sup>1</sup>  
ANATÓLIO LASCHUK<sup>2</sup>

CPGCC - Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação  
UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Av. Bento Gonçalves, 9500 - Caixa Postal 15064  
CEP 91501 - Porto Alegre - RS - BRASIL

<sup>1</sup>rmb@bruna.inescn.pt

<sup>2</sup>laschuk@vortex.ufrgs.br

**Abstract.** The computer generation of holograms is a rendering method which enables the use of physiological depth cues as stereopsis, motion parallax and visual accommodation in realistic images synthesized by Computer Graphics. Starting from a geometrical description of the scene, the algorithm determines interference patterns under specific conditions, which are put into photographic films to make the holograms. The holography reconstruction process involves the interference pattern observation under specific conditions. Through backlight illumination the holograms reconstruct the real and the virtual images of the holographed scene presenting, simultaneously, physiological and psychological depth cues. Considerations of hidden elements, implemented by ray-casting, reduce the stored information as well as improve the realism of the holographic images, favoring the tridimensional perception of the reconstructed holographies.

## 1 Introdução

A síntese de imagens fotorrealísticas tem sido objetivo de muitas pesquisas em Computação Gráfica, onde se persegue um realismo visual capaz de criar reações similares às que um observador teria ao visualizar a cena real [FOL 90]. As técnicas e modelos existentes para síntese deste tipo de imagens baseiam-se em projeções bidimensionais apresentando a mesma visão para os dois olhos do observador. Sendo assim, analogamente à visualização de uma fotografia, uma imagem fotorrealística não apresenta a real sensação de se observar uma cena tridimensional, mas sim, uma imagem plana dessa cena. Neste trabalho, investigam-se características que possibilitam a sensação de tridimensionalidade mais real, tais como estereoscopia, paralaxe e acomodação [BAS 92].

Diversas técnicas podem ser utilizadas para incrementar o realismo de uma imagem sintética. Dentre as características que o cérebro considera para identificar profundidade em uma cena, existem algumas que são ditas características de pintor, ou psicológicas, já que costumam ser utilizadas pelos artistas para criar a impressão de profundidade [OWC 90]. Destacam-se, entre estas, a deformação de perspectiva, a oclusão, o sombreamento, a degradação da cor com a distância, a reflexão entre o-

bjetos, a transparência, a projeção de sombras e as texturas dos objetos. Outras são as características fisiológicas de profundidade que dão ao observador a real sensação de profundidade e as principais são a estereoscopia, a paralaxe e a acomodação.

**Estereoscopia** é o efeito causado quando um observador percebe uma cena de modo ligeiramente diferente em cada olho. O cérebro funde as imagens utilizando a diferença entre elas para produzir a percepção de profundidade, que se acentua para objetos próximos ao observador.

**Paralaxe** está ligada aos movimentos do observador com relação à cena e a possibilidade de oclusão de objetos por outros mais próximos, assim como a visualização de objetos ocultos em outras posições relativas.

**Acomodação** refere-se à capacidade de foco do observador para objetos situados a diferentes distâncias dos seus olhos.

A estereoscopia, também referenciada como paralaxe binocular, é tida como a mais importante característica fisiológica de profundidade e surge, como primeira opção, para o incremento da sensação fisiológica de real tridimensionalidade [OWC 90]

[BED 91] [DIT 91] [FOL 90]. Embora o realismo alcançado com esta técnica nos dispositivos estereoscópicos seja considerável ainda carece de outras características fisiológicas de profundidade, como a paralaxe e a acomodação.

A consideração das três principais características fisiológicas de profundidade apresenta resultados de elevado realismo fisiológico e caracteriza as técnicas autoestereoscópicas de exibição de imagens tridimensionais [OKO 80] [TRI 87] [YAT 74] [YAT 76]. A simulação de seus efeitos em Computação Gráfica é recente e pouco explorada [NEA 88]. As imagens fotorealísticas geradas com o emprego de técnicas de Computação Gráfica apresentam resultados de elevadíssimo realismo psicológico, estando, entretanto, ainda longe de provocarem em um observador a mesma sensação experimentada ao observar a cena real; falta-lhes um incremento no realismo fisiológico.

O objetivo principal deste trabalho é o estudo da geração de hologramas por computador aplicados à visualização tridimensional em Computação Gráfica, a partir da superposição de distribuições analíticas relativas às ondas de luz que deixam uma cena descrita geometricamente. Procura-se analisar a inclusão das características fisiológicas de profundidade a imagens sintetizadas por computador. Para tanto, parte-se de um estudo de hologramas gerados por computador e, de alguma forma, direcionam-se e introduzem-se conceitos com relação à utilização das técnicas desenvolvidas em Computação Gráfica para a síntese de hologramas por computador com características psicológicas de profundidade. Pretende-se, com isto, possibilitar um significativo incremento no realismo fisiológico de imagens sintetizadas por computador.

## 2 Geração de Hologramas por Computador

Os hologramas ópticos são produzidos expondo um filme fotográfico, simultaneamente, à luz coerente espalhada por um objeto (feixe-objeto) e a um feixe de referência (feixe-referência) vindo diretamente da mesma fonte de luz (*laser*) [COL 71] [KAS 87]. O padrão de interferência estático registrado pelo filme codifica a aparência do objeto em uma faixa de pontos de vista ao redor de uma posição central. A iluminação desses filmes (hologramas) com um feixe de luz similar ao de referência, utilizado no processo de geração, resulta na reconstrução da imagem tridimensional do objeto, que causa em um observador a mesma sensação de profundidade que ele teria ao ver o objeto real.

