

Grafika komputerowa

Wykład 10

Modelowanie oświetlenia

Romuald Kotowski

Instytut Informatyki i Automatyki
Państwowa Wyższa Szkoła Informatyki i Przedsiębiorczości w Łomży

2 0 0 9

Spis treści

1 Wstęp

2 Oświetlenie

- Wyznaczanie cieni
- Modelowanie oświetlenia
- Cieniowanie powierzchni przedmiotów
- Algorytm śledzenia promieni

3 Tekstura

Spis treści

1 Wstęp

2 Oświetlenie

- Wyznaczanie cieni
- Modelowanie oświetlenia
- Cieniowanie powierzchni przedmiotów
- Algorytm śledzenia promieni

3 Tekstura

Spis treści

1 Wstęp

2 Oświetlenie

- Wyznaczanie cieni
- Modelowanie oświetlenia
- Cieniowanie powierzchni przedmiotów
- Algorytm śledzenia promieni

3 Tekstura

Wstęp

Dziś omówimy:

- algorytm wyznaczania cieni dla obiektów wielościennych
- różne metody modelowania oświetlenia
- sposoby opisywania tekstury (mikrostruktury powierzchni)

Spis treści

1 Wstęp

2 Oświetlenie

- Wyznaczanie cieni
- Modelowanie oświetlenia
- Cieniowanie powierzchni przedmiotów
- Algorytm śledzenia promieni

3 Tekstura

Wyznaczanie cieni

Zadanie

Chcemy wyznaczyć cienie rzucane przez ściany wielokątne na inne ściany obiektu trójwymiarowego. Zakładamy, że źródło punktowe emituje we wszystkich kierunkach światło jednorodne.

Poszukując rozwiązania zadania trzeba będzie dwukrotnie rozstrzygnąć problem zasłaniania – najpierw z punktu widzenia źródła światła, a następnie obserwatora.

Opiszemy to postępowanie na przykładzie oświetlenia słonecznego. Możemy przyjąć, że promienie światła są równoległe i biegną w kierunku $\mathbf{k}$.

Wyznaczanie cieni

Algorytmu wyznaczania cieni

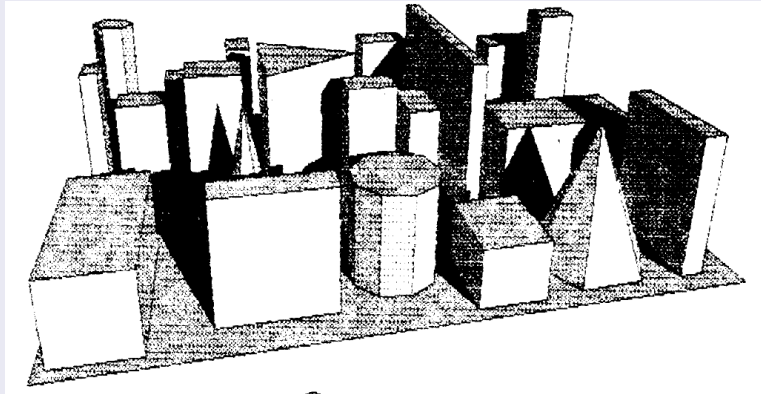
- Przekształcamy dane do układu obserwatora określonego przez kierunek oświetlenia $\mathbf{k}$.
- Tworzymy listę zasłonieć ścian w rzucie równoległym o kierunku $\mathbf{k}$. Otrzymujemy w ten sposób dla każdej ściany S_i ($i = 1, 2, \dots, n$) listę ścian zasłaniających S_i , czyli tych, które rzucają cień na S_i . Wyznaczamy części wspólne rzutu ściany S_i i rzutu każdej ze ścian, które ją zasłaniają, czyli wielokąty określające cienie.
- Przekształcamy dane z dotychczasowego układu obserwatora do nowego, zdefiniowanego położeniem środka rzutowani (przy rzucie perspektywicznym) lub kierunkiem patrzenia (w rzucie równoległym) na scenę. Te same przekształcenia wykonujemy na współrzędnych cieni wyznaczonych w poprzednim kroku.

