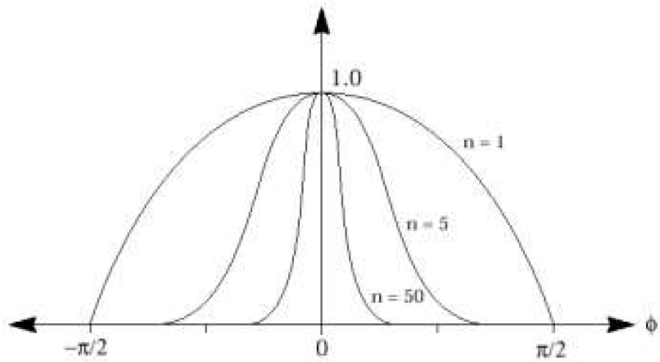
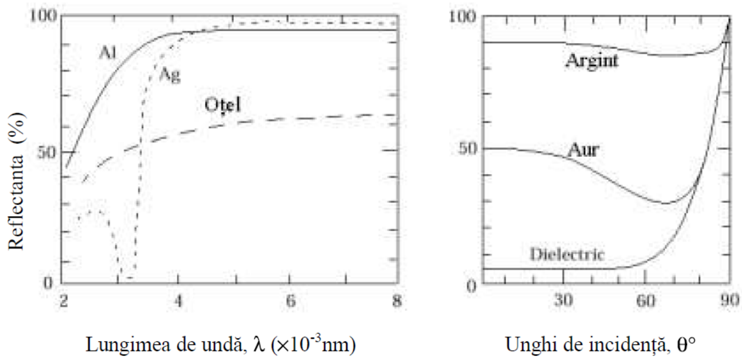
CURS 11 --Modelul Phong, Lambert, Gouraud.

1 Modelul Phong de iluminare

Phong a dezvoltat un model empiric în care intensitatea reflexiei speculare este proporțională cu $\cos^n \phi$. În Figura de mai jos se prezintă graficul funcției $\cos^n \phi$ pentru $-\frac{\pi}{2} \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$. Aici, n reprezintă proprietățile suprafeței și ia valori în domeniul $[1, 200]$. Pentru un reflector perfect, $n = \infty$, iar pentru un reflector foarte slab $n = 1$.



Pentru materiale reale, cantitatea de lumină reflectată specular depinde și de unghiul de incidență. În general, intensitatea reflexiei speculare crește cu creșterea unghiului de incidență. Relația exactă dintre ele depinde de proprietățile concrete ale suprafeței și reprezentăm aceasta printr-o funcție de reflexie speculară $W(\theta)$, cu valori în domeniul $[0, 1]$. Comportarea exactă a lui $W(\theta)$ variază de la o suprafață la alta. În Figura de mai jos este reprezentată dependența de lungimea de undă a luminii incidente și de unghiul de incidență pentru diferite materiale. De exemplu, în cazul sticlei, reflexia speculară crește de la aproape zero la intensitatea maximă pe măsură ce unghiul de incidență creste de la 0 la 90 . Alte materiale prezintă o variație mult mai mică și de aceea $W(\theta)$ este deseori înlocuit cu o constantă k_s determinată experimental, numită coeficient de reflexie speculară.



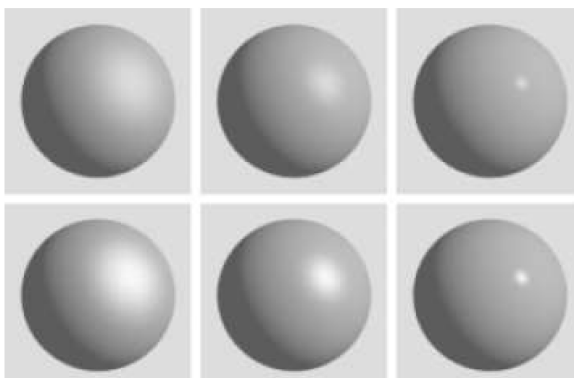
Acum putem să includem componenta de reflexie speculară în modelul nostru de iluminare din ecuația de mai sus:
I=componenta ambiantă + componenta difuză + componenta speculară
sau

$$I = k_d I_a + \frac{I_p}{(d + d_0)} \left[k_d (N \cdot L) + k_s \cos^n \phi \right]$$

