

# Optymalizacja ścieżek i 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
- 8 Bibliografia

# 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*

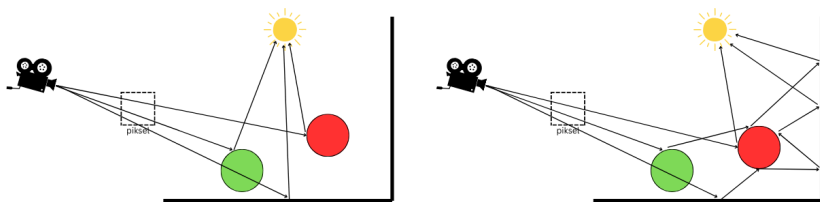
- Aby generować realistyczne obrazy, potrzebna jest jak najlepsza symulacja fizyki światła i jego interakcji z materią.
- Wykorzystuje się do niej model światła w postaci cząsteczki poruszającej się po promieniach.
- Algorytm śledzenia promieni opiera się na podążaniu ścieżką promienia światła przez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



Rysunek: Porównanie śledzenia promieni (na lewo) i śledzenia ścieżek (na prawo)

# 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.

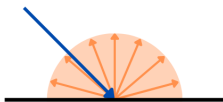
# BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*)

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

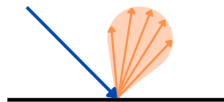
$$f_r(x, \omega_i \rightarrow \omega_o)$$



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

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

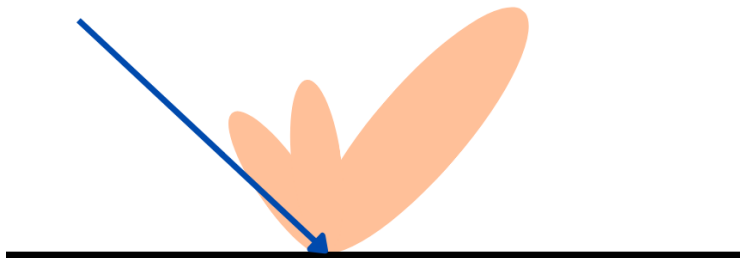
$$L_o(x, \omega_o) \approx L_e(x, \omega_o) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f_r(x, \omega_i, \omega_o) L_i(x, \omega_i) \cos \delta}{p(\omega_i)}$$

gdzie

- N to liczba próbek,
- $p(\omega_i)$  to funkcja gęstości prawdopodobieństwa (PDF, *ang. Probability Density Function*) wybrania kierunku  $\omega_i$
- 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

# Mieszanka rozkładów Gaussa

- Jednym ze sposobów uczenia się rozkładu światła przez system jest wykorzystanie mieszanki 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,
- $\pi_k$  to waga rozkładu,
- $\mathcal{N}(x \mid \mu_k, \Sigma_k)$  to rozkład Gaussa o średniej  $\mu_k$  i odchyleniu standardowym  $\Sigma_k$
- Do znalezienia parametrów rozkładów służy algorytm EM (Expectation-Maximization).



# Krok Oczekiwania

Dla każdego punktu  $x$  liczone jest prawdopodobieństwo przynależności do poszczególnych komponentów rozkładu Gaussa, bazując na bieżących wartościach parametrów.

$$\gamma_{ik} = P(z_i = k \mid x_i, \theta) = \frac{\pi_k \mathcal{N}(x_i \mid \mu_k, \Sigma_k)}{\sum_j \pi_j \mathcal{N}(x_i \mid \mu_j, \Sigma_j)}$$

gdzie  $\gamma_{ik}$  to prawdopodobieństwo przynależności punktu  $x_i$  do komponentu  $k$ .

