

Osvětlování a stínování

Pavel Strachota

FJFI ČVUT v Praze

8. dubna 2025

Obsah

- 1 Vlastnosti osvětlovacích modelů
- 2 Světelné zdroje a stíny
- 3 Phongův osvětlovací model
- 4 Stínování
- 5 Mlha
- 6 Optimalizované osvětlování

Obsah

- 1 Vlastnosti osvětlovacích modelů
- 2 Světelné zdroje a stíny
- 3 Phongův osvětlovací model
- 4 Stínování
- 5 Mlha
- 6 Optimalizované osvětlování

Úvod

Dosud umíme:

- sestrojít 3D scénu, reprezentovat ji datovou strukturou
- promítnout scénu na průmětnu (obrazovku, plátno, ...)
 - každý bod scény má „barvu“

Správnou „barvu“ vypočítáme **osvětlovacím modelem** za použití:

- definice vlastností materiálu, z něž jsou tvořeny objekty
 - barva, textura, mapovací funkce, koeficient odrazu, průhlednost, index lomu,... (a další v závislosti na osvětlovacím modelu)
- definice světelných zdrojů

Osvětlovací model

- model pro výpočet parametrů (barva, intenzita) světla, které přichází z daného místa scény
- pouze **přiblížení reality** - čím složitější model, tím složitější popis vlastností materiálů i světelných zdrojů

Dva typy osvětlovacích modelů:

- **fyzikální** - navržen na základě fyzikálních poznatků o šíření světla, pracuje s fyzikálními veličinami (radiance, intenzita, zářivý tok, zářivý výkon atd.)
 - **lokální** - uvažuje pouze přímé zdroje světla, zajímá se o každý bod scény zvlášť
 - **globální** - zahrnuje vícenásobně odražené a rozptýlené světlo ve scéně
např. *metoda radiozity* - výpočet energetické bilance viditelného světla ve scéně \implies numerické řešení osvětlovací rovnice
- **empirický** - založený na pozorování a zkušenosti

Návrh a použití empirického osvětlovacího modelu

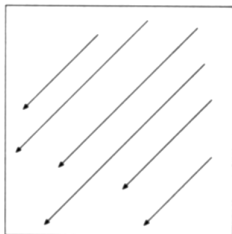
- **sestavení osvětlovací rovnice** (= předpisu, jak nalézt barvu daného bodu na povrchu objektu) na základě
 - poloh světelných zdrojů a pozorovatele
 - polohy zkoumaného bodu a normály povrchu, na němž leží
 - parametrů světelných zdrojů a materiálu, z něhož je zkoumaný bod (resp. celý objekt či alespoň část povrchu)
- **stínování** objektu, resp. polygonu
 - 1 „**osvětlování**“ = **aplikace osvětlovacího modelu** (vyčíslení osvětlovací rovnice) v několika místech objektu
 - 2 výpočet (skutečně vykreslované) barvy objektu ve všech pixelech, které zakrývá, s využitím informace z bodu 1

Obsah

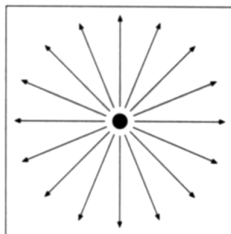
- 1 Vlastnosti osvětlovacích modelů
- 2 Světelné zdroje a stíny**
- 3 Phongův osvětlovací model
- 4 Stínování
- 5 Mlha
- 6 Optimalizované osvětlování

Typy světelných zdrojů

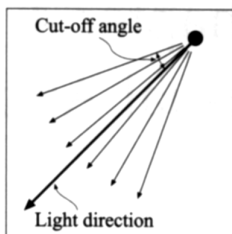
- **směrové světlo** - umístěné nekonečně daleko, vrhá rovnoběžně dopadající paprsky s konstantní intenzitou (slunce)
- **bodové světlo** - bod, který vyzařuje na všechny strany
- **reflektor (spot light)** - bodové světlo, které vyzařuje pouze v předepsaném kuželu.



