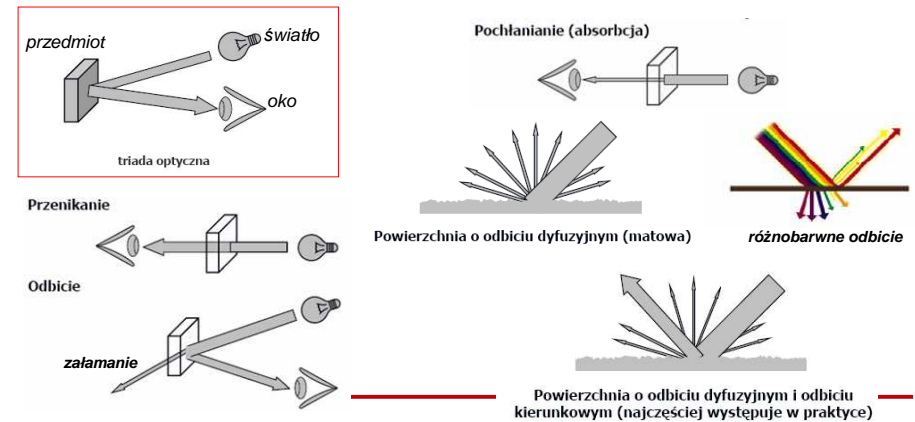


GRAKO: ŚWIATŁO I CIENIE

- Metody oświetlania
- Metody cieniowania
- Przykłady

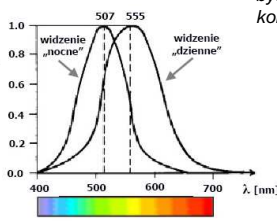
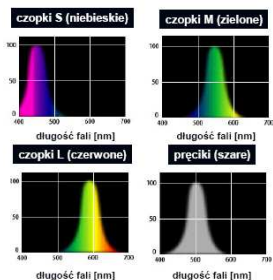
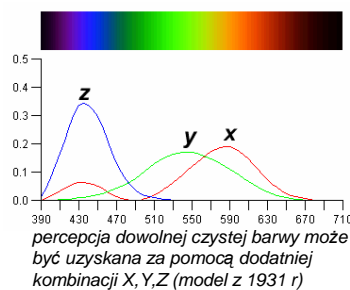
OŚWIETLENIE: elementy istotne w projektowaniu

- Rozumienie fizyki światła w realnym świecie
- Rozumienie procesu percepcji światła
- Opracowanie sposobu ukazania światła realnego (modelowanie percepcji odbioru rzeczywistości)



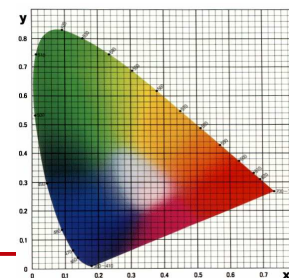
Trochę fizyki percepcji światła

- najlepiej widzimy (z zakresu 380-780 nm) barwę żółtozieloną o długości fali 550 nm
- najgorzej widzimy barwę niebieską 440 nm
- potrafimy rozróżnić maksymalnie 128 nasyconych barw
- potrafimy rozróżnić do około 30 odcieni tej samej barwy

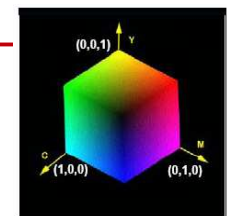
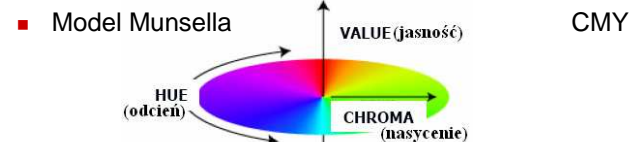


Względna czułość czopków i pręcików

Względna czułość oka ludzkiego

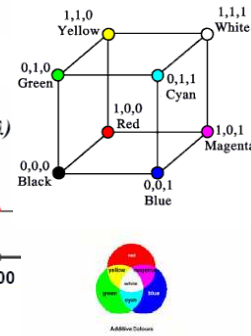
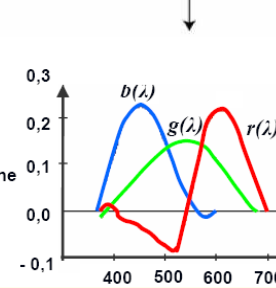


Modele barw



■ RGB

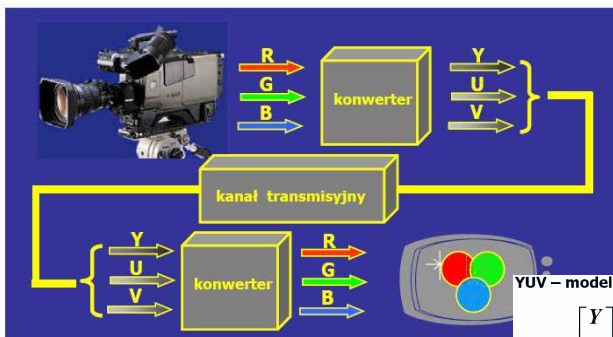
składowe tróchromatyczne $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$



1. Barwa = $[R, G, B]$, $R, G, B \in [0, 1]$.
2. Przekątna sześcianu od $[0, 0, 0]$ do $[1, 1, 1]$ - oś szarości, od barwy czarnej do białej).
3. Pozostałe barwy jakie można utworzyć z barw podstawowych R, G, B - wewnątrz sześcianu.
4. Zachodzi sumowanie barw - np. proces wyświetlania na monitorze ekranowym.
5. Zaleta - łatwość odtworzenia barwy opisanej.
6. Wada - trudność w opisanu barwy wyobrażonej.

