

Počítačová grafika

Pokročilé materiály pomocou raytracingu - BSSRDF

6. decembra 2016

Autoři: Marek Milkovič, xmilko00@stud.fit.vutbr.cz
Oliver Nemček, xnemce03@stud.fit.vutbr.cz
Vladimír Čillo, xcillo00@stud.fit.vutbr.cz

Obsah

Zadanie	2
Najdôležitejšie dosiahnuté výsledky	3
Prenikanie svetla cez vosk	3
Prenikanie svetla cez mramor	3
Zvláštne použité znalosti	5
BSSRDF	5
Difúzna aproximácia	6
Single scattering	7
Práca na projekte	8
Rozdelenie práce v tíme	8
Co bylo nejpracnější	8
Skúsenosti získané riešením projektu	8
Autoevaluace	9
O programe	10
Použité zdroje	10
Technológie potrebné pre spustenie programu	10
Obsluha programu	11
Doporučenia pre budúce zadávanie projektov	12
Literatura	13

Zadanie

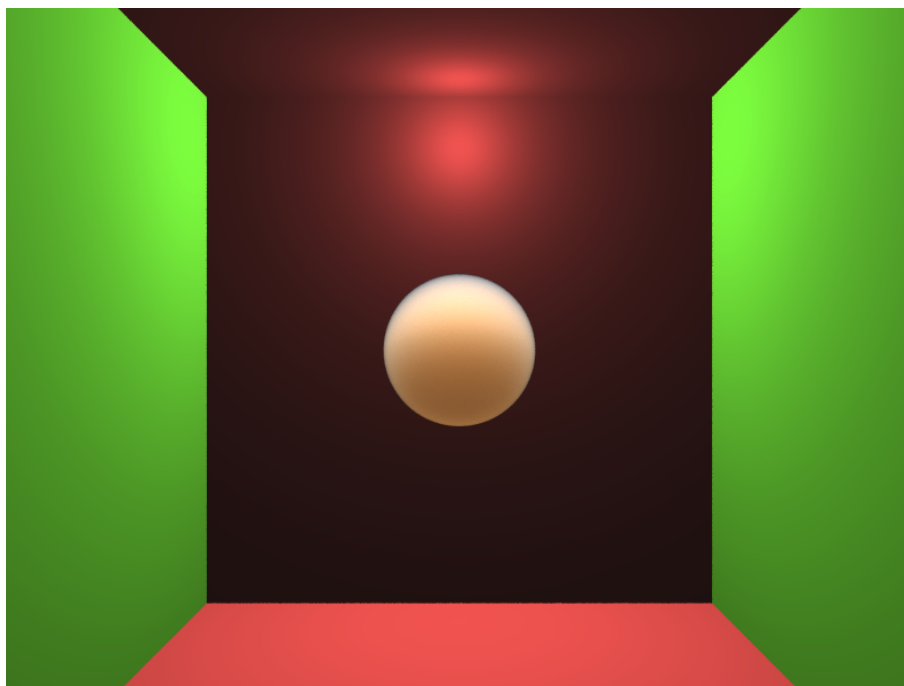
Pokročilé materiály pomocou raytracingu - BSSRDF

- Vytvorte jednoduchý raytracer s podporou BSSRDF materiálov
 - zoznámenie sa s OOP návrhom raytracerov
 - implementácia základného raytraceru
 - pridanie podpory základných geometrických útvarov: guľa, kocka, rovina
- Dôraz je kladený na vizuálnu kvalitu obrázkov
 - zameranie sa na realistické zobrazenie materiálov modelovaných pomocou BSSRDF