Directional Light



Point Light



Spot Light

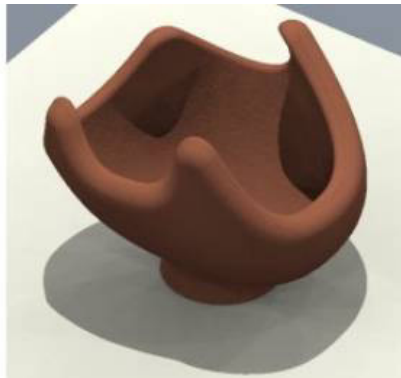
Vlastnosti světelných zdrojů

- bodové světlo + reflektor = poziční světlo (má danou pozici v prostoru)
 - úbytek intenzity se vzdáleností (ne vždy uvažován)
- každý světelný zdroj má svoji intenzitu, resp. barvu (stačí v RGB tvaru)
- skutečné světelné zdroje nejsou bodové \implies stíny vrhané objekty nejsou ostré (viz dále)

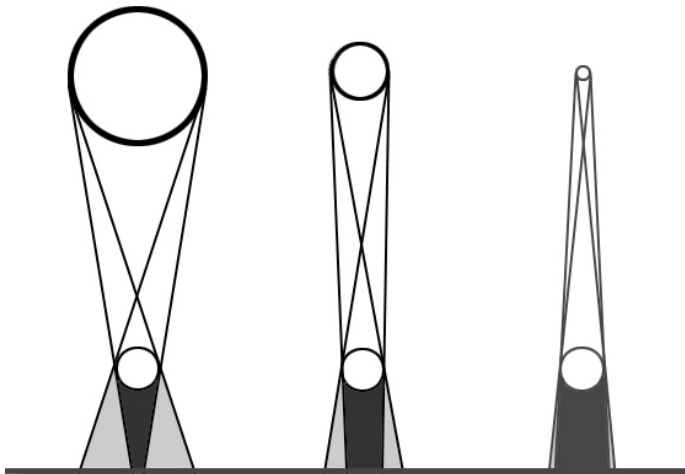
Stíny

- zvyšují realističnost scény, vypovídají o umístění světelných zdrojů
- **bodové** zdroje světla \implies **ostré** stíny (*hard shadows*) - nereálné
- **plošné** zdroje světla \implies **měkké** stíny (*soft shadows*)
 - úplný stín (*umbra*)
 - polostín (*penumbra*)
- stín (z hlediska počítačové grafiky)
 - **vlastní** - těleso zastiňuje část sebe sama
 - **vržený** - stín tělesa vržený na jiné objekty

Tvrdé a měkké stíny



Úplný stín a polostín (zatemnění Slunce)



Metody vykreslování stínů

1 globální zobrazovací metody

- používají globální osvětlovací model, nebo rekurzivně aplikovaný lokální model (raytracing)
- stíny jsou přímo součástí scény
- výpočetně náročné, pomalé
- metody zobrazující měkké stíny: distribuovaný (stochastický) raytracing, radiozita, fotonové mapy

2 samostatné metody

- použití v reálném čase
- převod zobrazení stínu na geometrický problém - obvykle řešení viditelnosti

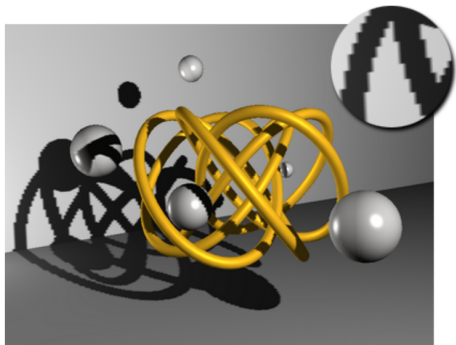
Mapování a vykreslování stínů

(pouze pro bodové zdroje světla)

- *shadow mapping*
- **projekční metody** - promítání jednoho tělesa na zbytek 3D scény (průmětny = polygonální plošky), kde středem promítání je světelný zdroj
- **metoda stínového tělesa** - průniky polygonů se zobecněným komolým kuželem:
 - podstava - polygon, který vrhá stín
 - vrchol - světelný zdroj
- **stínová paměť hloubky** (z-buffer)

Stínová paměť hloubky

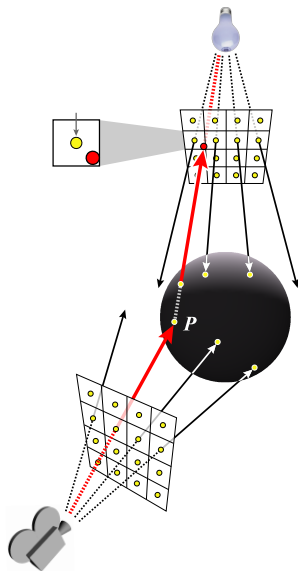
- využívá z-buffer pro kameru i pro světelné zdroje
- obecná, rychlá metoda vhodná pro HW implementaci
- obrazová metoda (*image-precision*)
- viz řešení viditelnosti
- konečné rozlišení z-bufferů
⇒ aliasing
 - např. tzv. *self-shadow* (polygon vrhá stín sám na sebe)