Wydzielenie luminancji

luminancja (Y) – informacja o jasności, obraz w szarości
 chrominancja (UV, IQ) – informacja o barwie



YUV – model dla telewizji w systemie PAL

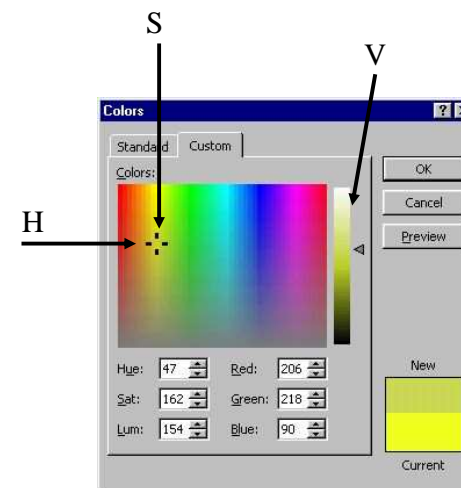
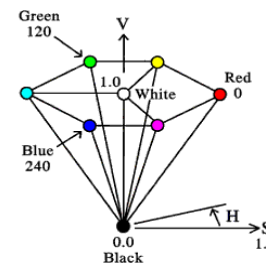
$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.229 & 0.587 & 0.114 \\ -0.146 & -0.288 & -0.434 \\ 0.617 & -0.517 & 0.100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

YIQ – model dla telewizji w systemie NTSC

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.229 & 0.587 & 0.114 \\ -0.168 & -0.257 & -0.321 \\ 0.212 & -0.528 & 0.311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

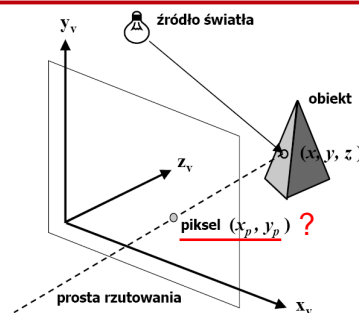
Przestrzeń kolorów HSV

- H = odcień
- S = nasycenie
- V = jasność



Problem oświetlenia scen 3W

- Percepcja światła (barwa)
- Komputerowa generacja/reprezentacja koloru
- Oddziaływanie światła i obiektów



symulacja fizyki zjawiska (optyka)
 plus komputerowe triki
 przyspieszające symulację

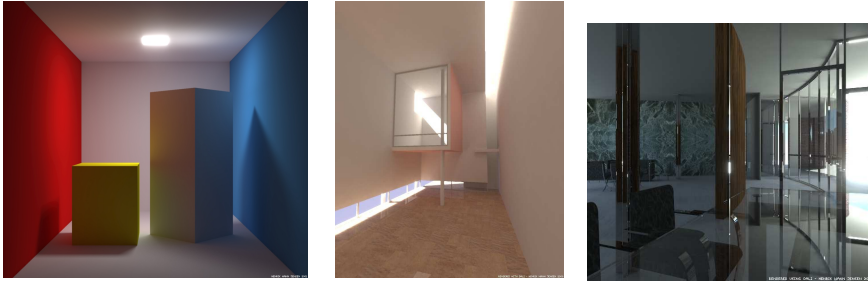
Od czego zależy jasność (x_p, y_p)

- Geometria układu źródło światła – obiekt – rzutnia
- Charakterystyka źródła światła (kolor, intensywność, kierunkowość, kształt, polaryzacja)
- Charakterystyka powierzchni obiektu (spektrum światła odbitego, pozycja, orientacja, mikrostruktura)
- Charakterystyka rozchodzenia się światła odbitego i rozproszonego
- Oświetlenie obiektów światłem odbitym



Definicje

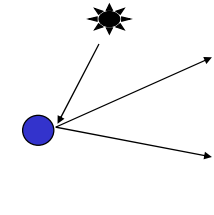
- **Iluminacja** (bezpośrednia i pośrednia): transport energii od źródeł światła do powierzchni i punktów



Images by Henrik Wann Jensen

Definicje

- **Oświetlanie**: proces obliczania intensywności świecenia (światła wychodzącego) w punkcie przestrzeni 3W, zwykle na powierzchni
- **Cieniowanie**: proces przypisania koloru pikselom



- Modele iluminacji :
 - **empiryczne**: proste formuły przybliżające obserwowane zjawisko (stosowane w 'szybkiej' grafice interaktywnej (uproszczone źródła, tylko luminancja bezpośrednia)
 - **fizyczne**: modele wykorzystujące fizykę oddziaływania światła z materią (bardziej realistyczna grafika)

Modele źródeł światła: światło otoczenia (pośrednia iluminacja)

Model oświetlenia światłem otoczenia:

Założenia:

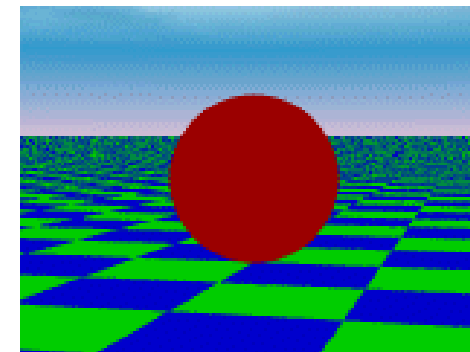
- Na scenie występuje jedynie światło rozproszone (bezkierunkowe).
- Powierzchnie obiektów odbijają światło

Model oświetlenia:

$$I = I_a \cdot k_a$$

- I - intensywność oświetlenia punktu powierzchni,
 I_a - intensywność dla światła rozproszonego,
 k_a - współczynnik odbicia światła rozproszonego przez powierzchnię, współczynnik zależy od materiału z jakiego wykonany jest obiekt, $k_a \in [0, 1]$

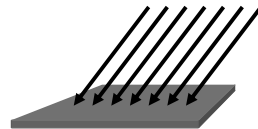
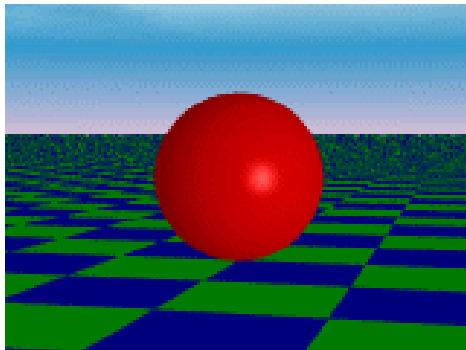
Światło otoczenia



