

2 Trabalhos relacionados

A técnica de mapeamento de sombras foi inicialmente proposta em 1978 por Williams [5]. Nesta seção, descrevemos brevemente várias alterações e extensões que foram propostas por diferentes autores ao longo dos anos para lidar com os problemas e limitações do algoritmo. Bons estudos comparativos (*surveys*) podem ser encontrados em [6-8].

2.1. Anti-chamuscamento

Aplicando diretamente o mapeamento de sombras, obtemos superfícies iluminadas com aspecto chamuscado em padrões de Moiré. Esse fenômeno, que será analisado em detalhes na Seção 3.1, está associado à resolução limitada do mapa de profundidades. Tradicionalmente, ele é resolvido com o acréscimo de um *bias*, um pequeno deslocamento aos valores de z do mapa [5]. No entanto, esse deslocamento precisa ser ajustado a cada cena e não é eficaz em todos os casos.

Brabec et al. [9] propõem a geração do mapa de profundidades com a distância linear até a fonte de luz, ao invés da projetada em perspectiva, e ajustam os planos do volume de visão da luz à cena. Wang & Molnar [10] fazem uma análise do problema de amostragem e propõem tomar a distância da segunda superfície mais próxima da fonte, o que é muito eficaz em cenas compostas apenas de sólidos. Woo [11] constrói o mapa com a média das distâncias da primeira e segunda superfícies. Weiskopf & Ertl [12] derivam uma equação genérica para as amostras do mapa e aplicam uma saturação (*clamp*) ao mapa de Woo, conseguindo melhores resultados com o descarte de faces voltadas para trás (*backface culling*). Hourcade & Nicolas [13], alternativamente, propõem um mapa de sombras que registra um identificador numérico (ID) de cada objeto da cena, o que elimina o chamuscamento, mas não permite sombras de um objeto sobre si próprio.

2.2. Filtragem

O principal problema verificado na utilização de mapas de sombras é a aparência serrilhada das bordas das regiões não-iluminadas devido à resolução finita do mapa. Esse efeito, analisado na Seção 4.1, pode ser tratado por um tipo especial de filtro denominado PCF (*Percentage-Closer Filter*), proposto por Reeves et al. [14]. Como os valores de profundidade do mapa não podem ser diretamente filtrados, o PCF é aplicado aos resultados dos testes de sombra com diferentes texels. Isso resulta em bordas com uma transição mais suave, o que dissimula o efeito de serrilhamento. Brabec & Seidel [15] fornecem implementações do PCF em *hardware* gráfico programável. Pagot et al. [16] fazem uma generalização dos mapas de sombra capaz de aumentar a eficiência em alguns casos. Kryachko [17] propõe um filtro com núcleo (*kernel*) circular, amostras ligeiramente deslocadas por um valor randômico (*jitter*) e um esquema de processamento condicional em programas de fragmento.

Recentemente, Donnelly & Lauritzen [18] criaram a noção de mapas de sombra de variância (VSM – *Variance Shadow Map*), onde cada texel representa, em vez de uma única profundidade, uma distribuição de profundidades no interior de uma região. Esse tipo de mapa pode ser pré-filtrado de forma muito mais rápida que PCF, resultando também em sombras com bordas suavizadas. No entanto, o método produz artefatos de vazamento de luz (*light bleeding*) graves em cenas com grande complexidade em *z* (*depth complexity*).

2.3. Reparametrização e particionamento

No mapeamento de sombras tradicional, grande parte da resolução de um mapa pode ser desperdiçada com partes da cena que são visíveis para a fonte de luz, mas invisíveis à câmera. Partindo dessa observação, Brabec et al. [9] focalizam a área do mapa de sombras ao menor retângulo capaz de envolver completamente o volume de visão da câmera, visto do ponto-de-vista da fonte de luz (ORSM – *Optimal Rectangle Shadow Map*).

