

Participating media (1. část)

Martin Kahoun

9. května 2011

Úvod

Až dosud jsme při renderování uvažovali, že je scéna "vyplněna" vakuem a zanedbávali jsme médium či média, která v mohou být obsažena mezi pevnými objekty ve scéně a podílet se přenosu světla. Těmito mohou být například různé plyny, mraky nebo kapaliny, ale i některé pevné látky (vosk, plasty, organické struktury apod.). Ve velmi malých scénách se toto opomenutí takřka ani neprojeví¹, avšak pokud bychom chtěli renderovat například sklenici mléka, je nutné počítat s přenosem světla skrze kapalinu, ačkoliv se nám může jevit jako neprůsvitná bílá; není tomu tak, bez přenosu světla v kapalině bude sklenice mléka vypadat spíše jako sklenice latexové barvy.

Pokud se rozhodneme renderovat scény mimo vakuum a tedy uvažovat přítomnost médií podílejících se na přenosu světla (anglicky *participating media*, dále jen PMa), zvýší se tím dimenze výpočetního prostoru a tím i náročnost výpočtů oproti běžné B-rep scéně, v každém bodu prostoru se totiž může změnit směr světla nebo jeho spektrum.

Kromě renderingu lze znalostí o PMa využít v astronomii například pro výpočty rozložení hmoty v mlhovinách či k odstraňování modrého nádechu ze satelitních snímků.

Vlastnosti médií

V důsledku přítomnosti PMa ve scéně může v každém bodě prostoru během transportu světla dojít ke kombinaci následujících jevů:

Absorpce – částice v bodu absorbuje určité kvantum energie světelného svazku

Emise – částice v bodu vyzařuje světlo (například oheň, jinak nebývá tak časté)

In-scattering – v bodu se díky rozptylu zvýší intenzita světla

Out-scattering – v bodu se díky rozptylu sníží intenzita světla

Hustota částic a odvozené charakteristiky

Základní vlastností každého PMa je hustota jeho částic na jednotku objemu. S hustotou též úzce souvisí homogenita média – pokud je všude médium stejně husté, říkáme, že je homogenní. Silně homogenní média nejsou příliš realistická, na druhou stranu jde o dobrou heuristiku.

Od hustoty se odvozuje několik dalších charakteristik, které potom hrají roli v upravené zobrazovací rovnici (viz níže), mezi ně patří následující koeficienty vyjádřující relativní změnu radiance vztáženou na jednotku délky:

- σ_e [m^{-1}] – emisní koeficient
- σ_a [m^{-1}] – absorpční koeficient
- σ_s [m^{-1}] – rozptylový koeficient

¹V takovém Cornell boxu nebude rozptyl světla v atmosféře pozorovatelný.

- $\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$ [m^{-1}] – extinkční koeficient

Koeficient je stanoven vždy pro nějakou konkrétní částici média. Pokud máme médium složené z více druhů částic, pak se koeficient celého média získá lineární kombinací koeficientů jednotlivých druhů částic.

Fázová funkce

Ekvivalentem BRDF pro PMA je tzv. fázová funkce popisující směrovou distribuci rozptýleného světla. Jedná se o hustotu pravděpodobnosti definovanou na sféře (oproti BRDF definované na polokouli). Rozptyl světla v médiu může být izotropní nebo anizotropní (analogie lambertovských a lesklých povrchů). Zde se sluší poznamenat, že ryze izotropní PMA neexistují (respektive nejsou známa); u těch, která se tak jeví, se efekt dostavuje díky průměru mnoha různých jevů (in/out-scattering a absorpce s vysokou četností). Rozeznáváme dva druhy rozptylu světla:

Rayleigh scattering – světlo interaguje s částicemi menšími než je vlnová délka světla (atomy a molekuly). Tento druh rozptylu jednak částečně polarizuje světlo a jednak závisí na vlnové délce vztahem λ^{-4} , díky čemuž se červené světlo rozptyluje méně než modré.

Mie scattering – světlo interaguje s částicemi řádově většími než je vlnová délka světla (kapky rosy, sněhové vločky apod.

Uveďme nyní několik příkladů fázové funkce, nejjednodušší je izotropní rozptyl:

$$p_{uni}(\theta) = \frac{1}{4\pi},$$

Fázová funkce pro Rayleigh scattering vypadá takto²:

$$p_{ray}(\theta) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2 \theta)$$

Fázovou funkci pro Mie scattering je nutné aproximovat, zde uvádíme Henyey-Greensteinovu aproximaci

$$p_{hg}(\theta, g) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos^2 \theta)^{\frac{3}{2}}}$$

kde parametr $g \in (-1, 1)$ je tzv. parametr asymetrie určující hlavní směr laloku; je kladný, jedná-li se o dopředný rozptyl a záporný v případě zpětného rozptylu (*backscattering*).