Nieistotna pozycja źródła światła i obserwatora, nachylenie powierzchni

Kierunkowe źródło światła

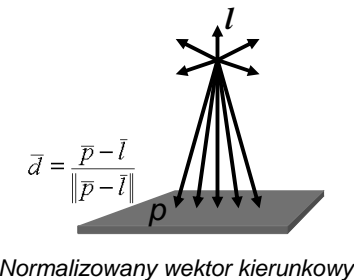
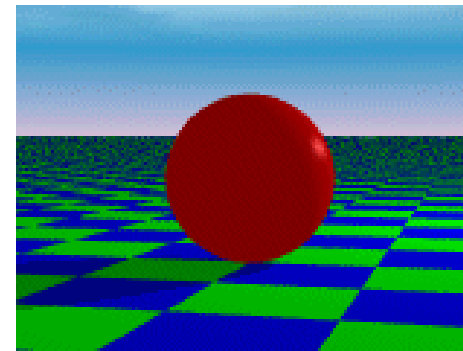
- Kierunek jest stały dla wszystkich powierzchni sceny
- Promienie źródła światła są równoległe
- Kąt pomiędzy powierzchnią a źródłem światła jest istotny



Nieistotna pozycja źródła światła i obserwatora

Punktowe źródło światła

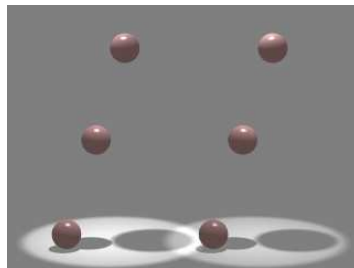
- Równomierna emisja światła z pojedynczego punktu we wszystkich kierunkach
- Różne kierunki pomiędzy promieniami światła a poszczególnymi punktami powierzchni



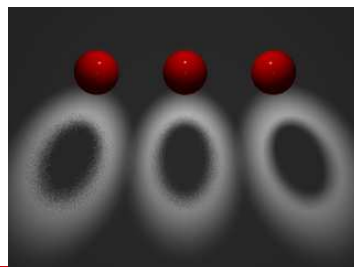
Istotna pozycja źródła światła i obserwatora oraz nachylenie powierzchni

Inne źródła światła

- Światła punktowe, których intensywność słabnie kierunkowo



- Powierzchniowe źródła światła (miękkie cienie)



Powierzchnie rozpraszające

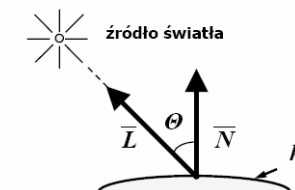
Model oświetlenia dla powierzchni rozpraszających (dyfuzyjnych):

Założenia:

- Na scenie występuje punktowe źródło światła emitujące światło tak samo we wszystkich kierunkach.
- Powierzchnie obiektów rozpraszają światło (są matowe).

Model oświetlenia:

$$I = I_p \cdot k_d \cdot \cos \Theta$$



I - intensywność oświetlenia punktu powierzchni,

I_p - intensywność świecenia punkowego źródła światła,

k_d - współczynnik odbicia przez powierzchnię, współczynnik zależy od materiału z jakiego wykonany jest obiekt, $k_d \in [0, 1]$

Powierzchnie rozpraszające



Powierzchnie rozpraszające oświetlanie pod różnym kątem

Modyfikacje

Te elementy sceny, na które nie padają bezpośrednio promienie wysyłane przez punktowe źródło światła nie będą widoczne.

Modyfikacja polega na połączeniu modelu opartego na prawie cosinusów z modelem dla światła rozproszonego.

$$I = I_a \cdot k_a + I_p \cdot k_d \cdot \cos \Theta$$

dołączymy tłumienie

$$I = I_a \cdot k_a + f_{att} \cdot I_p \cdot k_d \cdot \cos \Theta$$

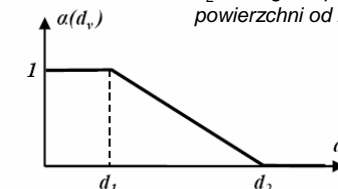
$$f_{att} = 1/d_L^2$$

d_L - odległość punktu powierzchni od źródła

dołączymy odległość

$$I' = I \cdot \alpha(d_v)$$

d_v - odległość oświetlanego punktu powierzchni od obserwatora



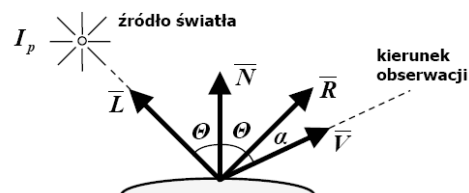
Model powierzchni odbijających światło

Model oświetlenia dla powierzchni odbijających światło:

Założenia:

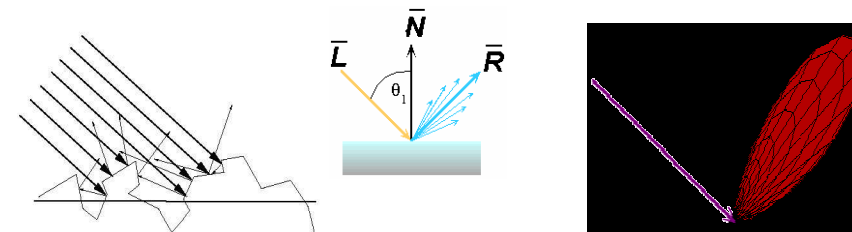
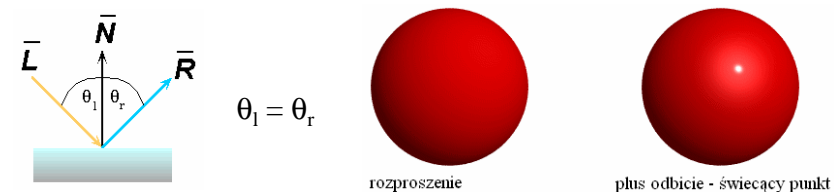
- Na scenie występuje punktowe źródło światła emitujące światło tak samo we wszystkich kierunkach.
- Powierzchnie obiektów odbija światło (różnie w różnych kierunkach).