Stínová paměť hloubky

Algoritmus

- 1 výpočet **stínového z-bufferu** pro vzdálenost scény od světla
- 2 zobrazení scény pomocí (klasického) z-bufferu
- 3 transformace zobrazených bodů do VCS (souř. systému průmětny) světla
- 4 ztmavení bodů, které jsou dále od světla, než je uloženo v jeho stínovém z-bufferu

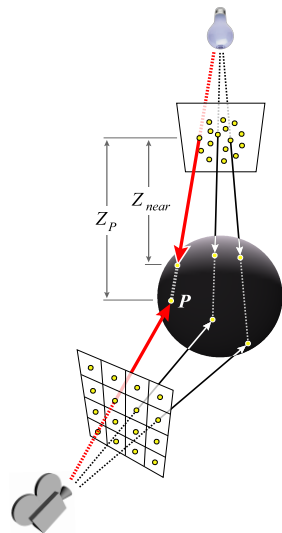
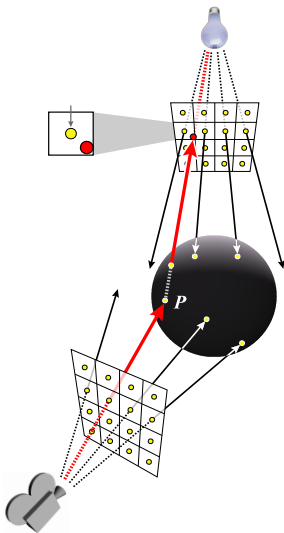


Nepravidelná stínová paměť hloubky 1/2

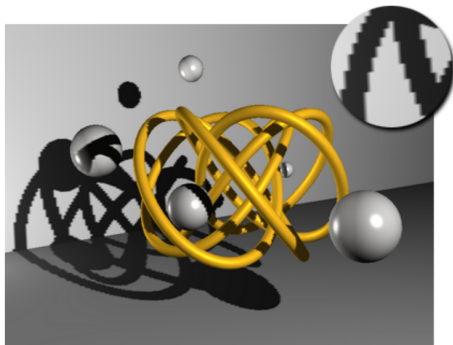
- vzorky v z-bufferu uloženy nepravidelně



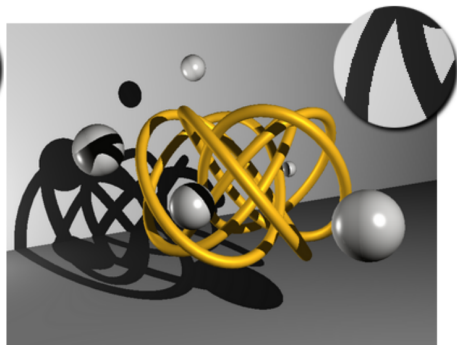
- nejprve zobrazení scény, pak teprve výpočet stínového z-bufferu
- *ray casting* (objekt po objektu)



Nepravidelná stínová paměť hloubky 1/2



klasický z-buffer



nepravidelný z-buffer

Obsah

- 1 Vlastnosti osvětlovacích modelů
- 2 Světelné zdroje a stíny
- 3 Phongův osvětlovací model**
- 4 Stínování
- 5 Mlha
- 6 Optimalizované osvětlování

Phongův osvětlovací model - úvod

- empirický, lokální osvětlovací model
- velmi populární, často používaný v reálné grafice
- implementován v HW i v knihovnách (OpenGL, ...)
- několik složek tvořících výslednou barvu objektu podle různých pravidel

Úmluva

- barvy (a zároveň intenzity) vyjádřené pomocí RGB

$$c = (c_R, c_G, c_B)$$

- násobení barev po složkách:

$$c \otimes d = (c_R d_R, c_G d_G, c_B d_B)$$

Složky světla tvořící barvu materiálu

- 1 **ambientní** - simuluje odražené a rozptýlené světlo ve scéně - materiálová konstanta m_A určuje barvu objektu vzhledem k ambientnímu světlu
 - 2 **difuzní** - odraz světla ze světelných zdrojů od matného povrchu - barva m_D
 - 3 **zrcadlová** (*specular*) - odraz světla ze světelných zdrojů od lesklého povrchu - barva m_S
- a v rekurzivním raytracingu navíc ještě -
 - 4 **odražená** (*reflected*) - odraz světla přicházejícího od jiných objektů
 - 5 **lomená** (*refracted*) - příspěvek světla lomeného paprsku
-
- rozlišení barev m_A , m_D , m_S nemá fyzikální podstatu, ale dává větší kontrolu nad vzhledem scény

Ambientní složka

- ambientní složka osvětlení daného bodu je

$$I_A = s_A \otimes m_A,$$

kde s_A je barva ambientního osvětlení scény.