Wyznaczanie cieni

Algorytmu wyznaczania cieni

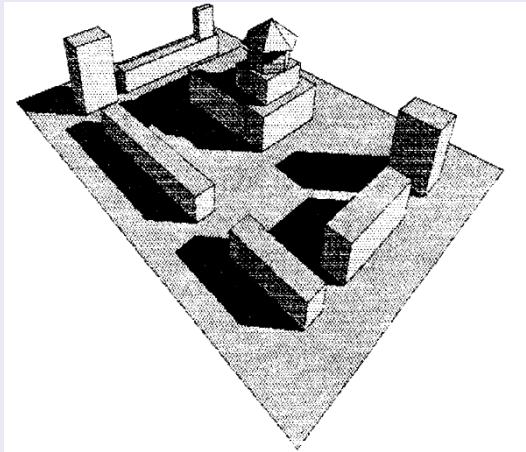
- Powtórnie określamy listę zasłonięć, tym razem w rzucie środkowym lub równoległym.
- Zaczynamy od ściany nie zasłaniającej żadnej innej, a dalej bierzemy ściany ewentualnie zasłaniające jedynie wcześniejsze. W tej kolejności rysujemy rzut ściany i na nim rzuty wszystkich padających na tę ścianę cieni, które zostały wyznaczone w kroku 2. algorytmu.

Wyznaczanie cieni



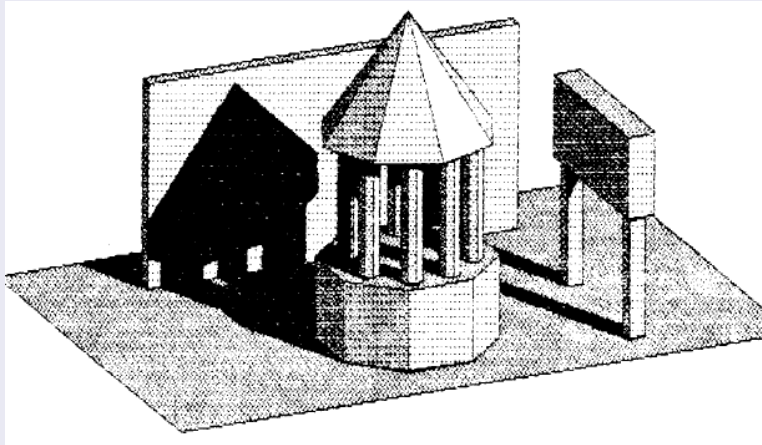
Rys. 1: Przykład wyznaczania cienia

Wyznaczanie cieni



Rys. 2: Przykład wyznaczania cienia

Wyznaczanie cieni



Rys. 3: Przykład wyznaczania cienia

Wyznaczanie cieni



Rys. 4: Cienie prawdziwe

Spis treści

1 Wstęp

2 Oświetlenie

- Wyznaczanie cieni
- **Modelowanie oświetlenia**
- Cieniowanie powierzchni przedmiotów
- Algorytm śledzenia promieni

3 Tekstura

Modelowanie oświetlenia

Postrzeganie przedmiotów polega na odbieraniu przez oko światła emitowanego przez przedmioty lub odbitego od ich powierzchni. Trudności modelowania oświetlenia wynikają m.in. ze zmiennych właściwości wzroku człowieka. Oko ludzkie reaguje na światło o natężeniu z szerokiego przedziału, którego granice pozostają w stosunku jak 1:100000. W razie zaadaptowania się do dużej jasności oko wykazuje największą wrażliwość na inne długości fal (czyli inne kolory) niż przy dostosowaniu się do słabego oświetlenia.