Hologramas de objetos imaginários podem ser produzidos simulando o processo de interferência de luz coerente e registrando, em filme fotográfico, o

padrão de interferência calculado. Quanto maior a definição do método de registro em filme fotográfico ou, quanto maior a informação armazenada, tanto maior será a exatidão no armazenamento dos padrões de interferência. Consequentemente, maior será a eficiência da reconstrução das hologramas, exibindo imagens mais brilhantes e bem definidas, devido à difração mais eficiente da luz incidente.

Dado que a geração de hologramas por computador opera sobre descrições matemáticas, necessita-se de uma representação que descreva o objeto a ser holografado e, ao mesmo tempo, possibilite o tratamento, de uma forma simples, da propagação e interferência das ondas que deixam esse objeto por emissão, reflexão e/ou transmissão.

## 3 Modelagem dos objetos

A modelagem de objetos por computador tem sido amplamente estudada em Computação Gráfica com diferentes intuítos. Utilizam-se técnicas que vão desde a representação por malhas de polígonos até a representação por superfícies paramétricas racionais ou funções implícitas [MAN 88] [FOL 90] [FAR 90] [BAS 91] [OLI 91].

A possibilidade de utilização dessas técnicas na representação de objetos para geração de hologramas por computador restringe-se à necessidade de conhecimento das ondas que deixam cada uma dessas superfícies por emissão, transmissão e/ou reflexão. Um ponto emite uma onda esférica, isto é, que tem amplitude e fase variando radialmente com relação a esse ponto no espaço [FOW 75]. Da mesma forma, é simples associar uma onda cilíndrica a uma linha reta, ou seja, que tem amplitude e fase variando radial e ortogonalmente a essa reta no espaço. Entretanto, é bastante difícil conceber que tipo de onda deixa uma superfície qualquer (figura 1). Uma descrição dos objetos a nível de pontos é, obviamente, mais rica do que qualquer outro tipo de representação [CHE 87] [FRE 86].

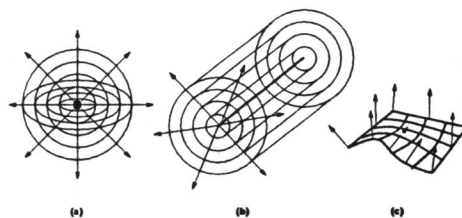


Figure 1: Tipos de onda que deixam: (a) um ponto, (b) uma reta e (c) uma superfície qualquer.

Deve ficar claro que o modelo ideal de síntese de hologramas por computador corresponde a uma re-

apresentação do objeto por pontos, visto que, na tentativa de imitar a natureza do processo holográfico, cada ponto do holograma deve possuir informações de todos os pontos do objeto que lhe são visíveis. A consideração de que o objeto é composto por pontos pode ser feita discretizando-o sobre a superfície que o compõe.

Conforme o teorema da amostragem<sup>1</sup> [COL 71], já que os dispositivos de registro em filme fotográfico impõem uma definição limitada, o nível de discretização do objeto não necessita ser infinito. Assim, os objetos serão modelados por pontos e o modelo para determinação dos padrões de interferência basear-se-á na superposição de distribuições analíticas referentes às ondas esféricas que deixam esses pontos.

#### 4 Câmera holográfica sintética

Analogamente aos processos de visualização monoculares de Computação Gráfica, os objetos são modelados em um sistema de coordenadas próprio, dito sistema de referência do objeto (SRO) e, posteriormente, instanciados em outro referencial, dito universo (SRU), especificando-se a sua posição e orientação. A câmera holográfica sintética ou, sistema de referência da câmera (SRC), é um referencial localizado e orientado no SRU. Esta hierarquia de sistemas de referência permite uma série de vantagens na construção de cenas e tomadas de câmera.

Na geração de hologramas por computador, a escala utilizada nos eixos dos sistemas de referência tem sentido físico e deve-lhe ser associada uma unidade de medida. Como os hologramas gerados por computador (HGCs) deverão interagir com luz e a mesma também deverá ser considerada na etapa de geração, deve-se utilizar um sistema de medidas coerente com os utilizados no mundo real. Desta forma, optou-se pelo sistema internacional de unidades (SI ou MKS) implicando que a medida de qualquer distância ou coordenada igual a um ( $x$ ,  $y$  ou  $z = 1$ ), em qualquer sistema de referência, significa um metro.

Considera-se que o filme fotográfico da câmera holográfica sintética é plano e sem espessura e está posicionado no plano  $z = 0$ , ou seja, é o plano XY do SRC. Deve-se considerar também que esse plano possui um poder de definição máximo, isto é, encontra-se discretizado em elementos de área de dimensões finitas. Estes elementos de área, por analogia ao termo

<sup>1</sup>De acordo com o teorema da amostragem, se uma função  $f(x)$  tem banda limitada, isto é, se o seu espectro pode ter valores não nulos em apenas uma banda limitada de frequências, e se  $f(x)$  é amostrada no mínimo duas vezes em cada intervalo  $\Delta x$  de dimensão mínima igual ao período espacial da componente de maior frequência espacial de  $f(x)$ , então  $f(x)$  pode ser exatamente reconstruída da amostragem discreta.

*pixel* de Computação Gráfica, serão chamados de *hoxels* (*hologram elements*).

Para que um anteparo difrate uma onda, sua transmitância deve ter alterações em dimensões da ordem do comprimento de onda ( $\lambda$ ) da onda incidente [BAS 92] [FOW 75]. Sendo assim, os *hoxels* devem ter dimensões da ordem de  $\lambda$  e a frequência espacial máxima que poderá ser registrada, segundo o teorema da amostragem, será  $\frac{1}{2dh}$  onde  $dh$  é a dimensão do *hoxel*, sobre o filme fotográfico. Para a visualização dos HGCs será utilizada luz visível, por isso, devem-se considerar comprimentos de onda entre 4000 e 7000Å, onde  $1\text{Å} = 10^{-10}m$ . Por limitações exigidas pelo processo de fotorredução utilizar-se-ão *hoxels* de dimensões  $10 \times 10\mu m$ .