Przykład: Idealne zwierciadło



Oświetlany punkt powierzchni, będzie widoczny dla obserwatora tylko wtedy, gdy kierunek wektora \vec{R} będzie się pokrywał z kierunkiem wektora \vec{V} .

Lustrzane odbicia (gładkie powierzchnie)



Nieidealne odbicie – osłabione odbicie

empiryczna aproksymacja

Model oświetlenia Phong (łączy rozpraszanie i odbijanie)

$$I = I_a \cdot k_a + f_{att} \cdot I_p \cdot k_d \cdot \cos \Theta$$

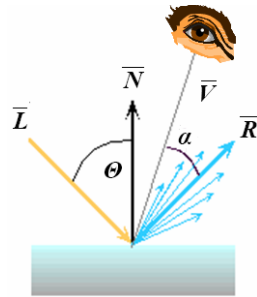
$$I = I_a \cdot k_a + f_{att} \cdot I_p \left[k_d \cdot \cos \Theta + W(\Theta) \cdot \cos^n \alpha \right]$$

odbicie nieidealne

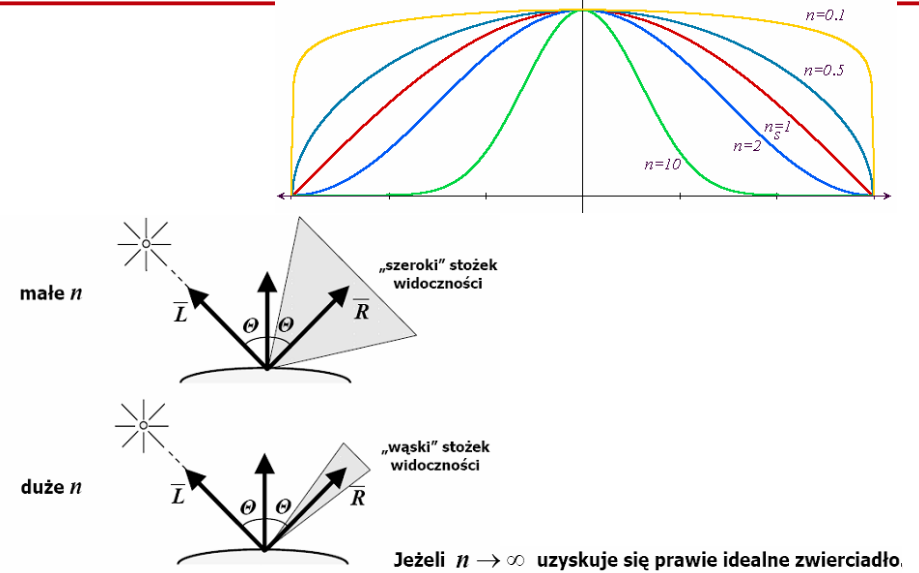
$W(\Theta)$ - pewna funkcja kąta Θ (zależy od własności materiału), często funkcję tą zastępuje się stałą k_s , czyli parametr nie zależy wtedy od kąta pod jakim światło pada na analizowany punkt powierzchni,

n - stała $n \in [1, 200]$

model empiryczny bez podstaw fizycznych

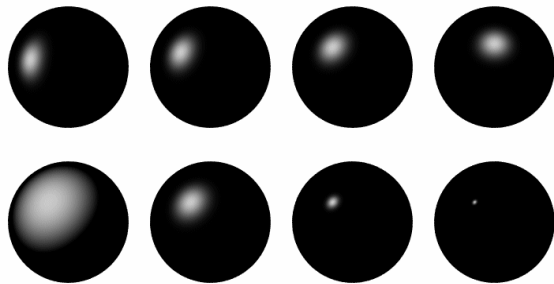


Intensywność oświetlenia zależy od punktu obserwacji



Przykład z oświetleniem Phong

- oświetlenie sfery przy zmiennych wartościach parametrów L i n



Model oświetlenia Phong

$$I_{total} = k_a I_a + \sum_{i=1}^{l.zr.szw} I_i (k_d(\Theta_i) + k_s(\alpha_i)^n)$$

Phong	$\rho_{ambient}$	$\rho_{diffuse}$	$\rho_{specular}$	ρ_{total}
$\phi_i = 60^\circ$				
$\phi_i = 25^\circ$				
$\phi_i = 0^\circ$				

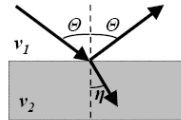
wykresy intensywności

Załamanie światła

Modele oświetlenia dla obiektów, które przepuszczają światło:

Podstawy fizyczne:

Przy przejściu z jednego ośrodka przezroczystego do drugiego promień świetlny ulega załamaniu.



Zjawisko jest opisane przez prawo Snella.

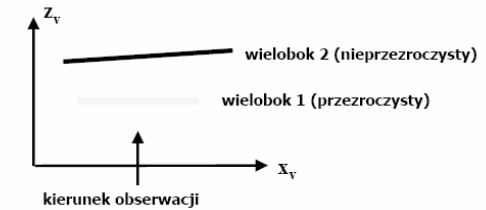
$$\frac{\sin \Theta}{\sin \eta} = \frac{v_1}{v_2}$$

gdzie v_1 i v_2 są odpowiednio prędkościami rozchodzenia się światła w pierwszym i drugim ośrodku.

Model przezroczystości

Najprostszy model przezroczystości:

Przezroczystość interpolowana



$$I = (1 - k_{t1}) \cdot I_1 + k_{t1} \cdot I_2$$

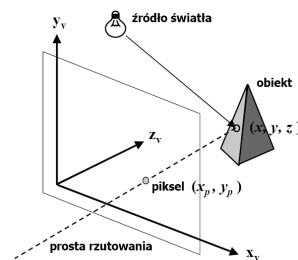
I_1 - intensywność oświetlenia wieloboku 1,
 I_2 - intensywność oświetlenia wieloboku 2,
 k_{t1} - współczynnik przezroczystości wieloboku 1, $k_{t1} \in [0, 1]$.

