

11 - Estereoscopia

**Robson Augusto Siscoutto¹, Flávio Szenberg², Romero Tori¹, Alberto B. Raposo²,
Waldemar Celes², Marcelo Gattass²**

¹ Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
INTERLAB - Laboratório de Tecnologias Interativas
Av. Prof. Luciano Gualberto, travessa 3, no. 158 - 05508-900 - São Paulo, SP, Brasil

² Departamento de Informática, PUC - Rio
TECGRAF - Grupo de Tecnologias em Computação Gráfica
R. Marquês de São Vicente, 225 - 22453-900 - Gávea, Rio de Janeiro – RJ - Brasil

{robson.siscoutto, romero.tori}@poli.usp.br
{szenberg, abraposo, celes, mgattass}@tecgraf.puc-rio.br

***Resumo.** Este capítulo apresenta uma abordagem básica sobre estereoscopia, mostrando como se dá a percepção das imagens estereoscópicas pela visão humana e de forma artificial, apresentando algumas técnicas e dispositivos para a obtenção da estereoscopia, bem como alguns fundamentos matemáticos relacionados. Além disso, alguns problemas relacionados com a visualização estereoscópica gerada por computação são discutidos. Ao final, duas aplicações em realidade virtual enfocando o uso de estereoscopia são apresentadas.*

11.1 Introdução

No curso da evolução, alguns animais (inclusive o ser humano) passaram a apresentar olhos posicionados na frente da cabeça. Esses animais perderam o incrível campo visual de, praticamente, 360 graus, proporcionado por olhos laterais e opostos. Por outro lado, eles adquiriram uma nova função: a visão binocular ou estereoscopia ("visão sólida" em grego) [Fontoura, 2001].

Para entender, na prática, o que vem a ser visão binocular e a sua importância para a sobrevivência, basta que se feche um dos olhos e se tente fazer as atividades cotidianas. Sob a visão monocular, o simples gesto de alcançar um objeto sobre a mesa passará a ser um desafio. A dificuldade mais evidente, nesse caso, é a de perceber a profundidade e avaliar a distância que separa um objeto do observador.

A visão monocular conta com elementos para uma percepção rudimentar da profundidade, valendo-se apenas das leis da perspectiva, onde o tamanho aparente dos objetos diminui à medida que esses se afastam do observador. Assim, os objetos mais próximos acabam escondendo, atrás de si, os objetos mais distantes que se encontram sobre o mesmo eixo de perspectiva.

A visão tridimensional que temos do mundo é resultado da interpretação, pelo cérebro, das duas imagens bidimensionais que cada olho capta a partir de seu ponto de vista e das informações sobre o grau de convergência e divergência. Os olhos humanos estão em média a 65 milímetros um do outro e podem convergir, de modo a cruzarem seus eixos em qualquer ponto a poucos centímetros à frente do nariz, ficando estrábicos; podem também divergir ou ficar em paralelo quando se foca algo no infinito. Os eixos visuais dos animais que têm olhos laterais e opostos, obviamente, nunca se cruzam. Além de imagens, o cérebro coordena os movimentos dos músculos dos globos oculares

e recebe informações sobre o grau de convergência ou divergência dos eixos visuais, o que lhe permite auferir a distância em que os olhos se cruzam em um determinado momento [Fontoura, 2001].

Além do processo natural para obtenção da estereoscopia, que é descrita em maiores detalhes na seção 11.2, outros processos artificiais, gerados ou não por computador, podem dar ao observador essa sensação de profundidade. A seção 11.3 descreve alguns dispositivos e técnicas para a obtenção artificial da estereoscopia.

A seção 11.4 detalha os principais fundamentos matemáticos utilizados no processo de criação e visualização de imagens estereoscópicas.

A visualização estereoscópica pode ocasionar desconforto para o observador manifestado quando há esforço visual causado por problemas relacionados a falhas tecnológicas ou ao sistema visual humano. A seção 11.5 apresenta possíveis problemas na visualização estereoscópica.

Por fim, são apresentados, na seção 11.6, alguns exemplos práticos em realidade virtual que enfocam a utilização de estereoscopia com o intuito de proporcionar ao usuário um maior grau de realismo com a obtenção do senso de profundidade, volume, distância e tamanho.

11.2 Estereoscopia

Devido à evolução das tecnologias de áudio, cada vez mais presente entre nós, seja via rádio de automóvel ou CD, estamos muito acostumados em relacionar estéreo ao som. Canais de áudio ligados a caixas de som independentes fazem chegar aos nossos ouvidos sons ligeiramente diferentes e, nos casos de fone de ouvido, exclusivamente diferentes. Estes sons são processados por nós no cérebro, dando-nos a sensação de imersão no ambiente onde os sons foram originados.

Esta tecnologia de som estéreo pode ser estendida ao visual [Lipton 1982]. Os animais, em específico os seres humanos, são dotados de dois olhos que enxergam o mundo de forma diferente, pois estão separados por uma distância. Isto pode ser observado com um simples experimento: alinhe o polegar da mão esquerda com uma bandeirinha e seu nariz, e foque sua visão para o dedo. Você verá a bandeirinha como sendo duas, uma para cada olho (feche um olho e abra o outro e em seguida inverta), conforme Figura 11.1 (a). Agora convergindo a visão para a bandeirinha, a visão que você terá com os dois olhos abertos é mostrada na Figura 11.1 (b) – o polegar agora é visto como sendo dois.

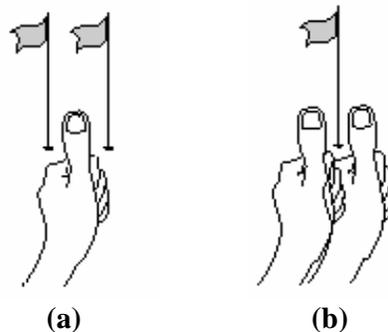


Figura 11.1 – a) Os olhos estão convergindo para o polegar e a bandeirinha é vista como dupla imagem. b) Os olhos agora estão convergindo para a bandeirinha e o polegar é visto como dupla imagem [StereoGraphics 1997].

Estas diferenças entre imagens geradas pelo olho direito e pelo olho esquerdo são processadas pelo cérebro nos dando uma noção de profundidade e, com isto, tem-se a idéia de imersão em um ambiente com objetos posicionados a distâncias diferentes.

Em computação gráfica, normalmente são geradas imagens mono (isto é, a partir de uma única câmera virtual) e estas imagens são visualizadas por um monitor ou projetadas em um plano. A estereoscopia visual, ao contrário, é feita a partir da geração de duas imagens, a partir das localizações das câmeras virtuais separadas de uma determinada distância.

Os equipamentos de visualização também afetam, e muito, a qualidade da visão estéreo. Muitos equipamentos necessitam de formatos especiais de imagens para cada olho. Os formatos mais usuais também são listados, lembrando que não há um padrão universalmente aceito. Serão abordados na seção 11.3, equipamentos para tal finalidade e seus funcionamentos.

11.2.1 Noções Básicas

Quando tiramos uma foto através de uma câmera fotográfica usual, existem alguns efeitos que nos fornecem características tridimensionais da cena. Estes efeitos são chamados efeitos passivos. Eles são inerentes à aparência do mundo externo e independem dos nossos olhos, isto é, giramos o papel fotográfico e a imagem continua estática. Alguns efeitos passivos que observamos comumente em fotos são:

- **Perspectiva:** elementos no “fundo” da imagem maiores que elementos “mais à frente” são vistos com tamanhos projetados menores. Vale ressaltar aqui que, “fundo” e “mais à frente” em uma foto são características impróprias, pois ao máximo que a imagem possa parecer tridimensional, esta é na verdade planar. Na perspectiva, objetos de mesmo tamanho devem aparecer maiores na foto quanto mais próximos da câmera estiverem. Na Figura 11.2, os dois paralelepípedos têm mesmo tamanho, mas pelo efeito de perspectiva gerado a partir de linhas existentes (definindo um ponto de fuga), concluímos que o paralelepípedo que aparece mais ao centro da imagem tem tamanho real maior.

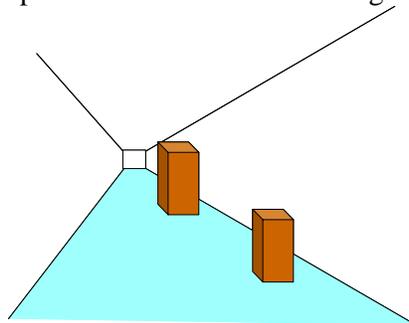


Figura 11.2 – Efeito de perspectiva.

- **Iluminação:** o efeito de iluminação aplicado à cena adiciona à imagem uma visualização melhor da forma dos objetos presentes, contribuindo com o aumento do grau de realismo. Note que na Figura 11.3 (a), o que parece é que existem um círculo e um hexágono, preenchidos com determinadas cores de forma uniforme. Já na Figura 11.3 (b), podem-se observar as verdadeiras formas dos objetos tridimensionais, esfera e cubo.

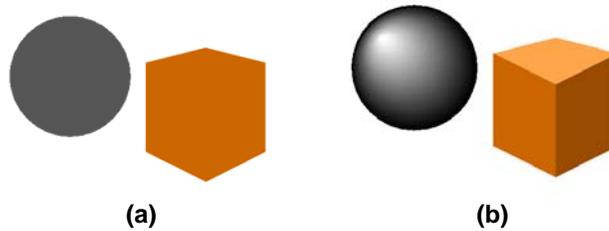


Figura 11.3 – Efeito de iluminação: a) sem iluminação e b) com iluminação.