Mais recentemente, o trabalho de Stamminger & Drettakis [19] sobre *Perspective Shadow Maps* (PSM) deu grande impulso à pesquisa de diferentes

técnicas de reparametrização: o mapa de sombras é gerado não diretamente no espaço da fonte de luz, mas num espaço qualquer obtido por meio de uma transformação adequada. Essa transformação, que pode ou não envolver uma projeção perspectiva, como na idéia original, visa obter uma parametrização que permita um aproveitamento mais uniforme da resolução do mapa em relação ao ponto de vista da câmera. Seguindo essa linha, Kozlov [3] busca soluções para alguns problemas do PSM original. Wimmer et al. [20] formulam uma transformação semelhante, mas mais estável e robusta, chamada *Light Space Perspective Shadow Map* (LiSPSM), técnica revisitada por Scherzer [21]. Martin & Tan [22,23] propõem o *Trapezoidal Shadow Map* (TSM), uma parametrização obtida a partir de um trapezóide que envolve a projeção bidimensional do volume de visão da câmera. Chong & Gortler derivam transformações capazes de mapear cada texel do mapa para exatamente um pixel da imagem, mas apenas em um plano determinado [24] (POSM – *Plane Optimal Shadow Map*), e posteriormente estudam métricas para um mapeamento ótimo [25]. Lloyd et al. [26] investigam uma parametrização logarítmica (LSM – *Logarithmic Shadow Map*), teoricamente ótima para certa métrica de erro. Zhang et al. [27] buscam uma parametrização perspectiva generalizada, adequando o PSM a qualquer orientação da luz em relação à câmera. Métricas úteis para a análise do serrilhamento foram apresentadas por Chong [28].

Além da reparametrização, outro tipo de técnica utilizada para melhorar a resolução dos mapas de sombras consiste em particionar o espaço, gerando um mapa de resolução adequada a cada região. Arvo [29] divide o volume de visão da luz em uma grade retangular (*grid*) ao longo do plano de projeção, alocando para cada célula uma resolução diferente de acordo com uma determinada métrica (*Tiled Shadow Map*). Fernando et al. [30] propõem o chamado *Adaptive Shadow Map* (ASM), uma estrutura hierárquica de mapas de sombra, possivelmente uma *quad-tree*, com mapas mais refinados em níveis mais profundos. Lefohn et al. [31,32] mostram como implementar ASMs em hardware gráfico programável com sua biblioteca “*Glif*”. Tadamura et al. [33] particionam o volume de visão da câmera ao longo do eixo z. Lloyd et al. propõem o particionamento também de acordo com as faces vistas pelo ponto-de-vista da fonte de luz [34], minimizando problemas de TSMs e LiSPSMs quando a luz incide quase paralelamente à

direção de visualização, e posteriormente analisa matematicamente os benefícios trazidos por cada tipo de divisão e algumas reparametrizações [35].

2.4. Amostragem irregular e outras técnicas

A amostragem irregular do mapa de sombras foi proposta, de forma simultânea e independente, por Aila & Laine [36] e Johnson et al. [37]. Nessa abordagem, não existe uma primeira passada para gerar o mapa de sombras amostrado uniformemente. Cada pixel da imagem final é transformado para o espaço da fonte de luz, cujo pixel correspondente é então amostrado e comparado. Isso elimina completamente o serrilhamento (a menos de um pixel) e o chamuscamento, mas por enquanto se mantém como uma solução de *software*, não podendo ser implementada em tempo real.

Zhang [38] mostrou que o teste de sombra pode ser realizado de forma inversa, verificando-se, para cada texel do mapa, quais pixels da imagem final devem ser comparados.

Considerando técnicas híbridas, McCool [39] reconstrói volumes de sombra a partir de mapas de sombra. Sen et al. [40] armazenam, em cada célula do mapa, as coordenadas de um vértice da silhueta do objeto. Govindaraju et al. [41] utilizam polígonos de sombras para as silhuetas e mapas para o restante da cena.

2.5. Extensões

Muitas pesquisas foram feitas objetivando-se estender as funcionalidades dos mapas de sombras. Em particular, a obtenção de sombras suaves, com regiões de penumbra corretas, foi bastante investigada em [8,42-45] e outros trabalhos. A utilização de mapas de sombras para fontes de luz hemisféricas e onidirecionais foi estudada por Brabec et al. [46], que propõem o mapeamento de um parabolóide duplo usado em técnicas de mapeamento de ambiente (*environment mapping*). Lokovic & Veach [47] introduzem o conceito de *Deep Shadow Maps*, mapas que armazenam, em cada célula, várias amostras de uma função de visibilidade, permitindo a renderização de sombras suaves e sombras de objetos translúcidos e efeitos volumétricos como fumaça e nuvens.