Najdôležitejšie dosiahnuté výsledky

Prenikanie svetla cez vosk

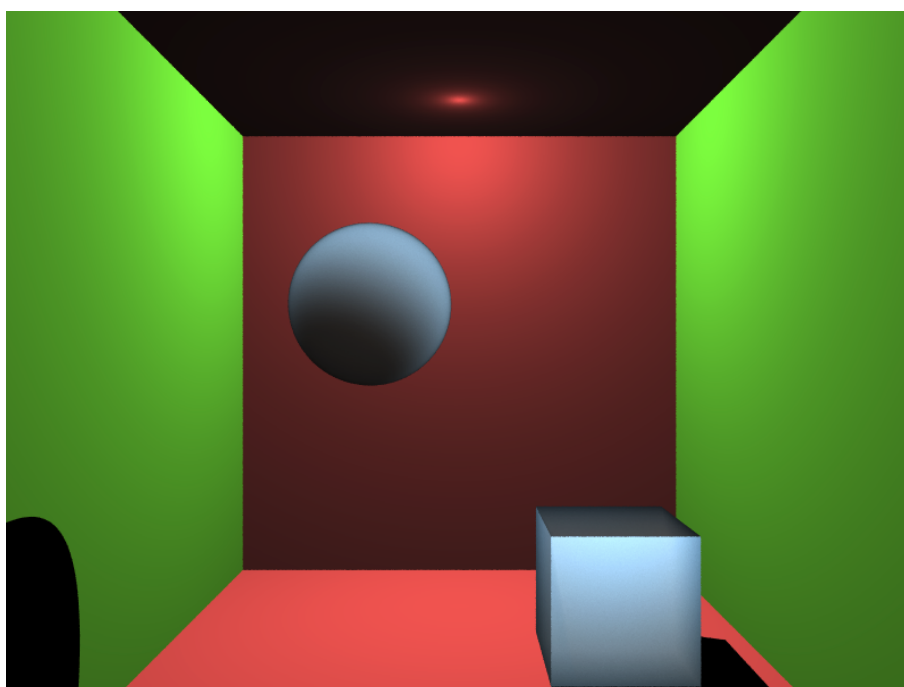
Na obrázku 1 je možné vidieť guľičku s BSSRDF materiálom, ktorá by mala približne simulovať vosk. Koeficienty pre vosk sa nám nepodarilo zohnať, preto sme skúšali empiricky zostrojiť materiál, ktorý by sa vlastnosťami podobal na vosk. Na túto guľičku svieti svetlo, pričom guľička nám je privrátená odvrátenou stranou od svetla. Je možné vidieť ako sa svetlo dostáva cez materiál aj na túto odvrátenú stranu a stráca na intenzite.



