

Optymalizacja ścieżek reprezentacji przestrzeni na potrzebę obsługi efektów lokalnych w symulacji transportu światła

Julia Jodczyk

Instytut Informatyki
dr inż. Łukasz Dąbała

6 listopada 2024

Plan prezentacji

- 1 Śledzenie promieni
- 2 Równanie renderingu
- 3 Path guiding
- 4 GMM
- 5 GMM w path guidingu
- 6 Efekty ogniskowe
- 7 Plan pracy

Fotorealiztyczny rendering

- Rendering to proces generacji obrazu z modelu za pomocą programu komputerowego.
- Celem fotorealistycznego renderingu jest stworzenie obrazu, który jest nie do odróżnienia od zdjęcia.

Śledzenie promieni *ang. Ray tracing*

- Aby generować realistyczne obrazy, potrzebna jest jak najlepsza symulacja fizyki światła i jego interakcji z materią.
- Wykorzystuje się do niej model światła w postaci cząsteczki poruszające się po promieniach.
- Algorytm śledzenia promieni opiera się na podążaniu ścieżką promienia światła przez scenę.

Algorytm

- 1 Z kamery w kierunku piksela prowadzony jest promień.
- 2 Wyszukiwany jest najbliższy punkt przecięcia z obiektami w scenie.
- 3 Z tego punktu promienie prowadzone są do każdego źródła światła, w celu wyznaczenia jasność w tym punkcie.
- 4 Jeśli punkt przecięcia należy do obiektu odbijającego światło lub przeźroczystego to wysyłane są promienie wtórne.

Śledzenie ścieżek (*ang. Path tracing*)

- Bardziej zaawansowana forma śledzenia promieni.
- Przy każdym uderzeniu promienia w powierzchnię jest on probabilistycznie rozpraszany w losowym kierunku.
- Pozwala to na symulację złożonych interakcji światła, takich jak oświetlenie pośrednie, miękkie cienie i kaustyki.

Radiancja

- Światło, które dociera do kamery z danego punktu, jest sumą światła emitowanego przez obiekt i światła przez niego odbitego.
- Ta idea sformalizowana jest przez równanie renderingu, które mierzy światło w odniesieniu do radiancji.
- Radiancja jest jednostką radiometryczną wyrażającą strumień promieniowania na jednostkę powierzchni z kąta bryłowego.
- Mówi nam, ile światła dociera do naszego oka (lub kamery) z danego miejsca i kierunku, określając, jak jasne i szczegółowe wydają się rzeczy.
- Radiancja pozostaje stała wzdłuż promienia światła.

Równanie renderingu

$$L_o(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + L_r(x, \omega_o)$$

gdzie

- L_e to światło emitowane przez obiekt,
- L_r to światło odbite.

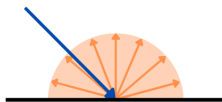
BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*)

- Funkcja opisująca, jak powierzchnia obiektu odbija światło.
- Zależy od kierunku, z którego pada światło oraz kierunku, w którym światło jest odbijane.

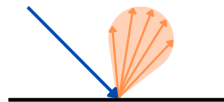
$$f_r(x, \omega_i \rightarrow \omega_o)$$



lustrzane



matowe



błyszczące

Światło odbite

$$L_r(x, \omega_o) = \int_{\Omega} f_r(x, \omega_i \rightarrow \omega_o) L_i(x, \omega_i) \cos \delta d\omega$$

gdzie

- Ω to półkula wszystkich kierunków przychodzących do punktu,
- $L_i(x, \omega_i)$ to światło przychodzące z kierunku ω_i ,
- $\cos \delta$ to tłumienie światła

Monte Carlo

- Równanie renderingu wymaga uwzględnienia nieskończonej liczby możliwych interakcji światła z powierzchniami sceny.
- Rozwiązanie tego równania nie jest możliwe, z wyjątkiem najprostrzych scen.
- W praktyce przybliża się je przy pomocy Monte Carlo.

Monte Carlo

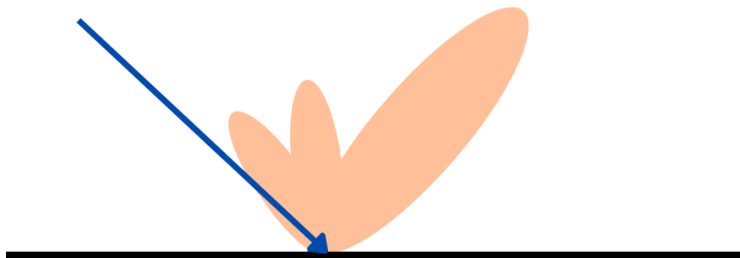
$$L_o(x, \omega_o) \approx L_e(x, \omega_o) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f_r(x, \omega_i, \omega_o) L_i(x, \omega_i) \cos \delta}{p(\omega_i)}$$

gdzie

- N to liczba próbek,
- $p(\omega_i)$ to funkcja gęstości prawdopodobieństwa (PDF, *ang. Probability Density Function*) wybrania kierunku ω_i
- ułamek $\frac{f_r(x, \omega_i, \omega_o) L_i(x, \omega_i) \cos \delta}{p(\omega_i)}$ waży każdą próbkę w oparciu o jej udział w radiancji.