Intensywność światła odbitego od powierzchni zależy od oświetlających ją źródeł, a także od własności samej powierzchni.

Modelowanie oświetlenia

Czarne, matowe materiały pochłaniają znaczny procent energii padającego na nie promieniowania i wyglądają jednakowo, niezależnie od kierunku patrzenia. W wypadku białej kartki papieru oświetlonej promieniami Słońca zmiana jest tylko ilościowa – odbija się znacznie więcej światła, ale również równomiernie we wszystkich kierunkach. Takie odbicie nazywa się *rozproszonym*.

Przedmioty gładkie (np. wypolerowane naczynia metalowe) odbijają światło głównie w jednym kierunku. Patrząc na nie pod odpowiednim kątem, widzimy odbłask – jasną plamę w kolorze padającego światła, natomiast przy oglądaniu takiego przedmiotu z innych kierunków wydaje się on ciemny. Ten rodzaj odbicia światła nosi nazwę *kierunkowego* lub *zwierciadlanego*.

Modelowanie oświetlenia

Światło może pochodzić z różnych źródeł. Te, których rozmiar jest znikomy w stosunku do wielkości oglądanej sceny lub są odpowiednio odległe (np. Słońce), traktujemy jako źródła punktowe. Inaczej będzie przy oświetleniu wnętrza długą świetlówką lampy jarzeniowej. W przypadku tzw. liniowych źródeł światła wyznaczanie intensywności oświetlenia jest nieco bardziej skomplikowane niż w przypadku źródeł punktowych, do jakich się tutaj ograniczamy.

Z codziennych obserwacji wiemy, że widoczne są również przedmioty nie emitujące światła ani nie bezpośrednio oświetlone. Dzieje się tak, gdyż pochodzące z różnych źródeł światło, odbijane wielokrotnie od powierzchni i przenikające część z nich, w efekcie daje w pewnym otoczeniu jednorodne tło oświetleniowe. Jego intensywność będziemy oznaczali I_t .

Modelowanie oświetlenia

Niech k_i – współczynniki z przedziału $[0, 1]$ charakteryzujące zdolność danej powierzchni (przedmiotu) do:

- k_t – odbijania oświetlenia tła
- k_r – odbicia rozproszonego
- k_z – odbicia zwierciadlanego

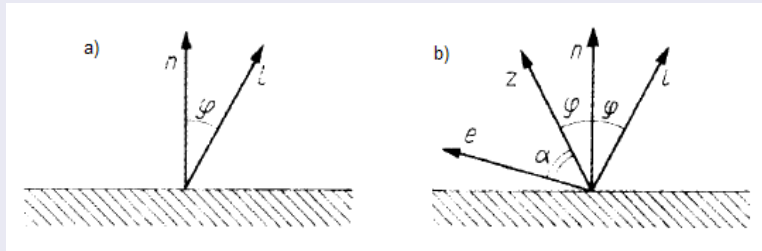
Modelowanie oświetlenia

Zajmijmy się najpierw jednym źródłem punktowym emitującym światło o natężeniu I_Z . Dla uproszczenia modelu zakładamy, że padające na powierzchnię promienie są równoległe. Intensywność odbitego światła rozproszonego jest proporcjonalna do cosinusa kąta φ padania promieni na daną powierzchnię. Ustawione prostopadle ($\varphi = 0^\circ = 0$) są bardziej oświetlone niż położone skośnie.

Niech $\mathbf{n}$ będzie wektorem normalnym do powierzchni, a $\mathbf{l}$ wektorem o kierunku padania promieni (rys. 5a). Wtedy

$$\cos \varphi = \mathbf{n} \cdot \mathbf{l}.$$

Modelowanie oświetlenia



Rys. 5: Odbicie zwierciadlane

Modelowanie oświetlenia

Oświetlenie rozproszone

Jeden z podstawowych wzorów fotometrii mówi, że natężenie oświetlenia maleje proporcjonalnie do kwadratu odległości od źródła światła.