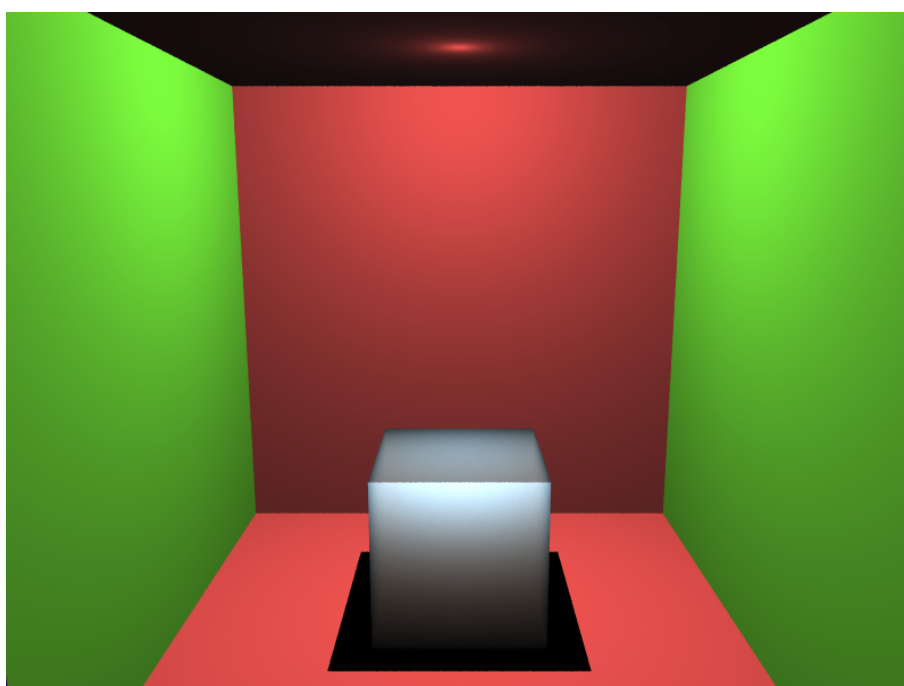
Obr. 1: Prenikanie svetla cez vosk

Prenikanie svetla cez mramor

Na obrázkoch 2 a 3 sú znázornené rozptyly svetla v mramore. Koeficienty od mramoru sme nastavili podľa skutočných nameraných hodnôt [5]. Na obrázku 2 sa svetlo nachádza za objektami, tak aby bolo vyššie ako tieto objekty. Môžeme pozorovať veľmi pekný efekt na guľičke. Na obrázku 3 sa svetlo nachádza nad kockou pričom pozorujeme rozptyl svetla až k základni kocky.



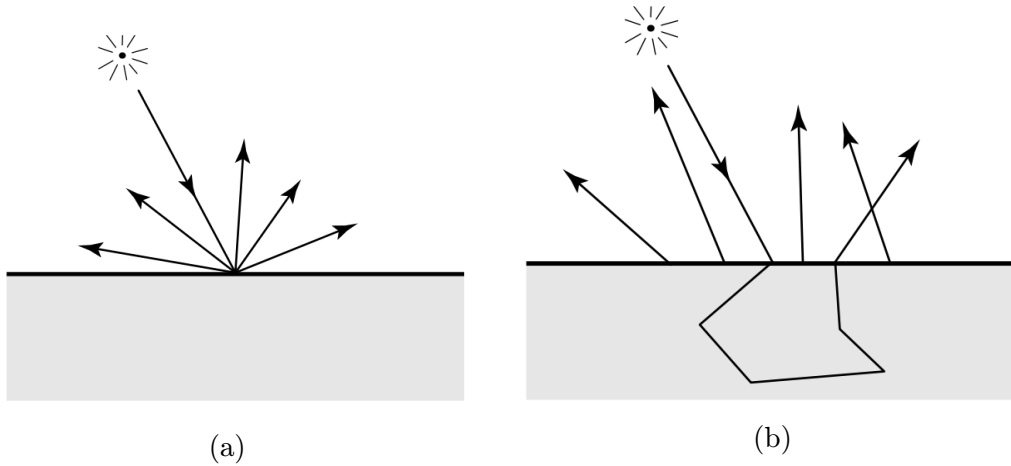
Obr. 2: Svetlo umiestnené za mramorovými objektami



Obr. 3: Svetlo umiestnené nad mramorovou kockou

Zvláštnne použité znalosti

Po vytvorení jednoduchého raytraceru bolo potrebné zoznámiť sa s výpočtom osvetlenia pomocou *bidirectional surface scattering distribution function* (**BSSRDF**). Často používaná metóda *bidirectional reflectance distribution function* (BRDF) predpokladá, že svetlo sa po dopade od materiálu odráža len v mieste dopadu. Tento predpoklad platí hlavne pre kovové materiály, avšak vo všeobecnosti neplatí pre materiály, u ktorých dochádza k prenosu svetla aj pod povrchom [5]. Tento rozdiel znázorňuje obrázok 4. Príkladmi takýchto materiálov sú drahokamy, listy stromov, vosk, plasty alebo koža [2]. BSSRDF sa snaží vyriešiť problém realistického zobrazenia týchto materiálov.



Obr. 4: Modely rozptylu svetla - (a) BRDF, (b) BSSRDF

BSSRDF

Funkcia BSSRDF, ďalej označovaná ako S , dáva do súvislosti diferenciál odrazeného svetla $dL_o(x_o, \vec{\omega}_o)$ v bode x_o pod uhlom $\vec{\omega}_o$ a dopadajúci tok $\Phi_i(x_i, \vec{\omega}_i)$ do bodu x_i zo smeru $\vec{\omega}_i$ [5]:

$$dL_o(x_o, \vec{\omega}_o) = S(x_i, \vec{\omega}_i, x_o, \vec{\omega}_o) d\Phi_i(x_i, \vec{\omega}_i) \quad (1)$$

