

# Subsurface scattering

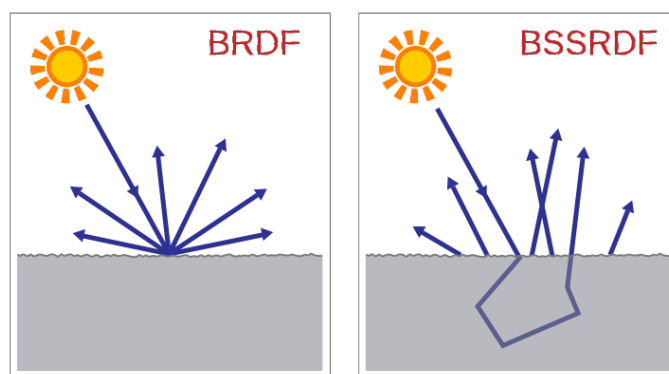
Zpracoval Martin Růžička, 18. července 2012

## Úvod

Ve většině předchozích přednášek <sup>1</sup> 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 takových materiálech může světelný paprsek mnohokrát změnit svůj směr šíření a

<sup>1</sup>Vyjímkou je část věnovaná Participating media

přítom 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. Algoritmus zredukoval původný 8D problém (rozšířená zobrazovací rovnice) na 1D. Použitá zjednodušení si v krátkosti popíšeme. Médium potom popíšeme "rozpíjacou rovnicou" (*diffusion profile*), která určuje, ako sa energia svetla šíri z bodu do okolia.

### 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.

Parametre média sa nahradia následovne:

$$\begin{aligned}\sigma'_s &= \sigma_s(1 - g) \\ \sigma'_t &= \sigma'_s + \sigma_a\end{aligned}$$

kde

$$g = \int_{4\pi} (\vec{\omega} \cdot \vec{\omega}') \cdot p(\vec{\omega} \cdot \vec{\omega}') d\omega'$$

Ak má médium vysoký forward scattering ( $g \rightarrow 1$ ), čo znamená, že svetlo sa rýchlo pohybuje dopredu, tak upravený koeficient  $\sigma'_s$  bude malý, pretože svetlo ujde veľkú vzdialenosť, kým sa rozptýli.

Opak platí pre vysokú hodnotu backward-scatteringu ( $g \rightarrow -1$ ). Tam sa svetlo rozptýli už pri malej vzdialenosti.

### 2. Metoda difúze

Vícenásobné odrazy počítáme metódou difúze. Vícenásobne odraženou radianci v médiu, ktorá je z povahy média téměř konstatní ve směrech, nazýváme difúzní radiance a značit ji budeme  $L_d$ . Difúzní radianci lze dobře aproximovat rozvojem v bázi sférických hamoniských funkcí s pouze čtyřmi koeficienty podle následující rovnice.

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

kde

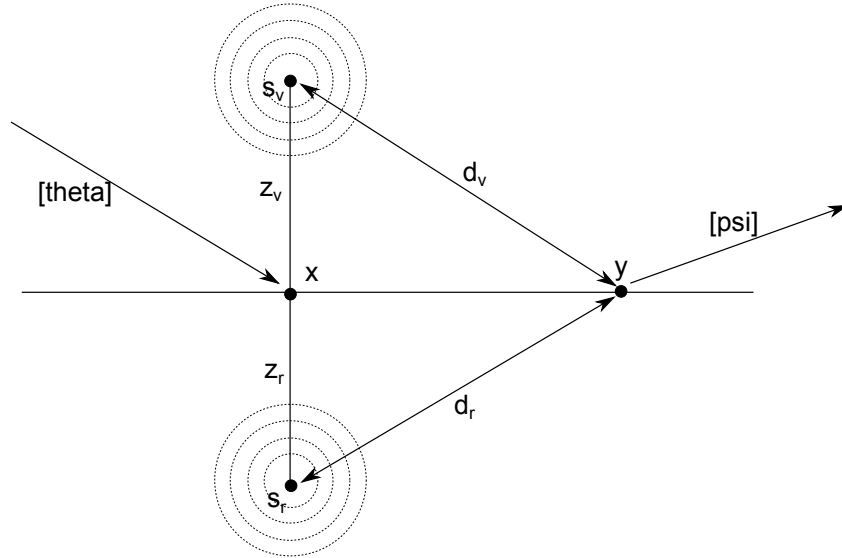
$$\phi(x) = \int_{4\pi} L(x, \vec{\omega}) d\omega$$

je *fluence* - priemerná radiance zo všetkých smerov keď zafixujeme bod.

$$\vec{E}(x) = \int_{4\pi} L(x, \vec{\omega}) \vec{\omega} d\omega$$

je *vector irradiance*.

