

Renderização Híbrida: Combinando o Melhor de Dois Mundos



**João Pedro Chaves
João Victor Leahy**



Agenda

1. Introdução
2. Conceitos Fundamentais
3. Pipeline de Renderização
4. Técnicas de Renderização
5. Otimizações e Desempenho
6. Conclusão
7. Referências

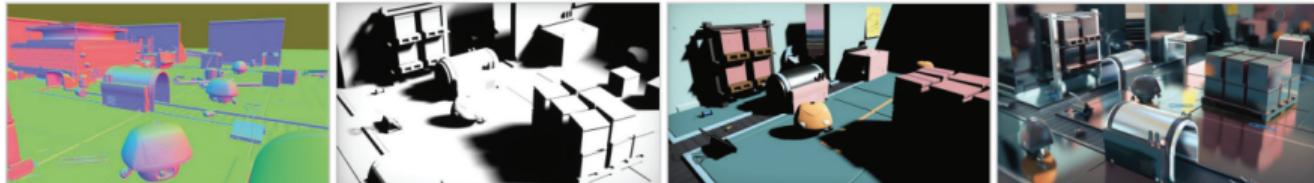
Introdução

- **O que é renderização híbrida?**
 - Combinação de técnicas de rasterização, computação e ray tracing para otimizar a qualidade visual e o desempenho em tempo real.
 - Utiliza as capacidades únicas de cada etapa do pipeline gráfico.
- **Por que usar a renderização híbrida?**
 - Equilibra qualidade de imagem com performance em tempo real, aproximando a qualidade do path tracing offline.
 - Permite modularidade e escalabilidade, adaptando-se às capacidades de hardware do usuário.
 - Aumenta a qualidade visual ao usar ray tracing para efeitos que a rasterização não consegue gerar de forma precisa.
 - Elimina a necessidade de soluções alternativas problemáticas (hacks) e algoritmos propensos a artefatos.

Arquitetura Modular: O Pipeline Híbrido

- O pipeline é dividido em etapas que se conectam, onde a saída de uma etapa serve como entrada para a próxima.
- A interoperabilidade do DirectX permite o compartilhamento de dados intermediários entre as etapas.
- A abordagem é escalável, adaptando as técnicas à capacidade do hardware.
- Cada etapa utiliza a técnica mais apropriada: rasterização, ray tracing ou computação.

Pipeline de Renderização Híbrida



G-Buffer
(Raster)

Direct Shadows
(Ray Trace or Raster)

Direct Lighting
(Compute)

Reflections
(Ray Trace or Compute)



Global Illumination
(Ray Trace and Compute)

Ambient Occlusion
(Ray trace or Compute)

Transparency & Translucency
(Ray Trace and Compute)

Post-Processing
(Compute)

G-Buffer (Raster) → Sombras Diretas (Ray Trace/Raster) → Iluminação Direta (Compute) → Reflexos (Ray Trace/Compute) → Iluminação Global → Oclusão Ambiente → Transparência → Pós-Processamento

Sombras Realistas: Ray Tracing e Filtragem

- Raios são lançados da superfície para a luz para determinar a ocultação.
- O ângulo do cone cria penumbras suaves, com um custo de ruído.
- O ruído é removido com filtragem espacial e temporal (SVGF).
- Sombras transparentes acumulam absorção de luz ao longo do trajeto.

$$\text{SombraFiltrada}(x) = \text{SVGF}(\text{Sombra}(x), \text{Variância}(x))$$

Comparação de Sombras Híbridas

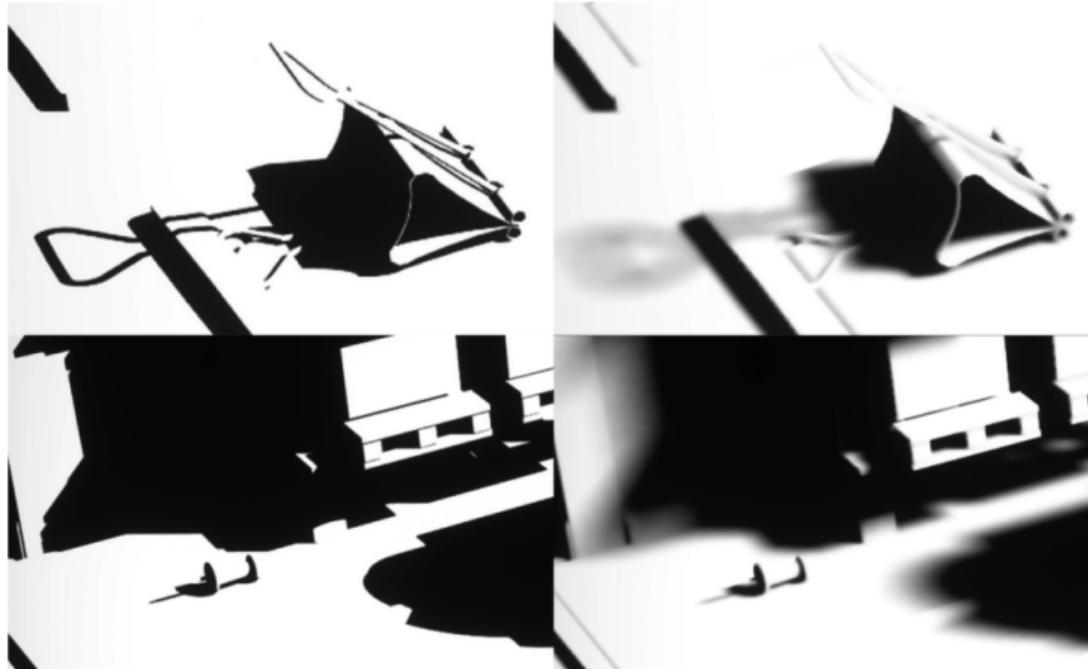


Figure 4: Hybrid ray traced shadows: hard (left) and soft and filtered (right).