Ak máme danú funkciu S , potom množstvo odrazeného svetla vypočítame integrovaním dopadajúceho svetla cez všetky smery a plochu A [5]:

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

Ako vidíme, S je funkciou vstupného bodu a uhlu do neho dopadajúceho svetla, ako aj výstupného bodu a uhlu z neho vychádzajúceho svetla. Počítať BSSRDF je možné rôznym spôsobom. My sme zvolili metódu, ktorá rozdeľuje funkciu S na dve zložky [5]:

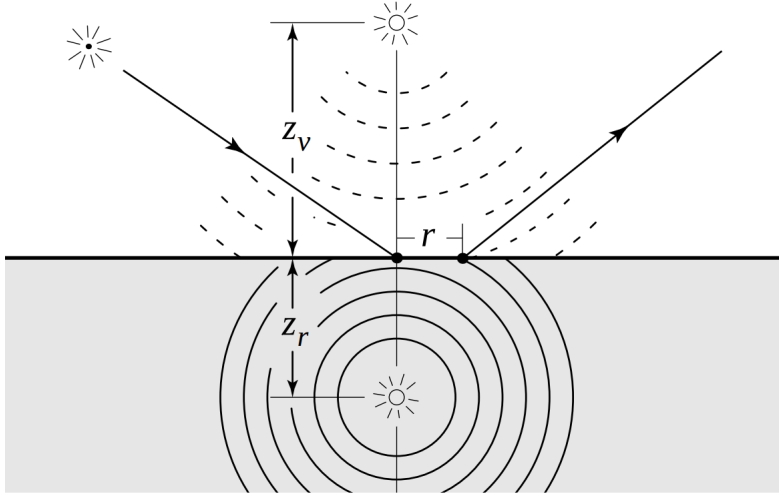
$$S = S^{(1)} + S_d \quad (3)$$

kde $S^{(1)}$ je tzv. *single scattering* a S_d je difúzna zložka (predstavuje tzv. *multiple scattering*).

Difúzna aproximácia

Počítanie BSSRDF pomocou difúznej aproximácie je založené na pozorovaní, že šírenie svetla v objektoch sa stáva po čase izotropné (nezávislé od smeru). Svetlo postupne stráca svoju energiu a uvoľňujú sa malé časti svetla do okolia, čo má za následok, že svetlo sa javí ako čisto difúzne. [5] Difúzna aproximácia modeluje tzv. *multiple scattering*, teda viacnásobný rozptyl svetla.

Na difúznu aproximáciu slúži model difúzneho dipólu. Pri tejto metóde sa do okolia bodu dopadu lúča umiestnia dva zdroje svetla — jeden dipól umiestnime pod povrchom v hĺbke z_r (tzv. reálny zdroj), druhý dipól nad povrchom vo výške z_v (tzv. virtuálny zdroj). Umiestnenie dipólov znázorňuje obrázok 5.



Obr. 5: Umiestnenie dipólov

Difúzna zložka funkcie S , S_d je daná nasledujúcim vzťahom [5]:

$$S_d(x_i, \vec{\omega}_i, x_o, \vec{\omega}_o) = \frac{1}{\pi} F_t(\eta, \vec{\omega}_i) R_d(\|x_i - x_o\|) F_t(\eta, \vec{\omega}_o) \quad (4)$$

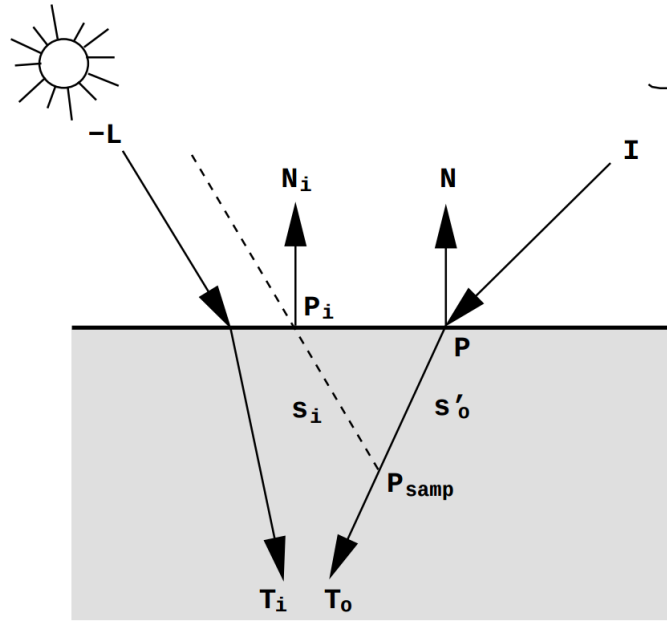
kde F_t je Fresnelova funkcia priepustnosti ako vo vstupnom, tak aj výstupnom bode a R_d je člen určený pomocou metódy difúzných dipólov. Hodnotu R_d určíme vzťahom [5]:

$$R_d(r) = \frac{\alpha'}{4\pi} \left[(\sigma_{tr} d_r + 1) \frac{e^{-\sigma_{tr} d_r}}{\sigma'_t d_r^3} + z_v (\sigma_{tr} d_r + 1) \frac{e^{-\sigma_{tr} d_v}}{\sigma'_t d_v^3} \right] \quad (5)$$

kde α' , σ_{tr} a σ'_t predstavujú vlastnosti materiálu, d_r je vzdialenosť bodu x od reálneho zdroja a d_v je vzdialenosť bodu x od virtuálneho zdroja. Význam ostatných premenných v tomto vzťahu je patrný z obrázku 5.

Single scattering

Pri *single scatteringu* sa snažíme zohľadniť jav, pri ktorom sa lúč fotónov zo svetla odrazí **jeden krát** pod povrchom materiálu a časť energie putuje až do kamery. Keďže pri výpočte pozície \mathbf{P} na povrchu materiálu poznáme pozíciu kamery (\mathbf{I}), vieme spočítať smer výstupného zalomenia T_o [3]. Uvedenú situáciu znázorňuje obr. 6. Ak budeme predpokladať, že svetlo sa pri vstupe do materiálu neláme, môžeme pre každé P_{samp} zistiť, kde lúč vstúpil do materiálu.



Obr. 6: Výpočet single scatteringu

Celková výstupná intenzita svetla L_o závisí na koeficientoch rozptylu, fázovej funkcii a hodnotách vzdialenosti s'_i a s'_o . Hodnotu s'_i síce nepoznáme, ale sme schopný ju dopočítať pomocou Snellovho zákona. L_o potom vypočítame zo vzťahu [3]:

$$L_o(x_o, \vec{\omega}_o) = \frac{\sigma_s(x_o) F_t(\eta, \vec{\omega}_i) F_t(\eta, \vec{\omega}_o) p(\vec{\omega}'_i \cdot \vec{\omega}'_o)}{\sigma_{tc}} e^{-s'_i \sigma_t(x_i)} e^{-s'_o \sigma_t(x_o)} L_i(x_i, \vec{\omega}_i) \quad (6)$$

kde σ_t , σ_s , σ_{tc} sú vlastnosti materiálu, F_t je Fresnelova funkcia priepustnosti a p je Henyey-Greenstein fázová funkcia [4]. Hľadaná hodnota $S^{(1)}$ je definovaná implicitne vzťahom [5]:

$$L_o(x_o, \vec{\omega}_o) = \int_A \int_{\pi} S^{(1)}(x_i, \vec{\omega}_i, x_o, \vec{\omega}_o) L_i(x_i, \vec{\omega}_i) (\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i) d\omega_i dA(x_i) \quad (7)$$

Práca na projekte

Rozdelenie práce v tíme

- **Marek Milkovič:** Difúzna aproximácia, multithreading, raytracer
- **Oliver Nemček:** Single scattering, antialiasing, raytracer
- **Vladimír Čillo:** Vzorkovanie, JSON parser, raytracer