Logo, a câmera holográfica sintética é um sistema de coordenadas euclidiano tridimensional onde o filme fotográfico é o plano XY ( $z = 0$ ) subdividido em regiões de área retangulares ditas *hoxels*, onde as coordenadas cartesianas possuem sentido físico com unidades dadas pelo sistema internacional.

#### 5 Propagação de ondas

Conforme foi dito, os objetos serão modelados utilizando pontos que emitem luz difusamente, isto é, ondas esféricas [FOW 75]. A consideração de que pontos emitem ondas esféricas faz com que qualquer ponto do espaço receba informações de todos os pontos que compõem o objeto. Sendo assim, hologramas gerados utilizando objetos descritos por pontos apresentam redundância total, isto é, cada ponto do padrão de interferência contém informações de todos os pontos do objeto.

A propagação de ondas esféricas é dada por

$$E_o(x, y, z) = A_o e^{i\frac{2\pi}{\lambda}r} \quad (1)$$

onde  $r$  é a distância do elemento emissor dessa onda ao *hoxel* ( $x, y, z$ ) onde se deseja conhecer a amplitude e fase dessa onda;  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $A_o$  a amplitude da onda.

Assume-se ondas perfeitamente coerentes com fases iniciais nulas e distâncias  $r$  muito maiores do que o comprimento de onda, de modo que as alterações da amplitude sejam desprezíveis sobre o plano do holograma.

#### 6 Determinação do padrão de interferência

Embora as ondas interfiram em qualquer ponto do espaço, deseja-se conhecer o padrão de interferência formado sobre o plano do holograma, isto é, a intensidade de cada ponto desse padrão que será convertida em transmitância proporcional de um filme fotográfico, ou seja, o próprio holograma. Deve-se,

portanto, determinar o valor de intensidade sobre cada *hoxel*. A intensidade do padrão de interferência é dada pelo quadrado da interferência do feixe-objeto e do feixe-referência [BAS 92] [COL 71] [LEI 65]:

$$I = (E_o + E_r)(E_o + E_r)^* \quad (2)$$

onde  $E_o$  representa o feixe-objeto e  $E_r$  o feixe-referência e o asterisco representa o complexo conjugado (utiliza-se notação complexa para facilitar alguns cálculos, embora a quantidade com sentido físico seja real). Convencionou-se que o feixe-referência será uma onda plana propagando-se na direção do eixo óptico (eixo Z do SRC) ou com direção de propagação pertencente ao plano XZ e podendo fazer ângulo  $\theta$  com o eixo Z

$$E_r(x, y, z) = A_r e^{i \frac{2\pi}{\lambda} (x \sin \theta + z \cos \theta)} \quad (3)$$

sobre o plano do holograma ( $z = 0$ )

$$E_r(x, y, 0) = A_r e^{i \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \theta} \quad (4)$$

O feixe-objeto, para cada *hoxel* do padrão de interferência, será dado pela adição de todas as ondas esféricas que deixam os pontos que compõem o objeto e atingem esse *hoxel*.

Assim, para um objeto discretizado por  $n$  pontos, a intensidade em um *hoxel* ( $x, y, 0$ ) será dada por [BAS 92] [CHE 87]

$$I = A_r^2 + \sum_{i=1}^n A_{oi} [A_{oi} + 2(A_r \cos \frac{2\pi}{\lambda} (r_{oi} - x \sin \theta) + \sum_{j=i+1}^n A_{oj} \cos \frac{2\pi}{\lambda} (r_{oj} - r_{oi}))] \quad (5)$$

onde  $A_r$  é a amplitude da onda de referência,  $A_{oi}$  é a amplitude da onda referente ao  $i$ -ésimo ponto do objeto,  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $r_{oi}$  é a distância do *hoxel* ( $x, y, 0$ ) ao ponto  $i$  emissor da onda esférica e  $\theta$  é a inclinação da direção de propagação da onda plana de referência com relação ao eixo Z do SRC.

## 7 Fabricação do holograma

Da mesma forma que nos processos de visualização por projeções em Computação Gráfica, uma vez modelados os objetos, criada a cena no SRU e especificada a posição e orientação da câmera no SRU, todos os componentes da cena devem ser passados ao SRC. Nos processos que visam reproduzir o que uma câmera fotográfica realiza, prossegue-se com um recorte da cena permanecendo enquadrado apenas aquilo que se encontra no campo de visão da objetiva da câmera.

Ao contrário de uma fotografia, um holograma contém informações de todo o subespaço à sua frente. Pode-se imaginá-lo como uma janela em frente a uma cena. Quando nos movimentamos com relação a um holograma podemos ver objetos que estariam fora do campo de visão em outras posições. Por exemplo, se em determinada posição não vemos um objeto que está à esquerda da cena que visualizamos, podemos nos mover para a direita, com relação ao holograma, e passar a ver esse objeto, da mesma forma que acontece com relação a uma janela.

Sendo assim, na geração de hologramas por computador, devem-se eliminar apenas aquelas partes da cena que se encontram atrás da câmera, isto é, o campo de visão dos HGCs é o subespaço de Z positivo do SRC. Uma vez realizado o recorte em Z, deve-se proceder a determinação do padrão de interferência. Faz-se, então, uma varredura do plano do holograma determinando a intensidade de luz que atinge cada um dos *hoxels* visitados. As dimensões da região do plano do holograma que será amostrada são limitadas pelo endereçamento máximo do dispositivo de registro e pela definição a ser utilizada para registrar o padrão de interferência em filme fotográfico.