Oznaczmy przez r długość drogi, jaką przebiega promień światła od źródła do oświetlanej powierzchni i dalej po odbiciu od niej do obserwatora. Jeśli uwzględnimy odbicie oświetlenia tła, to łącznie z odbitym światłem rozproszonym, jego intensywność wynosi

$$I = k_t I_t + k_r I Z(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) / r^2$$

Modelowanie oświetlenia

Oświetlenie rozproszone

W praktyce oświetlenie rozproszone lepiej modeluje wzór

$$I = k_t I_t + k_r (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) / (d + d_0)$$

d – odległość oświetlanego punktu powierzchni od źródła

d_0 – pewna stała, wartość dobiera się eksperymentalnie

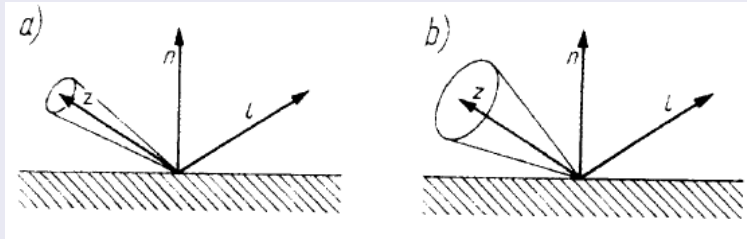
Modelowanie oświetlenia

Odbicie zwierciadlane

Na rysunku 5b wektor $\mathbf{z}$ wskazuje kierunek odbicia zwierciadlanego, a wektor $\mathbf{e}$ kierunek położenia obserwatora. Dla zwierciadeł idealnych kąt padania promienia i kąt odbicia są takie same, a odbicie kierunkowe światła może być zauważone tylko wtedy, gdy $\mathbf{z} = \mathbf{e}$, czyli gdy $\alpha = \angle(\mathbf{z}, \mathbf{e}) = 0^\circ$.

Rzeczywiste przedmioty nie są doskonałymi zwierciadłami i zależnie od własności swoich powierzchni odbijają światło nie tylko w kierunku $\mathbf{z}$, lecz także w kierunkach tworzących stożek, którego osią jest wektor $\mathbf{z}$.

Modelowanie oświetlenia



Rys. 6: Stożek w modelu Phong'a dla powierzchni: a) matowych; b) błyszczących

Model Bui-Tuong Phonga

- $m \approx 1$ – powierzchnie matowe
- $m \gg 1$ – powierzchnie gładkie i błyszczące
- $m = \infty$ – zwierciadło idealne

$$I = k_t I_t + k_r I Z (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l} + k(\psi) \cos^m \alpha) / (d + d_0)$$

$k(\psi)$ – zależność natężenia odbitego światła od kąta padania ψ (np. dla szkła dla małych ψ mamy $k(\psi) \approx 0$, a dla $\psi \approx 90^\circ$ mamy $k(\psi) \approx 1$).

Modelowanie oświetlenia

Model Bui-Tuong Phong

Widać, że $\cos \alpha = \mathbf{z} \cdot \mathbf{e}$. Jeśli przyjmiemy, że $k(\psi)$ jest stałe i $k(\psi) = k_z$, to

$$I = k_t I_t + k_r I_z (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l} + k_z (\mathbf{z} \cdot \mathbf{e})^m \alpha) / (d + d_0)$$

Gdy jest wiele (I_z) punktowych źródeł światła

$$I = k_t I_t + \sum_{i=1}^{I_z} k_r I_{z_i} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_i + k_z (\mathbf{z}_i \cdot \mathbf{e})^m \alpha) / (d_i + d_0)$$

Modelowanie oświetlenia

Model Torrance'a i Sparrowa

Powierzchnia to zbiór mikroskopijnych ścianek, będących idealnymi zwierciadłami. Zakłada się, że ścianki są nachylone losowo, a ich kierunki mają rozkład Gaussowski. Intensywność światła odbitego zwierciadłanie oblicza się, sumując natężenia światła odbijanego przez te ścianki, których wektory normalne mają kierunek dwusiecznej kąta między wektorami $\mathbf{e}$ i $\mathbf{l}$.