Path guiding

- Estymacja MC zbiega do pożądanej całki wraz ze wzrostem próbek.
- Szybkość zbieżności można znacznie poprawić poprzez umiejętny dobór PDF.
- Path guiding optymalizuje path tracing poprzez inteligentne kierowanie ścieżek promieni w stronę obszarów sceny, gdzie mają one większe szanse na istotne interakcje świetlne.
- Podczas renderowania system uczy się, które obszary sceny emitują lub odbijają więcej światła poprzez analizowanie wcześniej obliczonych próbek.



Rysunek: Przykładowy rozkład PDF

Mieszana rozkładów Gaussa

- Jednym ze sposobów uczenia się rozkładu światła przez system jest wykorzystanie mieszaniny rozkładów Gaussa.
- Jest to model probabilistyczny, w którym rozkład danych reprezentuje się za pomocą wielu rozkładów Gaussowskich.
- Funkcja gęstości prawdopodobieństwa jest zdefiniowana jako:

$$p(x) = \sum_{k=1}^K \pi_k \mathcal{N}(x \mid \mu_k, \Sigma_k)$$

gdzie

- K to liczba rozkładów,
- π_k to waga rozkładu,
- $\mathcal{N}(x \mid \mu_k, \Sigma_k)$ to rozkład Gaussa o średniej μ_k i odchyleniu standardowym Σ_k

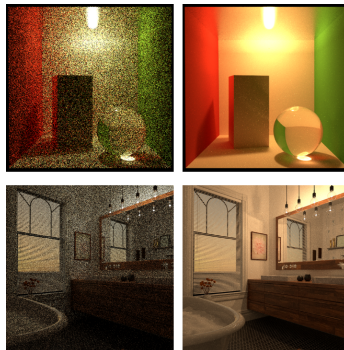
Algorytm EM

- Parametry mieszaniny są szacowane przy użyciu algorytmu EM (*ang. Expectation-Maximization*).
- Algorytm składa się z dwóch kroków wykonywanych naprzemiennie aż do uzyskania zbieżności.
 - Krok E: Obliczenie prawdopodobieństwa, że każdy punkt danych należy do każdego z rozkładów Gaussa biorąc pod uwagę bieżące oszacowania parametrów.
 - Krok M: Aktualizacja parametrów w celu maksymalizowania prawdopodobieństwa zaobserwowanych danych przy użyciu prawdopodobieństw z kroku E.

Zastosowanie w path guidingu

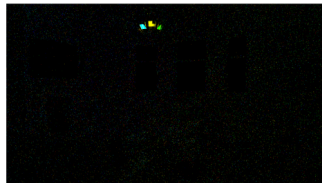
- Z każdą iteracją renderingu, mieszanina dostosowuje się do nowych ścieżek światła i obserwowanych kierunków, stale udoskonalając swój model.
- Dzięki temu można obniżyć liczbę próbek i skrócić czas potrzebny do uzyskania niezaszumionego obrazu.

Przykład zastosowania



Rysunek: Porównanie standardowego śledzenia ścieżek (po lewej) i path guidingu z wykorzystaniem mieszanin rozkładów (po prawej).¹

¹Ruppert, Herholz, and Lensch, “Robust fitting of parallax-aware mixtures for path guiding”.



Rysunek: Obraz referencyjny (po lewej) i wyniki zastosowania path guidingu z wykorzystaniem mieszanin rozkładów (po prawej).²

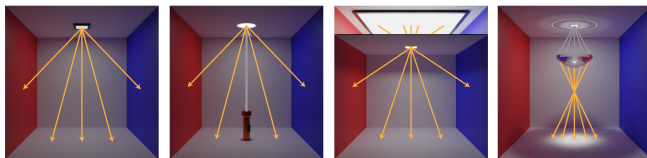
²Rath, Yazici, and Slusallek, "Focal Path Guiding for Light Transport Simulation".

Efekty ogniskowe

- Ogniska powstają, gdy wiele ścieżek światła z różnych kierunków zbiega się w małym obszarze.
- Ogniskami mogą być:
 - bezpośrednie i pośrednie źródła światła (takie jak kaustyki i plamy),
 - wąskie szczeliny,
 - ogniska pozorne.

Trudności w renderowaniu scen z ogniskami

- Niektóre ogniska mogą pojawiać się wolnej przestrzeni, a nie na powierzchni.
- Niektóre typy ognisk na powierzchni są trudne do próbkowania (okluzyjne ogniska i ogniska pozorne).



Rysunek: Rodzaje ognisk³

³Rath, Yazici, and Slusallek, "Focal Path Guiding for Light Transport Simulation".