- **Oclusão:** a oclusão é responsável por esconder parcial ou integralmente objetos que estejam por de trás de outros. Com isto, observa-se a ordem dos objetos em termos de distância à câmera. Este efeito é ilustrado na Figura 11.4. Na imagem da esquerda a esfera está por trás do cubo e na imagem da direita o cubo é que está por trás.

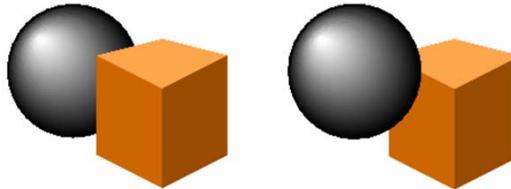


Figura 11.4 – Efeito de oclusão.

- **Sombra:** quando podemos afirmar que um objeto está colado a um plano de apoio? Esta pergunta, apesar de simples, é de difícil resposta em uma imagem resultante de uma projeção 3D para 2D. Isto porque o inverso dessa projeção, dado um ponto na imagem, é uma reta no espaço 3D, isto é, diversos pontos na cena 3D alinhados com a câmera projetam-se em um mesmo ponto. Isto pode levar à conclusão que um objeto pode estar fixo a um plano ou então mais próximo ao observador e solto no ar. A sombra auxilia na resposta de uma pergunta parecida com a proposta: quando podemos afirmar que um objeto não está colado ao plano? Uma sombra de um objeto está sempre no plano de apoio e se o objeto está a uma distância na imagem da sombra, podemos concluir que o objeto não está no plano de apoio, como podemos ver na Figura 11.5 (a) com a esfera. Na mesma figura, parece que o cubo está fixado no plano de apoio, mas esta afirmação não pode ser comprovada baseada apenas em uma imagem projetada.

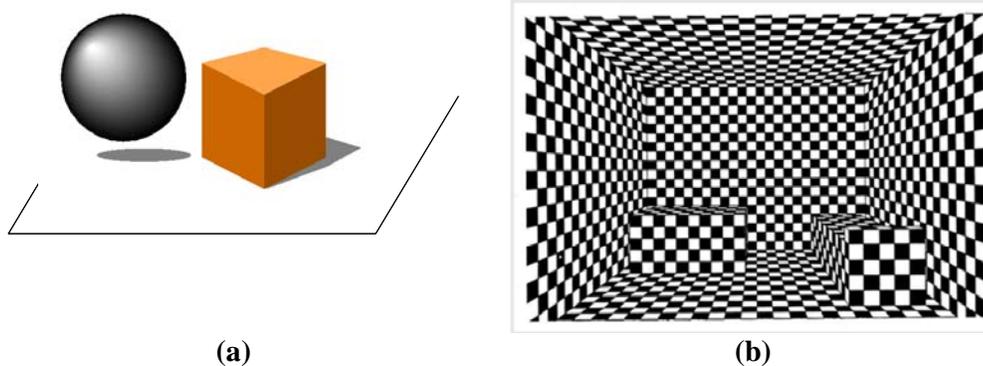


Figura 11.5 – a) Efeito de sombra. b) Efeito do gradiente de textura (<http://www.cquest.utoronto.ca/psych/psy280f/ch7/textureGrad.html>).

- **Gradiente da textura:** pode-se observar na Figura 11.5 (b), que os quadrados brancos e pretos indicam um decrescimento nos tamanhos indicando pontos onde se projetam algumas direções, definidos como ponto de fuga. Com isto, temos uma noção de profundidade.

A estereoscopia visual é classificada como efeito ativo, pois não está presente diretamente em uma imagem, sendo interpretada pelo nosso cérebro. O efeito estereoscópico é produzido através de um conjunto de elementos, como será visto a seguir.

Podemos dizer que “um visor estereoscópico é um sistema óptico cujo componente final é o cérebro humano” [StereoGraphics 1997]. Isto porque é o cérebro que faz a fusão das duas imagens (uma para cada olho) resultando em noções de profundidade, como é ilustrado na Figura 11.6. São capturadas duas imagens ligeiramente diferentes relativas à mesma cena, da mesma maneira que vemos o mundo real.

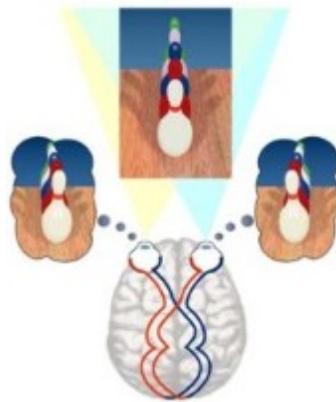


Figura 11.6 – Visões de cada olho da mesma cena [Watson, 1998].

Uma consequência imediata da diferença das imagens capturadas pelos dois olhos é o espaçamento entre o mesmo ponto projetado nas duas retinas, chamado de disparidade na retina. Por exemplo, na Figura 11.7 (a), o olho da esquerda vê a árvore à esquerda do pinheiro, enquanto o olho direito vê a direita. Estas duas imagens chegam ao cérebro onde é feita uma superposição, resultando na Figura 11.7 (b).

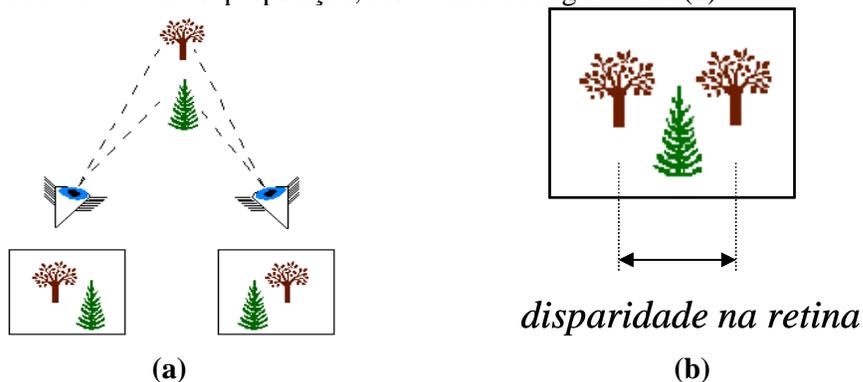


Figura 11.7 – a) Visões da mesma cena pelos dois olhos e b) Superposição das imagens e a disparidade na retina.

11.3 Dispositivos e Técnicas Estereoscópicas

A estereoscopia está relacionada à capacidade de enxergar em três dimensões, isto é, de perceber a profundidade. O princípio de funcionamento da maioria dos dispositivos estereoscópicos é o oferecimento de imagens distintas aos olhos esquerdo e direito do observador, proporcionando sensação de profundidade, tal qual quando se observa um objeto real.

Algumas das principais técnicas de estereoscopia estão resumidas nas próximas seções.

11.3.1 Vídeo Estereoscópico

A base para a percepção estereoscópica é a disparidade binocular do sistema visual humano, que gera duas imagens ligeiramente diferentes quando uma cena é projetada nas retinas dos olhos. As duas perspectivas diferentes das imagens são fundidas no córtex visual do cérebro, de forma a compor uma simples visão estereoscópica (tridimensional). Esse processo pode ser simulado através de duas câmeras organizadas com a mesma distância interocular dos olhos humanos. Logo, colocando-se as câmeras separadas uma da outra com base nessa distância, simula-se o sistema visual humano.

Quando cada imagem das câmeras for apresentada ao seu olho correspondente, as duas imagens serão fundidas em uma única imagem pelo cérebro, produzindo a ilusão de visão estereoscópica [Johanson, 2001].

O efeito de visão estéreo em imagens em movimento, ou vídeo estereoscópico, é obtido quando se utilizam duas câmeras de vídeo adequadamente posicionadas para captura do par de sinais de vídeo. Segundo Johanson (2001), há dois tipos de configurações de câmeras passíveis de utilização para a captura de vídeo estereoscópico:

- Câmeras em eixo paralelo;
- Câmeras em eixo convergente (*toed-in*).

Na configuração de eixo paralelo, as câmeras são alinhadas de forma que os eixos centrais de suas lentes estejam em paralelo, conforme Figura 11.8 (a). A convergência das imagens é alcançada por meio de um pequeno deslocamento dos sensores de captura das câmeras ou por meio de uma tradução horizontal (deslocamento horizontal das imagens para se alterar a distância ou paralaxe entre os pontos correspondentes das imagens do olho direito e do esquerdo) e do corte das imagens resultantes. Na segunda forma de configuração, eixo convergente, as duas câmeras são rotacionadas para que seus eixos centrais sejam convergidos sobre um mesmo ponto no plano de projeção, conforme Figura 11.8 (b). Em ambas as configurações, as câmeras devem ser alinhadas horizontal e verticalmente, e a separação intereixo deve ser de aproximadamente 65 milímetros. Dessa forma, obter-se-á uma sensação de estereoscopia mais realista.



Figura 11.8 – Configuração de Câmeras: a) Câmeras em Eixo Paralelo e b) Câmeras em Eixo Convergente (*toed in*) [Johanson, 2001].

Na configuração de câmeras convergentes ocorre um efeito indesejado devido ao desalinhamento vertical (paralaxe vertical) dos pontos das imagens esquerda e direita, sendo uma fonte de desconforto para o observador [Konrad, 1999]. A razão desse efeito, algumas vezes referido como distorção *Keystone*, é que os sensores de captura de imagem das câmeras estão localizados em planos diferentes. Portanto, os pontos de vista esquerdo e direito possuem perspectivas ligeiramente diferentes na cena. O problema é ilustrado na Figura 11.9.