Modelowanie oświetlenia

Ciała przezroczyste

W wielu przypadkach, na przykład dla przedmiotów ze szkła, istotniejsze może być uwzględnienie ich oświetlenia światłem ze źródeł znajdujących się za przedmiotami, a przepuszczanym przez mniej lub bardziej przezroczyste materiały.

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

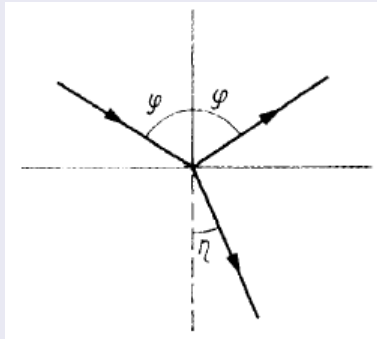
Prawo Snelliusa (patrz rys. 7)

$$r = \frac{\sin \varphi}{\sin \eta} = \frac{v_1}{v_2}$$

r – współczynnik załamania, φ – kąt padania, η – kąt załamania, v_i – prędkość światła w ośrodku i

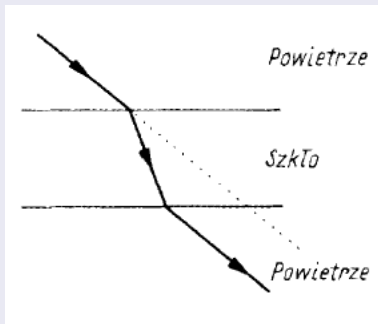
Modelowanie oświetlenia

Ciała przezroczyste



Rys. 7: Prawo załamania światła

Modelowanie oświetlenia



Rys. 8: Przesunięcie równoległe promienia świetlnego

r – współczynnik załamania, $= 1$ dla powietrza, $= 1.33$ dla wody, $= 1.5$ dla szkła potasowego

Modelowanie oświetlenia

Ciała przezroczyste

$$I = k_p I_b + (1 - k_p) I_0$$

k_p – współczynnik charakteryzujący przezroczystość danego materiału

I_b – natężenie światła dochodzącego ze źródeł znajdujących się za danym punktem powierzchni

I_0 – natężenie światła odbitego (zarówno w sposób rozproszony, jak i kierunkowy).

Spis treści

1 Wstęp

2 Oświetlenie

- Wyznaczanie cieni
- Modelowanie oświetlenia
- **Cieniowanie powierzchni przedmiotów**
- Algorytm śledzenia promieni

3 Tekstura

Cieniowanie powierzchni przedmiotów

Wyznaczanie intensywności oświetlenia odpowiadającego każdemu pikselowi tworzonego obrazu jest bardzo kosztowne. Są uproszczone metody cieniowania rysowanych przedmiotów, wymagające znacznie mniejszej liczby obliczeń.

Najprostszą metodą cieniowania obiektów wielościennych jest wyznaczenie stałej intensywności oświetlenia dla każdej ściany. Taki model w przybliżeniu odpowiada sytuacji, gdy zarówno źródło światła, jak i obserwator znajdują się daleko od obiektu. Stała intensywność oświetlenia ścian nie przeszkadza na przykład w przypadku sześcianu, natomiast nie powinna być stosowana do wizualizacji płaskich wielokątów aproksymujących powierzchnię krzywoliniową. Występuje bowiem wtedy tzw. **efekt Macha** – miejsca, gdzie krzywa natężenia oświetlenia powierzchni (wzdłuż dowolnej prostej) lub jej pochodna mają nieciągłości, wydają się jaśniejsze albo ciemniejsze, zależnie od oświetlenia ich otoczenia. To zjawisko skoków oświetlenia obserwuje się w pobliżu wszystkich krawędzi wspólnych dla dwóch sąsiednich ścian o różnej jasności. Jednym ze sposobów uniknięcia wrażenia nieciągłości natężenia światła jest jego interpolacja. Dwa różne rozwiązania tego typu zostały przedstawione przez Gourauda i Phonga.