Comparação entre sombras duras (esquerda) e sombras suaves filtradas (direita)

Processo de Filtragem de Sombras

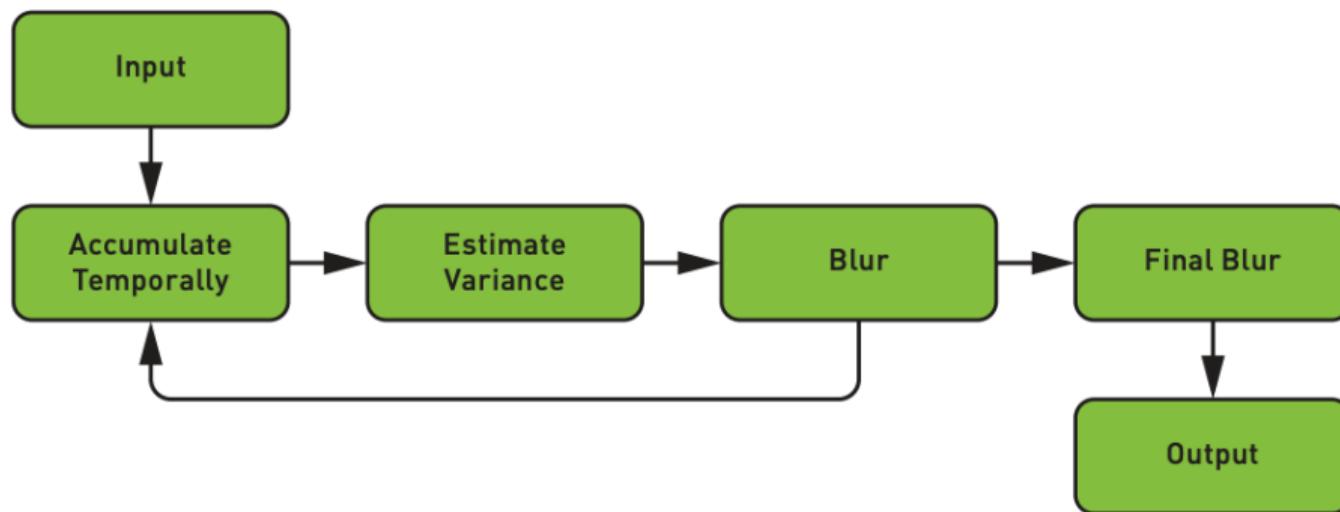


Figure 6: Shadow filtering, inspired by the work of Schied et al. [24].

Pipeline de filtragem de sombras baseado no trabalho de Schied et al. ?

Acumulação de Sombras Transparentes

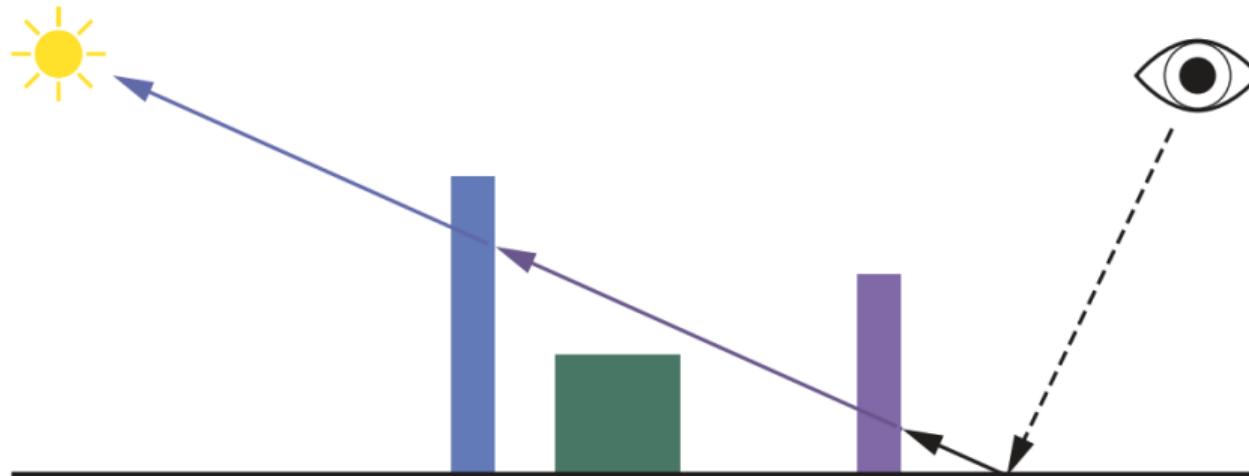


Figure 8: Hybrid ray traced transparent shadow accumulation.