$k_{t1} = 0$ - wielobok 1 nieprzezroczysty,
 $k_{t1} = 1$ - wielobok 1 całkowicie przezroczysty,

CIENIOWANIE

Obliczanie jasności (koloru) poszczególnych pikseli obrazu sceny (na rzutni) z uwzględnieniem między innymi efektów oświetlenia

1. Dla punktu obrazu (piksel) o współrzędnych (x_p, y_p) obliczyć odpowiedni punkt widocznej powierzchni obiektu (x, y, z) .
2. Dla punktu (x, y, z) zastosować wybrany model oświetlenia i obliczyć intensywność I analizowanego punktu.
3. Wypełnić piksel (x_p, y_p) zgodnie z obliczoną intensywnością.



Algorytm kosztowny obliczeniowo

Cieniowanie jednotonowe

Założenia:

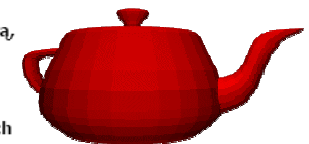
- Obiekty sceny opisane są jako siatki wieloboków.
- Dla widocznej ściany obiektu sceny, zakłada się stałą intensywność oświetlenia.

Algorytm:

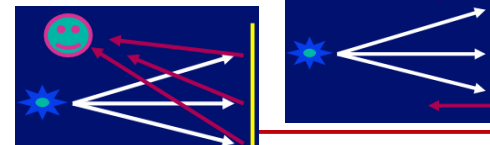
1. Dla dowolnego punktu widocznej ściany, wyliczyć intensywność oświetlenia.
2. Rzutować ścianę, wypełniając odpowiedni wielobok stałą, zgodnie z obliczoną intensywnością.

Zaletą: stosunkowo mało obliczeń.

Wadą: jeśli siatka wieloboków aproksymuje obiekt o płynnych kształtach – widoczne będą krawędzie.



Efekt nierealistyczny bo:

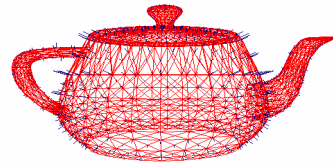


Udoskonalenia:

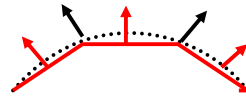
- Model oświetlenia Phonga w każdym punkcie wielokąta



- Liczenie normalnych w wierzchołkach



- Gładzki model zamiast wielokątów



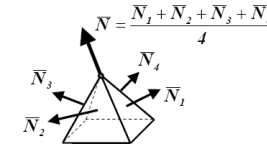
Algorytm interpolacji intensywności (Gourauda)

Założenie:

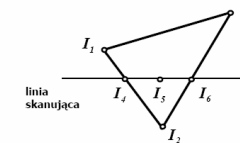
- Obiekty sceny opisane są jako siatki wieloboków.

Algorytm:

- Dla każdego wierzchołka siatki wieloboków wyliczyć „wektor normalny”, jako średnią arytmetyczną wektorów normalnych dla ścian, do których należy analizowany wierzchołek.



- Dla każdego wierzchołka siatki stosując wybrany model oświetlenia i obliczony „wektor normalny”, obliczyć intensywność oświetlenia I_j .
- Wypełnić rzuty widocznych wieloboków, używając algorytmu linii skanującej, w następujący sposób



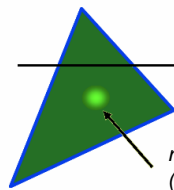
$$I_4 = I_1 \cdot \frac{y_4 - y_2}{y_1 - y_2} + I_2 \cdot \frac{y_1 - y_4}{y_1 - y_2} \quad I_6 = I_3 \cdot \frac{y_6 - y_2}{y_3 - y_2} + I_2 \cdot \frac{y_3 - y_6}{y_3 - y_2}$$

$$I_5 = I_4 \cdot \frac{x_4 - x_5}{x_6 - x_4} + I_6 \cdot \frac{x_5 - x_4}{x_6 - x_4}$$

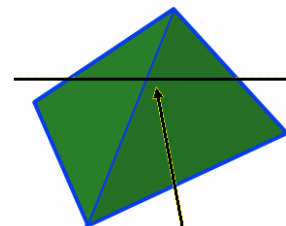
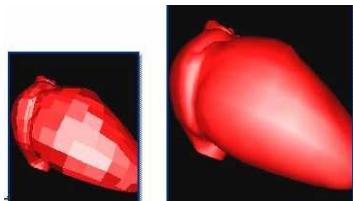
Zaleta: ograniczenie ilości obliczeń, obiekty aproksymowane siatkami wieloboków wyglądają „gładko”, bowiem krawędzie siatki przestają być widoczne.

Wada: nienaturalne obrazy w przypadkach odbicia światła od powierzchni lustrzanych.

Ograniczenia metody Gourauda



nie sposób wycieniować takiego efektu (lustrzane odbicie)



miejsca nieciągłości

Algorytm interpolacji wektorów normalnych (Phonga)

Założenie:

- Obiekty sceny opisane są jako siatki wieloboków.

Algorytm:

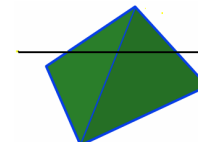
- Obliczyć „wektory normalne” do wierzchołków wieloboków siatki tak samo jak w poprzednim algorytmie.
- Wypełnić rzuty widocznych wieloboków używając algorytmu linii skanującej, lecz interpolując nie intensywności a „wektory normalne” obliczone dla wierzchołków.