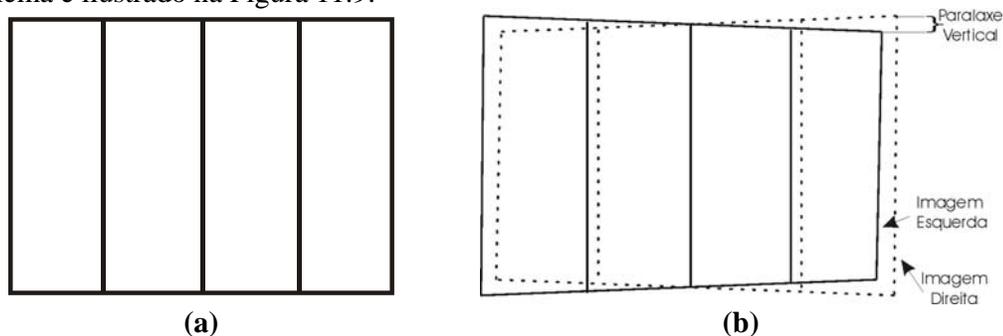


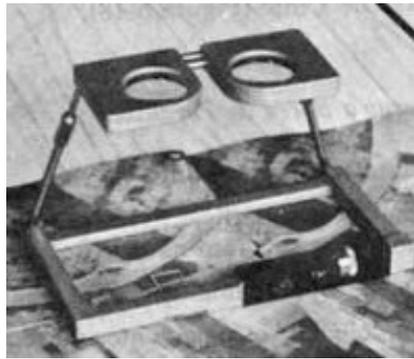
Figura 11.9 – Paralaxe Vertical causada por Distorção Keystone: a) Imagem Original e b) Visão do olho esquerdo e direito sobrepostas [Lacotte, 1995].

No caso da configuração de câmeras com eixos paralelos não ocorre paralaxe vertical, mas há necessidade de uma tradução horizontal das imagens resultantes. Por causa dessa tradução, as imagens não são perfeitamente sobrepostas. Esse fato requer cortes nas imagens, de forma que somente um campo de visão comum seja apresentado. Dependendo de como as imagens são traduzidas, os planos de convergências podem ser posicionados em profundidades de percepção diferentes [Johanson, 2001].

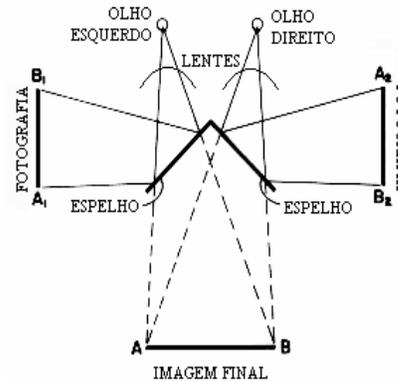
11.3.2 Estereoscópio

O estereoscópio é um instrumento composto por lentes que direcionam uma das imagens do par estereoscópico para o olho direito e a outra para o olho esquerdo, permitindo visualizar-se a imagem de forma tridimensional. A Figura 11.10 (a) traz o exemplo de um aparelho estereoscópico, ele separa fisicamente as visões esquerda e direita, eliminando a possibilidade do cruzamento entre as visões. No essencial, o estereoscópio é constituído por um par de lentes convexas montadas sobre um suporte [Alves, 1999; Machado, 1997].

Uma das grandes vantagens desse tipo de aparelho é permitir que o observador ajuste a distância pupilar entre as lentes, bem como ajuste a distância de visualização. Seu esquema básico pode ser observado na Figura 11.10 (b).



(a)



(b)

Figura 11.10 – Estereoscópio: a) Exemplo de Aparelho Estereoscópico e b) Esquema Básico de um Estereoscópio.

11.3.3 Anáglifo

Anáglifo é o nome dado às figuras planas cujo relevo se obtém por cores complementares, normalmente vermelho e verde ou vermelho e azul esverdeado, conforme a Figura 11.11 (a). Nesse caso, cada um dos olhos utilizará um filtro diferente, feito de papel celofane, para visualizar as imagens do par estereoscópico. O filtro vermelho refletirá a cor vermelha, deixando atingir o olho apenas as partes do anáglifo que estejam na cor vermelha, e o olho que estiver com o filtro verde/azul receberá a parte em verde/azul da imagem. A Figura 11.11 (b) apresenta modelos de óculos para visualização estereoscópica de anáglifos. Assim, as duas imagens são separadas na observação e fundidas pelo cérebro em uma única imagem tridimensional em preto e branco [Machado, 1997; Mancini, 1998; Santos, 2000].



(a)



(b)

Figura 11.11 – Figura Estereoscópica formada pelo processo de cores complementares: a) Exemplo de uma imagem anáglifo e b) Óculos utilizados para visão estéreo com anáglifo [Wood, 2000].

As vantagens desse tipo de estéreo são:

- Necessita apenas de um projetor ou monitor;
- Pode ser impressa;

- Baixo custo – óculos são facilmente confeccionados.

A desvantagem principal é a perda de qualidade que a coloração impõe.

11.3.4 Polarização da Luz

É bastante comum o conceito de luz como energia que se transmite de forma ondulatória. Sendo assim, pode-se considerar que essas ondas vibram em todas as direções perpendiculares à direção de deslocamento, conforme pode-se observar na Figura 11.12 (a). No entanto, em certas condições, as ondas de luz podem ser obrigadas a vibrar apenas num plano. Nesse caso, tem-se a luz polarizada que pode ser vista na Figura 11.12 (b).

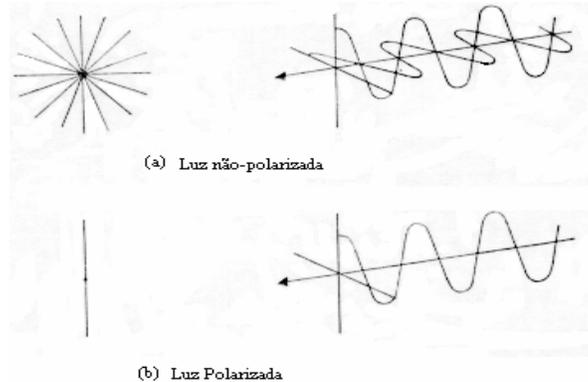


Figura 11.12 – Polarização Linear: a) Raio de luz não polarizado e b) Luz polarizada linearmente – vibrando apenas no plano vertical [Machado, 1997].

No processo de estereoscopia por polarização da luz, são utilizados filtros polarizadores, os quais fazem com que as imagens projetadas do par estereoscópico sejam polarizadas em planos ortogonais (por exemplo, um plano vertical e um horizontal). Dessa forma, o observador utiliza filtros polarizadores ortogonais correspondentes aos planos de projeção e vê com cada olho apenas uma das imagens projetadas. Da fusão das imagens vistas por cada olho, resultará a visão estereoscópica [Machado, 1997].

Pode-se citar como exemplo desse tipo de visão estereoscópica a utilização de dois projetores, onde cada um produz a imagem referente a cada olho. Na frente das lentes dos projetores, são colocados filtros polarizados da luz projetada. Os filtros são rotacionados de tal forma que a polarização da luz dos projetores tem orientações defasadas de 90° . O observador, por sua vez, utiliza óculos também com lentes polarizadas, com orientações coincidentes com os filtros dos projetores. As projeções dos dois projetores são sobrepostas em uma tela prateada, que preserva a polarização da luz incidente na reflexão. Dessa forma, cada olho enxerga apenas a imagem projetada por um dos projetores, gerando o efeito estereoscópico. A Figura 11.13 apresenta um exemplo de projeção polarizada.



Figura 11.13 – Projeção Polarizada da Luz.

Dentre as técnicas mais comuns de polarização de luz, a de luz vertical e a de luz circular são as mais utilizadas. A primeira possui a desvantagem de que com a inclinação da cabeça do observador pode-se levar a perda do estéreo. Para se resolver esse problema é utilizado a polarização circular. No caso do exemplo da Figura 11.13, o esquema a ser montado é idêntico, mudando apenas os filtros polarizadores.

11.3.5 Óculos Obturadores Sincronizados

Segundo essa técnica, o observador, ao visualizar a tela do computador ou televisor, deve utilizar óculos especiais, cujas lentes são feitas de cristal líquido. As lentes podem ficar instantaneamente transparentes ou opacas de acordo com um controle eletrônico. Esse controle é sincronizado com sinal de vídeo, de forma a deixar, por exemplo, opaca a lente da esquerda e transparente a da direita quando estiver sendo exibido, na tela, o quadro referente ao olho direito e vice-versa.

O sinal de vídeo deve apresentar, na seqüência, as imagens esquerda e direita em sincronismo. Como as taxas de atualização das imagens no vídeo são suficientemente rápidas (60Hz para cada olho), o resultado é que cada olho enxerga uma imagem diferente, resultando no efeito estereoscópico. De forma alternativa, o sinal de vídeo pode ser entrelaçado (linhas pares mostram a imagem esquerda e linhas ímpares mostram a imagem direita), reduzindo o cintilamento da imagem. Existem hoje no mercado diversos óculos obturadores. Os de custo mais elevado são controlados por um emissor de infravermelho que realiza a obturação das lentes dos óculos. A Figura 11.14 (a) apresenta um exemplo de óculos obturadores de custo mais elevado. Aqueles de baixo custo têm seu controlador conectado ao microcomputador ou à fonte de vídeo e permitem a visualização em estéreo no monitor de vídeo ou na televisão [Santos, 2000]. A Figura 11.14 (b) mostra um exemplo dos óculos obturadores de baixo custo.