Diagrama mostrando o processo de acumulação de luz em sombras transparentes

Resultado: Sombras Transparentes

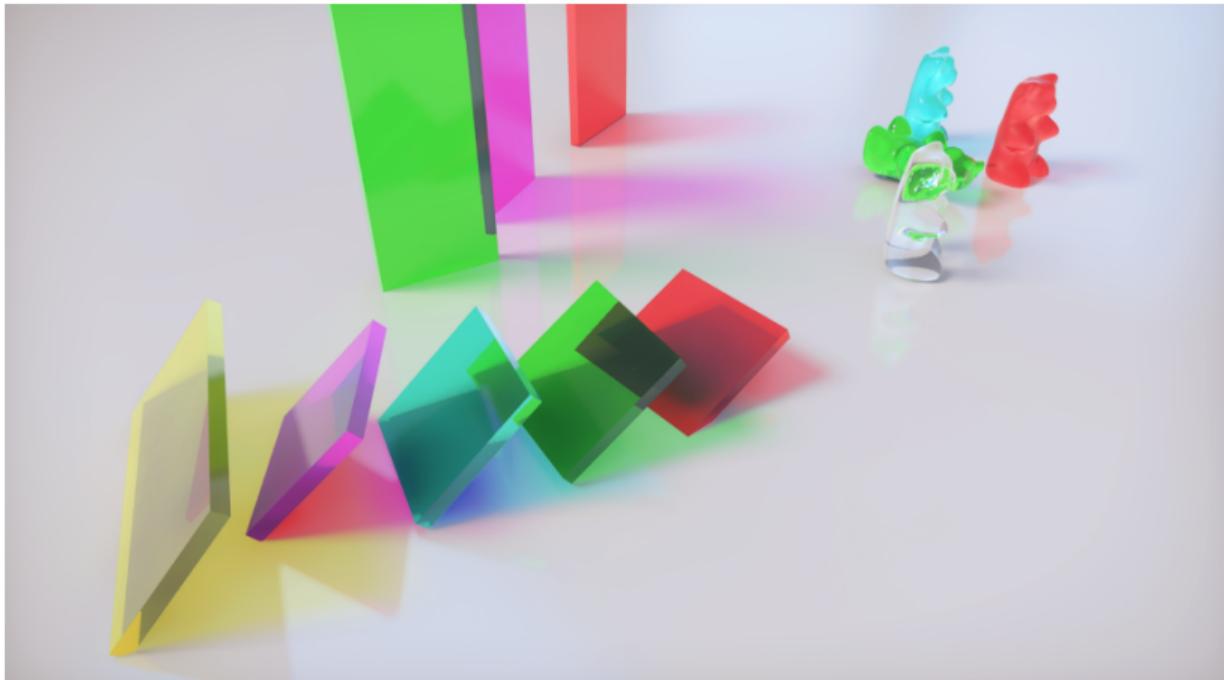


Figure 7: Hybrid ray traced transparent shadows.

Exemplo de sombras transparentes coloridas com ray tracing híbrido

Reflexos Dinâmicos com Ray Tracing

- Ray tracing gera reflexos precisos sem as limitações do SSR.
- A amostragem de importância gera raios refletidos com base no BRDF do material.
- O modelo de material combina múltiplas camadas em um BRDF unificado.

Exemplo de Reflexos com Ray Tracing



Figure 9: Hybrid ray traced reflections.

Reflexos precisos em superfícies metálicas usando ray tracing híbrido

Pipeline de Processamento de Reflexos

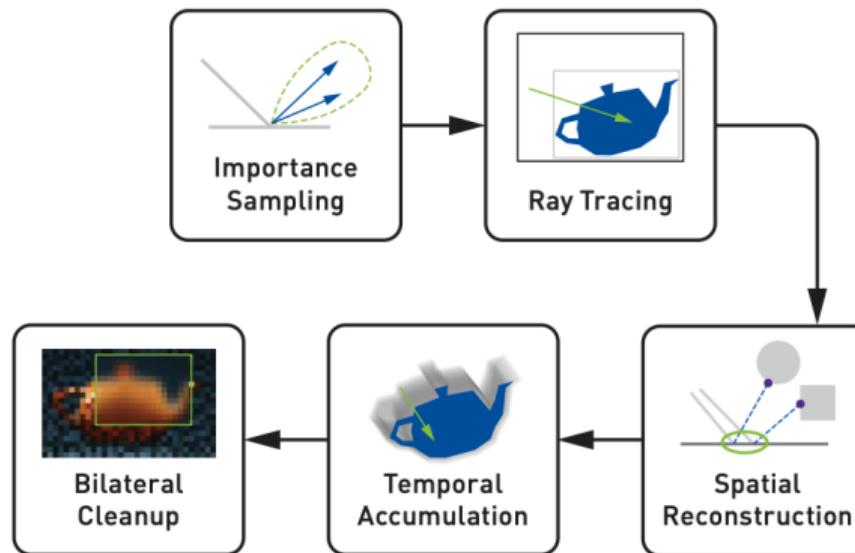


Figure 10: Reflection pipeline.