Cieniowanie powierzchni przedmiotów

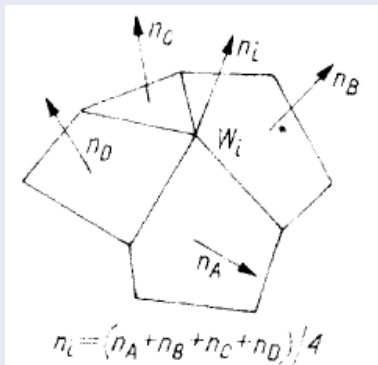
Metoda Gouroda

dla każdego wierzchołka W_i obiektu wielościennego

- wyznaczamy w W_i uśredniony wektor normalny, równy średniej arytmetycznej wektorów prostopadłych do wszystkich ścian, które ten wierzchołek ograniczają (rys. 9);
- znając wektor normalny, stosujemy jeden z poprzednio omówionych modeli do wyznaczenia natężenia światła w punkcie W_i ;

intensywność oświetlenia punktów wewnątrz kolejnego wielokąta (ściany) określamy przez liniową interpolację natężenia światła wzdłuż krawędzi, a między nimi – wzdłuż linii poziomych, którymi przeglądamy wielokąt.

Cieniowanie powierzchni przedmiotów



Rys. 9: Wyznaczanie średniego wektora normalnego metodą Gourauda

Cieniowanie powierzchni przedmiotów

Metoda Gourada

Drugi krok metody stanowi kolejną modyfikację algorytmu wypełniania wielokąta. Postępowanie ilustruje rys. 10.

Niech I_1, I_2, I_3 i I_4 oznaczają natężenie światła w wierzchołkach W_1, W_2, W_3 i W_4 cieniowanego czworokąta i niech $W_i = (x_i, y_i)$. Dla linii poziomej y oświetlenie I_A punktu $A = (x_A, y)$ wyznacza się ze wzoru

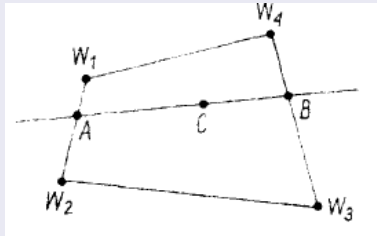
$$I_A = I_1 \frac{y - y_2}{y_1 - y_2} + I_2 \frac{y_1 - y}{y_1 - y_2}$$

i analogicznie dla punktu $B = (x_B, y)$. Wtedy

$$I_C = I_A \frac{x - x_B}{x_A - x_B} + I_B \frac{x_A - x}{x_A - x_B}$$

Model Gourauda daje znacznie bardziej realistyczne obrazy niż przy stałej intensywności oświetlenia całych ścian, ale ma wady. Przy wizualizacji tą metodą na przykład gładkich powierzchni metalowych odbłaski światła mają często nienaturalne kształty.