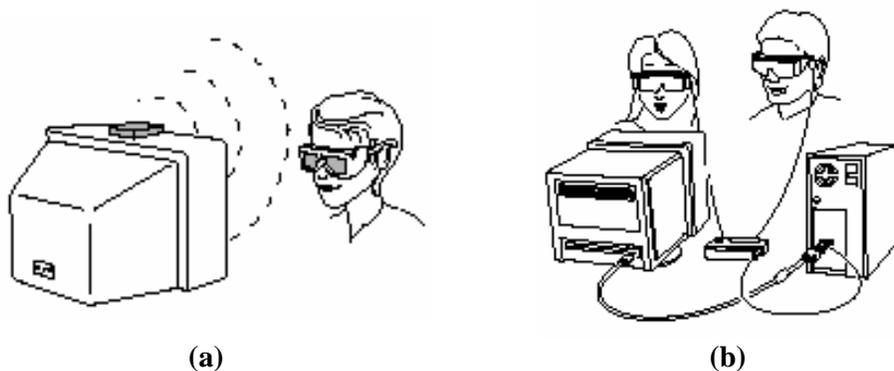


Figura 11.14 – Óculos Obturadores Sincronizados: a) CrystalEyes e b) SimulEyes VR (Stereographics, 1997).

11.3.6 Par Estéreo

Na visualização por par estéreo, são apresentadas duas imagens, lado a lado, geradas de forma que cada imagem seja posicionada considerando-se a distância entre os olhos do observador e, ainda, ligeiramente deslocadas na horizontal. Para a visualização de um par estéreo, o usuário deve convergir os olhos até ver três imagens. A imagem central aparece com profundidade. Os pares podem ser impressos ou ser mostrados na tela do computador. A Figura 11.15 apresenta um par estéreo.

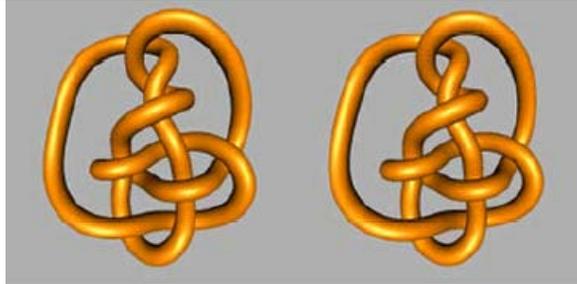


Figura 11.15 – Par Estéreo.

11.3.7 Efeito Pulfrich

O olho humano tende a perceber a luz de forma mais lenta quando a intensidade é menor. O efeito *Pulfrich* para obtenção de estéreo faz-se através do uso de um filtro em um dos olhos (pode ser uma lente de óculos escuros) e uma animação convencional, conforme Figura 11.16 (a e b). A percepção diferenciada da mesma animação pelos dois olhos faz com que o usuário enxergue o mesmo objeto em posições diferentes com cada olho, gerando a sensação de profundidade. É um sistema extremamente barato e simples, porém o controle da profundidade não é completo e só funciona com objetos em movimento [NvNews, 2000; Santos, 2000].

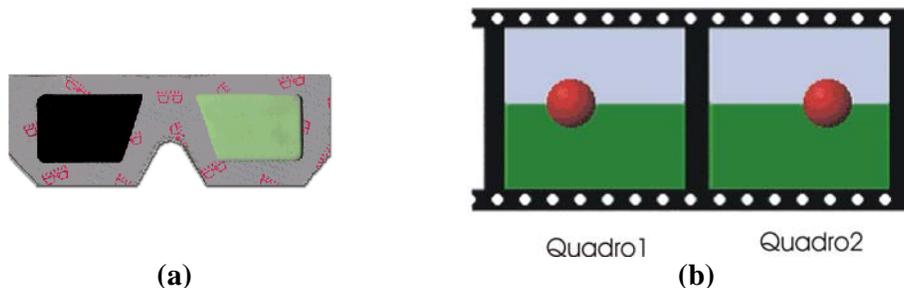


Figura 11.16 – Efeito Pulfrich: a) Filtro e b) Uma animação: quadro1 - lente escura e quadro2 – lente clara [Wood, 2000].

11.3.8 Estereogramas de Pontos Aleatórios

Estereogramas (*Random-Dot Stereogram*) são baseados na mesma idéia dos pares estereoscópicos. Entretanto, as duas Figuras são construídas sobre uma mesma imagem com apenas uma parte alterada (aquela de que se deseja mudar a profundidade). A Figura 11.17 mostra um exemplo de um estereograma.

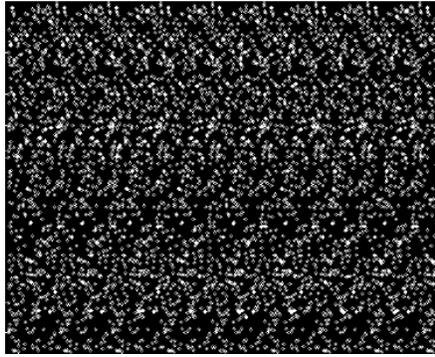


Figura 11.17 – Estereograma de Pontos Aleatórios.

11.3.9 Estéreo por Disparidade Cromática (*ChromaDepth*[™])

Com o uso de óculos com lentes especiais, é possível codificar diferentes profundidades na imagem através de suas cores. As lentes *ChromaDepth*[™] mudam a direção da luz que as atravessa de acordo com a cor, criando o efeito estéreo. Todos os objetos em cores quentes (próximas ao vermelho) parecem estar mais perto do observador, enquanto os objetos de cores azuis (cores frias) parecem estar mais distantes. As demais cores reproduzem a profundidade entre as cores vermelha e azul, gradativamente, conforme a Figura 11.18.

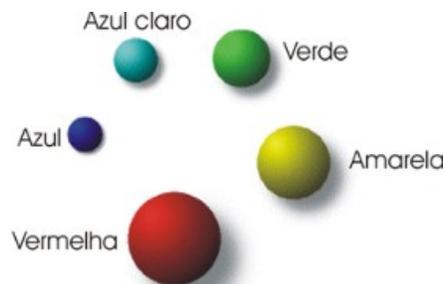


Figura 11.18 – ChromaDepth: Profundidade das Cores [Wood, 2000].

Esse método é bastante barato, porém não permite o uso das cores de forma natural e de fácil controle, ou seja, as cores dos objetos em uma cena devem ser escolhidas conforme o padrão de profundidade de cada cor. Dessa forma, para que um homem seja colocado no fundo de uma cena, ele deve ter a cor azul.

Uma grande desvantagem é a restrição à tabela de cores imposta na Figura 11.18. Isto impossibilita seu uso, por exemplo, em visualização científica, pois a tabela de cores é em função de propriedades existentes ao longo dos objetos da cena e não em função da distância ao usuário. Esta técnica funciona apenas para imagens estáticas – cenas e câmera sem alterações.

A vantagem é a possibilidade de impressão. Para isto, existem dois tipos de óculos:

- ChromaDepth® 3D *High Definition* (HD): para visualização em monitores;
- ChromaDepth® 3D *Standard Glasses*: para visualização em impressos.

11.3.10 Display Autoestereoscópico

Nos displays autoestereoscópicos, as visões esquerda e direita são multiplexadas espacialmente, permitindo ao observador visualizar uma imagem tridimensional sem a necessidade óculos especial. Cada imagem do par estéreo é “fatiada” e reside sobre as colunas pares e ímpares do monitor. As fatias são direcionadas para o olho do observador por meio de uma película lenticular colocada na superfície do monitor (Figura 11.19) ou pelo cálculo de distância e posicionamento dos olhos do observador. Maiores detalhes podem ser encontrados em Perlin (2000 e 2001) e em Dodgson (1998).

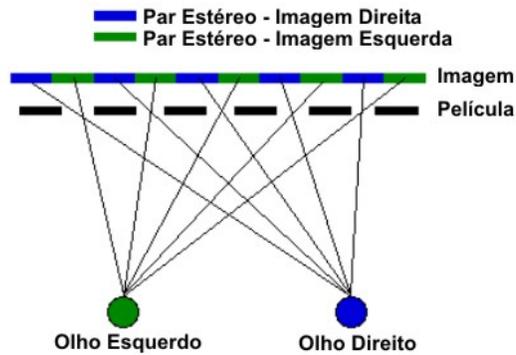


Figura 11.19 – Display Autoestereoscópico.

11.4 Fundamentos Matemáticos

Conforme citado anteriormente, existem diferenças entre imagens formadas nas retinas de cada olho quando sobrepostas. Estas diferenças são na direção horizontal. A disparidade é zero para objetos onde os olhos convergem. Já a paralaxe é a distância entre os pontos correspondentes das imagens do olho direito e do esquerdo na imagem projetada na tela. Em outras palavras, disparidade e paralaxe são duas entidades similares, com a diferença que paralaxe é medida na tela do computador e disparidade, na retina. É a paralaxe que produz a disparidade, que por sua vez, produz o estéreo. Os três tipos básicos de paralaxe são:

- **Paralaxe zero:** conhecida como ZPS (do inglês *Zero Parallax Setting*). Um ponto com paralaxe zero se encontra no plano de projeção, tendo a mesma projeção para os dois olhos (Figura 11.20 (a)).
- **Paralaxe negativa:** significa que o cruzamento dos raios de projeção para cada olho encontra-se entre os olhos e a tela de projeção, dando a sensação de o objeto estar saindo da tela (Figura 11.20 (b)).
- **Paralaxe positiva:** o cruzamento dos raios é atrás do plano de projeção, dando a sensação de que o objeto está atrás da tela de projeção (Figura 11.20 (c)).