Pipeline de reflexos: Amostragem de Importância → Ray Tracing → Reconstrução Espacial → Acumulação Temporal → Limpeza Bilateral

Oclusão Ambiente: Aprofundando o Realismo

- A Oclusão Ambiente (AO) simula o sombreamento em áreas de contato.
- Ray tracing é mais preciso que GTAO, especialmente para objetos fora da tela.
- Raios são lançados em um hemisfério, e a oclusão é determinada pela quantidade de raios que atingem um objeto.

$$AO(x) = \frac{1}{N} \sum \text{Visibilidade}(x, \omega_i)$$

Comparação de Técnicas de Oclusão Ambiente

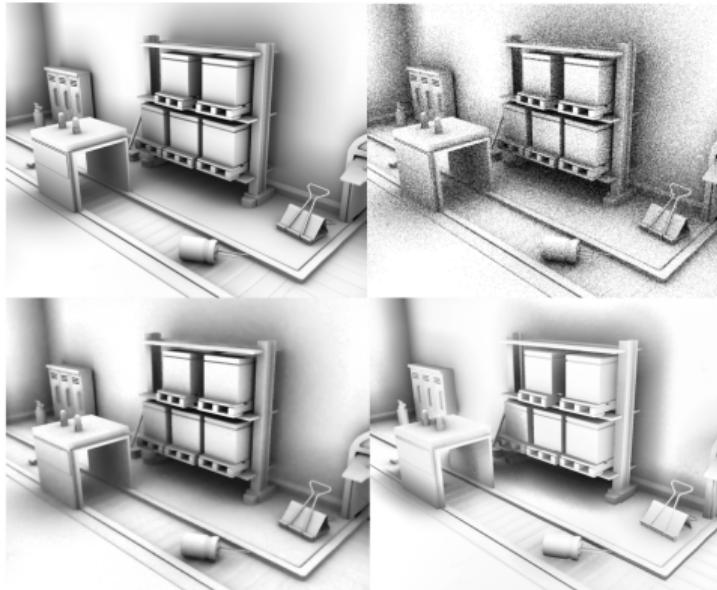


Figure 17: Top left: ray traced AO (1000 spp). Top right: hybrid ray traced AO (1 spp).
Bottom left: filtered hybrid ray traced AO (1 spp). Bottom right: GTAO.

Comparação de técnicas: Ray traced AO (1000 spp), Hybrid ray traced AO (1 spp),
Filtered hybrid ray traced AO (1 spp), e GTAO

Transparência e Translucidez: Efeitos Realistas

- Ray tracing permite transparência sem ordem, e classifica corretamente malhas transparentes.
- Refração suave e áspera são tratadas com múltiplos raios para melhor convergência.
- Translucidez é simulada em espaço de textura, acumulando resultados ao longo do tempo.

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \text{ (Lei de Snell)}$$

Processo de Espalhamento de Luz

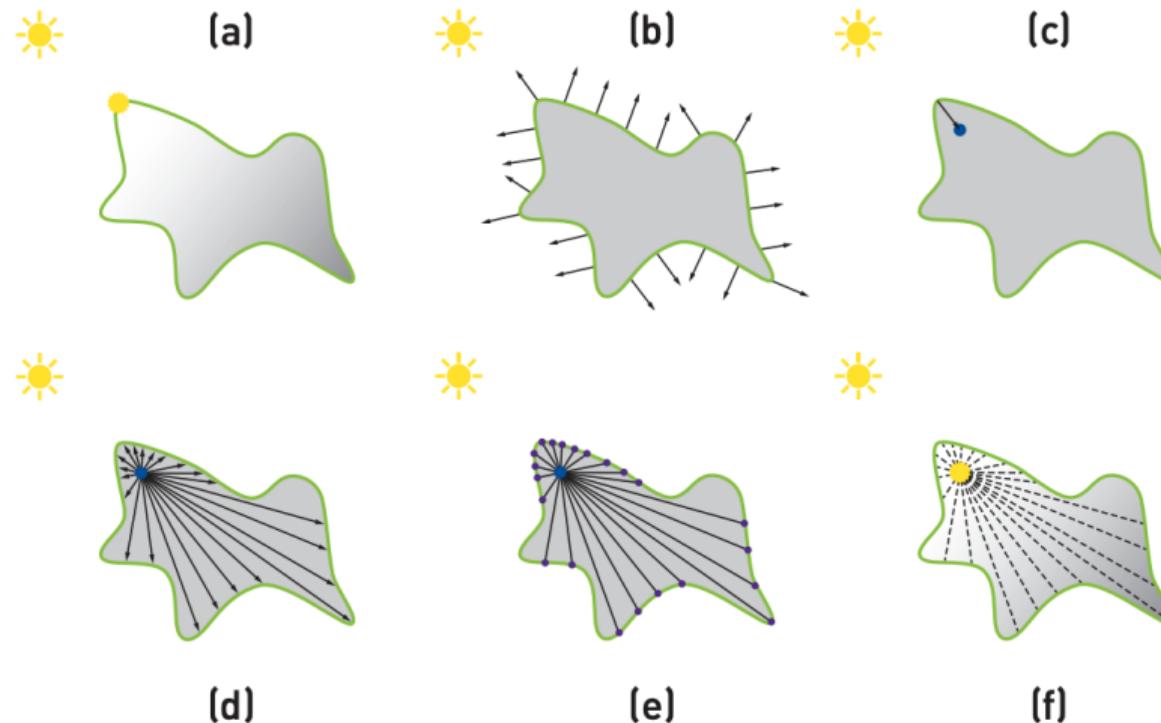


Figure 24: Light scattering process. (See text for details.)