Příklad

Ve žlutém světle se modrý objekt jeví jako černý, fialový objekt jako červený:

$$(1, 1, 0) \otimes (0, 0, 1) = (0, 0, 0),$$

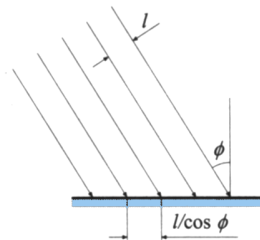
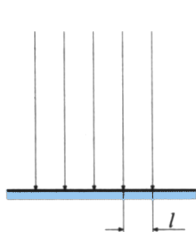
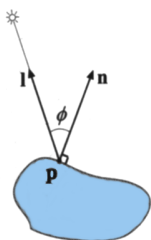
$$(1, 1, 0) \otimes (1, 0, 1) = (1, 0, 0).$$

Difuzní složka 1/2

- složka invariantní vůči úhlu pohledu - povrch odráží světlo difuzně do všech směrů
- množství odraženého světla v bodě p s normálou \mathbf{n} je však dáno polohou vůči světelnému zdroji barvy s ve směru jednotkového „světelného“ vektoru \mathbf{l} :

Lambertův zákon

$$I_D = s \otimes m_D \cdot \cos \phi = s \otimes m_D \cdot (\mathbf{l} \cdot \mathbf{n})$$



Difuzní složka 2/2

Poznámky

- barva zdroje s , resp. jeho intenzita, může dále záviset na vzdálenosti bodu od zdroje
 - kvůli poklesu intenzity s druhou mocninou vzdálenosti (u bodových zdrojů)
 - kvůli tlumení způsobenému prostředím (*attenuation*)
- barva zdroje s může záviset na pozici \mathbf{p} vůči zdroji (pro reflektory)

⇒ obecně $s = s(\mathbf{p})$

- pro úhel $\phi > \frac{\pi}{2}$ (kdy $\cos \phi < 0$) k odrazu nedochází (odvrácená plocha)

⇒ upravený vzorec pro Lambertův zákon

$$I_D = s(\mathbf{p}) \otimes m_D \cdot \max((\mathbf{l} \cdot \mathbf{n}), 0)$$

Zrcadlová složka 1/3

- odlesky vylepšují vnímání zakřivenosti povrchu a umístění světelných zdrojů
- závisí na
 - poloze světelného zdroje vzhledem k bodu \mathbf{p} (určena jednotkovým vektorem \mathbf{l})
 - poloze pozorovatele vzhledem k \mathbf{p} (jednotkový vektor \mathbf{v})
 - exponentu zrcadlového odrazu h (*specular reflection exponent*) - materiálová konstanta

Phongův vzorec pro zrcadlovou složku - obecný tvar

$$I_S = s(\mathbf{p}) \otimes m_S \cdot \Sigma(\mathbf{l}, \mathbf{n}, \mathbf{v})^h,$$

kde $\Sigma(\mathbf{l}, \mathbf{n}, \mathbf{v}) \in [0, 1]$ je míra odrazivosti závislá na vzájemné pozici zdroje, pozorovatele a \mathbf{p}

Zrcadlová složka 2/3

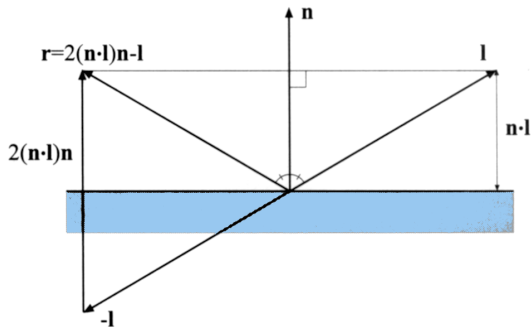
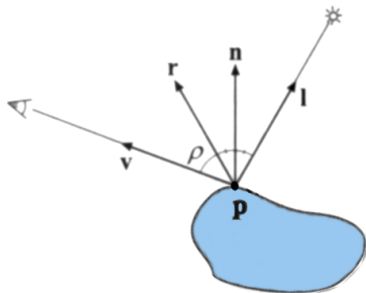
1. možnost výpočtu Σ

