Wprowadzenie do grafiki maszynowej. Wprowadzenie do metody śledzenia promieni

Aleksander Denisiuk
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski
Olsztyn, ul. Słoneczna 54
denisjuk@matman.uwm.edu.pl

Wprowadzenie do metody śledzenia promieni

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane

Najnowsza wersja tego dokumentu dostępna jest pod adresem

http://wmii.uwm.edu.pl/~denisjuk/uwm

Podstawy
❖ Scena fotorealistyczna
❖ Ray tracing
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane

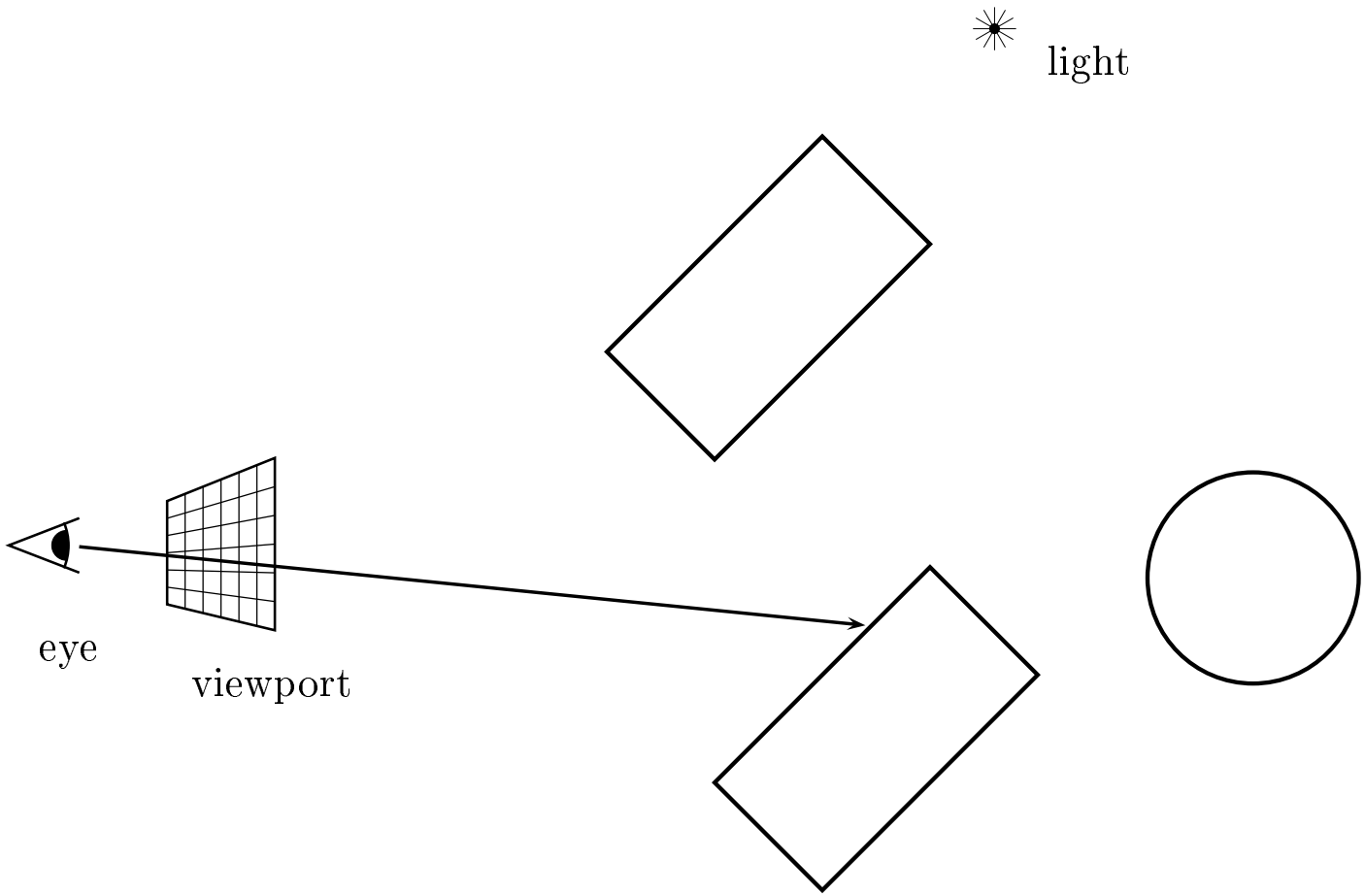
Podstawy

Scena fotorealistyczna

Podstawy
❖ Scena fotorealistyczna
❖ Ray tracing
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane

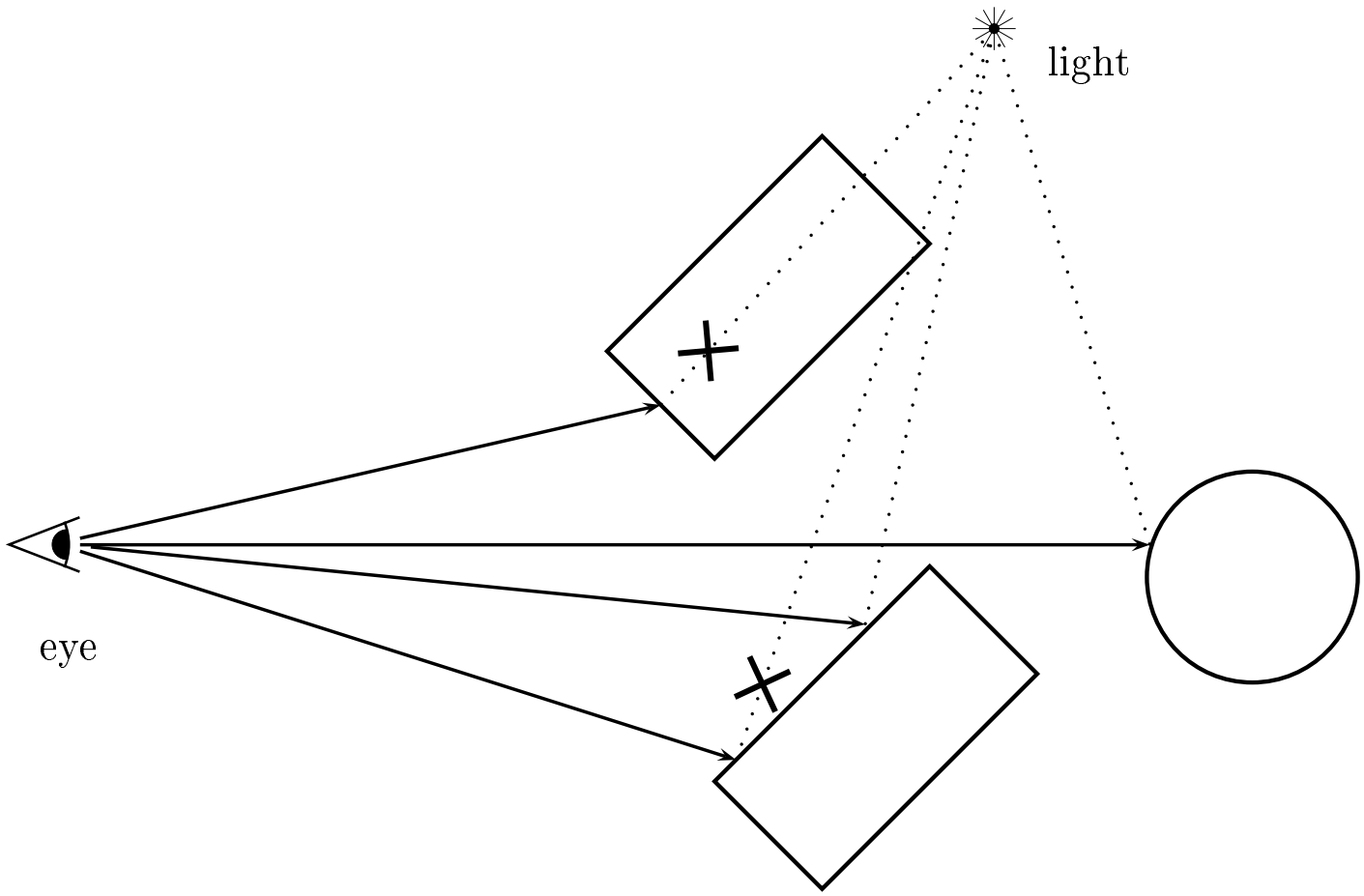
Śledzenie promieni

Podstawy
❖ Scena fotorealistyczna
❖ Ray tracing
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane



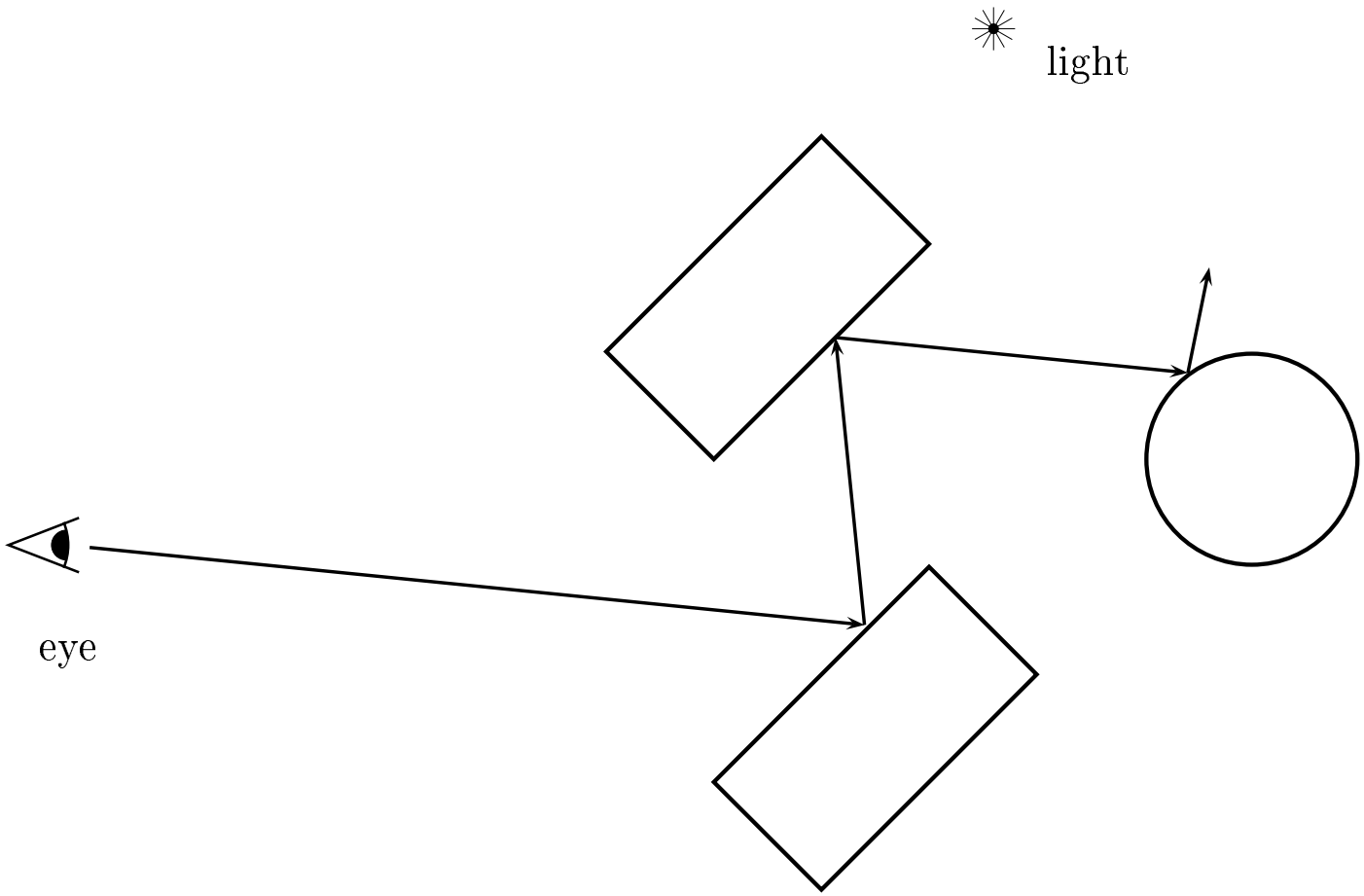
Czujnik cienia (shadow feeler)

Podstawy
❖ Scena fotorealistyczna
❖ Ray tracing
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane



Śledzenie promieni odbijanych

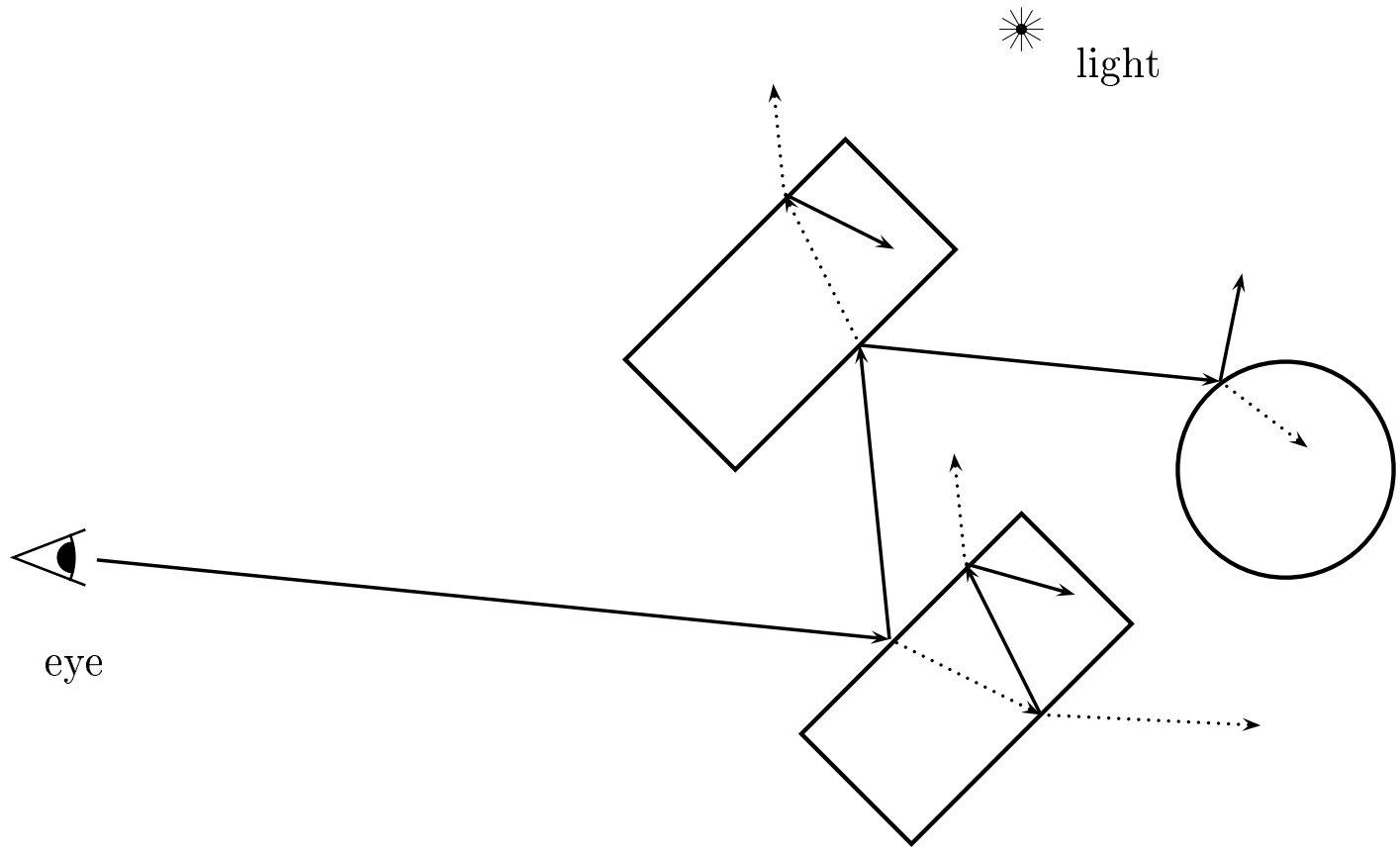
Podstawy
❖ Scena fotorealistyczna
❖ Ray tracing
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane



$$I = I_{\text{local}} + \rho_{\text{rg}} I_{\text{reflect}}$$

Promienie załamane

Podstawy
❖ Scena fotorealistyczna
❖ Ray tracing
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane



$$I = I_{\text{local}} + \rho_{\text{rg}} I_{\text{reflect}} + \rho_{\text{tg}} I_{\text{xmit}}$$

Podstawy

Model oświetlenia
❖ Promienie odbijane
❖ Promienie załamane
❖ Całkowite oświetlenie

Algorytm

Sprawdzanie przecięcia

Techniki zaawansowane

Model oświetlenia

Lokalne oświetlenie i promienie odbijane

Podstawy

Model oświetlenia

❖ Promienie odbijane

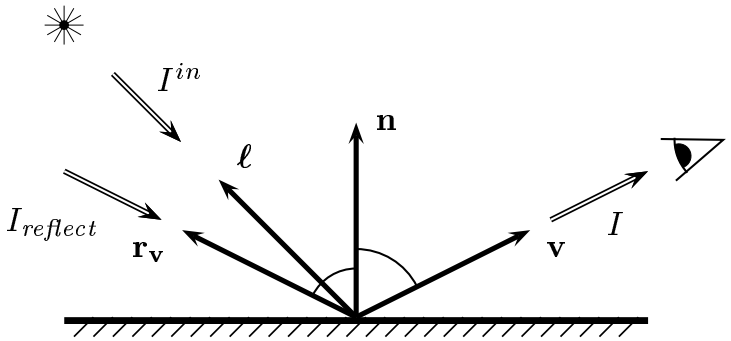
❖ Promienie załamane

❖ Całkowite oświetlenie

Algorytm

Sprawdzanie przecięcia

Techniki zaawansowane



Wektor odbijany $r_v = 2(v \cdot n) - v$.