Transparência em Espaço de Objeto vs Textura



Figure 18: Left: object-space ray traced transparency result. Right: texture-space output.

Comparação: Transparência ray traced em espaço de objeto (esquerda) e resultado em espaço de textura (direita)

Transparência com Ray Tracing



Figure 20: Object-space ray traced rough transparency.

Transparência áspera com ray tracing: objeto original, transparência e diagrama de raios

Efeitos de Translucidez



Figure 23: Ray traced translucency.

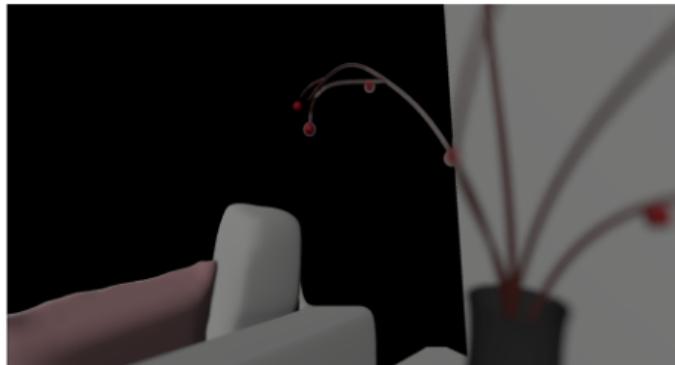
Demonstração de translucidez com ray tracing em diferentes ângulos de visualização

Profundidade de Campo: Combinando Ray Tracing e Pós-Processamento

- O ray tracing resolve o problema de semi-transparência em objetos fora de foco.
- Uma máscara de raios adaptativa concentra o ray tracing onde há maior necessidade.
- A variância temporal da luminância influencia a máscara de raios.

$$x_f = \text{saturate}(x_n + \sigma^2 \cdot 100000) \cdot m$$

Demarcação de Campo Próximo e Distante



(a) Near field



(b) Far field

Figure 2: Demarcation of near and far fields.

Demonstração de (a) campo próximo e (b) campo distante na profundidade de campo

Semi-transparências em Objetos Fora de Foco

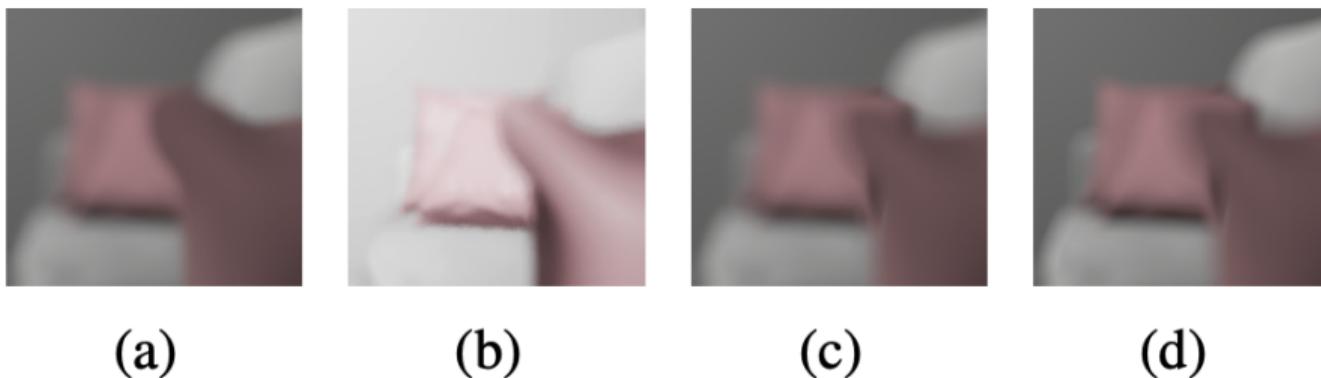


Figure 6: Semi-transparencies of foreground silhouettes.

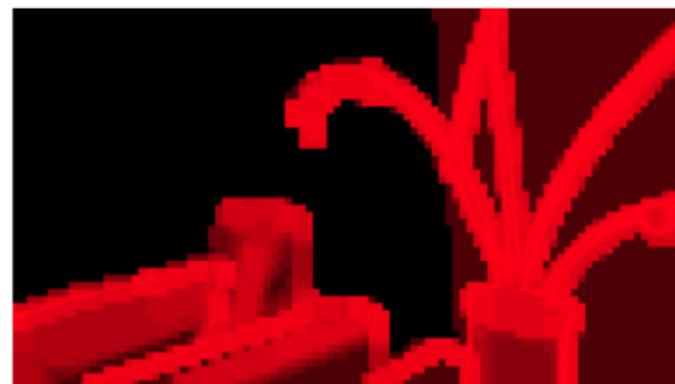
Comparação de técnicas para semi-transparências em silhuetas de objetos em primeiro plano

Máscara de Raios Adaptativa

$$x_f = \text{saturate}(x_n + \sigma^2 \cdot 100000) \cdot m \quad (4)$$



(a) $\sigma^2 \cdot 100000$



(b) x_f

Figure 4: Comparison of variance with no. of rays shot.