Determinado o padrão de interferência sobre a região especificada do plano do holograma, deve-se registrá-lo em filme fotográfico para que possa interagir com luz, difratando-a, e reconstruindo a imagem do objeto considerado no processo de geração. A passagem do padrão de interferência a filme fotográfico pode ser realizada tomando a fotografia da sua exibição ou utilizando dispositivos de escrita direta sobre o filme (*laser*, microlitografia de feixe de elétrons).

Conforme já foi afirmado, cada *hoxel* corresponde a uma área do espaço com dimensões bem definidas. Como serão considerados *hoxels* quadrados de lado  $10\mu\text{m}$ , deve-se garantir que essas regiões, ao serem passadas ao filme fotográfico, mantenham as suas dimensões originais.

### 7.1 Fotorredução

O padrão de interferência, para ser passado ao filme fotográfico, pode ser exibido em um tubo de raios catódicos ou em *halftoning* impresso e tomada a sua fotografia a uma determinada distância, que garanta que cada *hoxel* exibido (*pixel*) tenha, sobre o filme, as dimensões especificadas durante o processo de geração. Certamente, ao se exibir o padrão de interferência em um monitor de vídeo ou *halftoning* impresso, cada *hoxel* terá dimensões superiores às especificadas no processo de geração. Por isso, torna-se necessária a fotorredução.

Conforme a figura 2, dada uma exibição do padrão de interferência em monitor de vídeo, papel ou qualquer outra forma de exibição que promova uma ampliação, pode-se utilizar uma câmera fotográfica comum para realizar o processo de fotorredução.

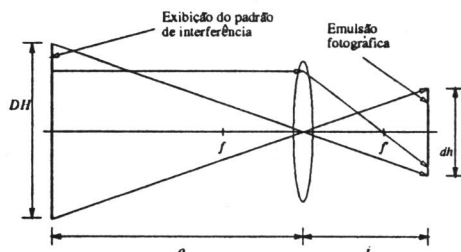


Figure 2: Fotorredução.

Sabendo que as objetivas das câmeras fotográficas utilizam lentes convergentes, pode-se aplicar a equação do fabricante de lentes (6) para determinar a posição  $i$  da imagem de um objeto em  $o$  sobre um eixo que passa pelo centro da lente de distância focal  $f$ .

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{i} \quad (6)$$

A equação do fabricante de lentes (6) deve ser utilizada em conjunto com a relação de *ampliação transversal linear* dada por

$$m = -\frac{i}{o} \quad (7)$$

onde o sinal negativo de  $m$  indica que a imagem está invertida.

Como se vê na figura 2, dada uma exibição com  $RH$  pixels com dimensão  $DH$ , deseja-se fotorreduzi-los. Se no processo de geração foram considerados *hoxels* de dimensão  $dh$ , a dimensão do padrão sobre o filme deve ser  $RH dh$ . Assim, consegue-se expressar a distância do objeto à lente em função apenas de parâmetros conhecidos, respeitando a redução requerida

$$o = f \left( 1 - \frac{DH}{RH dh} \right) \quad (8)$$

A equação (8) expressa a distância da câmera fotográfica à exibição do padrão de interferência, de modo que, sobre o filme fotográfico, os *hoxels* terão dimensão  $dh$ , conforme especificado.

Utilizou-se, para exibição dos padrões de interferência, uma estação de trabalho SUN, com 1152 pixels na horizontal por 900 na vertical e até 256 níveis de uma cor, por pixel. Considerando, no processo de geração, que o *hoxel* era quadrado e de lado  $10\mu m$ , obtiveram-se HGCs retangulares de  $1,152 \times 0,9 cm^2$ . Verificou-se que em monitores deste

tipo, utilizando o processo acima descrito com o filme KODAK EKTACHROME PLUS (EPP) revelado pelo processo padrão E6, da companhia KODAK, não se consegue definição melhor do que  $10\mu m$ .

Conforme se vê, no estado atual, a fotorredução de padrões de interferência exibidos em monitor de vídeo permite a geração de pequenos hologramas que são válidos apenas para verificação das técnicas em desenvolvimento. Tornam-se necessários, portanto, dispositivos de maior endereçamento espacial para que se gerem hologramas com maiores dimensões e com maior definição para que se obtenham HGCs mais eficientes e de objetos mais complexos.

A possibilidade de registro direto do padrão de interferência em filme fotográfico, certamente, resultaria na quebra ou atenuação das limitações de dimensões e definição encontradas com o processo de fotorredução. Existem, como possibilidades de registro direto em filme fotográfico, as técnicas de feixe de elétrons utilizadas em microlitografia para produção de máscaras de circuitos integrados e os dispositivos de varredura *laser* com controle de posição espacial e de amplitude de feixe.

## 8 Reconstrução

A reconstrução ideal da imagem holográfica tridimensional dos objetos considerados na geração dos HGCs se dá ao iluminá-los com uma onda similar à utilizada como referência no processo de geração. Sempre é possível reconstruir as imagens real e virtual utilizando um feixe de luz qualquer. Utilizou-se uma técnica de modulação vertical artificial dos padrões de interferência para beneficiar a reconstrução utilizando luz branca [BAS 92] [LES 86].

Ao se iluminar os HGCs, as variações de transmitância, ocasionadas pelas correspondentes variações de intensidade calculadas sobre o padrão de interferência, provocam difração da onda incidente e, conseqüente, reconstrução da imagem tridimensional do objeto considerado na etapa de geração.

A luz difratada reconstrói as imagens real e virtual da cena holografada (figura 3). A imagem real é caracterizada pela convergência da luz para a forma do objeto, enquanto que a imagem virtual é caracterizada pela divergência da luz a partir da forma do objeto. Assim, e como se vê na figura 3, no lado oposto à origem do feixe referência, com relação ao HGC, a imagem real pode ser detectada através do posicionamento de um anteparo na região onde há a reconstrução dessa imagem ou por observação direta posicionando-se o observador a uma distância tal do holograma que permita a visualização da divergência que ocorre após a convergência para a imagem real. Por outro lado, a imagem virtual é visualizada no

mesmo lado da fonte referência, através do posicionamento do observador no lado oposto à origem desse feixe, com relação ao HGC.