- vypočítáme vektor \mathbf{r} jako zrcadlový obraz \mathbf{l} podle \mathbf{n} :
 - projekce \mathbf{l} na \mathbf{n} je $(\cos \phi) \mathbf{n} = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) \mathbf{n}$ a proto

$$\mathbf{r} = 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) \mathbf{n} - \mathbf{l}$$

- vypočítáme $\Sigma(\mathbf{l}, \mathbf{n}, \mathbf{v})$ jako

$$\Sigma = \max(\cos \rho, 0) = \max(\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}, 0)$$



Zrcadlová složka 3/3

2. možnost výpočtu Σ

- vypočítáme „půlvektor“ \mathbf{h} (*halfway vector*) mezi \mathbf{l} a \mathbf{v} a normalizujeme jej

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{l} + \mathbf{v}}{|\mathbf{l} + \mathbf{v}|}$$

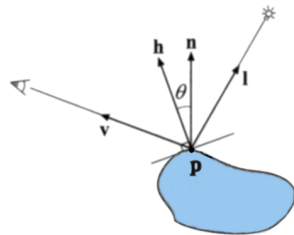
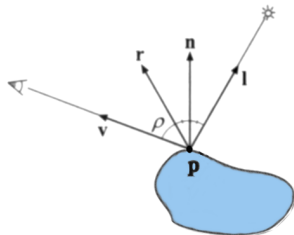
- vypočítáme $\Sigma(\mathbf{l}, \mathbf{n}, \mathbf{v})$ jako

$$\Sigma = \max(\cos \theta, 0) = \max(\mathbf{n} \cdot \mathbf{h}, 0)$$

místo

$$\Sigma = \max(\cos \rho, 0) = \max(\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}, 0)$$

- výhoda: směrové světlo a rovnoběžné promítání $\implies \mathbf{h}$ konstantní
- podobný, ale přesto **rozdílný** výsledek



Phongův osvětlovací model - shrnutí

- osvětlovací rovnice - součet všech složek

$$I = I_A + I_D + I_S$$

- obecně n světelných zdrojů se světelnými vektory \mathbf{l}_k a barvami \mathbf{s}_k , $k \in \{1, 2, \dots, n\}$

Rovnice Phongova osvětlovacího modelu

$$I = \mathbf{s}_A \otimes m_A + \sum_{k=1}^n \mathbf{s}_k(\mathbf{p}) \otimes (m_D \cdot (\mathbf{l}_k \cdot \mathbf{n}) + m_S \cdot \Sigma(\mathbf{l}_k, \mathbf{n}, \mathbf{v})^h)$$

- možnost přidání členu vlastního vyzařování objektu (*emission*) - m_E - těleso samo „září“, ale není světelným zdrojem

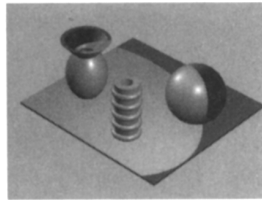
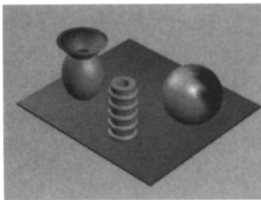
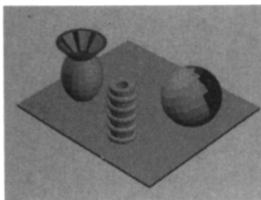
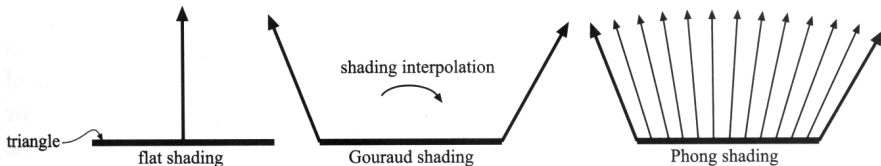
Obsah

- 1 Vlastnosti osvětlovacích modelů
- 2 Světelné zdroje a stíny
- 3 Phongův osvětlovací model
- 4 Stínování**
- 5 Mlha
- 6 Optimalizované osvětlování