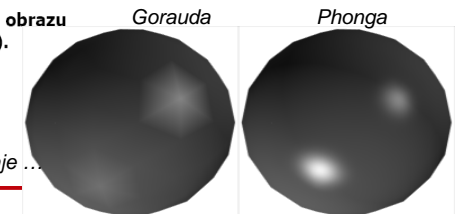
Intensywność oświetlenia dla kolejnych pikseli jest obliczana przy pomocy modelu oświetlenia, lecz dla interpolowanego a nie „prawdziwego” wektora normalnego.

Zaleta: znacznie lepsze obrazy niż dla poprzedniego algorytmu.

Wada: dość dużo obliczeń (dla każdego piksela obrazu wykorzystywany jest model oświetlenia).

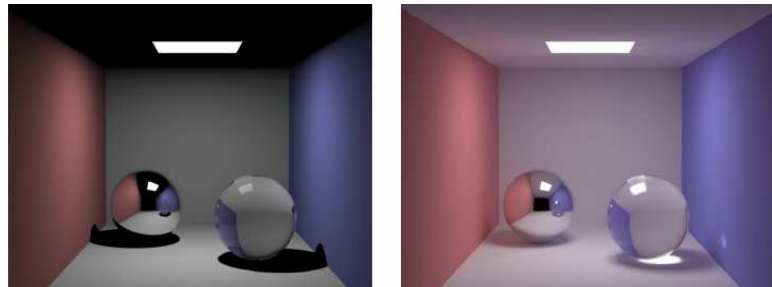


Zarys wielokątów zostaje ...



Realistyczne sceny 3W: metody globalnej iluminacji

Zakładamy, że punkt jest oświetlony nie tylko poprzez zbiór lokalnych źródeł światła, ale przez wszystkie emitory i reflektory sceny globalnej



tylko źródło światła

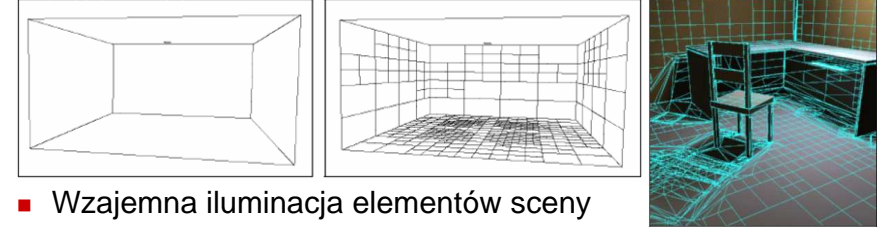
uwzględnienie rozprożeń

Metody:

- Energetyczna
- Śledzenia promieni

Metoda bilansu energetycznego

- Podział sceny na mniejsze elementy (siatka)



- Wzajemna iluminacja elementów sceny



Metoda energetyczna: algorytm

- Równanie

$$E_i = W_i + \rho_i \sum_{j=1}^n F_{ij} E_j \quad \begin{bmatrix} 1 - \rho_1 F_{11} & -\rho_1 F_{12} & \dots & -\rho_1 F_{1n} \\ -\rho_2 F_{21} & 1 - \rho_2 F_{22} & \dots & -\rho_2 F_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\rho_n F_{n1} & -\rho_n F_{n2} & \dots & 1 - \rho_n F_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \dots \\ W_n \end{bmatrix}$$

E_i - natężenie promieniowania i - tego płata ($\text{W/m}^2, \text{lx}$),

E_j - natężenie promieniowania j - tego płata ($\text{W/m}^2, \text{lx}$),

W_i - emisja własna energii z i - tego płata ($\text{W/m}^2, \text{lx}$),

ρ_i - współczynnik odbicia światła dla i - tego płata,

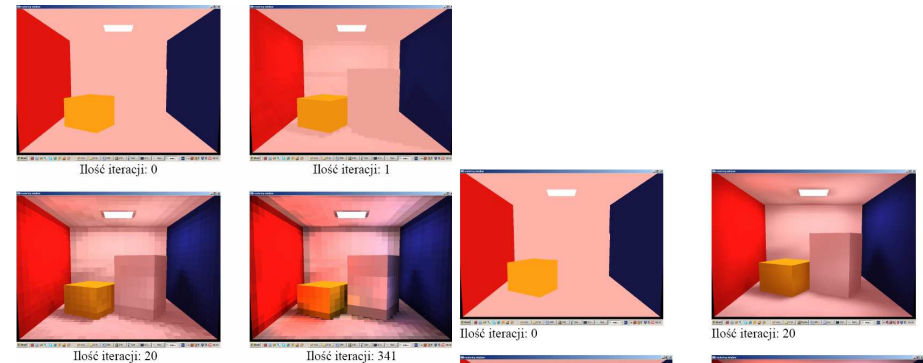
F_{ij} - współczynnik sprzężenia optycznego i - tego płata z j - tym płatem,

n - liczba płyt powierzchni na scenie,

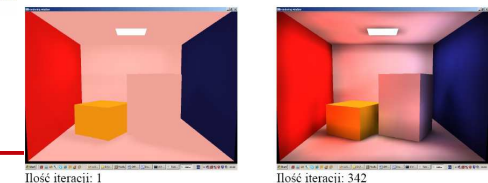
- Algorytm iteracyjny aż do minimalnego przyrostu E_i

Metoda energetyczna: interpolacja kolorów

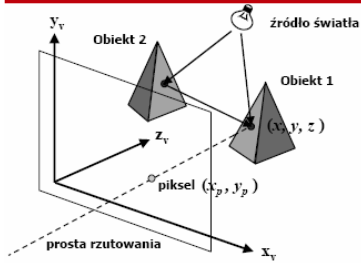
- Bez interpolacji (rozwiązanie przybliżone)



- Z interpolacją



Metody z wiązką promieni (idea)



Punkt (x, y, z) na ścianie obiektu 1 jest oświetlany bezpośrednio przez źródło światła a także przez światło odbite od obiektu 2.

Jak obliczyć jasność lub kolor punktu (piksela) (x_p, y_p) , będącego rzutem punktu (x, y, z) ?