A visualização direta da imagem real apresenta problemas de pseudoscopia<sup>2</sup> enquanto que a imagem virtual é perfeitamente ortoscópica [KAS 87] (figura 3).

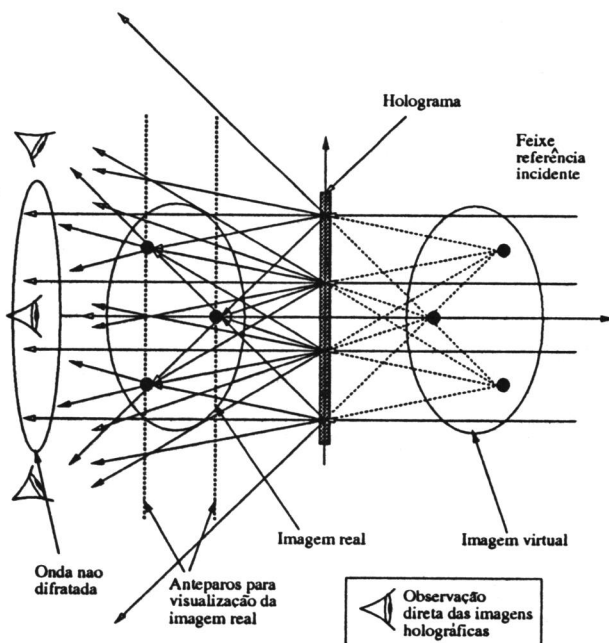


Figure 3: Reconstrução das imagens real e virtual de um objeto composto por três pontos.

## 9 Remoção de elementos ocultos em HGCs

Ao se observar uma fotografia, ou uma imagem fotorrealística gerada utilizando procedimentos convencionais de Computação Gráfica, verificam-se considerações de ocultação. Ou seja, são visíveis apenas aquelas partes da cena que se encontram mais próximas da câmera fotográfica (sintética ou não) e que não são ocultadas por nenhuma outra parte da cena. Nota-se, entretanto, que por mais que o observador se mova com relação a uma imagem deste tipo, não consegue visualizá-la de outros ângulos. A remoção de elementos ocultos é única para cada posição de uma câmera fotográfica.

A observação de um holograma óptico, ou da própria cena tridimensional, mostra que, dependendo da posição do observador com relação ao holograma,

<sup>2</sup>Pseudoscopia caracteriza o movimento relativo inverso (paralaxe inversa) entre objetos a diferentes profundidades em uma cena. Quando o movimento relativo entre os objetos a diferentes profundidades ocorre da mesma forma que no mundo real diz-se que há ortoscopia.

ou à cena real, surgem ou desaparecem objetos. Isto pode ser entendido, em termos de Computação Gráfica, como havendo remoção de elementos ocultos para cada nova posição do observador. Portanto, de alguma forma, o holograma armazena informações sobre a remoção de elementos ocultos ao redor da cena holografada.

Guiando-se pela realidade, observou-se que a redundância de um holograma óptico não é, na verdade, total. Isto é, cada ponto do padrão de interferência (*hoxel*) não conhece informações de todos os pontos do objeto, mas sim apenas daqueles pontos que lhe são visíveis. Este tipo de consideração implica em redução de redundância, visto que as informações de um ponto do objeto não se encontram sobre todo o holograma, mas apenas sobre aquelas regiões para as quais ele não é ocultado.

Propôs-se, e verificou-se, que técnicas de remoção de elementos ocultos utilizadas em Computação Gráfica podem ser adaptadas à síntese de hologramas por computador a partir de objetos descritos por pontos emissores de luz difusa. Conforme observado, entretanto, a remoção de elementos ocultos deverá ser realizada para cada *hoxel* do padrão de interferência e não uma única vez como é realizado na síntese de imagens fotorrealísticas em Computação Gráfica.

A consideração de remoção de elementos ocultos, por *hoxel*, reflete a visão da cena por cada *hoxel* e não apenas a visão focada da câmera fotográfica. Nos procedimentos que simulam uma câmera fotográfica considera-se a luz, focalizada por uma lente convergente, que converge para o centro de projeção dessa câmera, ou seja, considera-se a visibilidade da cena por um observador localizado na posição do centro de projeção e com ângulo de visão igual à abertura da lente da câmera. Nos hologramas sintéticos, cada *hoxel* tem a função de um centro de projeção, isto é, cada *hoxel* tem função análoga à de um observador ali posicionado e, como o ângulo de abertura de um holograma é  $\pi$  radianos, para cada *hoxel* deve se considerar a visibilidade de toda a cena à frente do holograma.

Os objetos descritos por pontos não permitem considerações de ocultação, visto que os elementos que os compõem são adimensionais, e necessitam outro tipo de representação, de modo que se possibilite a implementação de remoção de elementos ocultos em HGCs. A representação por polígonos planares convexos opacos, descritos a partir de uma sequência orientada de vértices (pontos-objeto), permite o tratamento de pontos-objeto sendo ocultados por regiões opacas.

Para realização de HGCs considerando elementos ocultos serão utilizados objetos descritos por pon-

tos emissores de luz difusa, os quais, podem formar polígonos planares convexos opacos. Note-se que os polígonos são opacos, o que indica que a reconstrução das imagens holográficas não exibirá polígonos luminosos, mas sim, regiões imaginárias que ocultam pontos-objeto que estejam atrás de si.