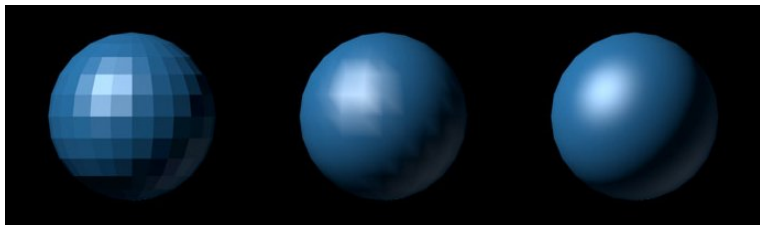
3 typické metody stínování

- 1 **konstantní stínování** (*flat shading*) - vyčíslíme osvětlovací rovnici pro jeden bod každého polygonu (trojúhelníku), celý polygon vyplníme výslednou barvou
 - nejjednodušší, nejrychlejší, ale nehezkké: zachovává polygonální strukturu modelu
- 2 **Gouraudovo stínování** - spočítá osvětlení ve vrcholech trojúhelníku a získané hodnoty interpoluje
 - rychlé, obvykle implementováno v HW, dává dojem zakřivených povrchů
 - stále lze pozorovat polygonální strukturu, např. na stínech
- 3 **Phongovo stínování** (\neq Phongův osvětlovací model) - spočítá normály ve vrcholech, jejich hodnoty interpoluje pro každý bod Δ a použije pro vyčíslení osvětlovací rovnice
 - z uvedených 3 metod nejrealističtější, nejnáročnější

Schéma a srovnání metod stínování



Metody stínování - další příklady srovnání



konstantní

Gouraudovo

Phongovo

Metody stínování - další příklady srovnání



konstantní

Gouraudovo

Phongovo

Obsah

- 1 Vlastnosti osvětlovacích modelů
- 2 Světelné zdroje a stíny
- 3 Phongův osvětlovací model
- 4 Stínování
- 5 Mlha**
- 6 Optimalizované osvětlování

Mlha - úvod

- zvýšení realističnosti scény
- odstranění artefaktu náhlého oříznutí zadní ořezávací rovinou (viz *promítání*) - při průletu scénou se objekty vynořují z mlhy, neobjevují se náhle
- barva mlhy c_f , **mlhový faktor** $f \in [0, 1]$ klesající směrem od pozorovatele
- barva povrchu s původní barvou c_s bude po „zamlžení“

$$c_p = fc_s + (1 - f)c_f$$

- směr růstu f neintuitivní, ale zjednoduší rovnice pro f (viz dále)

Průběh mlhového faktoru

- **lineární mlha:** hodnota z_p ... vzdálenost bodu p od pozorovatele, z_{start} ... začátek mlhy, z_{end} ... konec mlhy

$$f = \frac{z_{end} - z_p}{z_{end} - z_{start}},$$

- **exponenciální mlha:**

$$f = e^{-d_f z_p},$$

- **kvadratická exponenciální mlha:**

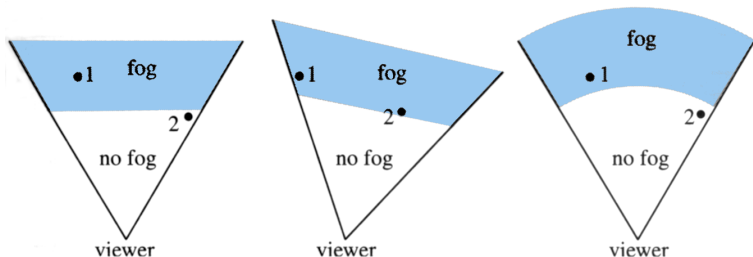
$$f = e^{-(d_f z_p)^2},$$

kde d_f je hustota mlhy. f po výpočtu ořízneme do intervalu $[0, 1]$

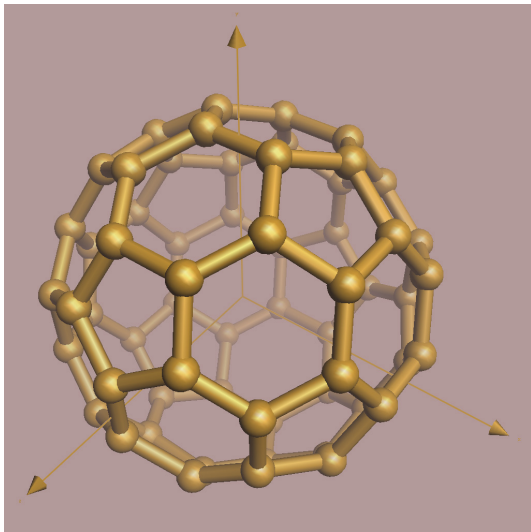
- mlhu lze počítat jen ve vrcholech Δ a použít Gouraudovo stínování

