

Subsurface scattering

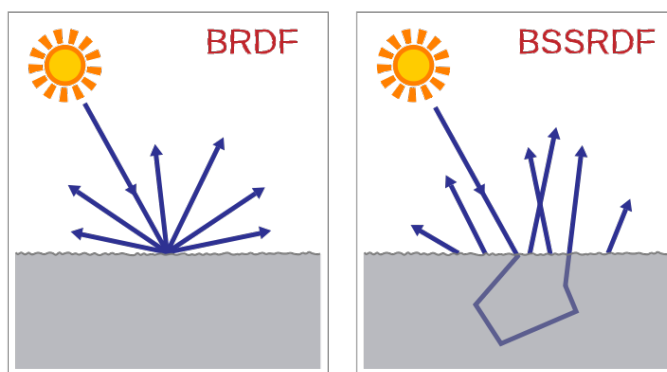
Zpracoval Martin Růžička, 18. května 2011

Úvod

Ve většině předchozích přednášek ¹ jsme předpokládali, že světlo dopadající na povrch tělesa je **v tomto místě** pohlceno, odraženo nebo zalomeno. To však není vždy pravda a v praxi se setkáváme s celou řadou propustných materiálů, uvnitř kterých dochází k vícenásobným světelným odrazům. Důsledkem toho je, že fotony vstupující do tělesa v jednom místě ho mohou opouštět v místě jiném. Tento jev nelze popsat klasickou BRDF a proto se zavádí rozšíření zvané BSSRDF (bidirectional surface scattering reflectance distribution function).

BSSRDF

Je BRDF rozšířená o subsurface scattering. Je to funkce parametrizovaná dvěma pozicemi a dvěma směry (vstupní a výstupní směr a místo paprsku). Značit ji budeme písmenem S .



Obrázek 1: Narozdíl od BRDF může světelný paprsek u BSSRDF vstupovat a vystupovat v různých místech povrchu.

Pokud chceme používat tuto funkci pro výpočet globálního osvětlení ve scéně je potřeba příslušně rozšířit i Zobrazovací rovnici. Tu musíme navíc integrovat přes plochu, kterou může světlo vnikat pod povrch.

$$L_o(x_o, \vec{\omega}_o) = \int_A \int_{2\pi} S(x_i, \vec{\omega}_i, x_o, \vec{\omega}_o) \cdot L_i(x_i, \vec{\omega}_i) \cdot \cos(N_{x_o}, \vec{\omega}_i) d\omega_i dA_{x_i}$$

Simulace

Simulování subsurface scatteringu je výpočetně velmi náročné. Obzvláště nepříjemné jsou však materiály s vysokým albedem (tj. nízkou absorbcí světla). V

¹Výjimkou je část věnovaná Participating media

takových materiálech může světelný paprsek mnohokrát změnit svůj směr šíření a přitom ztratit jen malou část svojí energie. Například v mléku má světelný paprsek i po 1000 odrazech stále více než 1/4 svojí původní energie. V takových materiálech je proto zcela logicky například Path tracing téměř nepoužitelný. Photon mapping zde naštěstí funguje poměrně dobře. Pro účely subsurface scatteringu ho stačí jen mírně modifikovat. V první fázi je potřeba umožnit fotonům navíc refrakci a jejich šíření pod povrchem. V druhé části potom fotony sbíráme nejen na povrchu ale i pod povrchem. Hlavním problémem je zde především rychlost algoritmu, protože fotonů musíme v 1. fázi emitovat velké množství.

Practical model for BSSRDF

Jde o metodu představenou Jensenem a spol, která za určitých zjednodušení počítá BSSRDF. Použitá zjednodušení si v krátkosti popíšeme.

1. Princip podobnosti

Tento princip v jednoduchosti říká, že anizotropní médium s velkým rozptylem lze nahradit izotropním médiem s vhodně nastavenými parametry. V anizotropním médiu s velkým albedem se světlo tak dlouho odráží všemi směry tam a zpět, že ve výsledku můžeme médium považovat téměř za izotropní.

2. Metoda difúze

Vícenásobné odrazy počítáme metodou difúze. Vícenásobně odraženou radianci v médiu, která je z povahy média téměř konstantní ve směrech, nazýváme difúzní radianci a značit ji budeme L_d . Difúzní radianci lze dobře aproximovat rozvojem v bázi sférických hamonických funkcí s pouze čtyřmi koeficienty podle následující rovnice.

$$L_d(x, \vec{\omega}) = \frac{1}{4\pi} \phi(x) + \frac{3}{4\pi} \vec{\omega} \cdot \vec{E}(x)$$

3. Při řešení rovnice difúze předpokládáme uzavřený tvar za pomoci 2 dipólů - viz obr2.

Za těchto předpokladů můžeme potom funkci S vyjádřit jako:

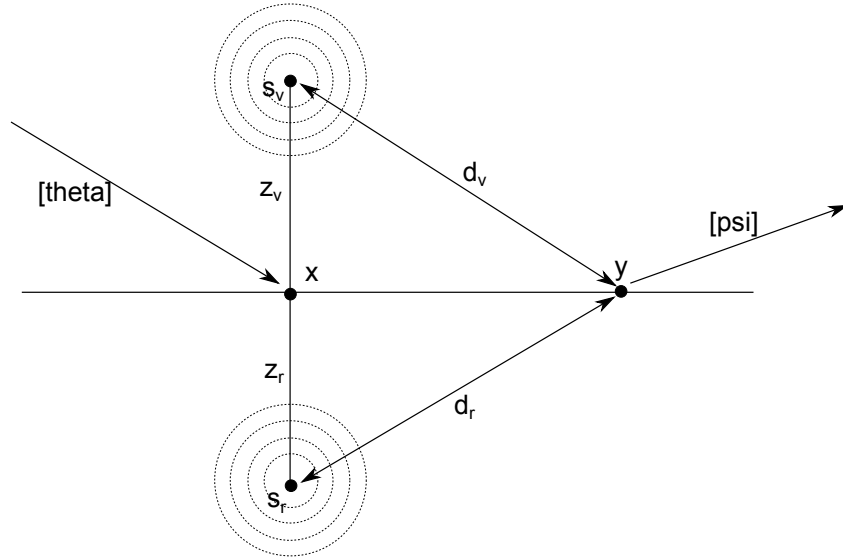
$$S(x_i, \vec{\omega}_i, x_o, \vec{\omega}_o) = \frac{1}{\pi} F_t(\eta, \vec{\omega}_i) \cdot R_d(\|x_i - x_o\|) \cdot F_t(\eta, \vec{\omega}_o)$$

$$R_d(r) = \frac{\alpha'}{4\pi} \left[z_r(1 + \sigma_{tr}d_r) \frac{e^{-\sigma_{tr}d_r}}{d_r^3} + z_v(1 + \sigma_{tr}d_v) \frac{e^{-\sigma_{tr}d_v}}{d_r^3} \right]^2$$

- $F_t(\eta, \vec{\omega}_i)$ a $F_t(\eta, \vec{\omega}_o)$ značí Fresnelovy vzorce pro příchozí směr $\vec{\omega}_i$ v bodě x_i a odchozí směr $\vec{\omega}_o$ v bodě x_o
- η je relativní index lomu

²Takto je vzorec uveden v Advanced Global Illumination. Jensen ho ve svém článku má bez z_r před závorkou. Řešení tohoto hlavolamu přenechávám čtenáři jako domácí cvičení.)

- $\alpha' = \frac{\sigma'_s}{\sigma'_t}$ a $\sigma_{tr} = \sqrt{3\sigma_a\sigma'_t}$ jsou vlastnosti materiálu
- z_r a z_v jsou vzdálenosti imaginárních bodových světél od bodu x



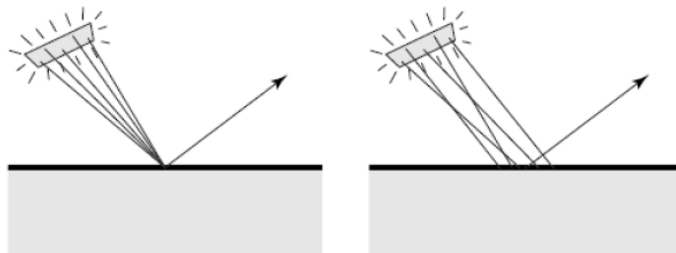
Obrázek 2: Dipóly umístíme nad a pod místo, kterým světlo vstupuje do média.

Renderování s BSSRDF

Na závěr si ještě ukážeme dvě metody používající BSSRDF v praxi.

Monte Carlo

Výpočet osvětlení ve scéně používající BSSRDF vyžaduje vyhodnocení integralní rovnice uvedené v předchozích částech. Tento integrál můžeme počítat pomocí zavedených metod jako například Monte Carlo trace-ování náhodných paprsků z nichž odhadujeme hodnotu integrálu. Zde nastává pouze jediná podstatná změna a to, že kromě vzorkování směrů musíme u světelných paprsků vzorkovat i jejich počátek.



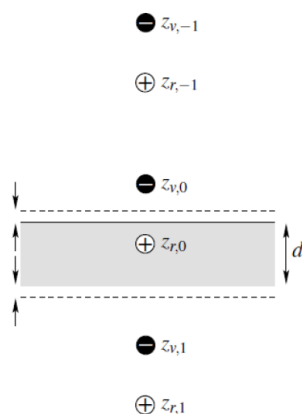
Obrázek 3: Na levé straně obrázku je ukázka path tracingu s klasickou BRDF, na pravé path tracing s BSSRDF.

Hierarchical method

Cílem této metody je urychlit výpočet osvětlení. Toho metoda dosahuje tím, že oddělí výpočet irradiance od subsurface scatteringu. V první fázi spočteme irradianci na vybraných místech povrchu. V druhé fázi počítáme vlastní subsurface scattering. Ten bychom teoreticky mohli spočítat přímo součtem příspěvků od všech našich irradiance vzorků z první části dosazováním do dříve popsanych rovnic pro výpočet BSSRDF. To by však trvalo dlouho a proto si nad našimi irradiance vzorky postavíme hierarchickou strukturu, s kterou dále pracujeme podobně jako třeba u Lightcuts³ při výpočtu subsurface scatteringu.

Vícevrstevné materiály s BSSRDF

Pro správné zobrazování některých materiálů je navíc potřeba rozšířit BSSRDF o více vrstev. Typickým představitelem takových materiálů je zejména lidská kůže. Zjednodušeně můžeme tyto jevy počítat pomocí drobného rozšíření modelu dipólů tak jak to vidíme na obrázců níže.



Obrázek 4: Aproximace více vrstevných materiálů pomocí více dipólů

³Metoda byla popsána v kapitole Scalable many-light methods