Oświetlenie punktu na powierzchni

Podstawy
Model oświetlenia
❖ Promienie odbijane
❖ Promienie załamane
❖ Całkowite oświetlenie
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane

$$I = I_{\text{local}} + \rho_{\text{rg}} I_{\text{reflect}}$$

$$I_{\text{local}} = \rho_a I_a^{in,i} + \delta_i \cdot \left(\rho_{\text{d}} I_{\text{d}}^{\text{in},i} (\ell_i \cdot n) + \rho_{\text{s}} I_{\text{s}}^{\text{in},i} (r_v \cdot \ell_i)^f \right)$$

- $\delta_i = 1$, jeśli punkt jest bezpośrednio oświetlony światłem i, 0 — w przeciwnym przypadku.
- współczynniki ρ zależą od kolorów (częstotliwości)
- I_{reflect} oblicza się rekurencyjnie powtarzając algorytm ray tracing

Promienie załamane

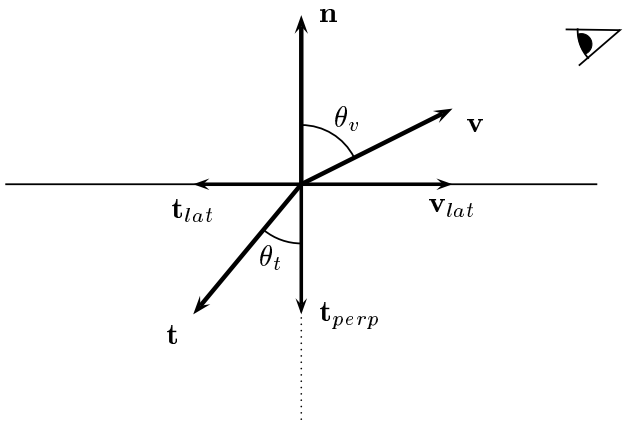
Podstawy

Model oświetlenia
❖ Promienie odbijane
❖ Promienie załamane
❖ Całkowite oświetlenie

Algorytm

Sprawdzanie przecięcia

Techniki zaawansowane



Prawo Snelliusa

$$\frac{\sin\theta_v}{\sin\theta_t} = \eta.$$

Współczynnik załamania

Podstawy
Model oświetlenia
❖ Promienie odbijane
❖ Promienie załamane
❖ Całkowite oświetlenie
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane

- $\eta \approx 1,3$ — powietrze $\rightarrow$ woda.
- $\eta \approx 1,5$ — powietrze $\rightarrow$ szkło.
- $\sin\theta_t = \eta^{-1}\sin\theta_v$.
- Jeżeli $\eta^{-1}\sin\theta_v > 1$, to nie ma załamania, tylko całkowite wewnętrzne odbijanie

Obliczenie wetora t

Podstawy
Model oświetlenia
❖ Promienie odbijane
❖ Promienie załamane
❖ Całkowite oświetlenie
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane

- $v_{\text{lat}} = v - (v \cdot n)n$
- $\|t_{\text{lat}}\| = \sin\theta_t = \eta^{-1}\sin\theta_v = \eta^{-1}\|v_{\text{lat}}\|$
- $t_{\text{lat}} = -\eta^{-1}v_{\text{lat}}$
- $\cos\theta_t = \sqrt{1-\sin^2\theta_t} = \sqrt{1-\|t_{\text{lat}}\|^2}\ (\|t_{\text{lat}}\| < 1)$
- $t_{\text{perp}} = -\sqrt{1-\|t_{\text{lat}}\|^2}\cdot n$
- $t = t_{\text{lat}} + t_{\text{perp}}$
- $t_{\text{perp}} = -\sqrt{1-\eta^{-2}\left(1-(v\cdot n)^2\right)}\cdot n$
- $t = \eta^{-1}\left((v\cdot n)n - v\right) - \sqrt{1-\eta^{-2}\left(1-(v\cdot n)^2\right)}\cdot n$

Rozszerzenie modelu Phonga

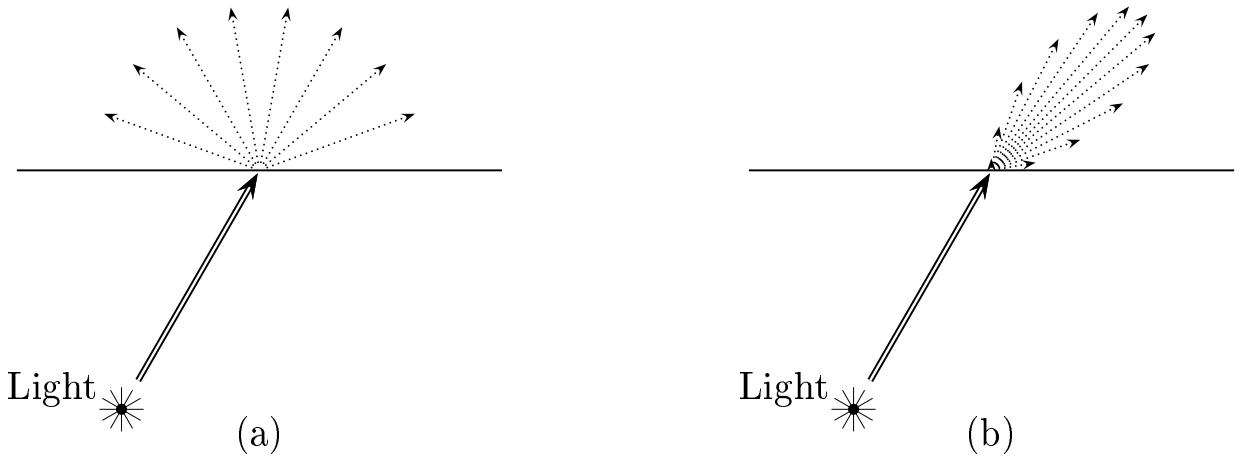
Podstawy

Model oświetlenia
- ❖ Promienie odbijane
- ❖ Promienie załamane
- ❖ Całkowite oświetlenie

Algorytm

Sprawdzanie przecięcia

Techniki zaawansowane



Rozszerzenie modelu Phonga

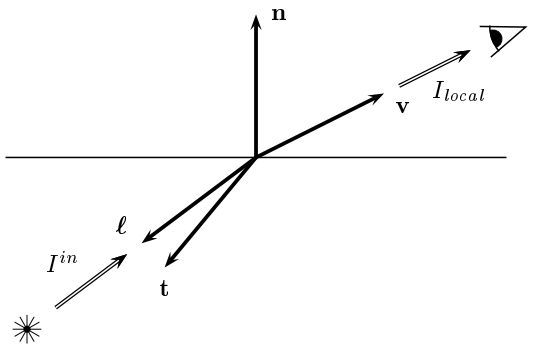
Podstawy

Model oświetlenia
- ❖ Promienie odbijane
- ❖ Promienie załamane
- ❖ Całkowite oświetlenie

Algorytm

Sprawdzanie przecięcia

Techniki zaawansowane



- $$I^i_{\text{local}} = \rho_{\text{a}} I^{\text{in},i}_{\text{a}} + \delta'_i \cdot \left(\rho_{\text{dt}} I^{\text{in},i}_{\text{d}} (\ell_i \cdot (-n)) + \rho_{\text{st}} I^{\text{in},i}_{\text{s}} (t \cdot \ell_i)^f \right)$$

Rozszerzenie modelu Phonga

Podstawy

Model oświetlenia
❖ Promienie odbijane
❖ Promienie załamane
❖ Całkowite oświetlenie

Algorytm

Sprawdzanie przecięcia

Techniki zaawansowane

$$
\begin{aligned}
I_{\mathrm{local}} = & \rho_{\mathrm{a}} I_{\mathrm{a}}^{\mathrm{in}} + \rho_{\mathrm{d}} \sum_{i=1}^{k} \delta_i I_{\mathrm{d}}^{\mathrm{in},i} (\ell_i \cdot n) + \\
& + \rho_{\mathrm{s}} \sum_{i=1}^{k} \delta_i I_{\mathrm{s}}^{\mathrm{in},i} (r_v \cdot \ell_i)^f + \rho_{\mathrm{dt}} \sum_{i=1}^{k} \delta_i' I_{\mathrm{d}}^{\mathrm{in},i} (\ell_i \cdot (-n)) + \\
& + \rho_{\mathrm{st}} \sum_{i=1}^{k} \delta_i' I_{\mathrm{s}}^{\mathrm{in},i} (t \cdot \ell_i)^f + I_{\mathrm{e}}
\end{aligned}
$$

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
❖ Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane

Algorytm

Algorytm

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
❖ Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane

Dla każdego promienia:

- Znajdź pierwsze miejsce przecięcia ze sceną.
  - ✦ Jeśli promień nie przecina żadnego obiektu ze sceny, wykorzystuj „kolor tła”.
- Oblicz oświetlenia punktu zgodnie z modelem oswietlenia.
- Wypuść promienie odbijane oraz załamane.
- Zastosuj rekurencyjnie algorytm do każdego wypuszczonego promienia.
- Dodaj wyniki obliczenia ośiwetleń.