Cieniowanie powierzchni przedmiotów



Rys. 10: Interpolacja liniowa natężenia światła

Cieniowanie powierzchni przedmiotów

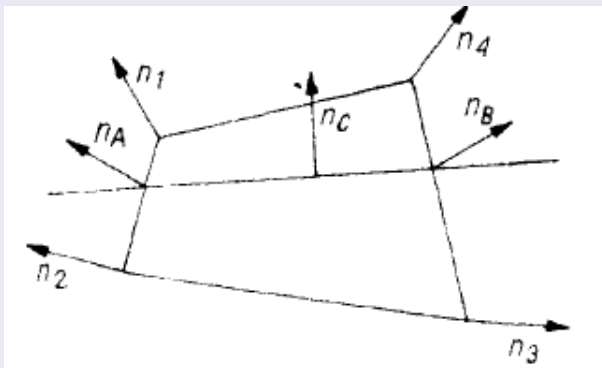
Metoda Phong

Zamiast interpolowania natężenia oświetlenia, interpoluje się wektory normalne do powierzchni w badanych punktach. Rysunek 11 ilustruje przykład omawiany poprzednio dla metody Gottrauda: wersory normalne $\mathbf{n}_A$ i $\mathbf{n}_B$ obliczamy przez liniową interpolację odpowiednio $\mathbf{n}_1$ i $\mathbf{n}_2$ oraz $\mathbf{n}_3$ i $\mathbf{n}_4$, a z nich wersor normalny $\mathbf{n}_C$ $\mathbf{n}_6$.

Liczba obliczeń w metodzie Phong jest znacznie większa niż w metodzie Gourauda, ale za to na ogół otrzymuje się istotnie lepsze obrazy.

Cieniowanie powierzchni przedmiotów

Metoda Phong



Rys. 11: Interpolacja liniowa wektorów normalnych w metodzie Phong

Spis treści

1 Wstęp

2 Oświetlenie

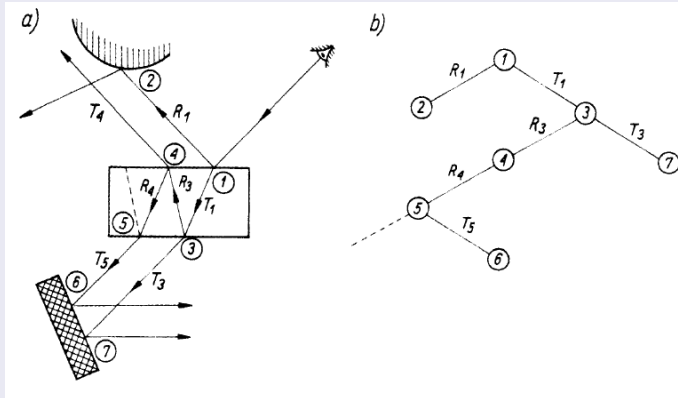
- Wyznaczanie cieni
- Modelowanie oświetlenia
- Cieniowanie powierzchni przedmiotów
- **Algorytm śledzenia promieni**

3 Tekstura

Algorytm śledzenia promieni

Bardziej kosztowną techniką modelowania oświetlenia, ale dającą lepsze efekty, jest śledzenie promieni światła. Źródła emitują nieskończenie wiele promieni w różnych kierunkach. Na ekranie monitora rastrowego pokazujemy tylko wąski wycinek przestrzeni, mieszczący się wewnątrz ostrośłupa widzenia. Ponadto tworzony obraz ma ograniczoną rozdzielczość. W algorytmach grafiki komputerowej postępuje się zatem odwrotnie niż w optyce geometrycznej, od obserwatora (środka rzutowania) promień prowadzi się przez środek każdego piksela w kierunku źródeł światła. Jeśli promień napotyka jakiś przedmiot, to częściowo odbija się od niego, a częściowo go przenika. Dalej śledzimy drogę dwóch promieni – odbitego i przepuszczonego (lub tylko pierwszego z nich, gdy ciało jest zupełnie nieprzezroczyste). Kierunek promienia odbitego określamy z równości kąta padania i odbicia, a przy promieniu przenikającym przedmiot uwzględniamy zmiany kierunku na granicy różnych ośrodków. Każdy z tych dwóch promieni może się dalej odbijać i/lub przenikać inne przedmioty itd. Drogę promienia (rys. 12a) od obserwatora przez środek danego piksela w stronę źródeł światła opisuje się drzewem binarnym (rys. 12b).