Uma vez descrita a cena, através de pontos emissores de luz difusa, que formam, ou não, polígonos planares convexos opacos, prossegue-se com a determinação da intensidade do padrão de interferência em cada *hoxel* considerando, para o cálculo de intensidade, apenas aqueles pontos do objeto que são visíveis pelo *hoxel*. Isto é análogo a substituir na expressão (5)  $A_{oi}[\dots]$  por  $\delta_{hi}A_{oi}[\dots]$ , onde  $\delta_{hi}$  é a função visibilidade entre o *hoxel*  $h$  de coordenadas  $(x,y,0)$  e o ponto-objeto  $i$  (igual a 1 se for visível e igual a 0 se houver algum polígono opaco entre os dois pontos).

Para se realizar o teste de visibilidade de um ponto do objeto com relação a um *hoxel* do padrão de interferência, optou-se pela utilização da técnica de *ray casting* de polígonos [FOL 90] utilizada em procedimentos de Computação Gráfica (figura 4).

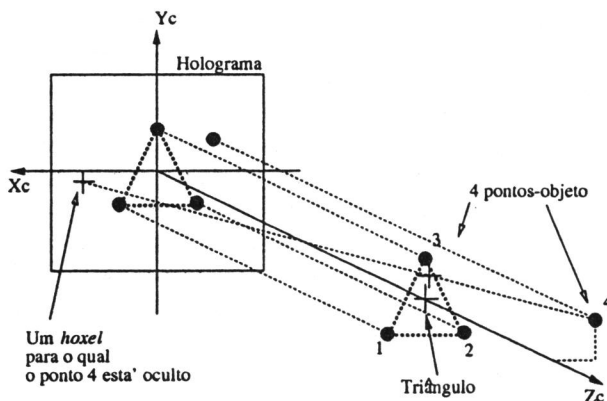


Figure 4: *Ray casting* de polígonos aplicado a síntese de hologramas gerados por computador com considerações de remoção de elementos ocultos.

Esta consideração de remoção de elementos ocultos representa a primeira aplicação, conhecida, de características psicológicas de profundidade em hologramas gerados por computador a partir da superposição de distribuições analíticas. Verificou-se que apesar do custo computacional ter aumentado, pela necessidade de se realizar os testes de visibilidade, os HGCs apresentaram holografias mais brilhantes e bem definidas e, acima de tudo, com a possibilidade de considerar a principal característica psicológica de profundidade, representando um grande aumento do realismo psicológico das imagens holográficas reconstruídas.

## 10 Resultados

De modo a validar as técnicas analisadas e propostas desenvolveu-se um protótipo em linguagem C padrão com interface via arquivos e linha de comando e realizaram-se testes em microcomputadores compatíveis com IBM-PC e rede de estações de trabalho SUN.

Para que se tenha sucesso nos hologramas gerados por computador devem-se realizar algumas considerações quanto a limitações impostas sobre os objetos. A limitação do endereçamento espacial e da quantidade de níveis de intensidade representáveis implica que o número de pontos que compõem o objeto também seja limitado, devido ao surgimento de altas frequências no padrão de interferência incapazes de serem registradas com a definição disponível.

Em HGCs com definição limitada devem ser evitadas as altas frequências e, portanto, se os objetos tiverem dimensões laterais da ordem ou menores que o holograma e encontrarem-se exatamente à frente do mesmo reduz-se a possibilidade do registro incompleto das frequências espaciais do padrão de interferência.

Com endereçamento máximo de  $1152 \times 900$  e definição de  $10\mu\text{m}$  obtêm-se hologramas de até  $1,152 \times 0,9\text{cm}^2$  e os objetos não deverão ultrapassar estas dimensões laterais. Para que a informação de todos os pontos-objeto esteja contida sobre todo o holograma, a sua distância ao plano XY do SRC não deve ser menor do que  $25\text{cm}$ . É bom notar, também, que objetos com dimensões laterais tão limitadas e tão distanciados do plano do holograma devem ter grandes variações de profundidade entre os pontos que o compõem para que se consiga verificar a sua tridimensionalidade dentro dos pequenos ângulos de visão permitidos à reconstrução das imagens holográficas.

Portanto, para que haja sucesso garantido nos hologramas a serem gerados, sob as condições delimitadas devem ser considerados objetos compostos por até 10 pontos emissores de luz difusa com dimensões laterais menores do que  $1,1 \times 0,9\text{cm}^2$  e distâncias ao plano do holograma maiores do que  $25\text{cm}$  e com grandes variações nesta dimensão.

Todos os resultados foram obtidos supondo-se a utilização de ondas de luz monocromática, perfeitamente coerente, com comprimento de onda  $\lambda = 6328\text{Å}$ , ou seja, luz *laser* ideal de hélio-neônio (He-Ne) e foram seguidas as considerações conforme apresentado.

A figura 5 apresenta o padrão de interferência determinado a partir da geometria apresentada na figura 4, considerando remoção de elementos ocultos e uma onda plana com direção de propagação paralela ao eixo Z do SRC, como referência. Verifica-se

que o padrão de interferência da figura 5 apresenta duas regiões distintas, devido à remoção de elementos ocultos. Uma, à esquerda, que armazena informações dos quatro pontos que compõem a cena e outra, à direita, que não armazena informações do ponto que se encontra atrás do triângulo. A região à direita não armazena informações do ponto-objeto que se encontra atrás do polígono, pois o mesmo é ocultado com relação aos *hozels* desta região por um triângulo opaco imaginário formado pelos outros três pontos da cena.