Warunek zakończenia rekurencji: ilość odbić.

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
❖ Sprawdzenie przecięcia
❖ Sfera
❖ Płaszczyzna
❖ Trójkąt
❖ Wielościan wypukły
❖ Zmniejszenie testów
Techniki zaawansowane

Sprawdzanie przecięcia

Sprawdzenie przecięcia

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
❖ Sprawdzenie przecięcia
❖ Sfera
❖ Płaszczyzna
❖ Trójkąt
❖ Wielościan wypukły
❖ Zmniejszenie testów
Techniki zaawansowane

- Obiekty modeluje się za pomocą prostych figur: sfera, walec, stożek, torus, wielobok płaski, wielobok o bokach w postaci płatów Béziera, powierzchni NURBS.
- Sprawdza się dla każdego promienia, dla każdego czujnika cienia.
- Zależy od ilości uwzględnianych odbić.
- Najbardziej kosztowne względem obliczeń działanie.
- Wymagania na algorytm:
  - dokładność i pewność: artefakty
  - prędkość: czas obliczeń

Sfera

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
❖ Sprawdzenie przecięcia
❖ Sfera
❖ Płaszczyzna
❖ Trójkąt
❖ Wielościan wypukły
❖ Zmniejszenie testów
Techniki zaawansowane

- promień $\{\, p + \boldsymbol{u}t \,\}$, $t \geqslant 0$, $|\boldsymbol{u}| = 1$
- sfera $\{|x - c| = r\} \subset \mathbb{R}^3$
- najbliższy punkt q

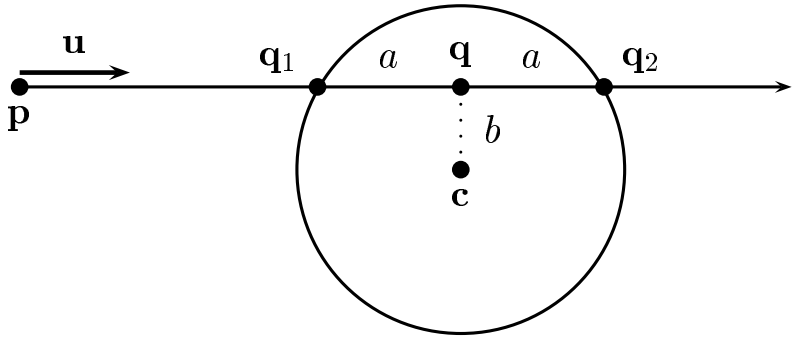


Figure X.1: The ray from $\mathbf{p}$ in direction $\mathbf{u}$ reaches its closest point to the center $\mathbf{c}$ of the sphere at $\mathbf{q}$. The points $\mathbf{q}_1$ and $\mathbf{q}_2$ are the two places where the line intersects the sphere.

Najbliższy punkt q

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
❖ Sprawdzenie przecięcia
❖ Sfera
❖ Płaszczyzna
❖ Trójkąt
❖ Wielościan wypukły
❖ Zmniejszenie testów
Techniki zaawansowane

- $t_0 = (c - p) \cdot \boldsymbol{u}$
- $q = p + t_0 \boldsymbol{u}$
- $b = |q - c| \quad a = \sqrt{r^2 - b^2}$
- $q_1 = p + (t_0 - a)\boldsymbol{u}$, $q_2 = p + (t_0 + a)\boldsymbol{u}$

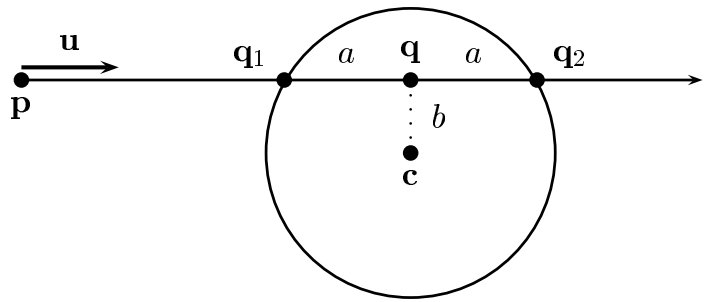


Figure X.1: The ray from $\mathbf{p}$ in direction $\mathbf{u}$ reaches its closest point to the center $\mathbf{c}$ of the sphere at $\mathbf{q}$. The points $\mathbf{q}_1$ and $\mathbf{q}_2$ are the two places where the line intersects the sphere.

Algorytm

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
❖ Sprawdzenie przecięcia
❖ Sfera
❖ Płaszczyzna
❖ Trójkąt
❖ Wielościan wypukły
❖ Zmniejszenie testów
Techniki zaawansowane

$t_0 \leftarrow (c - p) \cdot \boldsymbol{u}$
$q \leftarrow p + t_0 \boldsymbol{u}$
$b = |q - c|$
if $b > r$ **then**
  return brak przecięcia
end if
$q = \sqrt{r^2 - b^2}$
if $t_0 - a \geqslant 0$ **then**
  $q_1 = q - a\boldsymbol{u}$
  return q_1
end if
if $t_0 + a \geqslant 0$ **then**
  $q_2 = q + a\boldsymbol{u}$
  return q_2
end if
return brak przecięcia

Obiekty złożone

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
❖ Sprawdzenie przecięcia
❖ Sfera
❖ Płaszczyzna
❖ Trójkąt
❖ Wielościan wypukły
❖ Zmniejszenie testów
Techniki zaawansowane

- Sfera graniczna
  - szybko odrzucić nieprzecinające promienie

Płaszczyzna

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
❖ Sprawdzenie przecięcia
❖ Sfera
❖ Płaszczyzna
❖ Trójkąt
❖ Wielościan wypukły
❖ Zmniejszenie testów
Techniki zaawansowane

- płaszczyzna $\{ x \cdot \boldsymbol{n} = d \}$
- punkt $q = p + t_0 \boldsymbol{u}$
  - $d = q \cdot \boldsymbol{n} = p \cdot \boldsymbol{n} + t_0 \boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{n}$
  - $t_0 = \frac{d - p \cdot \boldsymbol{n}}{\boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{n}}$

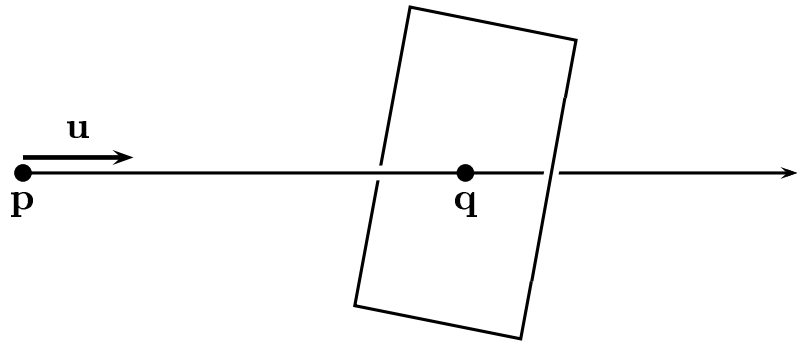


Figure X.2: The ray specified by its start position $\mathbf{p}$ and direction $\mathbf{u}$ intersects the plane at the point $\mathbf{q}$.