Comparação entre (a) variância ($\sigma^2 \cdot 100000$) e (b) máscara de raios final (x_f)

Renderização Híbrida para Cenas Dinâmicas

- Separamos a cena em componentes estáticos e dinâmicos.
- O transporte de luz é: cena estática + diferença causada por objetos dinâmicos.
- A diferença do transporte de luz é esparsa, possibilitando amostragem adaptativa.

$$L = L_s + (L_+ - L_-) \cdot s_i = s_t \cdot \frac{\text{Var}(L_{\Delta,i}) + |L_{\Delta,i}|}{\sum(\text{Var}(L_{\Delta,j}) + |L_{\Delta,j}|)}$$

Interação da Luz com Objetos Dinâmicos

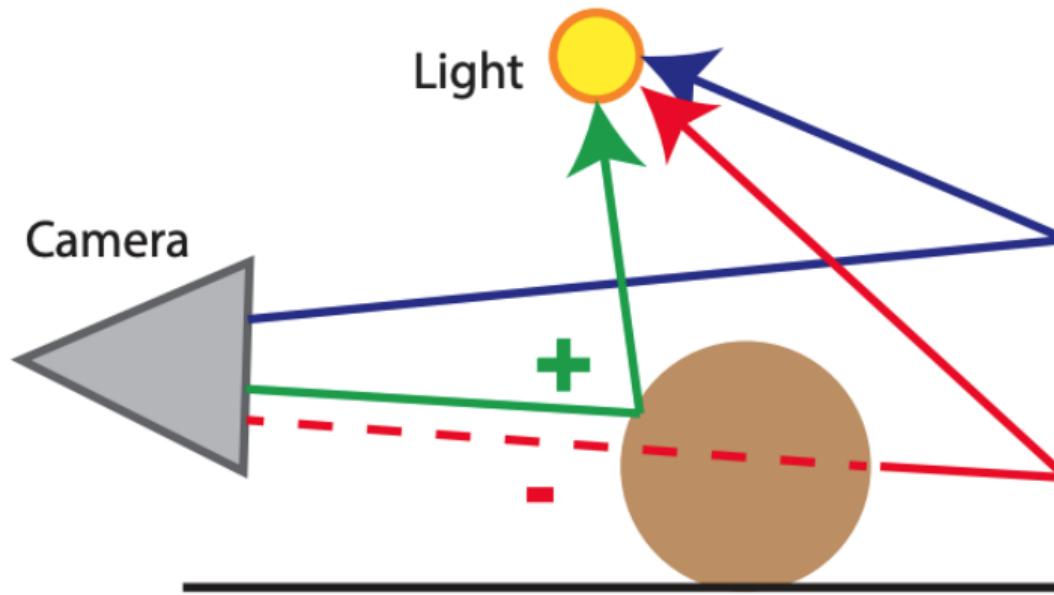


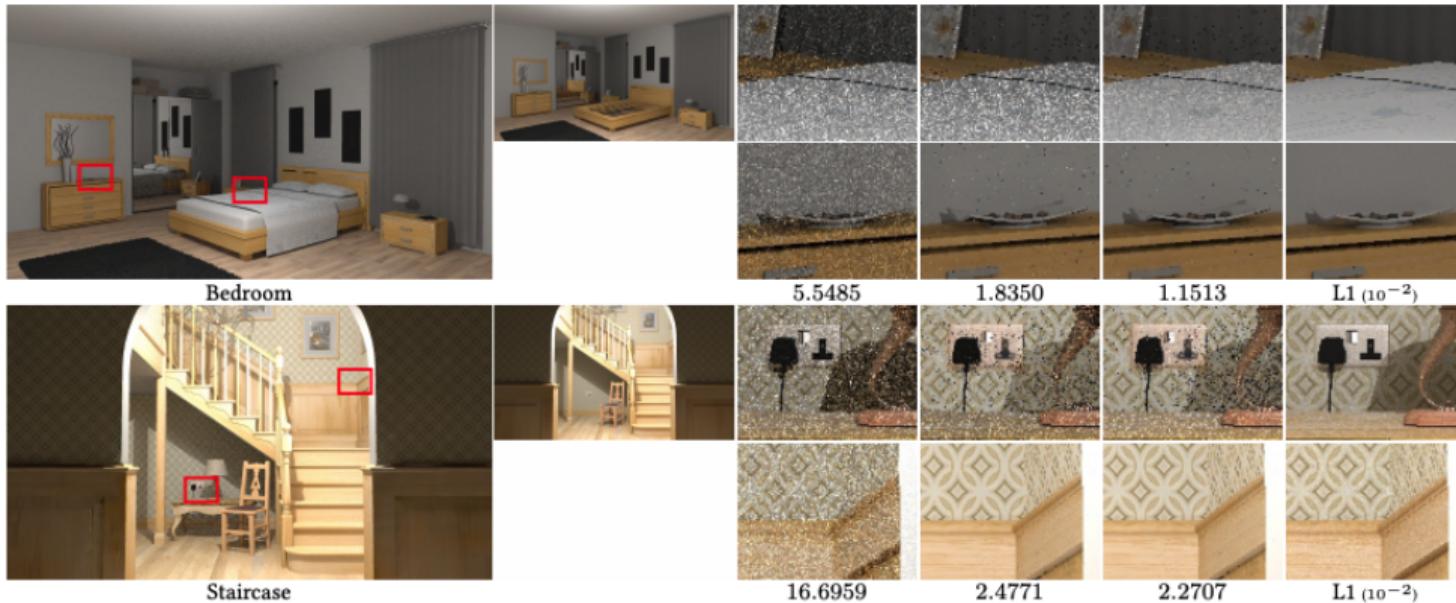
Diagrama mostrando a interação da luz com objetos dinâmicos na cena