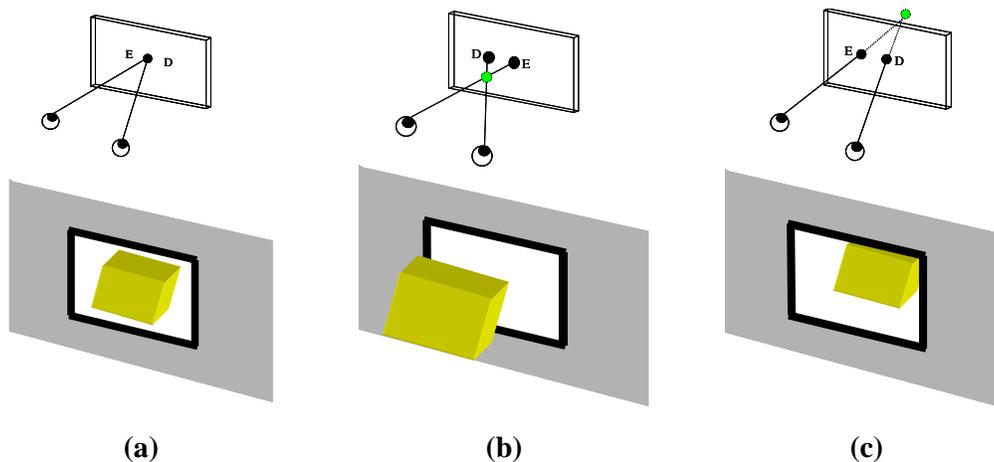


Figura 11.1 – Tipos de paralaxe: a) Paralaxe zero (ZPS), b) Paralaxe negativa e c) Paralaxe positiva.

A paralaxe positiva P pode apresentar problema quando comparada à distância interaxial (t_c) – distância entre os olhos. Quando P tem valor menor, mas próximo a t_c o resultado é ruim, a menos que se queira posicionar o objeto no infinito. Se P for maior que t_c , significa que há um erro, pois é um caso degenerado. Estes casos estão ilustrados na Figura 11.21.

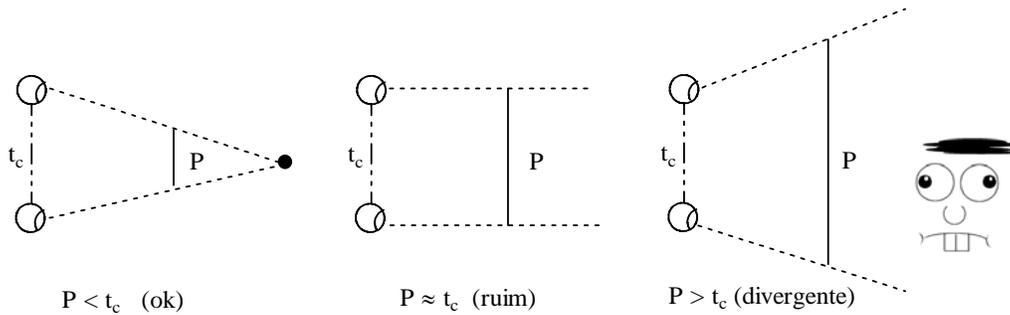


Figura 11.2 – Problemas com paralaxe positiva.

Deve-se tomar cuidado para que as projeções sempre caiam no retângulo que define o campo de visão no plano de projeção. Caso isto não ocorra, significando que apenas um dos olhos esteja vendo o ponto, a noção de estereoscopia é perdida. Isto apenas é aceitável para pontos que se movam rapidamente.

Um fator importante que deve ser levado em consideração é que a distância do observador à tela afeta o efeito de estereoscopia. Quanto maior a distância à tela, maior será o efeito estereoscópico (tanto positivo quanto negativo). Na Figura 11.22 é ilustrado o caso para paralaxe positiva. Note que para o observador 2, que está mais distante da tela, o ponto também se encontra mais distante e para dentro, comparado ao observador 1.

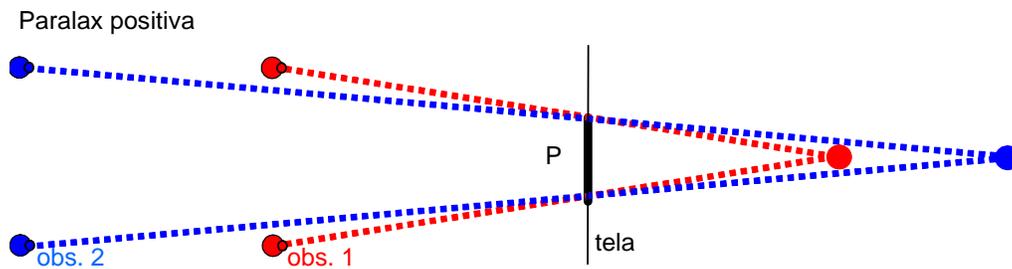


Figura 11.3 – Efeito estereoscópico com paralaxe positiva com distâncias diferentes do observador à tela.

Um grande desafio da estereoscopia é gerar maior efeito de profundidade com menor valor de paralaxe devido ao espaço físico limitado da tela e distância máxima que um ambiente comporta para os observadores. Em regra geral, o ângulo de paralaxe (β) deve estar no intervalo $[-1,5^\circ, 1,5^\circ]$, definindo paralaxes mínimas e máximas. O esquema de controle da paralaxe é ilustrado na Figura 11.23, onde d é a distância do observador à tela.

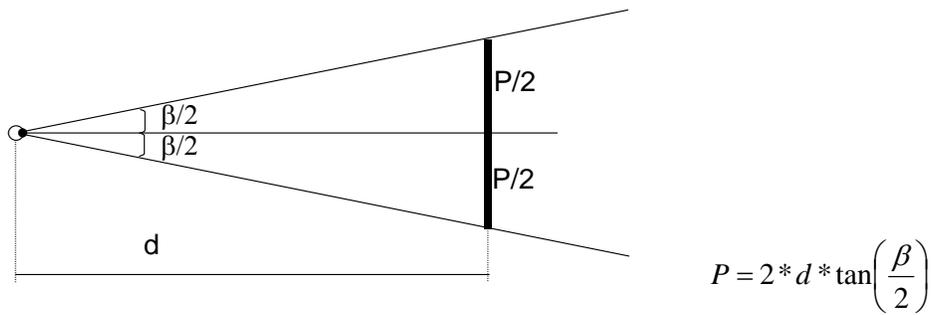


Figura 11.4 – Intervalo de controle do ângulo de paralaxe.

Em uma situação de *desktop*, normalmente $d = 60\text{cm}$. Portanto o valor máximo de paralaxe P_{max} é 1,57 cm. Em uma sala de visualização com distância média de 3m, o valor máximo de paralaxe P_{max} é 7,85 cm. Esta paralaxe é relativa ao mundo físico, onde são feitas as projeções. Para transformar para o mundo virtual temos que dividir esta grandeza pela largura da tela de projeção e multiplicar pelo número de pontos horizontais.

A distância interaxial também influencia a paralaxe. Quanto maior a distância interaxial, maior é a paralaxe e, conseqüentemente, maior a sensação de estéreo. Contudo sempre se deve obedecer aos limites para a paralaxe positiva, mencionados anteriormente.

Esta seção trata apenas de câmeras paralelas. Com isso, duas imagens não são sobrepostas por causa da distância interaxial, exceto no ZPS. O esquema de câmeras paralelas é mostrado na Figura 11.24 (a) [StereoGraphics 1997], onde d_0 é a distância das câmeras ao ZPS.

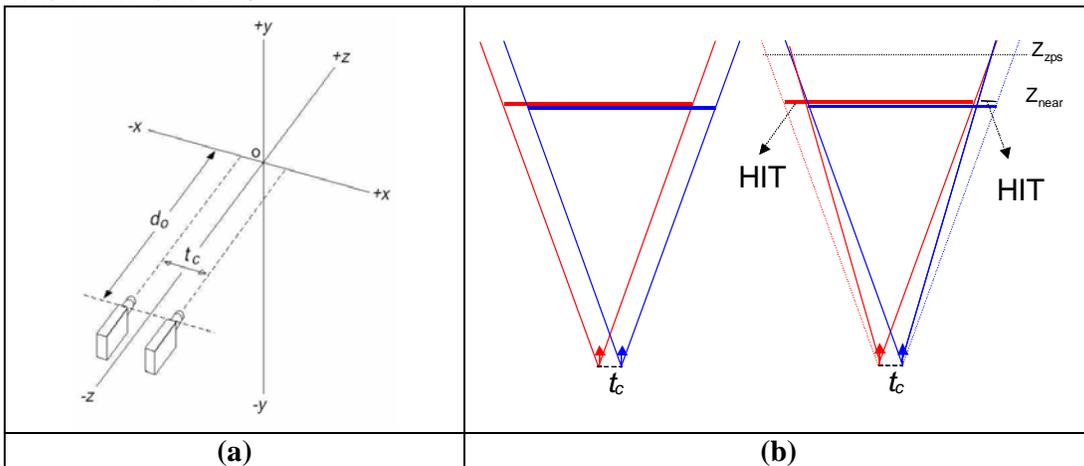


Figura 11.5 – a) Câmeras paralelas. b) Deformação do frustum.