Założenie:

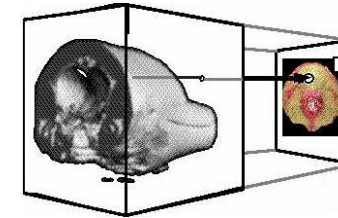
Źródło światła reprezentowane jest przez pęk promieni biegnących w różnych kierunkach (dyskretyzacja źródła światła).

Algorytm:

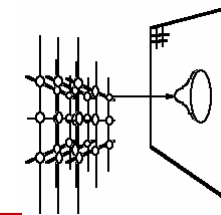
1. Analizuje się poszczególne promienie emitowane przez źródło światła w kierunku od źródła światła do rzutni.
2. Wylicza się kolejne kierunki odbicia analizowanego promienia od ścian obiektów, aż do wyznaczenia kierunku ostatniego odbicia promienia.
3. Prosta wyznaczona przez ostatni kierunek odbicia analizowanego promienia przecina rzutnię, bądź nie.

Algorytmy naturalne

- Projekcyjne



- Splatting - dekompozycja, rozdział przestrzeni na punkty/obiekty i ich rzutowanie na płaszczyznę obrazu (wpływ o charakterze gaussowskim – gaussowski kernel jest użyty do ważenia wpływu wokseli na danych piksel płaszczyzny obrazu)



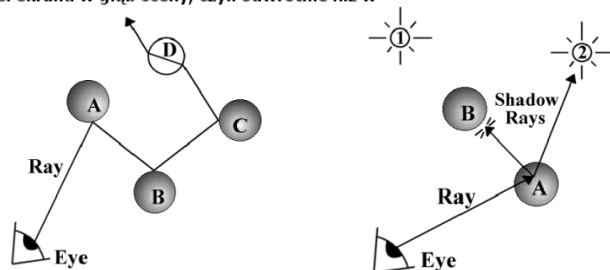
Metody śledzenia promieni (ray-tracing)

Założenia:

- Na scenie może znajdować się wiele obiektów i wiele źródeł światła.
- Możliwe jest obliczenie punktu przecięcia prostej (promienia) i powierzchni obiektu.
- Opisany jest sposób oddziaływania powierzchni obiektów i światła (zadane są modele oświetlenia).

Idea metody

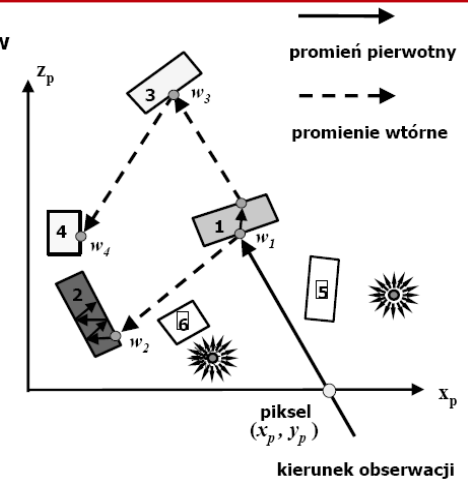
Bada się drogę fikcyjnego promienia biegnącego od obserwatora, przez piksel ekranu w głąb sceny, czyli odwrotnie niż w rzeczywistości.



Śledzenie promieni

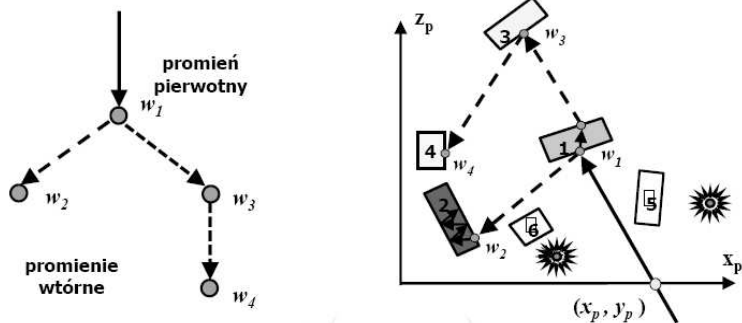
Na scenie jest sześć obiektów i dwa źródła światła

- 1 - odbija i załamuje promień,
- 2 - występuje całkowite odbicie wewnętrzne,
- 3 - odbija promień,
- 4 - rozprasza promień,
- 5 - zasłania źródło światła,
- 6 - tłumi promień, ale nie zasłania źródła



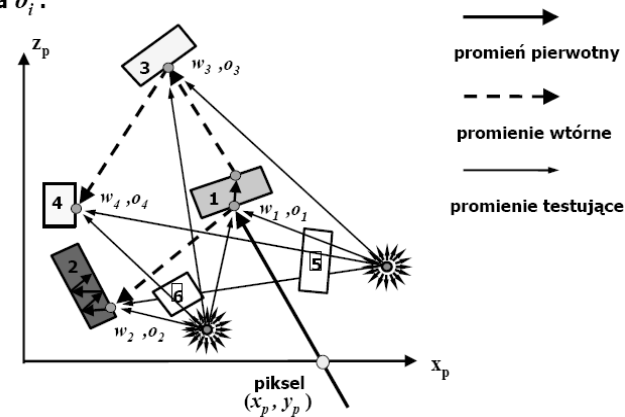
Śledzenie promieni

Krok 1 Przez każdy punkt (piksel) ekranu przeprowadza się promień pierwotny i wyznacza promienie wtórne (śledzenie). Następnie dla analizowanego punktu ekranu buduje się graf w postaci drzewa.



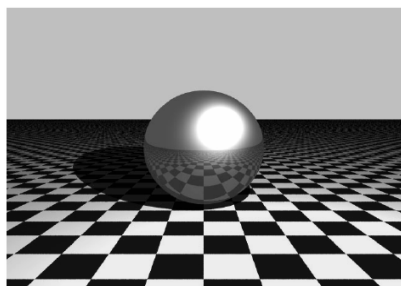
Śledzenie promieni

Krok 2 Dla każdego węzła w_i drzewa, na podstawie analizy promieni testujących (łączyjących bezpośrednio źródło światła i węzeł), wyznacza się oświetlenie lokalne węzła o_i .