Algorytm śledzenia promieni



Rys. 12: a) Idea metody śledzenia promieni; b) drzewo opisujące drogę promienia

Algorytm śledzenia promieni

Zasadniczy koszt algorytmu (nawet 95% wykonywanych działań) wiąże się ze znajdowaniem przecięć promieni z powierzchniami przedmiotów. Aby uniknąć niepotrzebnych obliczeń, można najpierw określić kulę opisującą obiekt (cały przedmiot, jego ścianę, fragment powierzchni) i sprawdzić, czy promień przecina tę kulę. W tym celu wystarczy znaleźć odległość środka kuli od prostej (promienia) i porównać ze średnicą kuli. Ewentualne dalsze szukanie punktu przecięcia jest łatwe dla obiektów wielościennych – wyznaczamy punkt przecięcia prostej z płaszczyzną zawierającą ścianę i badamy, czy leży on wewnątrz trójkąta.

Algorytm śledzenia promieni

Znacznie bardziej skomplikowanym zadaniem jest obliczenie punktu przecięcia promienia z powierzchnią krzywoliniową. W przypadku powierzchni algebraicznych zdefiniowanych równaniem

$$Q(x, y, z) = \sum_{i,j,k} c_{ijk} x^i y^j z^k = 0$$

punkt przecięcia z promieniem

$$P(t) = E + t\mathbf{w} = (x_E + t x_w, y_E + t y_w, z_E + t z_w)$$

gdzie $E = (x_E, y_E, z_E)$ – położenie obserwatora, a $\mathbf{w} = [x_w, y_w, z_w]$ – wektor kierunkowy, określa wartość parametru t spełniając równanie

$$\sum_{i,j,k} c_{ijk} (x_E + t x_w)^i (y_E + t y_w)^j (z_E + t z_w)^k$$

Zadanie sprowadza się do wyznaczenia zer wielomianu.

Tekstura

Najbardziej realistyczne obrazy komputerowe uwzględniają mikrostrukturę rysowanych przedmiotów. Dla drewna są charakterystyczne nie tylko różnokolorowe słoje, lecz także porowatość. Tkaniny mają różnorodną fakturę, a na przykład powierzchnia glinianego dzbanka znacznie się różni od podobnego naczynia ze szkła. Te cechy przedmiotów są nazywane teksturą i stąd w grafice komputerowej *tekstutowaniem* określa się metodę modelowania drobniotkich detali rysowanych obiektów.

Tekstura

Bardzo często struktura danych definiujących przedstawianą scenę ma charakter powierzchniowy. Obiekt jest określony zbiorem płaskich ścian lub płatów powierzchni. Narzucając się wtedy rozwiązanie polega na zdefiniowaniu funkcji wektorowej dwóch zmiennych

$$\chi(u, v)$$

która każdemu punktowi ściany (płata) przyporządkowuje różne charakterystyki:

- kolor
- współczynniki odbicia i przenikania światła
- kierunek wektora normalnego itp

Określenie, na przykład, różnych kierunków wektorów prostopadłych do powierzchni (przypomnijmy, że mają one kluczowe znaczenie przy modelowaniu oświetlenia) pozwala symulować wypukłości i zmarszczki na zupełnie gładkich przedmiotach.

Tekstura

Wartości funkcji χ są często tablicowane – na przykład dygitalizując fotografię.

Metoda trójwymiarowego definiowania tekstury jest ogólniejsza i ma liczne zalety w stosunku do funkcji dwu zmiennych. Znikają kłopoty z dopasowaniem wzorców dla sąsiednich ścian (płatów). Znacznie łatwiej jest unikać zniekształceń, a także przekształcać teksturę przy transformacjach obiektu. Tekstutowanie to proces kosztowny, ale dający bardzo efektowne wyniki.

Literatura

[1] M. Jankowski, Elementy grafiki komputerowej, WNT, 2006

Koniec? :-)

Koniec wykładu 10