Algorytm

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
❖ Sprawdzenie przecięcia
❖ Sfera
❖ Płaszczyzna
❖ Trójkąt
❖ Wielościan wypukły
❖ Zmniejszenie testów
Techniki zaawansowane

$c \leftarrow \boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{n}$
if $c == 0$ **then**
  return brak przecięcia
end if
$t_o \leftarrow (d - p \cdot \boldsymbol{n})/c$
if $t_0 < 0$ **then**
  return brak przecięcia
end if
$q \leftarrow p + t_0 \boldsymbol{u}$;
return q;

Trójkąt

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
❖ Sprawdzenie przecięcia
❖ Sfera
❖ Płaszczyzna
❖ Trójkąt
❖ Wielościan wypukły
❖ Zmniejszenie testów
Techniki zaawansowane

- trójkąt —wierzchołki v_0, v_1, v_2 (nie kolinearne)
- krok pierwszy — przecięcie z płaszczyzną $\{ x \cdot \boldsymbol{n} = d \}$, punkt q
  - $\boldsymbol{n} = (v_1 - v_0) \times (v_2 - v_0)$
  - $d = \boldsymbol{n} \cdot v_0$
- krok drugi — czy punkt q leży wewnątrz trójkąta
  - *współrzędne barycentryczne*

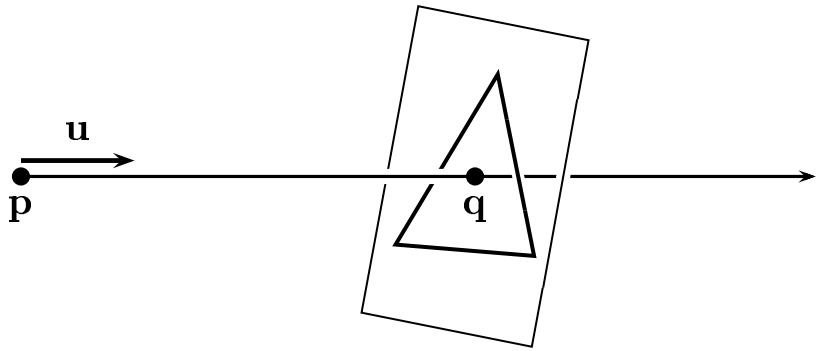


Figure X.3: Intersecting a ray with a triangle. The first step is to find the intersection $\mathbf{q}$ with the plane containing the triangle.

Wielościan wypukły

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
❖ Sprawdzenie przecięcia
❖ Sfera
❖ Płaszczyzna
❖ Trójkąt
❖ Wielościan wypukły
❖ Zmniejszenie testów
Techniki zaawansowane

- Uogólnienie algorytmu Lianga-Barsky'ego
  - ✦ przecięcia z każdą ze ścian (wejście/wyjście)
  - ✦ ostatnie wejście przed pierwszym wyjściem

Ograniczająca bryła

Podstawy

Model oświetlenia

Algorytm

Sprawdzanie przecięcia

❖ Sprawdzenie przecięcia

❖ Sfera

❖ Płaszczyzna

❖ Trójkąt

❖ Wielościan wypukły

❖ Zmniejszenie testów

Techniki zaawansowane

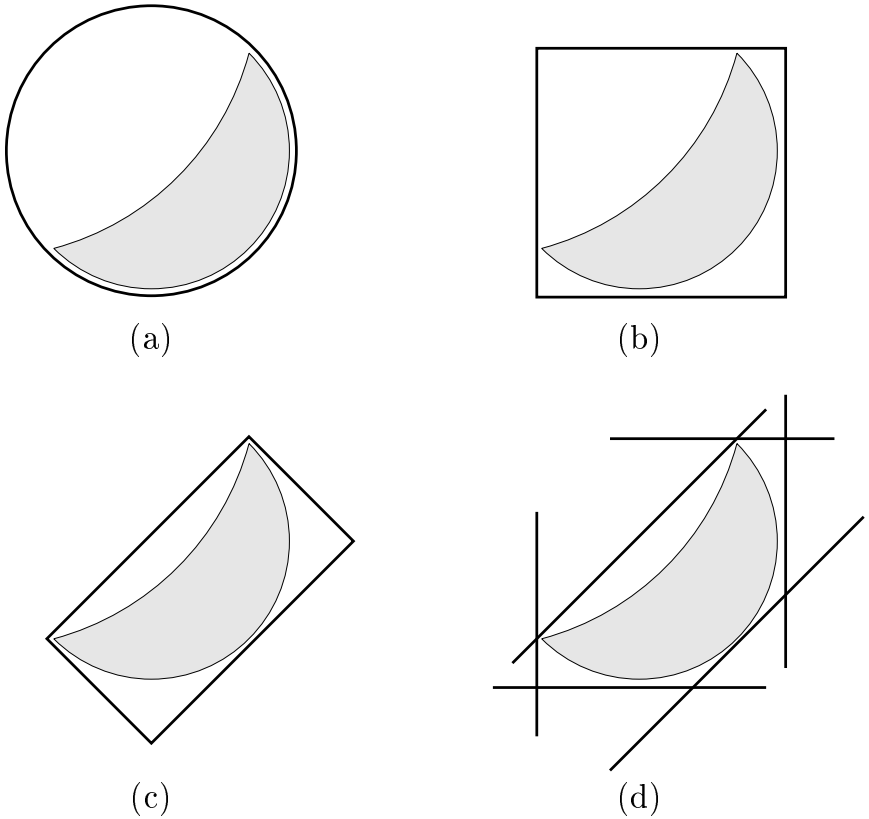


Figure X.6: Various kinds of two dimensional bounding volumes enclosing a crescent shape. (a) is a bounding sphere. (b) is an axis aligned bounded box (AABB). (c) is an oriented bounding box (OBB). (d) is a discrete oriented polygon (k-DOP) with $k = 3$.

Quadtree (Octtree)

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
❖ Sprawdzenie przecięcia
❖ Sfera
❖ Płaszczyzna
❖ Trójkąt
❖ Wielościan wypukły
❖ Zmniejszenie testów
Techniki zaawansowane

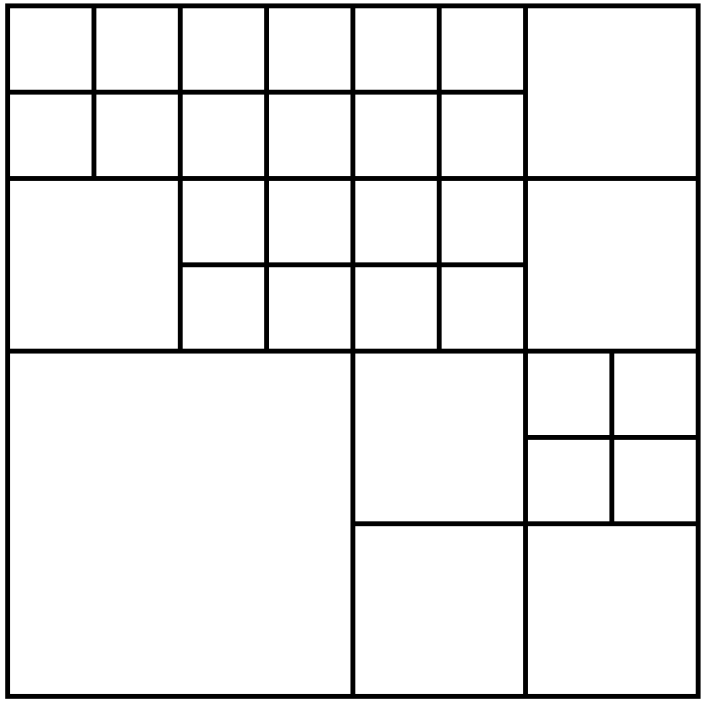


Figure X.7: A quadtree.

k-d drzewo

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
❖ Sprawdzenie przecięcia
❖ Sfera
❖ Płaszczyzna
❖ Trójkąt
❖ Wielościan wypukły
❖ Zmniejszenie testów
Techniki zaawansowane

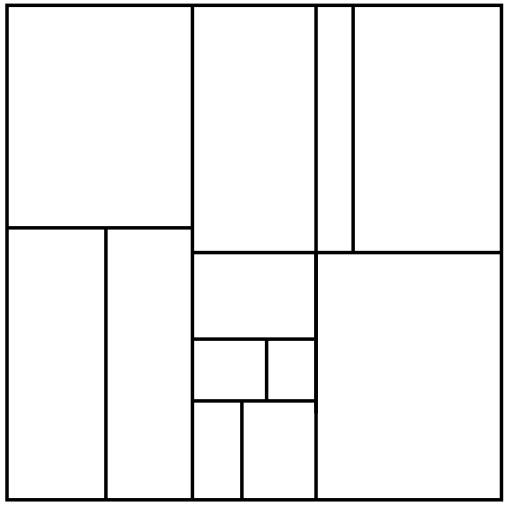


Figure X.8: A k-d tree in two dimensions. A region in a k-d tree can be subdivided by either a vertical or a horizontal line.

drzewo BSP (Binary Space Partitioning)

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
❖ Sprawdzenie przecięcia
❖ Sfera
❖ Płaszczyzna
❖ Trójkąt
❖ Wielościan wypukły
❖ Zmniejszenie testów
Techniki zaawansowane