# Krok maksymalizacji

Aktualizacja parametrów mieszanki  $(\pi_k, \mu_k, \Sigma_k)$  tak, aby zmaksymalizować prawdopodobieństwo danych. Wyznaczone są nowe wartości parametrów, bazując na obliczonych w kroku E prawdopodobieństwach:

$$\pi_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma_{ik}$$

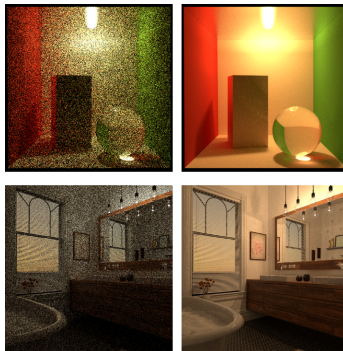
$$\mu_k = \frac{\sum_{i=1}^N \gamma_{ik} x_i}{\sum_{i=1}^N \gamma_{ik}}$$

$$\Sigma_k = \frac{\sum_{i=1}^N \gamma_{ik} (x_i - \mu_k)(x_i - \mu_k)^\top}{\sum_{i=1}^N \gamma_{ik}}$$

# Zastosowanie w path guidingu

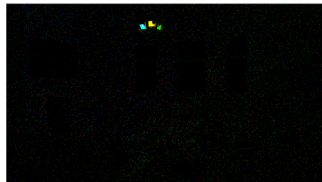
- GMM pozwala aproksymować rozkład światła w scenie.
- Modele GMM uczą się na podstawie wcześniejszych próbek, gdzie w przestrzeni kierunków występuje większe prawdopodobieństwo wystąpienia istotnego oświetlenia.
- Na podstawie oszacowanego rozkładu mieszaniny Gaussa, promienie są kierowane w sposób, który zwiększa szansę ich trafienia w obszary o wysokiej intensywności oświetlenia.

# Przykład zastosowania



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

<sup>1</sup>Ruppert, 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).<sup>2</sup>

---

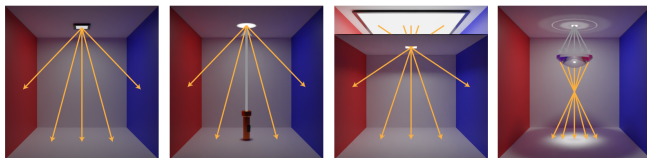
<sup>2</sup>Rath, Yazici, and Slusallek, "Focal Path Guiding for Light Transport Simulation".

# 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 ognisk<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Rath, Yazici, and Slusallek, "Focal Path Guiding for Light Transport Simulation".

# Przestrzenna funkcja gęstości próbkowania

Rath i in.<sup>4</sup> 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:

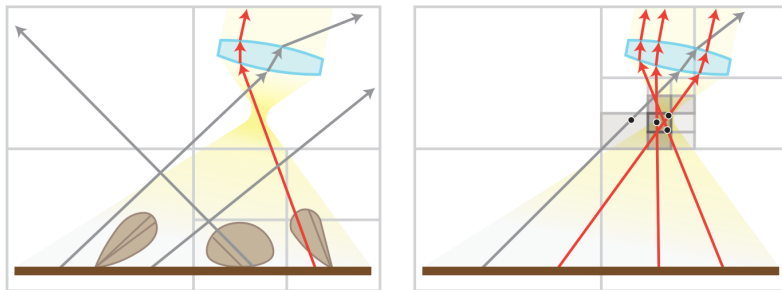
$$w_o = \frac{y - x}{||y - x||}$$

---

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



# Rozkład kierunkowy a przestrzenny



Rysunek: Porównanie rozkładu kierunkowego i przestrzennego<sup>5</sup>

<sup>5</sup>Rath, 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

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

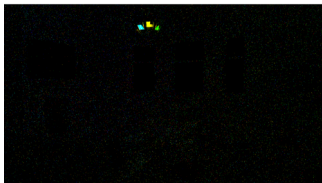
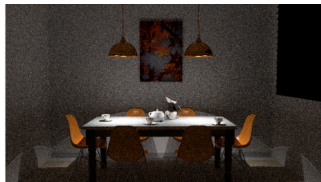
gdzie

- $n_{px}$  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

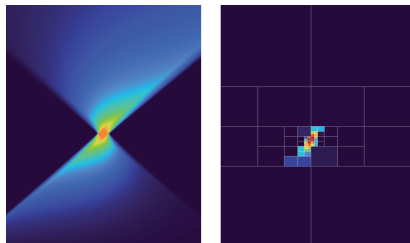


Rysunek: Porównanie path guidingu wykorzystującego rozkład kierunkowy (po lewej) i rozkład przestrzenny (po prawej)<sup>6</sup>

<sup>6</sup>Rath, Yazici, and Slusallek, "Focal Path Guiding for Light Transport Simulation".

# 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 punktu<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup>Rath, 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>.