Inserção de Objetos Dinâmicos



Processo de inserção de objetos dinâmicos: cena estática + transporte de luz aditivo - transporte de luz subtrativo = resultado final

Comparação com Path Tracing



Comparação de convergência e qualidade visual entre diferentes técnicas de renderização

Illuminação Global: Surfels para Resultados Dinâmicos

- Surfels calculam iluminação indireta difusa sem pré-computação.
- Surfels são alocados dinamicamente, baseados em cobertura e área dos pixels.
- A irradiância é calculada por path tracing e acumulação temporal.

$$x_{n+1} = \text{lerp}(x_n, x_{n+1}, k)$$

Interreflexão Difusa Baseada em Surfels

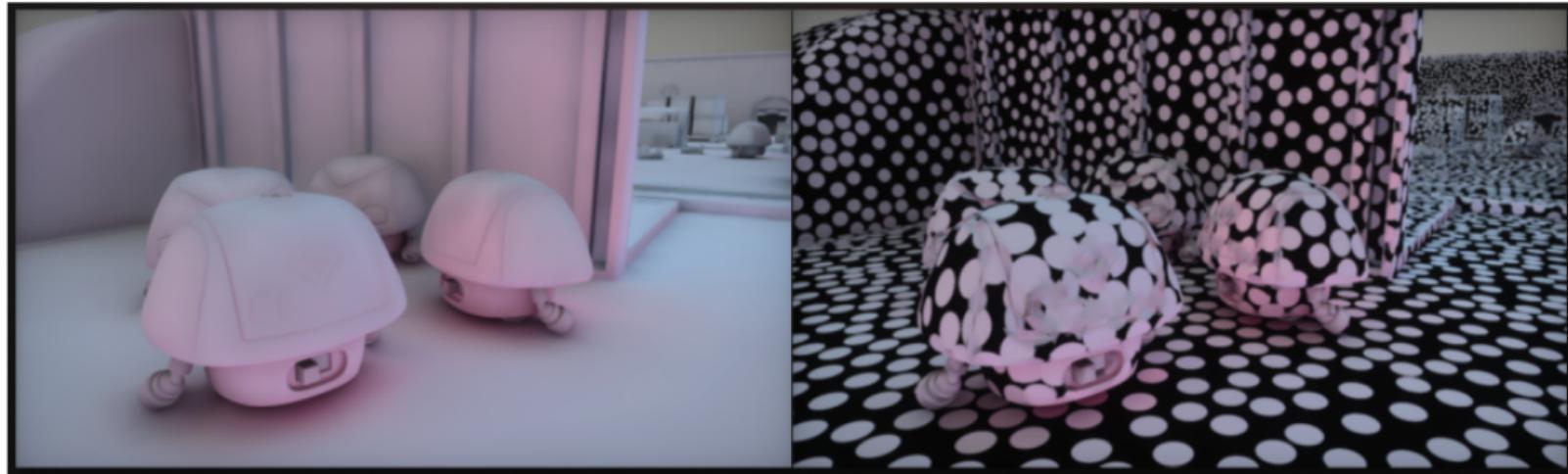


Figure 26: Surfel-based diffuse interreflection.

Demonstração de interreflexão difusa usando surfels: iluminação direta (esquerda) vs. iluminação global com surfels (direita)