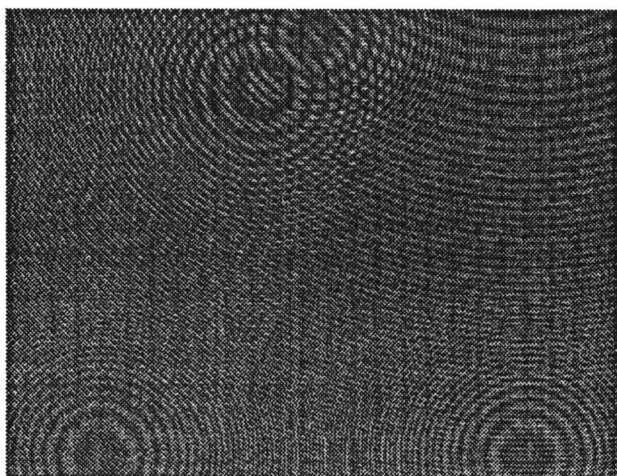


Figure 5: Padrão de interferência com consideração de elementos ocultos a partir de quatro pontos emissores de luz difusa.

A figura 6 apresenta fotografias da reconstrução da imagem holográfica obtidas a partir dos padrões dos HGCs sem e com remoção de elementos ocultos. As três imagens superiores referem-se à cena onde não se considera remoção de elementos ocultos, isto é, considera-se um triângulo transparente, enquanto que as três fotografias inferiores referem-se à reconstrução da imagem da cena considerando ocultação. As reconstruções encontram-se organizadas em três colunas onde; a central refere-se ao posicionamento do observador exatamente à frente do holograma, ou da própria da cena, e as da direita e esquerda referem-se ao posicionamento do observador à direita e à esquerda da cena, respectivamente, sempre olhando diretamente para o objeto. Verifica-se que o ponto que não pertence ao polígono não é reconstruído na fotografia inferior à direita, pois, com relação à posição relativa entre o observador e a cena, este ponto encontra-se atrás do triângulo opaco formado pelos outros três pontos. Nota-se, ainda, que o mesmo ponto é reconstruído nas posições relativas entre o observador e o holograma, onde seria visível na cena real.

Anais do SIBGRAPI V, novembro de 1992

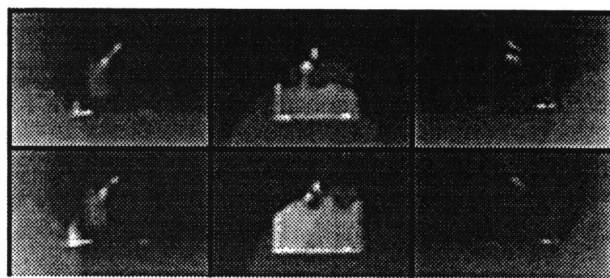


Figure 6: Reconstruções sem e com remoção de elementos ocultos.

Observa-se, também, o deslocamento lateral relativo que o ponto atrás do triângulo sofre com relação aos outros três pontos em cena, por encontrarem-se em diferentes profundidades. Desta forma, fica provada a conservação de paralaxe e, consequentemente, a estereoscopia, pois um observador binocular ao observar a holografia observará duas imagens distintas, uma em cada olho, que fundidas pelo cérebro dar-lhe-ão a real sensação de profundidade.

A acomodação fica mostrada se for observada a diferença de foco que existe nos pontos que se encontram a diferentes profundidades com relação ao holograma, na reconstrução.

As reconstruções apresentadas neste trabalho são fotografias (obtidas com uma câmera de vídeo) da reconstrução com luz branca da imagem virtual da cena holografada. Utilizou-se um anteparo opaco com um furo circular de 0,5cm de diâmetro à frente de uma lâmpada incandescente transparente de 60W como fonte de luz. Posicionou-se o HGC a 3m do anteparo furado e o observador (câmera de vídeo) a 1m do holograma.

## 11 Conclusões e perspectivas futuras

A análise da visualização de uma cena tridimensional sugere a divisão das características de profundidade em duas classes:

1. as características fisiológicas, que dão a um observador a sensação de real tridimensionalidade e
2. as características psicológicas, que sugerem ao observador o interrelacionamento entre os objetos da cena e com a luz que a ilumina.

Existem diversas formas de apresentar características fisiológicas de profundidade em registros bidimensionais, no entanto, a holografia mostra-se como a técnica mais indicada para essa aplicação, por reunir todas as propriedades desejáveis de um dispositivo bidimensional de exibição de imagens tridimen-



sionais. Na geração de hologramas por computador as pesquisas têm enfatizado as características fisiológicas de profundidade disponíveis nesta técnica, porém, ainda não havia sido considerada a inclusão de características psicológicas para o incremento do realismo das imagens holográficas sintetizadas por computador.

A geração de hologramas por computador, na forma como foi apresentada, apresenta diversas similaridades com as técnicas de *rendering* de Computação Gráfica. Apresentou-se o processo de síntese de hologramas por computador comparando-o e utilizando técnicas de Computação Gráfica e separando-o em duas etapas distintas:

- a geração do holograma e
- a reconstrução das imagens real e virtual.

Na etapa de geração do holograma, foram feitas considerações sobre a forma mais viável para descrição geométrica dos objetos e as implicações dessa escolha. Analisou-se a determinação do padrão de interferência a partir da propagação das ondas correspondentes aos elementos geométricos que descrevem o objeto.

A partir do padrão de interferência calculado, foram analisadas algumas possibilidades para registrá-lo em filme fotográfico mantendo as dimensões especificadas no processo de geração.

Na etapa de reconstrução, viu-se que é possível reconstruir uma imagem real da cena holografada para a qual a luz converge e depois diverge e uma imagem virtual da mesma cena de onde a luz diverge. Ficou claro que para visualizar a imagem real é possível utilizar um anteparo, permitindo apenas a visualização de cortes bidimensionais da cena tridimensional, ou observá-la diretamente, a partir da divergência, embora, desta forma, a imagem real apresente problemas de pseudoscopia que provocam confusões quanto à profundidade dos elementos em cena. Por outro lado, a imagem virtual permite a visualização da cena tridimensional exibindo as características fisiológicas de profundidade desejadas (estereoscopia, paralaxe e acomodação) sem necessitar da realização de cortes bidimensionais e sendo perfeitamente ortoscópica.