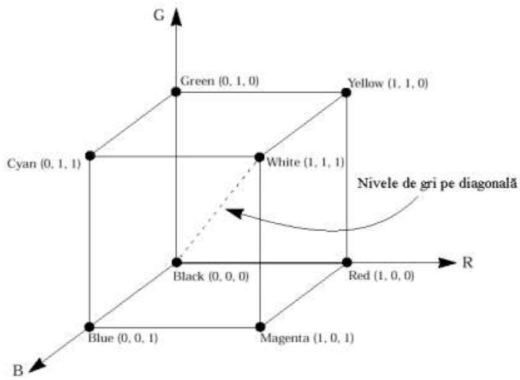
Întrucât R și V sunt normalizați, putem rescrie ecuația de mai sus sub formă vectorială:

$$I = k_d I_a + \frac{I_p}{(d + d_0)} \left[k_d (N \cdot L) + k_s (R \cdot V)^n \right]$$

În Figura de mai jos este prezentată o sferă iluminată conform Ecuației de mai sus, pentru diferite valori ale lui k_s și n.



În fiecare caz, $k_d = 0.4$ și $I_a = 20\%$ din I_p. Primul rând are $k_s = 0.25$, iar al doilea $k_s = 0.5$. De la stânga la dreapta, n=3, 10 și respectiv 100. Până acum am presupus că avem de-a face cu o sursă de lumină monocromă, și am ignorat faptul că obiectele au culoare. Vom exprima culoarea utilizând un model de culoare, care ne va permite să atribuim culorilor valori numerice. Un model uzual simplu este RGB, în care o culoare este reprezentată ca un amestec de trei culori primare, roșu, verde și albastru, corespunzătoare ecranului, după cum se vede în figura următoare:



Pentru a lua în considerație efectul iluminării colorate asupra obiectelor colorate, trebuie să aplicăm modelul nostru de iluminare pentru fiecare componentă a modelului de culoare utilizat. De exemplu, dacă utilizăm modelul RGB, vom trata separat componentele roșie, verde și albastră. Putem exprima culoarea suprafeței obiectelor printr-un coeficient de reflexie difuză dependent de culoare (k_{dR}, k_{dG}, k_{dB}). De asemenea, avem componente de culoare pentru lumina incidenta, I_{pR}, I_{pG}, I_{pB}., Deci, pentru componenta roșie modelul nostru devine:

$$I_R = k_{dR} I_{aR} + \frac{I_{pR}}{d + d_0} \left[k_d (N \cdot L) + k_s (R \cdot V)^n \right]$$

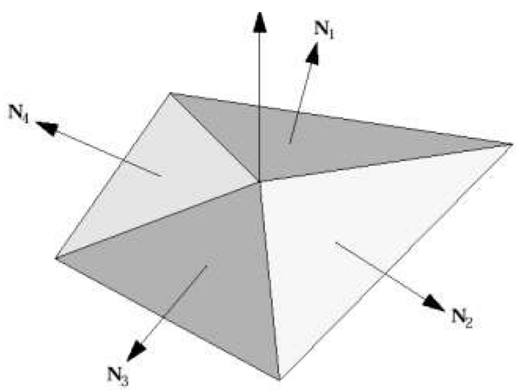
și similar pentru verde și albastru. Presupunem că pata datorată reflexiei speculare va fi de aceeași culoare ca și sursa de lumină, deci k_s nu depinde de culoare. Având cele trei intensități, I_R, I_G și I_B, și fiecare componentă în domeniul acceptat de display, le putem utiliza pentru controlul direct al monitorului RGB. Valori din afara domeniului se tratează după cum s-a prezentat mai înainte, prin limitare sau scalare globală. De asemenea, mai putem scala local culoare prin dividerea fiecărei componente cu valoarea maximă, o metodă care păstrează tonalitatea și saturația, dar modifică luminozitatea. Deși utilizarea modelului RGB duce de obicei la rezultate rezonabile, este o simplificare grosolană a interacțiunilor dintre lumină și obiecte. Pentru rezultate mai bune trebuie să aplicăm modelul de iluminare cu mai mult de trei culori primare. În loc să ne restrângem la un model de culoare cu trei componente, o formă mai generală a modelului de iluminare ar putea fi scrisă ca:

$$I_\lambda = k_{d\lambda} I_{a\lambda} + \frac{I_{p\lambda}}{d + d_0} \left[k_d (N \cdot L) + k_s (R \cdot V)^n \right]$$