Vyjádření vzdálenosti od pozorovatele

- 1 vzdálenost od průmětny: souřadnice z , resp. n ve VCS (viz promítání)
- 2 skutečná vzdálenost od středu promítání \implies radiální mlha



MIha - příklady



MIha - příklady



Obsah

- 1 Vlastnosti osvětlovacích modelů
- 2 Světelné zdroje a stíny
- 3 Phongův osvětlovací model
- 4 Stínování
- 5 Mlha
- 6 Optimalizované osvětlování**

Forward rendering

- klasický algoritmus
- aplikuje osvětlování a stínování na každý objekt.
- mnoho objektů z daného pohledu vůbec není vidět (z-buffer)
- mnoho světel na objekt nedosvítí, protože nemají takový dosah
 - bodová, směrová světla, reflektory (ale ne plošná světla)
- mnoho **zbytečné práce**, **pokles frame rate**, pokud počet světel je $\gg 100$
- lze urychlit, pokud jsou (neprůhledné) objekty vykreslovány *pokud možno* odpředu dozadu

Deferred shading

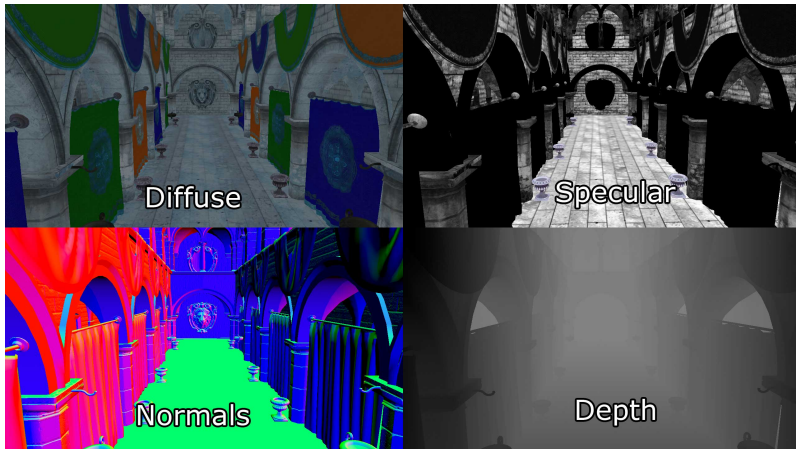
- dvoufázové zpracování
- aplikuje tzv. G-buffer (zobecnění z-bufferu)

Postup

- 1 *Geometry pass* ... naplnění G-bufferu
 - informace nutné k aplikaci osvětlovací rovnice pro objekty viditelné v jednotlivých pixelech
 - normály, barvy m_D a m_S , exponent h (v alfa kanálu m_S)
- 2 *Lighting pass* ... aplikace osvětlovacího modelu (**pixel shader**)
- 3 *Transparent pass* ... viz dále

Deferred shading

G-buffer



Deferred shading

Výhody

- pouze tolik výpočtů osvětlení, kolik je pixelů
- dostatečný frame rate s tisíci světel

Nevýhody

- nelze použít průhlednost (v pixelu barva více objektů za sebou, ale G-buffer umí jen jeden)
 - transparentní objekty lze renderovat ve "forward" režimu v rámci 3.kroku
- nutný jediný osvětlovací model pro celou scénu

Forward+ rendering

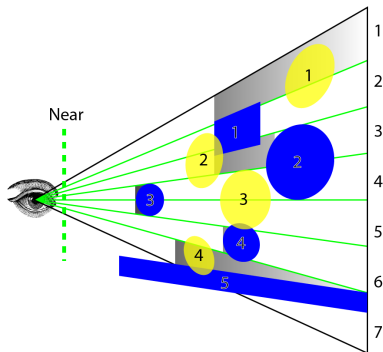
- omezí počet světel, které je nutné vyhodnocovat
- rozdělení průmětny na dlaždice
- v každé dlaždici seznam světel, které má smysl uvažovat