Przestrzenna funkcja gęstości próbkowania

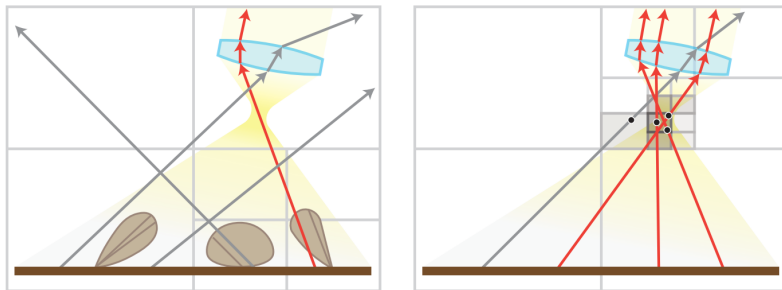
Rath i in.⁴ zaproponowali nowatorską metodę path guidingu przeznaczoną do obsługi efektów ogniskowych.

- Alternatywa do bezpośredniego uczenia się kierunkowego rozkładu lokalnego.
- Uczenie się globalnego rozkładu ognisk w przestrzeni.
- Próbkowanie punktów i wyliczanie z nich następnego kierunku ścieżki:

$$w_o = \frac{y - x}{||y - x||}$$

⁴Rath, Yazici, and Slusallek, “Focal Path Guiding for Light Transport Simulation”.

Rozkład kierunkowy a przestrzenny



Rysunek: Porównanie rozkładu kierunkowego i przestrzennego⁵

⁵Rath, Yazici, and Slusallek, "Focal Path Guiding for Light Transport Simulation".

Jak znaleźć punkty ogniskowe w przestrzeni

- Ogniska to takie punkty, w których przecina się wiele ścieżek.
- Przecięcie ścieżek to przecięcie prostych, na których leżą (nawet jeśli takie przecięcie znajduje się przed początkiem promienia lub za przecięciem z powierzchnią).
- Jeśli dla każdego punktu w scenie zliczymy wkład wszystkich ścieżek, które przez niego przechodzą, to otrzymamy funkcję, która będzie osiągała maksima w ogniskach.

Funkcja wkładu punktu

$$\mathcal{F}(p) = \frac{1}{n_{px}} \sum_{px} \int_{\mathcal{P}_p} f_{px}(x) dx$$

gdzie

- n_{px} to liczba pikseli
- \mathcal{P}_p to zbiór wszystkich ścieżek przechodzących przez punkt p
- $f_{px}(x)$ to funkcja wpływu ścieżki na wartość piksela.

Implementacja

- Reprezentacja funkcji wkładu punktu jako adaptacyjne drzewo ósemkowe.
- Przy każdej ścieżce zliczanie jej wkładu w każdy liść drzewa.
- Dzielenie i scalanie węzłów drzewa w zależności od wartości funkcji.

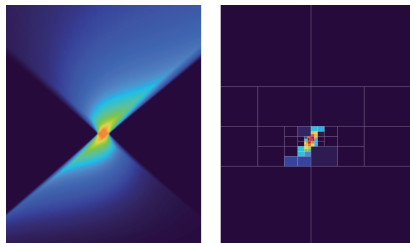
Wyniki



Rysunek: Porównanie path guidingu wykorzystującego rozkład kierunkowy (po lewej) i rozkład przestrzenny (po prawej)⁶

Perspektywa poprawy

- Jako że funkcja wkładu punktu jest ciągła, można spróbować oszacować ją za pomocą mieszaniny rozkładów Gaussa.
- Potencjalnie może to poprawić obsługę efektów ogniskowych oraz zmniejszyć ilość potrzebnych próbek.



Rysunek: Ciągła i dyskretna reprezentacja funkcji wkładu punktu⁷

⁷Rath, Yazici, and Slusallek, “Focal Path Guiding for Light Transport Simulation”.

Plan pracy

- Stworzenie mieszaniny rozkładów Gaussa, która będzie szacować funkcję wkładu punktów.
- Zbieranie danych do dopasowania mieszaniny podczas każdej iteracji renderingu.
- Używanie dopasowanej do funkcji wkładu mieszaniny do prowadzenia kolejnych ścieżek w stronę ognisk.

Bibliografia I



Kajiya, James T. “The rendering equation”. In: *Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '86. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1986, 143–150. DOI: 10.1145/15922.15902. URL: <https://doi.org/10.1145/15922.15902>.



Pharr, M., W. Jakob, and G. Humphreys. *Physically based rendering: From theory to implementation: Third edition*. Nov. 2016, pages 1–1233.

Bibliografia II



- Rath, Alexander, Ömercan Yazici, and Philipp Slusallek. "Focal Path Guiding for Light Transport Simulation". In: *ACM SIGGRAPH 2023 Conference Proceedings*. SIGGRAPH '23. Los Angeles, CA, USA: Association for Computing Machinery, 2023. DOI: 10.1145/3588432.3591543. URL: <https://doi.org/10.1145/3588432.3591543>.
- Ruppert, Lukas, Sebastian Herholz, and Hendrik P. A. Lensch. "Robust fitting of parallax-aware mixtures for path guiding". In: *ACM Trans. Graph.* 39.4 (Aug. 2020). DOI: 10.1145/3386569.3392421. URL: <https://doi.org/10.1145/3386569.3392421>.