în care oricare termeni dependenți de lungimea de undă sunt precizați prin indicele λ. Însă cum utilizăm aceste componente spectrale pentru a specifica un triplet RGB, de care avem nevoie pe display? O modalitate ar fi să le convertim în spațiul CIE XYZ și apoi în spațiul RGB al monitorului, ceea ce necesită cunoașterea aspectelor cromatice ale fosforului din monitor.

2 Modelul Gouraud

În această metodă, se calculează valorile intensităților în vârfurile poligonului, iar apoi acestea sunt interpolate, pentru a determina valoarea intensității în orice punct al poligonului. Metoda poartă numele de Umbrire Gouraud, după numele inventatorului său, Henri Gouraud (1971).



Mai întâi trebuie să determinăm intensitățile în vârfurile poligonului. Pentru a calcula intensitatea într-un vertex pe baza modelului nostru de iluminare, avem nevoie de normala în vertex. Nu putem utiliza normala poligonului, întrucât trebuie să luăm în considerație orientarea poligoanelor adiacente pentru a evita discontinuitățile în zona muchiilor. De fapt avem nevoie de normala la suprafața care este de fapt aproximată prin poligoane. Putem aproxima normala la suprafață într-un vertex calculând media normalelor poligoanelor de care aparține acel vertex. Fie poligonul din Figura de mai jos. Intensitatea I_Q în punctul Q se calculează prin interpolarea intensităților I_A în A și I_B în B:

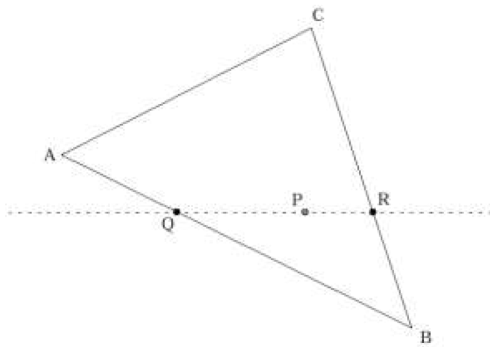
$$I_Q = u I_B + (1 - u) I_A,\ u = \frac{AQ}{AB}$$

Asemanator se procedeaza pentru punctul R:

$$I_R = wI_B + (1-w)I_C,\ w = \frac{CR}{CB}$$

Acum putem interpola pentru a obtine intensitatea în P:

$$I_P = vI_R + (1-v)I_Q,\ v = \frac{QP}{QR}$$



Pentru fiecare linie de scanare, putem accelera procesul dacă utilizăm calcul incremental. Pentru doi pixeli p_1 și p_2 la v_1, respectiv v_2 pe linia de scanare, avem

$$I_{P2} = v_2 I_R + (1-v_2)I_Q$$

si

$$I_{P1} = v_1 I_R + (1-v_1)I_Q$$

Prin scaderea celor doua relatii avem:

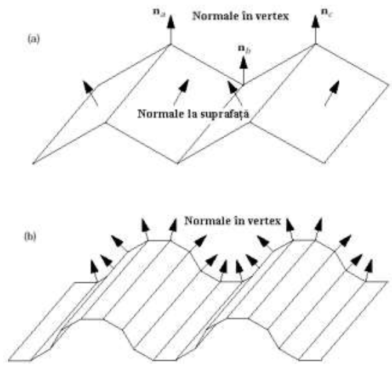
$$I_{P2} - I_{P1} = (I_R - I_Q)(v_2 - v_1)$$

Notam $I_R - I_Q = \Delta I$, iar $v_2 - v_1$ cu Δv, si atunci avem:

$$I_{P2} - I_{P1} = \Delta I \Delta v$$

Trebuie să calculăm I și v o singură dată pentru o linie de scanare, reducând calculul pentru un pixel la o singură adunare. Nu vom mai avea discontinuități în umbrire pentru poligoane adiacente. Intensitatea calculată prin interpolare pe o muchie va fi punctul de plecare pentru interpolarea pe următorul poligon.