Comparação de Técnicas de Iluminação Global

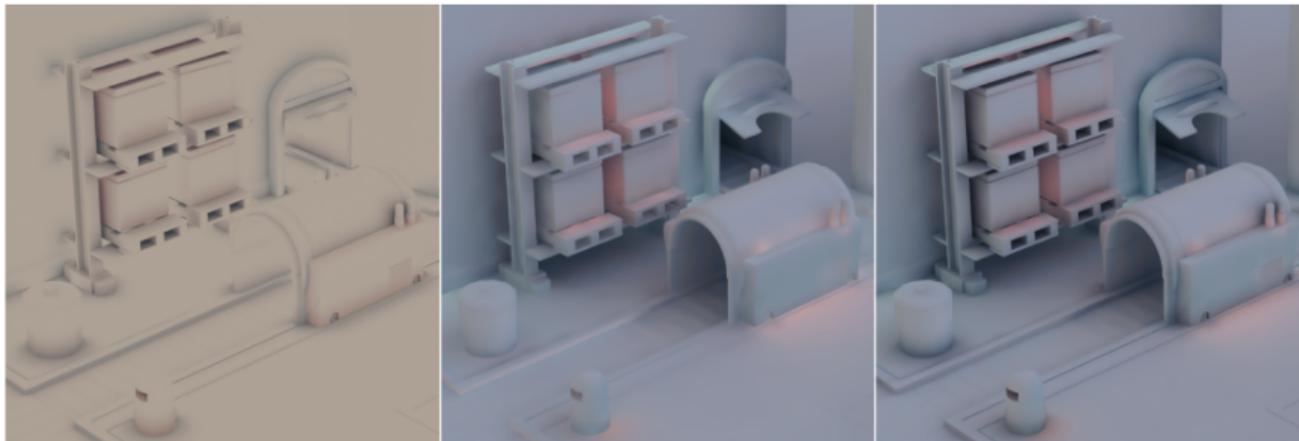


Figure 29: Left: colored GTAO. Center: surfel GI. Right: surfel GI with colored GTAO.

Comparação: GTAO colorido (esquerda), iluminação global com surfels (centro), e combinação de surfels com GTAO colorido (direita)

Desempenho e Qualidade Visual

- A renderização híbrida aumenta o desempenho com melhor qualidade visual.
- A qualidade visual se aproxima do ray tracing, com menor custo computacional.
- Atinge qualidade de path tracing offline em tempo real com alocação inteligente de raios.
- **Destaque:** A renderização híbrida pode ter um desempenho até 6x superior ao path tracing tradicional.

Métricas de Desempenho

| | Volta (ms) | | | Turing (ms) | | | x-faster |
|------------------|------------|-------|-------|-------------|------|------|----------|
| Shadows | | | | | | | |
| 1 SPP | 1.48 | | | 0.44 | | | 3.3x |
| 2 SPP | 2.98 | | | 0.77 | | | 3.9x |
| 4 SPP | 5.89 | | | 1.31 | | | 4.5x |
| 8 SPP | 11.53 | | | 2.33 | | | 4.9x |
| 16 SPP | 23.54 | | | 4.65 | | | 5.0x |
| A0 | | | | | | | |
| | 0.5m | 2.0m | 20m | 0.5m | 2.0m | 20m | |
| 1 SPP | 1.67 | 2.18 | 2.50 | 0.54 | 0.62 | 0.62 | 3.0-3.6x |
| 2 SPP | 3.41 | 4.48 | 5.08 | 0.88 | 1.01 | 1.01 | 3.8-4.4x |
| 4 SPP | 6.71 | 8.81 | 10.03 | 1.48 | 1.64 | 1.64 | 4.5-5.3x |
| 8 SPP | 13.27 | 17.44 | 19.85 | 2.55 | 3.02 | 3.02 | 5.2-5.7x |
| 16 SPP | 26.56 | 34.90 | 39.96 | 4.90 | 5.82 | 5.82 | 5.4-6.0x |
| Reflections | 2.97 | | | 1.45 | | | 2.0x |
| Trans. & Transp. | 0.47 | | | 0.25 | | | 1.9x |
| GI | 1.70 | | | 0.35 | | | 4.8x |

Comparação de desempenho entre GPUs Volta e Turing para diferentes técnicas.

Aplicações

- **Jogos:**

- Melhora a qualidade visual de sombras, reflexos, oclusão ambiente e outros efeitos.
- Permite o uso de ray tracing para efeitos de transparência e translucidez.
- Possibilita a renderização de iluminação global indireta em cenas dinâmicas.
- Aumenta a precisão de efeitos como profundidade de campo (DoF) com semitransparências mais realistas.

- **Outras aplicações:**

- Visualização arquitetônica, design de produtos, realidade virtual e aumentada.
- Renderização de cenas dinâmicas com objetos e iluminação em mudança.

Conclusão: O Futuro da Renderização Híbrida

- A renderização híbrida oferece qualidade visual aprimorada e desempenho otimizado.
- Há grande potencial para futuras aplicações e melhorias.
- A renderização híbrida é o futuro da renderização em tempo real.

Referências

- Colin Barré-Brisebois et al. «Hybrid Rendering for Real-Time Ray Tracing». Em: *Ray Tracing Gems*. Ed. por Eric Haines e Tomas Akenine-Möller. Apress, 2019. Cap. 25, pp. 465–492. URL: <https://raytracinggems.com>
- Yu Wei Tan et al. «Hybrid DoF: Ray-Traced and Post-Processed Hybrid Depth of Field Effect for Real-Time Rendering». Em: *ACM SIGGRAPH 2020 Posters*. SIGGRAPH '20. ACM, 2020
- Alexandr Kuznetsov et al. «Hybrid Rendering for Dynamic Scenes». Em: (2024). arXiv: 2406.07906 [cs.GR]