Postup

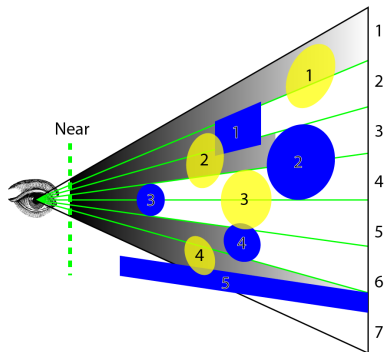
- 1 *Light culling pass* ... sestavení seznamu světel (**compute shader**)
 - v každé dlaždici min a max. vzdálenost objektů
 - pre-rendering do z-bufferů s operací MIN, resp. MAX
⇒ „osvětlitelný“ objem (*frustum*)
 - světla mají omezený dosah (světelná "koule" či "kužel")
 - světla **nezasahující** do osvětlitelného objemu "odstřelena" ze seznamu
- 2 *Lighting pass* ... aplikace osvětlovacího modelu (**pixel shader**)

Forward+ rendering

Dlaždice a osvětlitelné objemy



Depth Bounds for Opaque Geometry

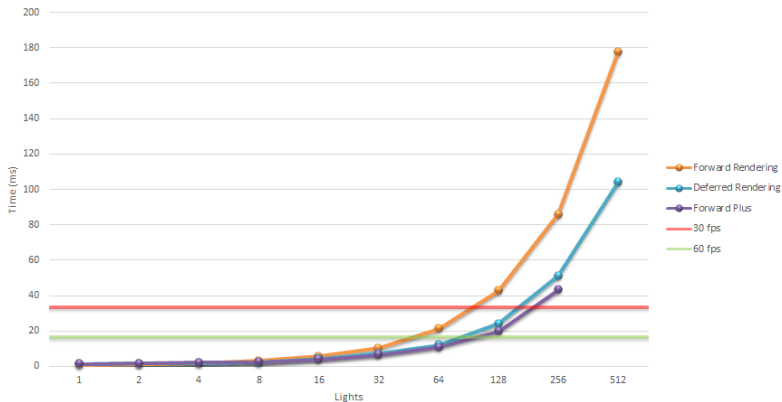


Depth Bounds for Transparent Geometry

- pro **průhledné** objekty nelze omezit přední hranici osvětlitelného objemu: vůbec se nerenderují do z-bufferů
 ⇒ samostatné seznamy světel pro průhl./nepřuhl. obj.

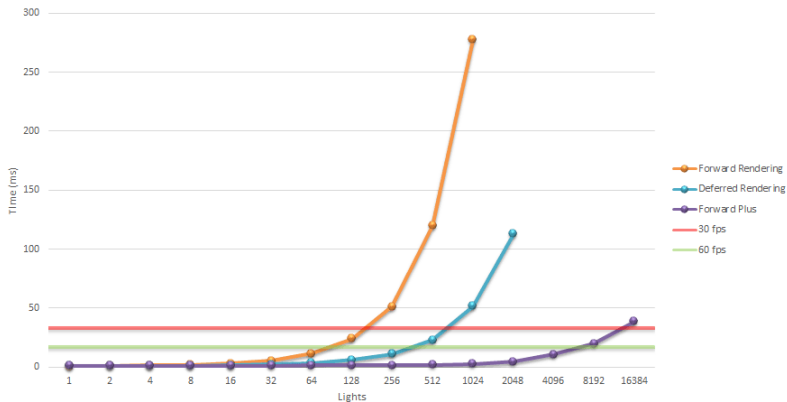
Srovnání metod

Světla s velkým dosahem (35-40 jednotek)



Srovnání metod

Světla s malým dosahem (1-2 jednotky)



Literatura

-  J. F. Hughes, A. van Dam, M. McGuire, D. F. Sklar, J. D. Foley, S. K. Feiner, K. Akeley: *Computer Graphics: Principles and Practice (3rd ed.)*, Addison Wesley, 2014.
-  J. D. Foley, A. van Dam, S. K. Feiner, J. F. Hughes: *Computer Graphics: Principles and Practice*, Addison Wesley, 1997.
-  Žára, Beneš, Sochor, Felkel: *Moderní počítačová grafika*. Computer Press, 2005.
-  G. S. Johnson, W. R. Mark, C. A. Burns: *The Irregular Z-Buffer and its Application to Shadow Mapping*. Technical Report, The University of Texas at Austin, 2004.
-  J. van Oosten: *Forward vs Deferred vs Forward+ Rendering with DirectX 11*, 2015
<https://www.3dgep.com/forward-plus/> (cit. 2025-04-08)