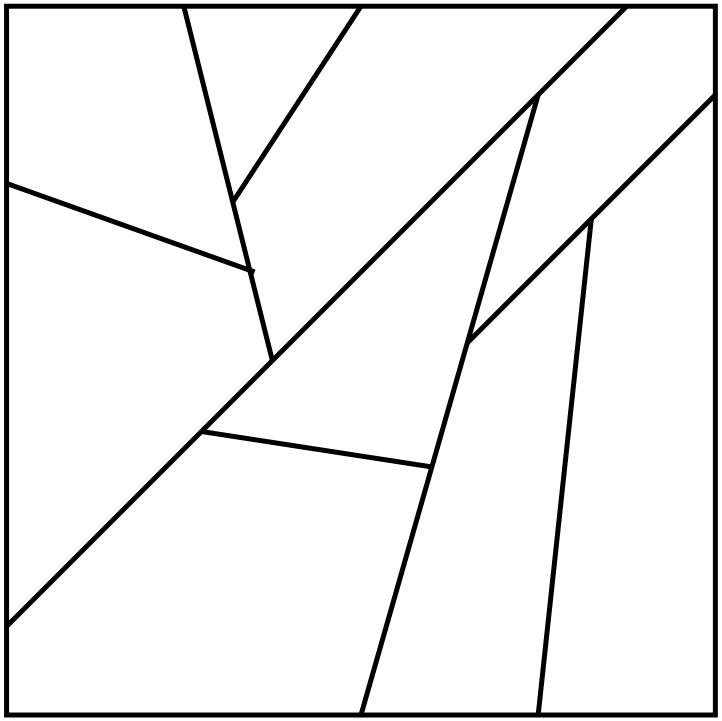


Figure X.9: A BSP tree in two dimensions.

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane
❖ Supersampling i Antialiasing
❖ Głębia ostrości
❖ Rozmazywanie ruchu
❖ Miękie cienie
❖ Wiele kolorów
❖ Path tracing
❖ Backwards

Techniki zaawansowane

Supersampling i Antialiasing

Podstawy

Model oświetlenia

Algorytm

Sprawdzanie przecięcia

Techniki zaawansowane

❖ Supersampling i Antialiasing

❖ Głębia ostrości

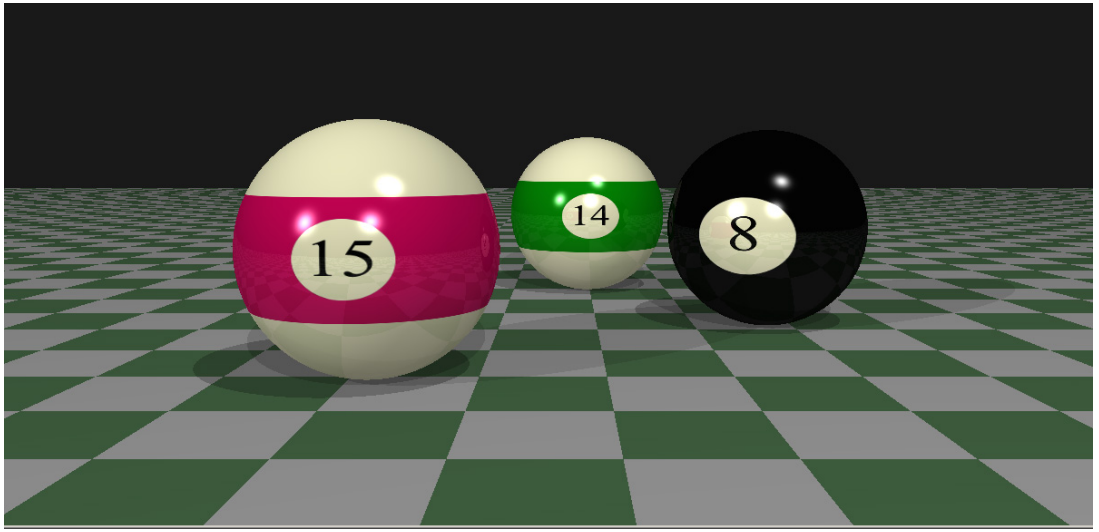
❖ Rozmazywanie ruchu

❖ Miękie cienie

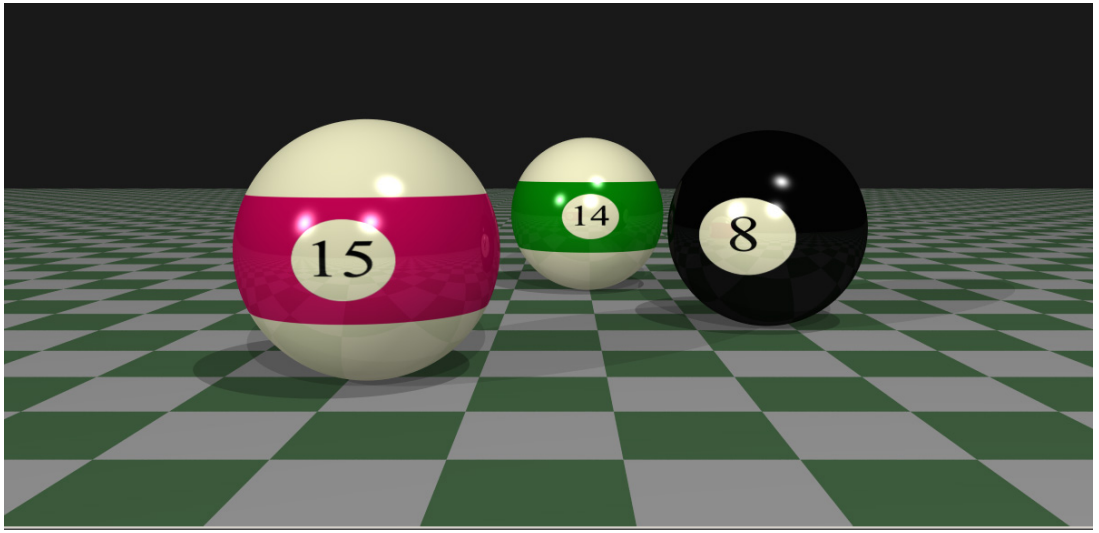
❖ Wiele kolorów

❖ Path tracing

❖ Backwards



(a) No supersampling.



(b) Supersampling with jittered subpixel centers.