Ce facem însă atunci când dorim ca o muchie să fie într-adevăr vizibilă? Metoda descrisă mai sus netezeste muchiile ca ele să dispară. Rezolvarea este să efectuăm acțiuni speciale atunci când dorim o muchie reală: calculăm două normale în vertex, câte una pentru fiecare fațetă, fiecare calculată prin medierea normalelor la suprafața poligoanelor de pe partea corespunzătoare. O altă problemă este prezentată în figura de mai jos:



Aici fațetele adiacente au fost astfel aranjate încât normalele mediate n_a, n_b și n_c sunt paralele. Ca urmare fiecare fațetă va avea aceeași umbrire și suprafața va apărea incorect ca fiind plată. Una dintre soluții ar fi să introducem poligoane suplimentare, ca în Figură. Interpolarea intensității nu elimină complet efectul de bandă Mach, dar rezultatele sunt mult mai realiste decât în cazul umbririi constante. Această tehnică de interpolare poate de asemenea să distorsioneze petele luminoase datorate reflexiei speculare. O altă problemă apare atunci când o pată luminoasă datorată reflexiei speculare este plasată în interiorul unui poligon ea va fi netezită și nu va mai fi vizibilă.

3 Interpolarea vectorilor normali

Această tehnică utilizează o metodă de interpolare similară, cu diferența că se interpolează vectorul normală la suprafață, și nu intensitatea. Această metodă mai este cunoscută sub numele de interpolare Phong. Normalele în vertex-uri se calculează la fel ca în cazul metodei interpolării intensității. În Figura de mai sus, dacă normala în punctul P este n_P, avem:

$$n_Q = un_B + (1-u)n_A$$

$$n_R = wn_B + (1-w)n_C$$

$$n_P = vn_R + (1-v)n_Q$$

unde u, v si w sunt aceiași ca mai înainte. De asemenea, normala poate fi calculată incremental. Rezultatul este mult mai realist decât în cazul metodei interpolării intensității, mai ales atunci când se ia în considerație și reflexia speculară petele luminoase sunt mult mai bine reprezentate, iar efectul de bandă Mach este mult redus (din pacate, în cazul sferelor și cilindrilor mai este posibil să apară efectul de bandă Mach). Dezanvantajul metodei constă în necesarul mai mare de calcul pentru fiecare punct din poligon; trebuie efectuate calcule complete de umbrire, pe baza normalei interpolate în acel punct.

4 Modelul Lambert de iluminare

Lumina este un factor foarte important în redarea cât mai realistă a unei scene 3D. Împreună cu proprietățile de material ale unui obiect, lumina determină modalitatea în care obiectul este afișat în scena 3D.

Există mai multe modele empirice pentru calculul reflexiei luminii într-un punct al unei suprafețe: Phong (1975), Blinn (1977), Oren-Nayar (1994), Cook-Torrance (1981), Lambert (1760), etc (la curs veți discuta despre modelul Lambert, Phong și Blinn).

Ca model de reflexie vom prezenta în continuare un model care extinde modelul de reflexie Phong și care conține toate cele 4 componente care pot fi folosite pentru a calcula iluminarea. Pentru a obține astfel culoarea într-un punct al unei suprafețe vom avea următoarele componente :

Componenta emisivă
Componenta ambientală
Componenta difuză
Componenta speculară
Contribuția fiecărei componente este calculată ca o combinație dintre proprietățile de material ale obiectului (factorul de strălucire și de difuzie al materialului) și proprietățile sursei de lumină (culoarea sursei de lumină, poziția sursei de lumină).

Astfel, culoarea finală a luminii într-un punct aparținând unei suprafețe este:

culoare = emisiva + ambientala + difuza + speculara;
În cele ce urmează prezentăm pe scurt ce reprezintă cele 4 componente și cum pot fi calculate.

4.1 Componenta emisivă

Aceasta reprezintă lumina emisă de un obiect și nu ține cont de nicio sursă de lumină. O utilizare des întâlnită pentru componenta emisivă este aceea de a simula obiectele care au strălucire proprie (de ex: sursele de lumina precum neonul sau televizorul).