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



Obrázek 2: Dipóly umísťme nad a pod miesto, ktorým svetlo vstupuje do média.

Za týchto predpokladů můžeme potom funkci S vyjádřit jako:

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

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

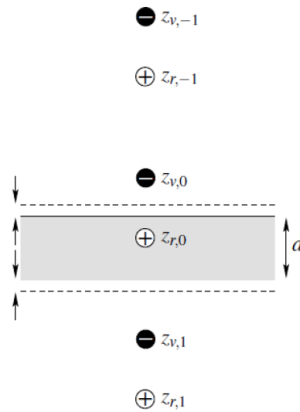
- $F_t(\eta, \vec{\omega}_i)$  a  $F_t(\eta, \vec{\omega}_o)$  značí Fresnelovy vzorce pro přichodí směr  $\vec{\omega}_i$  v bodě  $x_i$  a odchozí směr  $\vec{\omega}_o$  v bodě  $x_o$

<sup>2</sup>Takto 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.)

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

## 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 obrázků níže.



Obrázek 3: Aproximace více vrstevných materiálů pomocí více dipólů

## Renderování s BSSRDF

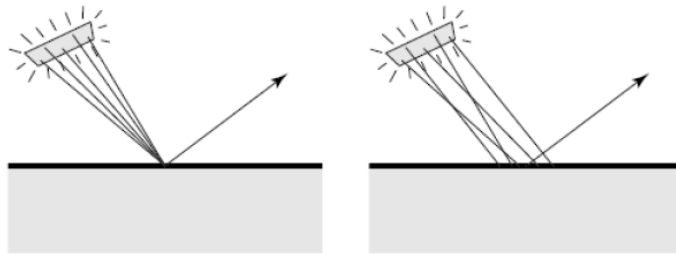
Na závěr si ještě ukážeme metody používající BSSRDF v praxi.

### Monte Carlo

Výpočet osvětlení ve scéně používající BSSRDF vyžaduje vyhodnocení integrální 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.

### 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



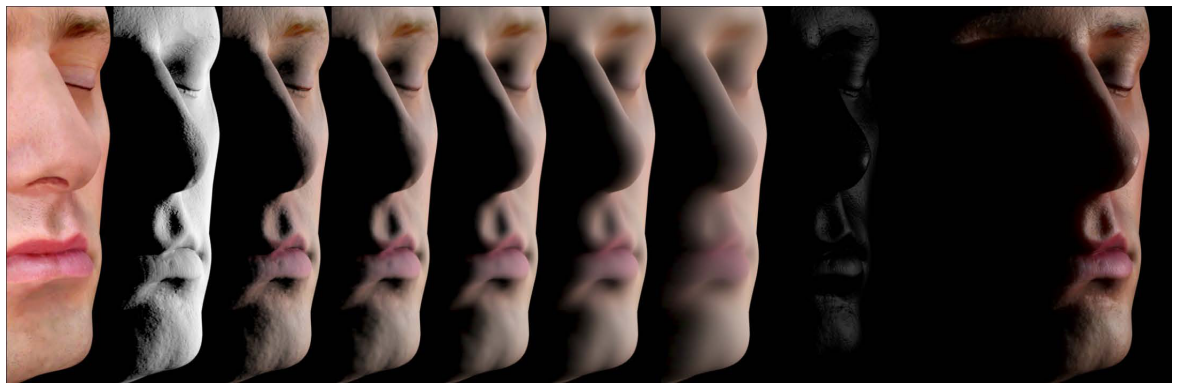
Obrázek 4: Na ľavé strane obrázku je ukázka path tracingu s klasickou BRDF, na pravej strane path tracing s BSSRDF.

rovnic pro výpočet BSSRDF. To by však trvalo dlouho a proto si nad našimi irradiance vzorky postavíme hierarchickou strukturu, s ktorou ďalej pracujeme podobně jako třeba u Lightcuts<sup>3</sup> při výpočtu subsurface scatteringu.

## Filtrovanie textúry

Realtime subsurface scattering algoritmus sa dá dosiahnuť pomocou filtrovania textúry na GPU. Difúzny profil aproximujeme pomocou sumy 2D Gaussiánov, ktorými filtrujeme textúru. Pri tom ale musíme kompenzovať zdeformovanie textúry.