A relação da paralaxe em função da câmera é dada por:

$$P(d_m) = M \cdot f_c \cdot t_c \cdot (1/d_o - 1/d_m) \quad \text{onde:}$$

- **M**: magnificação (telas maiores, paralaxes maiores);
- **d_m**: objetos mais próximos da câmera produzem maior efeito de estereoscopia.

Em computação gráfica costuma-se definir o *frustum* de visão (i.e., o cone alcançável pela visão) sendo simétrico e a projeção é feita no plano Z_{near} . A simetria em estereoscopia é desfeita como será visto.

Em estereoscopia, em função de existência de duas câmeras, existem regiões de um *frustum* não alcançáveis pelo outro, e vice-versa, como é visto na Figura 11.24 (b), observado de cima. Z_{zps} é a distância do ZPS às câmeras. Para solucionar o problema de diferença entre os *frustums*, eles são deformados, tornando-se em não-simétricos. Esta deformação é dada na horizontal e é definida pelo HIT (do inglês *Horizontal Image Translation*). O cálculo do HIT (por semelhança de triângulos) é ilustrado na Figura 11.25 (a).

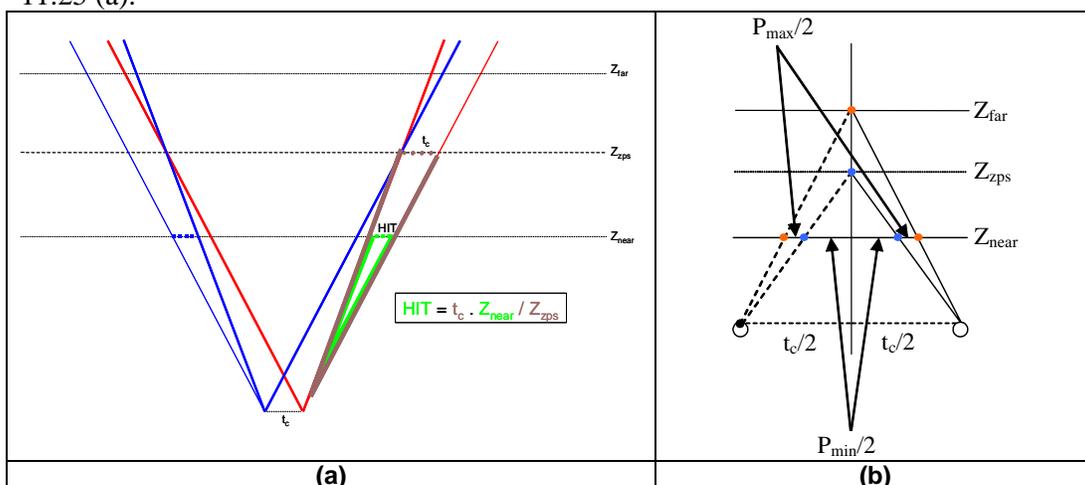


Figura 11.6 – a) Cálculo do HIT. b) Cálculo de t_c dado Z_{zps} .

Existem diversas maneiras de se trabalhar com os parâmetros:

- Especifica-se Z_{zps} e calcula-se t_c a partir dele, conforme a Figura 11.25 (b):

- ✓ Para t_c em função de P_{min} apenas, temos:

$$t_{c_1} = \frac{P_{min}}{Z_{zps} - Z_{near}} Z_{zps}$$

- ✓ Para t_c em função de P_{min} e P_{max} apenas, temos:

$$t_{c_2} = \frac{P_{max}}{Z_{far} - Z_{near}} Z_{far}$$

Para que não ocorra uma extrapolação nos limites mínimos e máximos das paralaxes, tomamos o menor valor entre os dois, isto é:

$$t_c = \min\{t_{c_1}, t_{c_2}\}$$

- Calcula-se t_c e Z_{zps} que otimizam as paralaxes de cada cena entre um valor máximo e mínimo. Neste caso, t_c é dado em função de P_{min} e P_{max} , conforme visto no caso anterior. Da Figura 11.25 (b), podemos também encontrar que

$$Z_{zps} = \frac{t_c}{t_c - P_{min}} Z_{near}$$

Como podemos notar, e se comprovar na prática, nem sempre é fácil gerar imagens estereoscópicas. Uma vez conhecidas as noções básicas, a composição de imagens estereoscópicas é uma arte, e não uma ciência exata.

11.5 Problemas

Existem alguns problemas bem conhecidos que envolvem imagens estereoscópicas, algumas vezes relacionados à falha tecnológica e outras vezes relacionados às características do sistema visual humano. Esses problemas são sempre manifestados quando há um esforço visual para obter-se uma visão estereoscópica, causando desconforto para o observador.

11.5.1 Problema de Convergência/Acomodação

Quando se olha para um objeto no mundo real, os olhos focalizam o objeto que se deseja visualizar (acomodação pela alteração da forma dos cristalinos nos olhos) e convergem (giro de um olho em direção ao outro) sobre este mesmo objeto. Após o processo de focalização e convergência dos olhos, o cérebro funde as duas imagens (esquerda e direita) em apenas uma, possibilitando a visualização estereoscópica ou em profundidade. Diferentes conjuntos de músculos controlam essas funções, e o caminho neurológico para esses dois processos estão também separados. Apesar da complexidade, o ser humano cresce acostumado ou habituado a acumular as respostas ou experiências visuais realizadas durante toda vida.

Ao contrário do que ocorre com os olhos no mundo real, quando se olha para uma tela ou monitor, os olhos são acomodados sobre o plano da tela, mas são convergidos com base na paralaxe entre as imagens esquerda e direita. Portanto há uma quebra da habitualidade das respostas nos dois mecanismos. Para algumas dessas pessoas, isso é percebido como desconforto. Para minimizar os efeitos negativos do problema de convergência/acomodação, o plano de convergência deve estar posicionado no plano da tela ou monitor. Isso pode ser feito por meio de uma tradução e um corte apropriado da imagem horizontal, no caso de se utilizar uma configuração de câmera em eixo paralelo.

11.5.2 Conflitos entre a Interposição e a Profundidade Paralaxe

Se um objeto, em visão tridimensional, tem uma paralaxe negativa (está localizado entre a tela e o observador) e está sendo obstruído pelas bordas da janela tridimensional em que está sendo apresentado, a sensação de profundidade estereoscópica é seriamente prejudicada, conforme demonstra a Figura 11.26. Esse problema ocorre devido ao conflito entre a profundidade tridimensional resultante da paralaxe negativa e a interposição entre os objetos da cena e a tela.

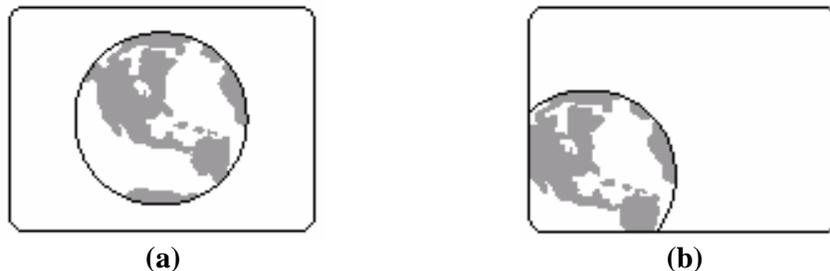


Figura 11.7 – Conflito entre paralaxe negativa e interposição: a) Visualização correta e b) Visualização incorreta [StereoGraphics 1997].

11.5.3 Efeito Crosstalk

Infelizmente, devido às limitações da tecnologia atual em dispositivos de apresentação, como monitores de vídeo, a separação das imagens esquerda e direita pode originar dois problemas. No primeiro, como os monitores são usados em alta frequência (de 100 a 120 Hz), os fósforos da tela não têm tempo suficiente para retornar ao seu estado de baixa energia entre as apresentações da imagem esquerda e da imagem direita. No segundo problema, os obturadores de cristal líquido dos óculos não podem bloquear 100% a passagem da luz. Parte da luz (aproximadamente 10%) pode passar através dos obturadores, permitindo que o olho veja, parcialmente, a outra imagem apresentada. Ambos os problemas acabam possibilitando que cada olho veja sua própria imagem, mais uma sobreposição, ou um "fantasma", da imagem do outro olho. Esse defeito, conhecido como efeito *Crosstalk*, não impede a visualização estereoscópica, mas causa desconforto visual no observador [Lacotte, 1995].

11.6 Exemplos Práticos

São apresentadas duas aplicações em realidade virtual enfocando o uso de estereoscopia. A primeira, denominada TecStereoPlayer, possibilita tocar vídeo com estereoscopia visual, enquanto a segunda, conhecida como Vídeo Avatar Estereoscópico, permite a integração de vídeo real estereoscópico em ambientes virtuais tridimensionais.

11.6.1 TecStereoPlayer – Um Sistema para Visualização de AVIs Estéreos

TecStereoPlayer é um tocador de vídeos com estereoscopia visual. Todos os fundamentos e bases matemáticas citados anteriormente já devem estar aplicados aos vídeos. O TecStereoPlayer apenas exhibe.

O desenvolvimento do TecStereoPlayer objetivou-se em suportar diversos formatos de vídeos estéreos [Lipton 1997] e exibir também em diversos dispositivos estéreos, transformando as imagens do vídeo quando necessário.