Co bylo nejpracnější

BSSRDF nie je jednoduchý model a vyžaduje pomerne obsiahle znalosti z fyzikálnej optiky, ktoré nám chýbali. Najzdĺhavejšou časťou projektu preto bolo štúdium materiálov, ktorých bol však pomerne obmedzený počet, pretože sa jedná o metódu, ktorá je stále aktívne vo výskume. Dostupné články často nie sú úplne jasné. Problémom je, že veľa výpočtov je v integrálnom tvare – musí sa vzorkovať. Ku rôznym parametrom chýbajú jednotky. Niekedy sa líšili fundamentálne vzorce. BSSRDF je veľmi úzka a špecifická oblasť, ktorú nie je možné obsiahnuť behom jedného semestra a vytvoriť plnohodnotný model. Bolo pomerne náročné všetko naimplementovať a testovať, pretože sme nevedeli aké výsledky očakávať a ako daný parameter ovplyvní vlastnosti materiálu.

Skúsenosti získané riešením projektu

Každý z nás sa získal množstvo nových znalostí z fyzikálnej optiky a znalostí o moderných modeloch pre fyzikálne realistické renderovanie. Začali sme s tým, že sme nikdy neprogramovali raytracer a skončili sme s raytracerom podporujúcim multithreading, ktorý dokáže zobrazíť materiály ponášajúce sa na referenčné BSSRDF materiály. Vzhľadom na to, že sme pred semestrom ani netušili, že BSSRDF existuje, tak hodnotíme tento projekt ako prínosný pre nás a naše vedomosti v tejto oblasti.

Autoevaluace

Technický návrh (90%): Pri návrhu riešenia sme postupovali v súlade s literatúrou a snažili sme sa zohľadniť *best practices* OOP návrhu, ako aj návrhu raytracerov.

Programování (90%): Všetci v týme máme komerčné skúsenosti s vývojom v C++, kvalita vytvorených zdrojových kódov tomu podľa nášho názoru odpovedá, naše riešenie preto po technickej stránke hodnotíme vysoko.

Vzhľad vytvoreného riešenia (50%): Neprítomnosť globálnej iluminácie dosť pôsobí na výsledný vzhľad, najmä na stranách objektov odvrátených od zdroja svetla. Raytracer taktiež podporuje len základné geometrické útvary ako kocka, či guľa, na ktorých nie je možné zobrazíť všetky možnosti toho, čo by BSSRDF dokázalo. Na renderoch je však vidieť prenikanie svetla cez úzke časti (hrany kocky) a zvýraznenie častí objektov, v ktorých je sústredená veľká časť svetla, takže BSSRDF materiály majú aspoň svoje základné črty.

Využití zdrojů (100%): Keďže zobrazovanie pomocou BSSRDF vyžaduje znalosti nad rámec výuky, boli sme pri práci na projekte odkázaný na literatúru, ktorej štúdium zabralo väčšinu času, ktorý sme venovali projektu.

Hospodaření s časem (70%): Prácu na projekte sme začali až v závere semestru, ale na dokončenie sme mali dostatok času, aj vďaka posunutému deadline. Na základe získaných skúseností si ale dovoľujeme tvrdiť, že na programoch tohto typu je vždy čo vylepšovať a ešte by sa dalo v práci pokračovať.

Spolupráce v týmu (100%): Aktívne sme Využívali git ako verzovací systém. Ako komunikačný kanál sme zvolili Discord¹, pretože nám poskytol ako textovú, tak aj hlasovú komunikáciu, s tým že uchovával históriu textovej komunikácie. Navzájom sa všetci poznáme dlhšiu dobu osobne a vieme, že sa môžeme jeden na druhého spoľahnúť.

Celkový dojem (70%): Naimplementovať raytracer s podporou BSSRDF vyžaduje dôkladné pochopenie značného množstva akademických materiálov, ktoré z veľkej časti daný problém popisujú pomocou zložitých matematických modelov. Túto prácu naviac nejde dosť dobre rozdeliť medzi jednotlivých členov tímu. Zvolili sme si pomerne náročné zadanie, čo sa podpísalo aj na celkovom dosiahnutom výsledku.