Avem astfel:

emisiva = Ke;
Ke – culoarea emisivă a materialului

4.2 Componenta ambientală

Aceasta reprezintă lumina reflectată de către obiectele din scenă de atât de multe ori încât pare să vină de peste tot.

Astfel, lumina ambientală nu vine dintr-o direcție anume, apărând ca și cum ar veni din toate direcțiile. Din această cauză, componenta ambientală este independentă de poziția sursei de lumină.

Componenta ambientală depinde de culoarea de material ambientală a suprafeței obiectului și de culoarea ambientală luminii.

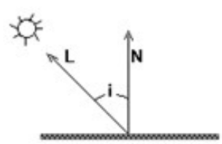
Similar componentei emisive, componenta ambientală este o constantă (se poate extinde modelul atribuind fiecărei lumini din scenă o culoare ambientală).

Avem astfel:

ambientala = Ka * culoareAmbientalaGlobala
Ka – constanta de reflexie ambientală a materialului
culoareaAmbientalaGlobala – culoarea ambientală a luminii

4.3 Componenta difuză

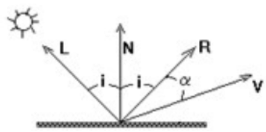
Aceasta reprezintă lumina reflectată de suprafața obiectului în mod egal în toate direcțiile.



Cantitatea de lumină reflectată este proporțională cu unghiul de incidență al razei de lumină cu suprafața obiectului.
Avem astfel: difuza=Kd $culoareLumina$ max($\vec{N}\vec{L}$,0)
Kd - constanta de reflexie difuză a materialului
culoareLumina – culoarea luminii
N – normala la suprafață (normalizată)
L – vectorul direcției luminii incidente (normalizat)
– produsul scalar $\vec{N}\vec{L}$ reprezintă măsura unghiului dintre acești 2 vectori; astfel, dacă i este mai mare decât $\frac{\pi}{2}$ valoarea produsului scalar va fi mai mică decât 0, acest lucru însemnând că suprafața nu primește lumină (sursa de lumină se află în spatele suprafeței) și de aici și formula care asigură că în acest caz suprafața nu primește lumină difuză.

Componenta speculară

Un reflector perfect, de exemplu o oglindă, reflectă lumina numai într-o singură direcție $\vec{R}$, care este simetrică cu $\vec{L}$ față de normala la suprafață. Prin urmare, doar un observator situat exact pe direcția respectivă va percepe raza reflectată.



Componenta speculară reprezintă lumina reflectată de suprafața obiectului numai în jurul acestei direcții, $\vec{R}$. Acest vector se obține prin:

```
vec3 R = reflect (-L, N) # GLSL
```

- Este necesar să se utilizeze -L deoarece `reflect()` are primul parametru vectorul incident care intră în suprafață, nu cel care iese din ea așa cum este reprezentat în figură

În modelul Phong se aproximează scăderea rapidă a intensității luminii reflectate atunci când α crește prin $(cos\alpha)^n$, unde n este exponentul de reflexie speculară al materialului (shininess).

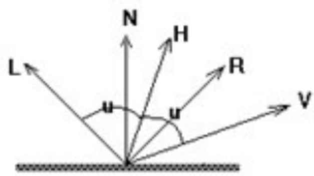
După cum se observă, față de celelalte 3 componente, componenta speculară depinde și de poziția observatorului. Dacă observatorul nu se află într-o poziție unde poate vedea razele reflectate, atunci nu va vedea reflexie speculară pentru zona respectivă. De asemenea, nu va vedea reflexie speculară dacă lumina se află în spatele suprafeței.

Astfel avem: $speculara = K_s \cdot culoareLumina \cdot primesteLumina \cdot (max(\vec{V} \cdot \vec{R}, 0))^n$

```
speculara = Ks * culoareLumina * primesteLumina * pow(max(dot(V, R), 0), n) # GLSL
```

- Ks - constanta speculară de reflexie a materialului
- V – vectorul direcției de vizualizare (normalizat)
- R – vectorul direcției luminii reflectate (normalizat)
- n – coeficientul de strălucire (shininess) al materialului
- primesteLumina – 1 dacă $\vec{N} \cdot \vec{L}$ este mai mare decât 0; sau 0 în caz contrar

Un alt model de iluminare (Blinn (1977)) pentru componenta speculară se bazează pe vectorul median, notat cu $\vec{H}$. El face unghiuri egale cu $\vec{L}$ și cu $\vec{V}$. Dacă suprafața ar fi orientată astfel încât normala sa să aibă direcția lui $\vec{H}$, atunci observatorul ar percepe lumina speculară maximă (deoarece ar fi pe direcția razei reflectate specular).