Um dos maiores problemas em sistemas de estereoscopia visual é a falta de padrão para imagens e, conseqüentemente, para vídeos. Os formatos suportados pelo TecStereoPlayer são:

- **Lado a lado:** as imagens estereoscópicas neste formato são formadas por duas imagens colocadas lado a lado. Exemplo desse formato é mostrado na Figura 11.27. Convencionalmente, a imagem colocada à esquerda é destinada ao olho esquerdo e a da direita, para o olho direito.



Figura 11.8 – Exemplo de formato lado a lado de imagem estéreo.

• **Acima e abaixo:** neste formato, as imagens estereoscópicas são formadas por duas imagens colocadas uma acima da outra. Exemplo desse formato é mostrado na Figura 11.28. Convencionalmente, a imagem colocada acima é destinada ao olho esquerdo, e a abaixo, ao direito.

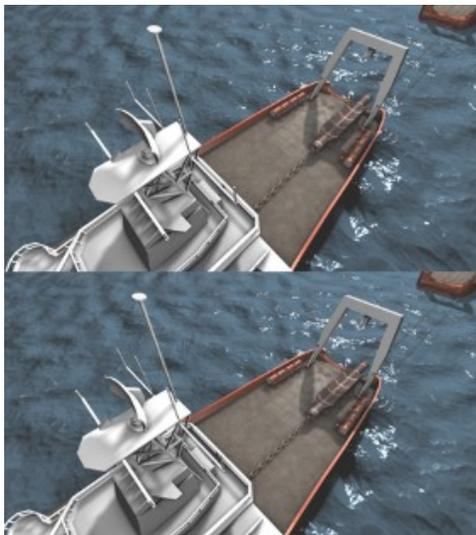


Figura 11.9 – Exemplo de formato acima e abaixo de imagem estéreo.

Para cada um desses formatos, ainda pode existir uma faixa preta separando as imagens. Uma justificativa para a existência dessa faixa, vertical no formato lado a lado e horizontal no formato acima e abaixo, é a imposição de alguns compressores de vídeo em relação à razão de aspecto das imagens. Por isto, não existe um padrão de altura (no caso vertical) ou largura (no caso horizontal) dessa faixa preta. Convencionalmente, busca-se adotar 5% da altura total para a faixa horizontal e 5% da largura total para a faixa vertical.

Outros formatos existentes, mas não suportados pelo TecStereoPlayer, são: entrelaçados por coluna e entrelaçados por linha. A existência desses formatos se deve ao fato de serem formatos específicos para determinados sistemas de equipamentos para visualização estéreo.

Os dispositivos suportados pelo TecStereoPlayer são:

- Placas gráficas com suporte ao OpenGL [OpenGL 2004] estéreo: neste caso, existem 4 *buffers*, chamados de QuadBuffer – dois para cada olho. Os óculos podem ser ligados diretamente à placa através de fios, eliminando a presença do emissor. Neste caso, geralmente, apenas um usuário pode utilizar o sistema por vez. Algumas placas suportam a utilização de emissores. O TecStereoPlayer divide as imagens de cada imagem do vídeo para cada *buffer* de trás de cada olho. Depois de preencher os dois *buffers* traseiros, é realizado o *SwapBuffers*.

- Monitores autoestereoscópico: para estes monitores, como mencionado anteriormente, não é necessária a utilização de óculos. O TecStereoPlayer destina cada imagem de cada olho para um dos seus formatos internos e, através de uma comunicação via saída serial, é passado ao monitor o formato utilizado.

- VRex: são projetores capazes de realizar estéreo ativo e passivo, não simultaneamente. O formato exigido por este projetor é o entrelaçamento de colunas.

Isto é, a imagem destinada para o olho da esquerda é distribuída pelas colunas pares da imagem enviada ao projetor e a imagem destinada para o olho da direita pelas colunas pares. Através de um equipamento ligado entre a placa de vídeo e o projetor, permite-se também a utilização do estéreo do OpenGL através de uma entrada de S-Video.

O TecStereoPlayer também reproduz na forma de anáglifos, permitindo a visualização com óculos com filtros de cores em qualquer *display* ou dispositivo de projeção.

11.6.2 Vídeo Avatar Estereoscópico

Técnicas de estereoscopia foram empregadas em um projeto de teleconferência em virtualidade aumentada, denominado AVTC, com o objetivo de proporcionar volume e profundidade às imagens bidimensionais [Siscoutto, 2003a]. O AVTC é baseado na integração de vídeo avatar estereoscópico em ambientes virtuais tridimensionais, e permite ao público alvo da teleconferência assistir ao vídeo de uma pessoa real imerso em um ambiente virtual, interagindo com o próprio ambiente e com o público.

Comumente, a integração de vídeo em ambientes virtuais se dá por meio do processo de modelagem ou reconstrução tridimensional da imagem do usuário. Na reconstrução, simultaneamente ao processo de criação do avatar tridimensionais, obtém-se a textura referente à imagem do usuário, a qual é mapeada sobre o modelo tridimensional [Ogi, 2000] [Mulligan, 2001]. Este esquema de reconstrução é realizado no âmbito tridimensional - inserção de um avatar 3D em um ambiente virtual 3D - requerendo uma arquitetura complexa e um alto grau de processamento [Ling, 2002].

O AVTC apresenta métodos alternativos para o processo de integração do vídeo no ambiente virtual. Esses métodos, denominados pré-integração e pós-integração, prescindem de reconstrução, reduzindo, assim, a demanda por processamento baixando o custo do processo. As alternativas propostas baseiam-se na integração de imagens reais bidimensionais do usuário em ambientes virtuais tridimensionais, em conjunto com a utilização de dispositivos de visualização estereoscópica [Siscoutto, 2003b].

A captura das imagens reais bidimensionais do usuário é realizada por meio de um par de câmeras de vídeo, que capturam duas imagens bidimensionais (esquerda e direita), em tempo real, gerando vídeo estereoscópico.

No método pré-integração, o vídeo é integrado no ambiente virtual durante o *pipeline* de renderização. Para isso, insere-se um modelo geométrico de uma placa vertical, no local do ambiente onde deverá aparecer a imagem do usuário (Figura 11.29 (a)). Depois de inserida a placa, as imagens do usuário são tratadas visando-se tornar transparente a cor de fundo da imagem (azul na Figura 11.29 (b)), restando apenas as imagens do apresentador. Posteriormente, mapeia-se a textura das imagens estereoscópicas do apresentador nas respectivas placas nas imagens estereoscópicas do ambiente virtual durante o *pipeline* de renderização. Deve ser realizado o mapeamento tanto da visão esquerda quanto da visão direita do par estereoscópico do ambiente virtual tridimensional integrado. Por fim, é obtido um par de imagens estereoscópicas integradas do ambiente virtual juntamente com a imagem do vídeo avatar (Figura 11.29 (c)).

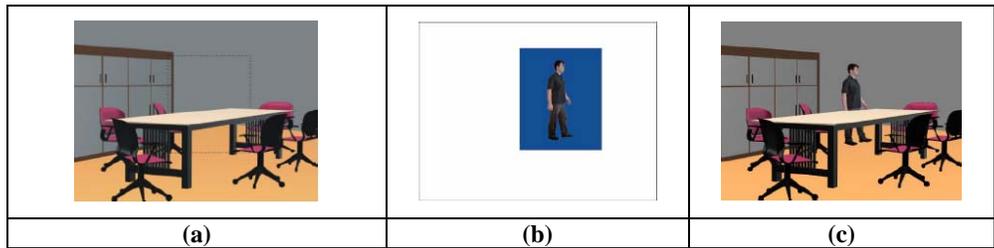


Figura 11.10 – Ilustração das imagens utilizadas no mapeamento de pré-integração.

O método de pós-integração insere o vídeo no ambiente virtual na fase final do *pipeline* de renderização, sendo necessárias 4 etapas. Na etapa 1, é realizada a renderização da cena, com obtenção de um par de imagens bidimensionais estereoscópicas do ambiente virtual (Figura 11.30 (a)); Na etapa 2, é inserido um modelo geométrico de uma placa vertical, com cor emissiva no ponto dentro do ambiente onde a imagem do usuário deverá aparecer. Também é realizada a desativação de toda a iluminação e textura emissiva presente no ambiente, de tal forma que, nas projeções estereoscópicas resultantes da renderização, apareçam apenas as partes da placa não obstruídas por outros elementos da cena virtual (Figura 11.30 (b)); Na etapa 3 é executada uma segunda renderização, obtendo-se um par de imagens bidimensionais estereoscópicas do ambiente virtual que contem apenas as partes visíveis da placa (plano emissivo) (Figura 11.30 (b)); Na última etapa, em conjunto com o par de imagens estereoscópicas do usuário (Figura 11.30 (c)), é realizado o mapeamento de textura das imagens estereoscópicas do vídeo nas respectivas imagens estereoscópicas do ambiente virtual, utilizando-se como referência as partes visíveis da placa na segunda renderização (Figura 11.30 (d)).

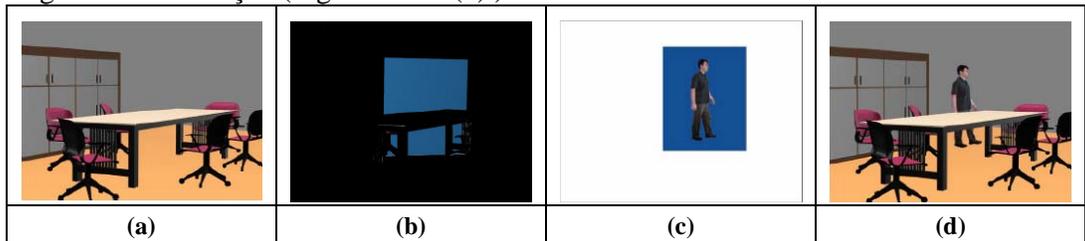


Figura 11.11 – Ilustração das imagens bidimensionais utilizadas no processo de mapeamento da pós-integração.