¹<https://discordapp.com/>

O programe

Použité zdroje

Pri práci na našom programe sme používali hlavne publikáciu od H.W.Jensena [5], ktorá obsahovala takmer všetko potrebné pre pochopenie BSSRDF. Neobsahovala však žiadne informácie o vzorkovaní povrchu objektu, pri ktorej sme čerpali hlavne zo slidov od Sony Pictures [1]. Publikácia od C. Heryho [3] obsahovala pseudokódy niektorých častí BSSRDF, čo nam výrazne pomohlo pri písaní a kontrole našich riešení. Veľkou inšpiráciou bol tiež blog Wei-Feng Huang-a² a jeho implementácia bidirectional path-tracingu³. Z nej sme prebrali implementácie niektorých fyzikálnych funkcií (Fresnel, Snell) a získali základný prehľad o tom, akým spôsobom riešiť difúziu aproximáciu a single scattering.

Technológie potrebné pre spustenie programu

Podporované OS:

- Windows (MinGW/Cygwin/MSYS2)
- Linux

Technológie potrebné pre spustenie programu:

- Prekladač jazyka C++ s podporou štandardu C++14
- [CMake](#) verzia 3.1 alebo vyššia
- [OpenGL Mathematics](#) (GLM) verzia 0.9.7.5 alebo vyššia
- [Simple DirectMedia Layer](#) (SDL) verzia 2.0.4 alebo vyššia
- [JsonCpp](#) verzia 1.7.2 alebo vyššia

²<http://rendering-memo.blogspot.cz/2015/01/bssrdf-importance-sampling-1-kickoff.html>

³<https://github.com/bachi95/Goblin>

Obsluha programu

- Spustenie
 - `bssrdf JSON_FILE [SS_SAMPLES MS_SAMPLES [AA_SAMPLES]]`
 - `JSON_FILE` – JSON súbor popisujúci scénu (ukážkové scény sa nachádzajú v `scenes/`)
 - `SS_SAMPLES` – Počet vzoriek pre single scattering (Predvolené: 25)
 - `MS_SAMPLES` – Počet vzoriek pre multiple scattering (Predvolené: 25)
 - `AA_SAMPLES` – Počet vzoriek pre antialiasing. 0 pre žiaden antialiasing. (Predvolené: 0)
- Ovládanie kamery
 - `w` – Posun kamery dopredu
 - `s` – Posun kamery dozadu
 - `a` – Posun kamery doľava
 - `d` – Posun kamery doprava
 - Držanie pravého tlačidla myši + pohyb myšou – Pohyb kamery v smere pohybu myši
- Ostatné
 - `F12` – Uloženie aktuálneho obsahu okna do súboru (screenshot)

Doporučenia pre budúce zadávanie projektov

Domnievame sa, že pri zadávaní projektov by bolo vhodné klásť väčší dôraz na porovnateľnú náročnosť jednotlivých zadaní a sústrediť sa hlavne na zadania, u ktorých je možné čerpať z materiálov predmetu a preberanej látky. Na druhú stranu, zadania považujeme za zaujímavé a prínosné. Kladne hodnotíme aj možnosť autoevaluácie a možnosť poskytnutia spätnej väzby k zadaniu prostredníctvom tejto dokumentácie.

Literatúra

- [1] Alejandro Conty Marcos Fajardo Alan King, Christopher Kulla. Bssrdf importance sampling. https://www.solidangle.com/research/s2013_bssrdf_slides.pdf, 2012.
- [2] Craig Donner, Jason Lawrence, Ravi Ramamoorthi, Toshiya Hachisuka, Henrik Wann Jensen, and Shree Nayar. An empirical bssrdf model. http://dl.acm.org/ft_gateway.cfm?id=1531336&ftid=661313&dwn=1&CFID=698861472&CFTOKEN=21307594, 2009.
- [3] Christophe Henry. Implementing a skin bssrdf. <http://monet.cs.columbia.edu/tmp/herySkinBSSRDF.pdf>.
- [4] Wojciech Jarosz. *Efficient Monte Carlo Methods for Light Transport in Scattering Media*. PhD thesis, UC San Diego, September 2008.
- [5] Henrik Wann Jensen, Stephen R Marschner, Marc Levoy, and Pat Hanrahan. A practical model for subsurface light transport. <https://graphics.stanford.edu/papers/bssrdf/bssrdf.pdf>, 2001.