Devido à elevada redundância dos hologramas, pois cada *hozel* registra informações de quase todos os pontos da cena, o tempo computacional cresce muito rapidamente com o número de pontos-objeto que compõem a cena. Entretanto, verifica-se que a intensidade em cada *hozel* é independente de todos os outros, o que possibilitou a paralelização dos algoritmos de determinação de padrões de interferência dividindo os hologramas em um número de faixas

igual ao número de máquinas disponíveis para determinação dos padrões de interferência, resultando em um decréscimo do tempo computacional proporcional ao número de máquinas disponíveis.

A reconstrução das imagens tridimensionais armazenadas nos HGCs não parece ser realizável em monitores de vídeo convencionais. Entretanto, a fabricação de dispositivos de exibição de imagens holográficas, diretamente conectados a circuitos eletrônicos, como nos monitores de vídeo tradicionais, permitiria a determinação e exibição simultânea de HGCs, além de possibilitar a evolução dos monitores de vídeo para exibição de imagens realmente tridimensionais aplicáveis em dispositivos de realidade virtual, por exemplo.

Consideraram-se apenas pontos emissores de luz difusa. A utilização de pontos refletores ou transmissores de luz difusa ou especular será possível utilizando algoritmos de cálculo de iluminação para determinar a amplitude da onda esférica de cada ponto ( $A_{oi}$ ) com relação a cada *hozel*.

## 12 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer aos colegas Manuel Menezes, Gladimir Baranoski, Robson Lemos, Marcos Nascimento, Marcelo Walter e Roberto Amboni pelo apoio e sugestões e a todos os outros que de alguma forma auxiliaram na realização deste trabalho.

## BIBLIOGRAFIA

- [BAS 91] BASTOS, Rui M. R.; NASCIMENTO, Marcos Eduardo; OLIVEIRA NETO, Manuel Menezes. **BEZIER3D - Sistema para Modelagem e Visualização Tridimensional**. Trabalho apresentado no Workshop on Geometric Modeling, IMPA, 9-11 Jan. 1991, Rio de Janeiro.
- [BAS 92] BASTOS, Rui M. R. **Geração de Hologramas por Computador a partir de Objetos Modelados Geometricamente**. Porto Alegre, Brasil, Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de mestrado, 1992.
- [BED 91] BEDFORD, M. **Cube roots**. *Computer Shopper*, London, v.42, p.185-190, Aug. 1991.
- [CHE 87] CHENG, X.; HUANG, J.; LOH, E. **Computer Generated Holograms using Personal Computers**. *Opt. and Lasers in Eng.*, v.7, p.83-90, 1987.

- [COL 71] COLLIER, R. J.; BURCKHARDT, C. B.; Lin, L. H. **Optical Holography**. New York: Academic Press, 1971. 605p.
- [DIT 91] DITLEA, S. 3D - The Next Generation. **VIDEO magazine**, New York, v.4, n.5, p.34-37, Aug. 1991.
- [FAR 90] FARIN, Gerald. **Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1990. 444p.
- [FOL 90] FOLEY, J; van DAM, A.; FEINER, S.; HUGHES, J. **COMPUTER GRAPHICS principles and practice**. 2. ed. Reading: Addison Wesley, 1990. 1174p.
- [FOW 75] FOWLES, G. R. **Introduction to Modern Optics**. 2. ed. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1975. 328p.
- [FRE 86] FRÈRE, Ch.; LESEBERG, D.; BRYNGDAHL, O. Computer-Generated Holograms of three dimensional objects composed of line segments. **J. Opt. Soc. Am. A**, Washington, v.3, n.5, p.726-730, May 1986.
- [KAS 87] KASPER, Joseph E.; FELLER, Steven A. **The Complete Book of Holograms**. New York: John Wiley, 1987. 216p.
- [LEI 65] LEITH, E. N. and UPATNIEKS, J. Photography by LASER. **Scientific American**, New York, v.212, n.6, p.24-35, 1965.
- [LES 86] LESEBERG, Detlef. Computer-Generated Holograms: display using one-dimensional transforms. **J. Opt. Soc. Am. A**, Washington, v.3, n.11, p.1846-1851, Nov. 1986.
- [MAN 88] MÄNTYLÄ, Martti. **An Introduction to Solid Modeling**. Maryland: Computer Science Press, 1988. 401p.
- [NEA 88] NEAL, Margaret; The Birth of a Hologram. **IEEE Computer Graphics and Applications**, Los Alamitos, v.8, n.7, p.4-6, July 1988.
- [OLI 91] OLIVEIRA NETO, Manuel Menezes; BASTOS, Rui M. R. BEZIER4D - Ambiente para Modelagem, Visualização e Animação Tridimensional. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO GRÁFICA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS, 4., 1991, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP, 1991. p.143-154.
- [OKO 80] OKOSHI, Takanori. Three-Dimensional Displays. **Proceedings of the IEEE**, New York, v.68, n.5, p548-564, May 1980.
- [OWC 90] OWCZARCZYK, J.; OWCZARCZYK, B. Evaluation of true 3D display systems for visualizing medical volume data. **Visual Computer**, Berlin, n.6, p.219-226, 1990.
- [TRI 87] TRICOLES, G. Computer Generated Holograms: an historical review. **Applied Optics**, New York, v.26, n.20, p.4351-4360, Oct. 1987.
- [YAT 74] YATAGAI, T. Three-Dimensional Displays using Computer-Generated Holograms. **Optics communications**, Amsterdam, v.12, n.1, p.43-45, Sept. 1974.
- [YAT 76] YATAGAI, T. Spectroscopic approach to 3D display using computer-generated holograms. **Applied Optics**, New York, v.15, n.11, p.2722-2729, Nov. 1976.