Concluído o processo de integração, são utilizados dispositivos de visualização estereoscópica, tais como sistema de projeção polarizada ou óculos obturadores sincronizados. As Figuras 11.31 (a) e 11.31 (b) mostram o par estereoscópico obtido após o processo de integração e a Figura 11.31 (c) apresenta as duas imagens do par sobrepostas utilizadas durante a visualização estereoscópica.

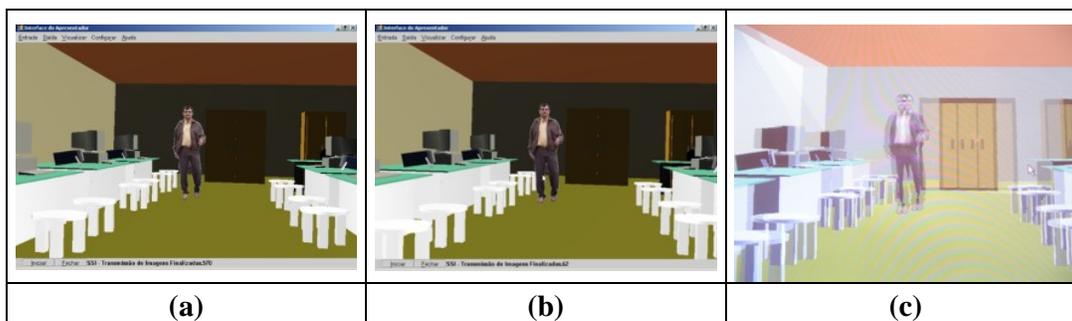


Figura 11.12 – Ilustração das imagens obtidas após o processo de integração: a) imagem esquerda integrada, b) imagem direita integrada e c) imagens a e b sobrepostas.

Os testes realizados com o AVTC avaliaram possíveis distorções na captura e na de integração das imagens reais em ambientes virtuais. Também foram analisados os aspectos visuais, o nível de imersão alcançado e a viabilidade da visualização estereoscópica. Os resultados constataram que a imagem de um objeto real inserida em um ambiente virtual apresenta exatamente a mesma forma, proporção e posicionamento quando comparado a um objeto virtual equivalente gerado dentro do ambiente virtual. Além disso, confirmou-se que a visualização estereoscópica é viável no processo de integração de imagens 2D com imagens 3D, proporcionando a visualização do vídeo avatar e do ambiente virtual com senso de volume e profundidade, sem que haja distinção entre imagens 2D e 3D.

11.7 Conclusão

A visão estereoscópica é uma característica do sistema visual humano que possibilita a visualização tridimensional do ambiente a partir de imagens bidimensionais captadas pelas retinas. Se os dispositivos de saída gráfica disponíveis já produzissem imagens realmente tridimensionais (holográficas, por exemplo), pesquisadores, desenvolvedores, artistas e demais profissionais envolvidos com a área de Realidade Virtual não precisariam se preocupar com a estereoscopia, um artifício interno de nosso sistema visual com o objetivo de contornar as limitações de um sistema de captura bidimensional. No entanto essa mesma limitação também é encontrada nos dispositivos de saída disponíveis no mercado, obrigando-nos a lançar mão de artifícios similares se quisermos criar efeitos tridimensionais realistas a partir de dispositivos de exibição bidimensionais. Sendo assim, enquanto terminais holográficos ou outra tecnologia de geração de imagens verdadeiramente tridimensionais não se tornarem tecnológica e economicamente viáveis, a ponto de substituírem completamente os tradicionais dispositivos bidimensionais, a estereoscopia será tema fundamental para estudantes, artistas, profissionais e pesquisadores envolvidos ou interessados na área de Realidade Virtual.

Este capítulo apresentou os principais conceitos relacionados à estereoscopia e as principais formas de se gerá-las artificialmente. Foram discutidos técnicas, tecnologias e problemas, além de apresentados exemplos, ressaltando-se que a criação de imagens estereoscópicas é muitas vezes mais arte que ciência exata.

Referências

- Alves, A. R. (1999) Princípios Fundamentais da Estereoscopia. UFSV – Santa Catarina, 1999. Disponível em: <http://www.inf.ufsc.br/~visao/1999/aline/estereo.html>. Acesso em 18 abril 2002.
- Dodgson, N. A. (1998) Autostereoscopic Image Compression. Rainbow Graphics Researchs Group, Computer Laboratory, University of Cambridge, Pembroke St. Disponível em: <<http://www.cl.cam.ac.uk/~nad/compr/compr.html>>.
- Fontoura, F.N.F. (2001) “Estereoscopia. Curso de Especialização em Informática com Ênfase em Internet e aplicações de ensino”. <http://atlas.ucpel.tche.br/~magic/comgraf/estereoscopia.html>. Acessado em 18 abril 2002.
- Johanson, M. (2001) Stereoscopic Video Transmission over the Internet; presented at WIAPP'01 in San Jose, July.
- Konrad, J. (1999) Enhancement of viewer comfort in stereoscopic viewing: parallax adjustment. Proceedings of SPIE/IST symposium on electronic imaging, stereoscopic displays and virtual reality systems, pp. 179-190.
- Lacotte, B. (1995) Elimination of keystone and crosstalk effects in stereoscopic video. Technical report 95-31, INRS Telecommunications, Quebec, December.
- Ling, C. et al. (2002) “Stereo Camera System and its Application in Networked Virtual Environment”, In: Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Beijing, 4-5, November, pp. 225-229.
- Lipton, L. (1982) Foundations of the Stereoscopic Cinema – A Study in Depth. Van Nostrand Reinhold Company.
- Lipton, L. (1997) “Stereo-Vision Formats for Video and Computer Graphics White Paper”. http://www.stereographics.com/support/body_stereo_formats.html
- Machado, L. S. (1997) A Realidade Virtual em Aplicações Científicas. Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada, INPE [INPE-6389-TDI/605], São José dos Campos, Abril.
- Mancini, A. (1998) Disparity Estimation and Intermediate View Reconstruction for Novel Applications Stereoscopic Video. Thesis of Mestre submitted to the Department of Electrical Engineering McHill University, Montreal, Canada.
- Mulligan, J., Isler, V. and Daniilidis, K. (2001) “Performance evaluation of stereo for tele-presence”, In Proc. Int. Conf. on Computer Vision, Vancouver, Canada.
- NvNews, 2000. Apresenta informações sobre óculos 3D e estereoscopia. Disponível em: <http://www.nvnews.net/articles/3dimagery/3dglass.shtml>. Acesso em 18 abril 2002.
- Ogi, T. et al. (2000) “Video Avatar Communication for the Multimedia Virtual Laboratory”, The First IEEE Pacific-Rim Conference on Multimedia (IEEE-PCM 2000), pp.90-93, Sydney.
- OpenGL (2004) OpenGL® - The Industry Standard for High Performance Graphics <http://www.opengl.org>

- Perlin, K., Paxia, S. and Kollin, J. (2000) An Autostereoscopic Display; SIGGRAPH 2000 Conference Proceedings. New Orleans, Louisiana. July 23-28. Disponível em: <<http://www.mrl.nyu.edu/publications/autostereo/autostereo.pdf>>.
- Perlin, K. et. al. (2001) Recent Advances in the NYU Autostereoscopic Display; Proceedings of the SPIE, Vol. 4297. San Jose, California. January 22-24. Disponível em: <<http://www.mrl.nyu.edu/publications/autostereo/spie2001.pdf>>.
- Santos, E. T. (2000) Uma Proposta para Uso de Sistemas Estereoscópicos Modernos no Ensino de Geometria Descritiva e Desenho Técnico. Anais do III Congresso Internacional de Engenharia Gráfica nas Artes e no Desenho (GRAPHICA 2000), Junho, Ouro Preto, MG. (CD-ROM). Disponível: http://www.pcc.usp.br/Pessoal/professores/toledo/pdf/graphica2000_estereo.pdf
- Siscoutto, R. A. and Tori, R. (2003a) “Proposta de Arquitetura para Teleconferência Tridimensional Baseada na Integração de Vídeo Avatar Estereoscópico em Ambiente Virtual Tridimensional”, Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, Escola Politécnica da USP, São Paulo: 192p. (Tese de Doutorado).
- Siscoutto, R. A. and Tori, R. (2003b) “Solução de Baixo Custo para Inserção de Vídeo Avatar Estereoscópico em Ambientes Virtuais Tridimensionais”, In: Proceedings of SVR2003 - VI Symposium on Virtual Reality, Ribeirão Preto, v. 1, p. 264-272.
- StereoGraphics Corporation (1997) Stereographics Developers’ Handbook: Background on Creating Images for CrystalEyes and SimulEyes. http://www.stereographics.com/support/downloads_support/handbook.pdf>
- Watson, K. et al. (1998) “Development of Stereoscopic-Haptic Virtual Environments”. Proc. of the 12th IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems.
- Wood, D. (2000) 3D Imagery. Página Html - Nv News – Vidia, 24 de fevereiro. Disponível em: <http://www.nvnews.net/articles/3dimagery/introduction.shtml>.