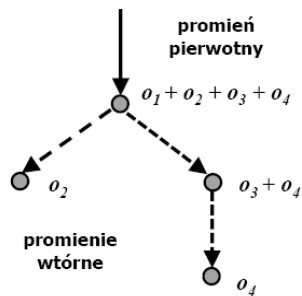


Śledzenie promieni

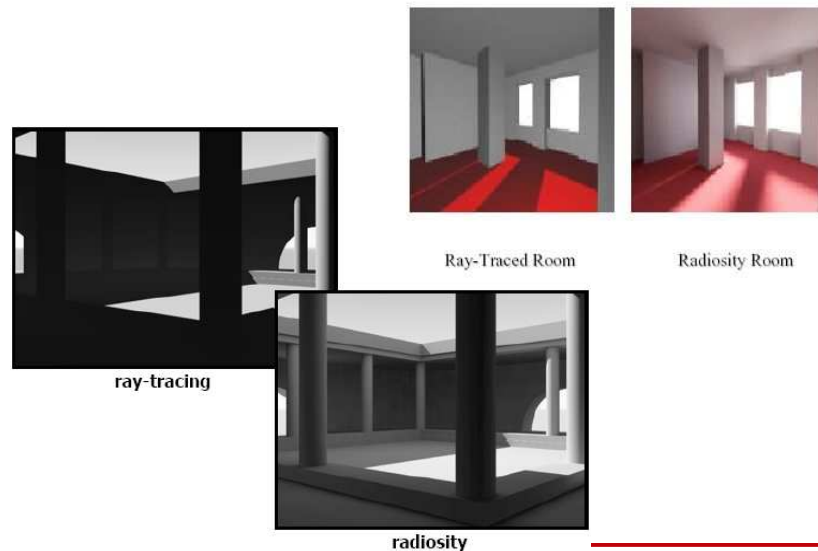
Krok 3 Sumuje się oświetlenia lokalne przypisane węzłom grafu. Oświetlenie węzła „wyższego” uzyskuje się przez dodanie do jego oświetlenia lokalnego, oświetlenia węzłów „niższych”.



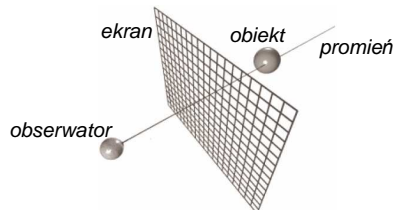
efekt końcowy



Porównanie



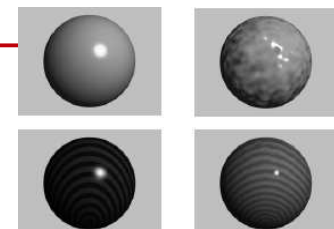
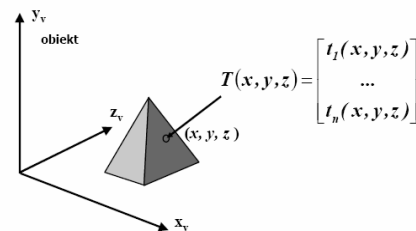
Metoda ray-castingu (do odtwarzania objętości)



Algorytm:

- Dla każdego piksela płaszczyzny obrazu:
 - Dla każdego punktu $f(i, j, k)$ wzdłuż promienia poprowadzonego z piksela:
 - Sprawdź $f(i, j, k)$ w tabeli klasyfikacji (kolor, przezroczystość)
 - Jeśli nowa treść wnoszona przez $f(i, j, k)$:
 - Znajdź normalną do lokalnej powierzchni i wyznacz (skoryguj) kolor punktu C_f .
 - Dokonaj ważenia koloru punktu przez jego (nie)przezroczystość: $C_f = C_f \cdot \alpha_f$
 - Wyznacz zmianę koloru i nieprzezroczystości promienia:
 - a) nieprzezroczystość $\alpha_i = \alpha_{i-1} + (1 - \alpha_{i-1})\alpha_f$
 - b) kolor: $C_i = C_{i-1} + (1 - \alpha_{i-1})C_f$
- Ustal kolor piksela w wynikowym obrazie na podstawie $C_p = C_i \cdot \alpha_i$

Realistyczne sceny 3W: metody nakładania tekstur



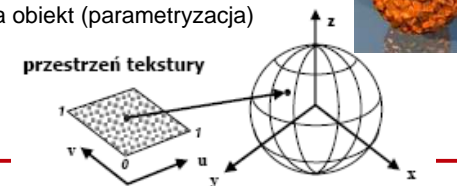
Tekstura jest funkcja $T(x, y, z)$, (w ogólności wektorowa) określona dla punktów leżących na powierzchni obiektu.



Metody: okresowe, fraktalne, probabilistyczne (modele Markowa) itp..

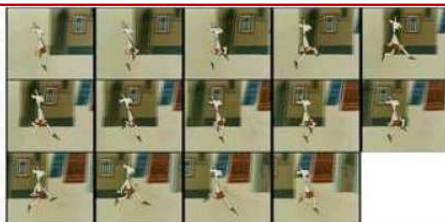
Nanoszenie (odwzorowanie) tekstury na obiekt (parametryzacja)

$$\begin{aligned} x &= R_x \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot u) \cdot \sin(v - \pi/2) \\ y &= R_y \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot u) \cdot \sin(v - \pi/2) \\ z &= R_z \cdot \cos(v - \pi/2) \end{aligned}$$



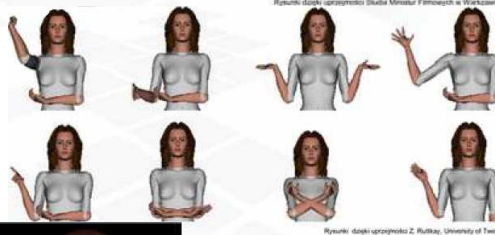
Animacje

- Poklatkowe, kluczowe, szkieletowe



Dziwne przygody Koziołka Matołka (1969-1971)

- Kinematyka prosta (odwrotna)



- Przechwytywanie ruchu