Supersampling i Antialiasing

Podstawy

Model oświetlenia

Algorytm

Sprawdzanie przecięcia

Techniki zaawansowane

❖ Supersampling i Antialiasing

❖ Głębia ostrości

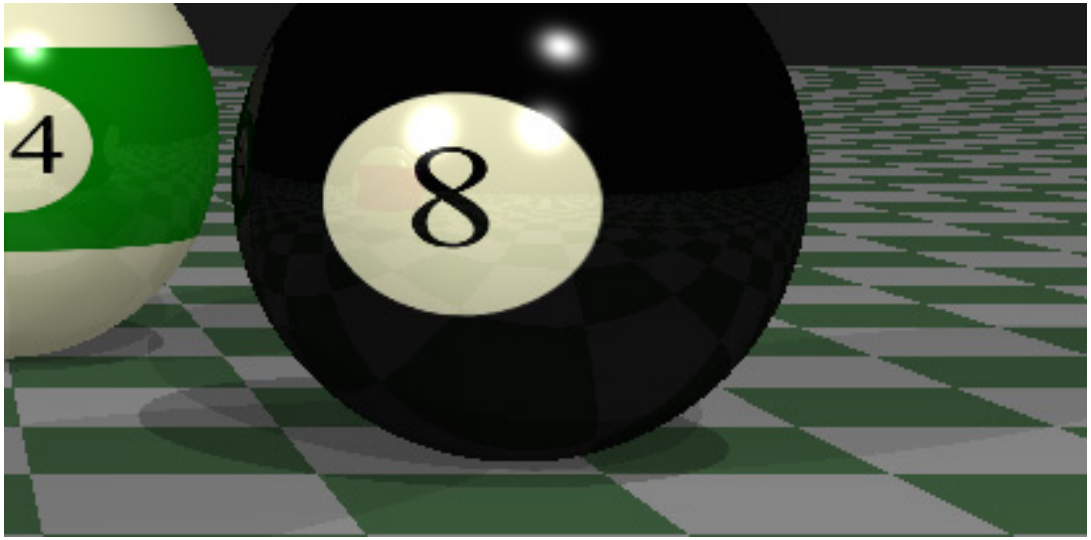
❖ Rozmazywanie ruchu

❖ Miękie cienie

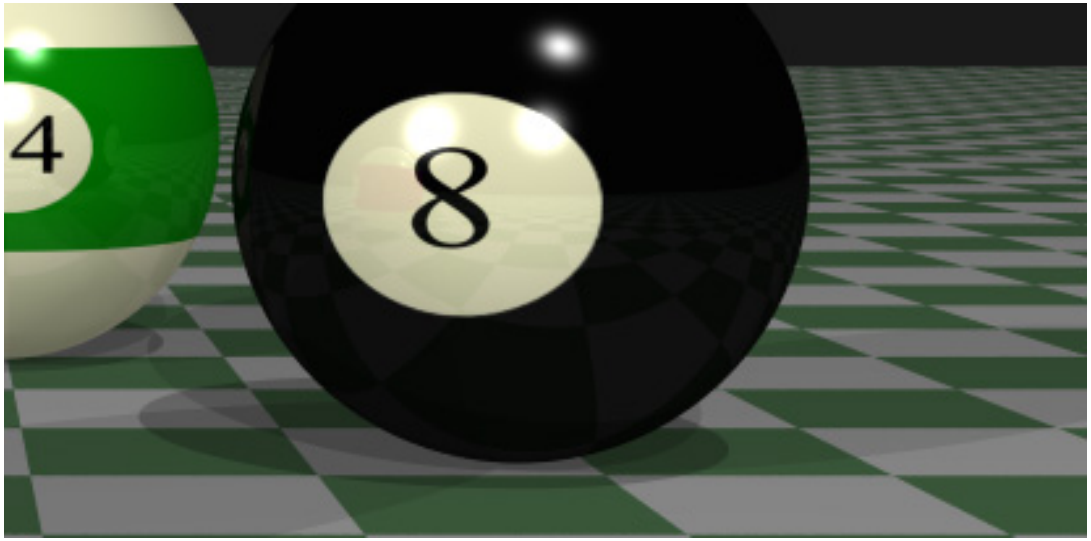
❖ Wiele kolorów

❖ Path tracing

❖ Backwards



(a) No supersampling.

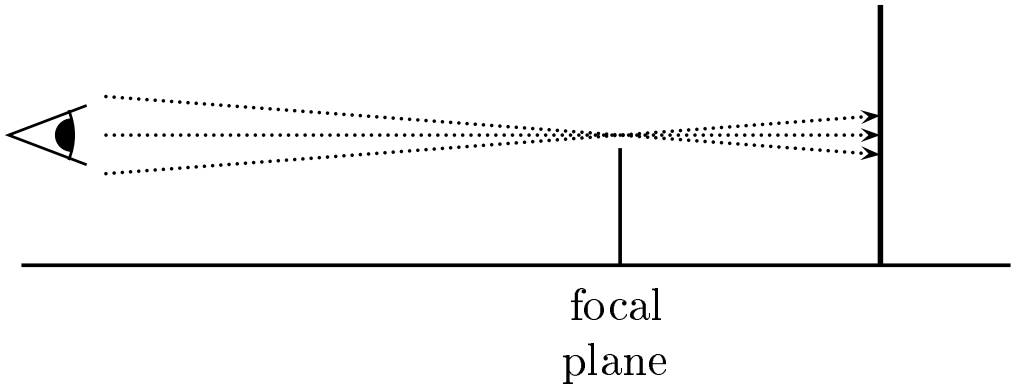


(b) Supersampling with jittered subpixel centers.

Figure IX.10: Close up views of the images in figure IX.9. See color plate C.10.

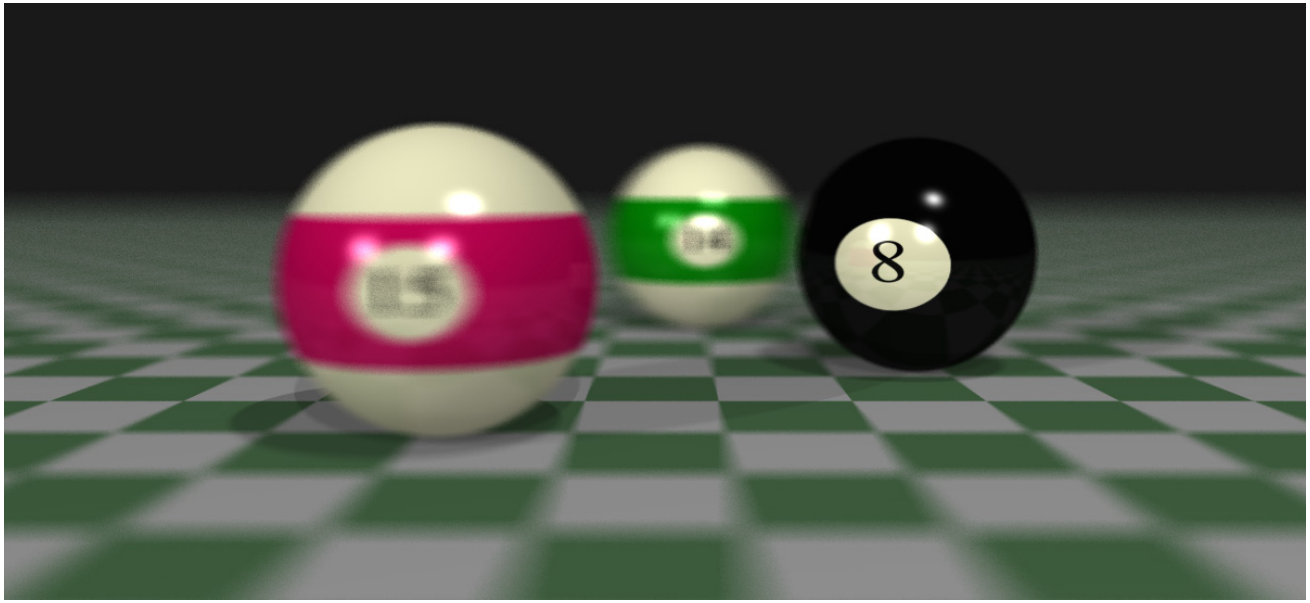
Głębia ostrości

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane
❖ Supersampling i Antialiasing
❖ Głębia ostrości
❖ Rozmazywanie ruchu
❖ Miękie cienie
❖ Wiele kolorów
❖ Path tracing
❖ Backwards



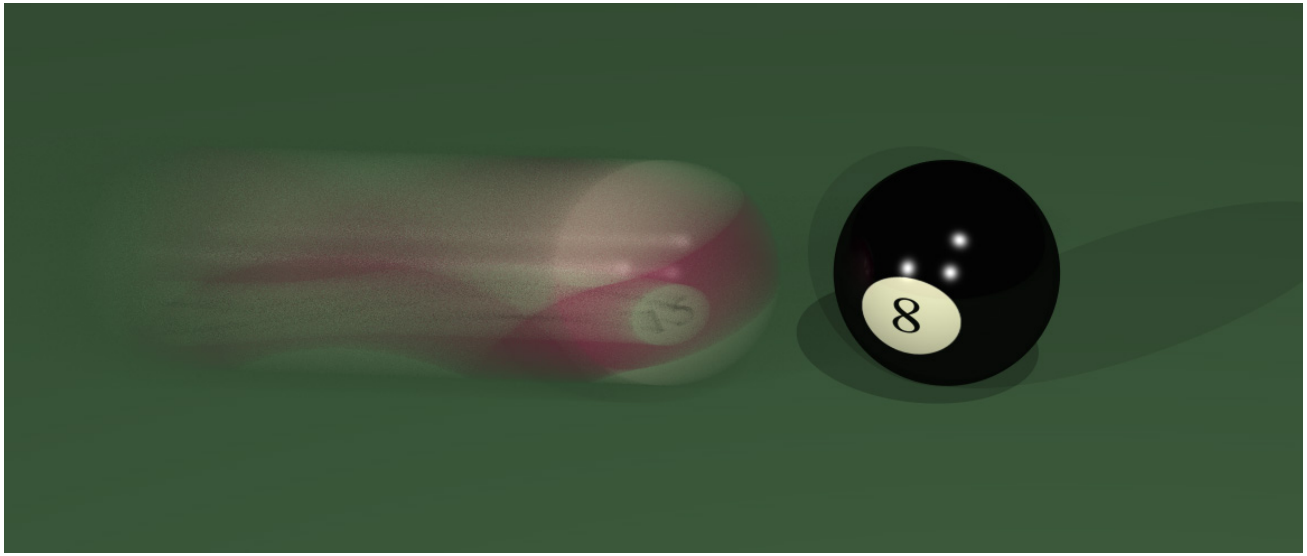
Głębia ostrości

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane
❖ Supersampling i Antialiasing
❖ Głębia ostrości
❖ Rozmazywanie ruchu
❖ Miękie cienie
❖ Wiele kolorów
❖ Path tracing
❖ Backwards



Rozmazywanie ruchu

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane
❖ Supersampling i Antialiasing
❖ Głębia ostrości
❖ Rozmazywanie ruchu
❖ Miękie cienie
❖ Wiele kolorów
❖ Path tracing
❖ Backwards