Termenul care exprimă reflexia speculară este în acest caz: $(\vec{N} \cdot \vec{H})^n$

```
pow(dot(N, H), n) # GLSL
```

- $\vec{H} = (\vec{L} + \vec{V})$ (normalizat)

Atunci când sursa de lumină și observatorul sunt la infinit, utilizarea termenului $\vec{N} \cdot \vec{H}$ este avantajoasă deoarece $\vec{H}$ este constant.

Ţinând cont de toate acestea, avem pentru componenta speculară următoarea formulă: $specular a = K_s \cdot culoareLumina \cdot primesteLumina \cdot (max(\vec{N} \cdot \vec{H}, 0)^n$

```
speculara = Ks * culoareLumina * primesteLumina * pow(max(dot(N, H), 0), n) # GLSL
```

Atenuarea intensității luminii

Atunci când sursa de lumină punctiformă este suficient de îndepărtată de obiectele scenei vizualizate, vectorul $\vec{L}$ este același în orice punct. Sursa de lumină este numită în acest caz direcțională. Aplicând modelul pentru vizualizarea a două suprafețe paralele construite din același material, se va obține o aceeași intensitate (unghiul dintre $\vec{L}$ și normală este același pentru cele două suprafețe). Dacă proiecțiile suprafețelor se suprapun în imagine, atunci ele nu se vor distinge. Această situație apare deoarece în model nu se ține cont de faptul că intensitatea luminii descrește proporțional cu inversul pătratului distanței de la sursa de lumină la obiect. Deci, obiectele mai îndepărtate de sursă sunt mai slab luminate. O posibilă corecție a modelului, care poate fi aplicată pentru surse poziționale (la distanță finită de scenă) este:

```
culoareObiect = emisiva + ambientala + factorAtenuare * ( difuza + speculara ); # GLSL
```

- factorAtenuare = $1/d^2$ este o funcție de atenuare
- d este distanța de la sursă la punctul de pe suprafață considerat

O aproximare mai bună este următoarea: factorAtenuare = $1/(K_c + K_l \cdot d + K_q \cdot d^2)$

- K_c - factorul de atenuare constant
- K_l - factorul de atenuare liniar
- K_q - factorul de atenuare patratic

Modele de shading

De asemenea, există mai multe modele de shading, care specifică metoda de implementare a modelului de calcul al reflexiei luminii. Mai exact, modelul de shading specifică unde se evaluează modelul de reflexie. Dacă vrem să calculăm iluminarea pentru o suprafață poligonală:

- în modelul de shading Lambert, se calculează o singură culoare pentru un poligon al suprafeței
- în modelul de shading Gouraud (1971), se calculează câte o culoare pentru fiecare vârf al unui poligon. Apoi, culorile fragmentelor poligonului se calculează prin interpolare între vârfuri (interpolarea liniară a culorilor vârfurilor, pentru fragmentele de pe laturi și interpolare liniară între culorile capetelor fiecărui segment interior, pentru fragmentele interioare poligonului). Calcularea culorilor vârfurilor se poate efectua în vertex shader.
- în modelul de shading Phong (1975), se calculează câte o normală pentru fiecare vârf al unui poligon. Apoi, pentru fiecare fragment se determină o normală prin interpolare între normalele din vârfuri. Astfel, se calculează o culoare pentru fiecare fragment al unui poligon (în fragment shader)

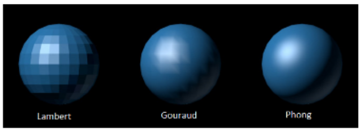


Figura 1. Diferite modele de shading: Lambert (o culoare per primitivă), Gouraud (o culoare per vârf), Phong (o culoare per fragment)

5 BIBLIOGRAFIE

1. https://ocw.cs.pub.ro/courses/egc/laboratoare/07