Keďže Gaussiány sú separabilné, filtrujeme nimi postupne, a výsledok posčítame.



Obrázek 5: Postupné filtrovanie Gaussiánmi, a pridanie lesklej zložky

Filtrovanie v texture space je ale často neefektívne, lebo objekty v diaľke sú filtrované rovnako detailne, aj keď u nich detaily nakoniec nie sú viditeľné. Toto sa dá vyriešiť filtrovaním v screen-space.

## Meranie parametrov média

Pre použitie participating média v renderingu je potrebné najprv získať jeho parametre pomocou meraní.

Narasimhan et al. zmerali scattering parametre 40 základných materiálov, a to buď kvapalín, alebo rozpustných vo vode, nasledujúcou technikou:

<sup>3</sup>Metoda byla popsána v kapitole Scalable many-light methods

K meraniu použili akvárium zo špeciálneho neodrazivého skla, ktoré naplnili médiom, a na ktoré z boku svietili pomocou difúzneho bodového svetla. Spredu potom toto akvárium vyfotili, a dostali HDR fotografiu. Schéma je vidno na obrázku.

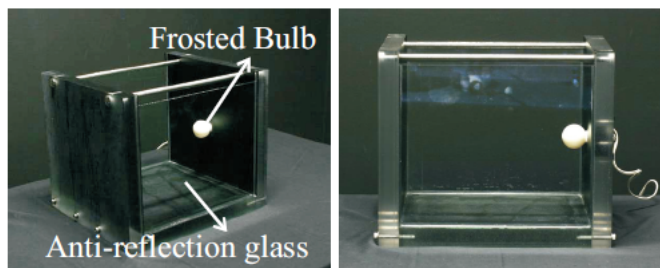


Figure 3: Two views of the apparatus used to measure scattering properties of water-soluble media. A glass tank with rectangular cross-section is fitted with a small light bulb. The glass is anti-reflection coated. Different volumes of participating media are diluted with water in the tank, to simulate different concentrations. A camera views the front face of the tank at normal incidence to avoid refractions at the medium-glass-air boundaries.

Obrázek 6: Akvárium použité pri meraní scattering parametrov médií

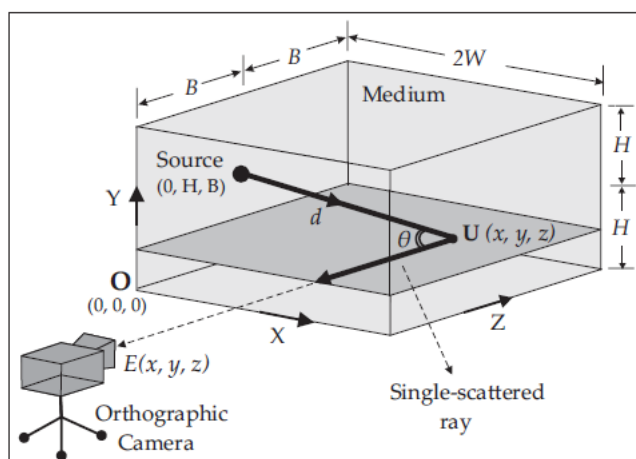


Figure 4: A volume filled with a homogeneous participating medium and illuminated by an isotropic point light source. A camera views the front face of the volume at normal incidence. The path of one single-scattered ray as it travels from the source to the camera is shown. This ray is first attenuated in intensity over a distance  $d$ , is then scattered at an angle  $\pi - \theta$ , and finally, is attenuated again over a distance  $z$ , before reaching the camera. The irradiances due to all the rays that scatter into a viewing direction must be integrated to obtain the final camera irradiance.

Základ teórie spočíva v tom, že spôsob interakcie svetla s konkrétnou časticou nezávisí od okolitých častíc, čo je ale len zjednodušenie, ktoré v praxi neplatí.

Z hodnoty pixelov potom z efektu single-scatteringu spätne odvodili parametre daného participating média. Keďže u niektorých médií je silný multiple-scattering efekt, tieto médiá merali rozriedené vodou, aby ho potlačili, a ostal dominantný single-scattering.

Zo získaných parametrov sa navyše dajú jednoducho odvodiť parametre pre

menejpercentné roztoky, alebo pre kombináciu médií, ako napríklad kafe s mliekom.



50% Milk + 50% Coffee



75% Milk + 25% Coffee



50% Wine + 50% Milk



75% Wine + 25% Milk