Miękie cienie

Podstawy

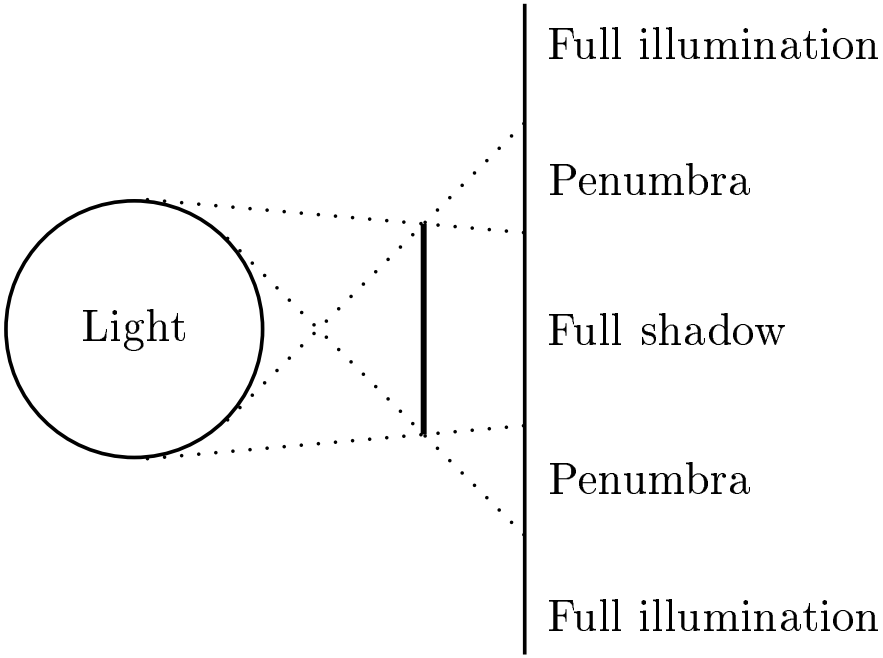
Model oświetlenia

Algorytm

Sprawdzanie przecięcia

Techniki zaawansowane

- Supersampling i Antialiasing
- Głębia ostrości
- Rozmazywanie ruchu
- Miękie cienie
- Wiele kolorów
- Path tracing
- Backwards



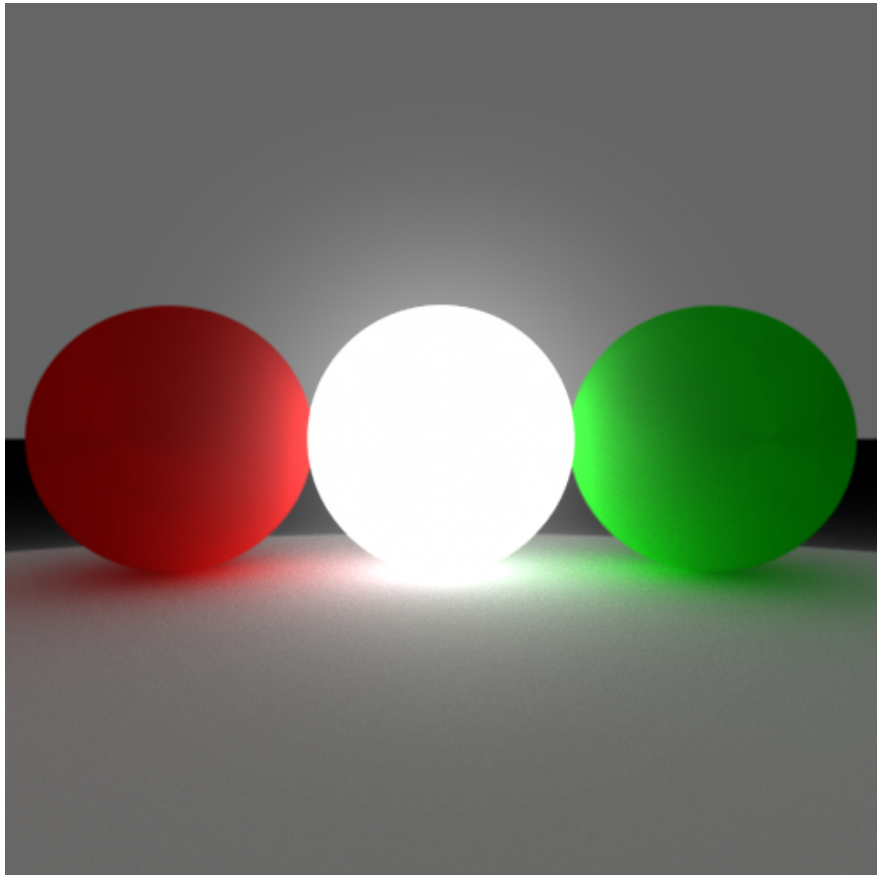
Wiele kolorów

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane
❖ Supersampling i Antialiasing
❖ Głębia ostrości
❖ Rozmazywanie ruchu
❖ Miękie cienie
❖ Wiele kolorów
❖ Path tracing
❖ Backwards

- Nie tylko RGB,
- Odbicie i załamanie zależy od barwy (częstotliwości fai).

Path tracing

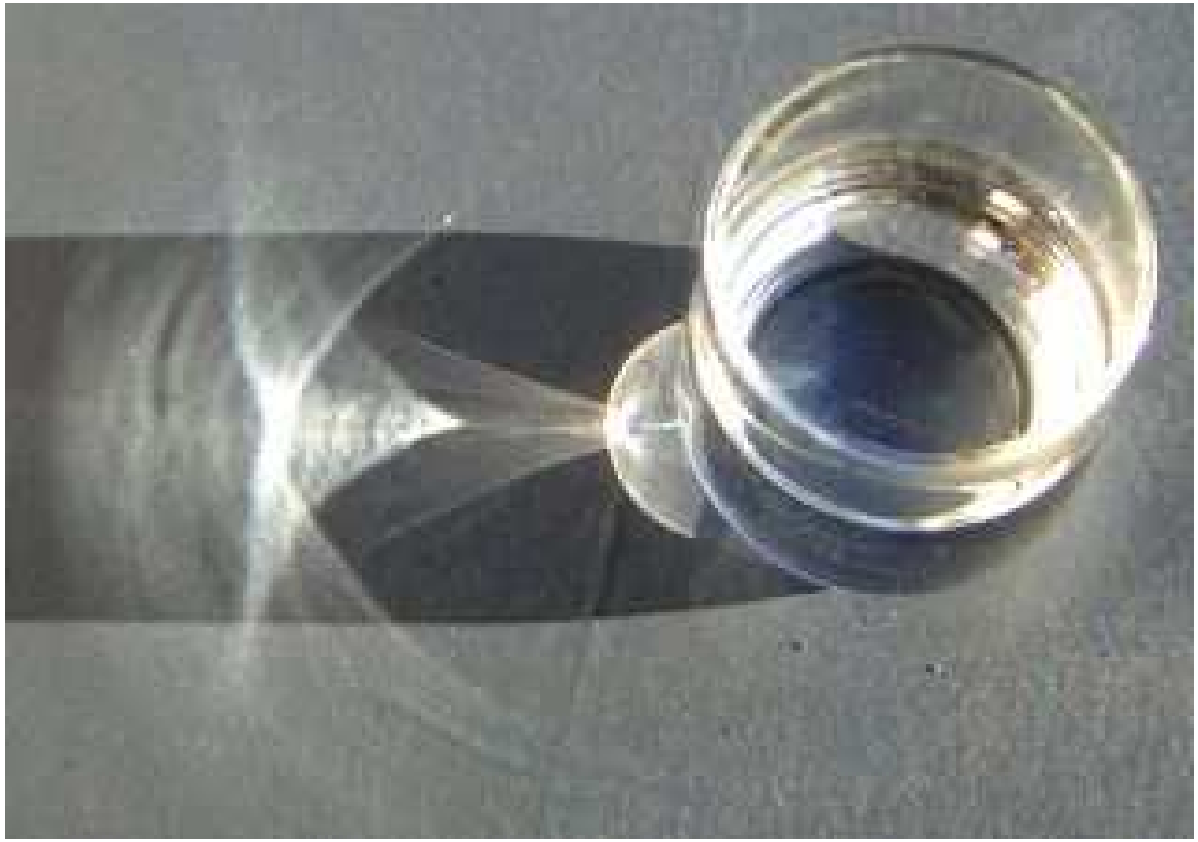
Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane
❖ Supersampling i Antialiasing
❖ Głębia ostrości
❖ Rozmazywanie ruchu
❖ Miękie cienie
❖ Wiele kolorów
❖ Path tracing
❖ Backwards



- Cycles

Odwrotny ray tracing

Podstawy
Model oświetlenia
Algorytm
Sprawdzanie przecięcia
Techniki zaawansowane
❖ Supersampling i Antialiasing
❖ Głębia ostrości
❖ Rozmazywanie ruchu
❖ Miękie cienie
❖ Wiele kolorów
❖ Path tracing
❖ Backwards



- Skupienie światła