Další vlastnosti médií

Mezi další vlastnosti PMA patří tzv. albedo neboli procentuální vyjádření absorpce světla (respektive efektivita rozptylové události), je definováno jako: $\frac{\sigma_s}{\sigma_t}$.

Pro simulaci halových jevů je pak důležitá anisotropie média, tedy tvar částic. Vedle toho nás může zajímat (především z implementačních důvodů) komplexnost tvaru, který dané médium vytváří (například cigaretový kouř).

Objemová rovnice

Chceme-li do výpočtů osvětlení zahrnout PMA musíme pro přenos světla objemovou rovnici. Podobně jako klasická zobrazovací rovnice se dá objemová vyjádřit ve dvou tvarech. Její směrová definice vypadá následovně:

$$L(\mathbf{x}, \omega) = \int_0^s T_r(\mathbf{x} \leftrightarrow \mathbf{x}_t) \cdot \sigma_s(\mathbf{x}_t) \cdot L_i(\mathbf{x}_t, \omega) \cdot dt + T_r(\mathbf{x} \leftrightarrow \mathbf{x}_s) \cdot L(\mathbf{x}_s, \omega) \quad (1)$$

²Měla by být ještě parametrizována vlnovou délkou, viz výše.

Na první pohled se jedná o součet lineárního integrálu přes všechny body od pozorovatele k bodu s na povrchu scény a nám známé zobrazovací rovnice (člen $L(\mathbf{x}_s, \omega)$), kde $p(\mathbf{x}, \omega, \omega')$ je fázová funkce, T_r je přenosová funkce vyjadřující, kolik světla se ztratí mezi dvěma body definovaná:

$$T_r(\mathbf{x} \leftrightarrow \mathbf{x}') = e^{-\tau(\mathbf{x} \leftrightarrow \mathbf{x}')} \\ \tau(\mathbf{x} \leftrightarrow \mathbf{x}') = \int_{\mathbf{x}}^{\mathbf{x}'} \sigma_t(u) du$$

Speciálně Beer-Lambert-Bouguerův zákon udává útlum světla při průchodu *homogenním* médiem:

$$T_r = e^{-\sigma_t l}$$

L_i představuje světlo sesbírané ze všech směrů v nějakém bodě:

$$L_i(\mathbf{x}, \omega) = \int_{4\pi} p(\mathbf{x}, \omega', \omega) \cdot L(\mathbf{x}, \omega') \cdot d\omega'$$

Objemovou rovnici lze též vyjádřit v diferenciálním tvaru (analogie zobrazovací rovnice pro radiozitu) – tedy rovnici vyjadřující přenos energie:

$$\frac{dL(\mathbf{x}, \omega)}{dx} = -\sigma_t \cdot L(\mathbf{x}, \omega) + \underbrace{\sigma_a \cdot L_e(\mathbf{x}, \omega)}_{\text{zachování energie}} + \sigma_s \cdot \int_{4\pi} L(\mathbf{x}, \omega) \cdot p(x, \omega, \omega') \cdot d\omega' \quad (2)$$

Reprezentace médií

Reprezentace PMA v paměti, tak, aby se s nimi dalo pohodlně pracovat je jedním z problému, které je potřeba vyřešit, aby bylo vůbec možné renderovat scény obsahující PMA. Hlavní překážkou je objemová povaha médií z čehož plynou potenciálně velká množství dat. Existuje několik přístupů, jak se tohoto problému zhostit. Každý má své výhody i nevýhody a nedá se obecně říct, který z nich je nejlepší. Každý se hodí pro něco.

3D voxelová mřížka

Médium reprezentujeme voxelovou mřížkou, kde se v každém voxelu ukládají důležité charakteristiky (hustota a odvozené koeficienty).

Výhody: přesnost, snadná reprezentace detailů (jemnější mřížkou), rychlé vyhodnocování

Nevýhody: velké paměťové nároky (především u animací), špatná editace, problémy s HDR

Množina bodů

Médium reprezentujeme jako množinu bodů (vzorků média) v prostoru. Každý bod má definovanou hustotu, při dotazování je nutno provádět interpolaci z okolních bodů.

Výhody: adaptivní v čase (dobře se animuje) – 1:1 korespondence s částicovou simulací, slušné nároky na paměť, snažší manimulace s daty

Nevýhody: pomalé vyhodnocování, ne úplně zřejmá interpolace mezi body

Analytická reprezentace

Pro média, jež jsou nějak omezena se dá nalézt příhodná analytická reprezentace. Typickým příkladem je atmosféra. Jedná se o rozlehlelé médium ve sféře, jehož hustota klesá s narůstající vzdáleností od středu.

Výhody: velmi rychlé vyhodnocování, není potřeba ukládat v paměti nic víc než parametry funkce, je možné předpočítávat hodnoty

Nevýhody: příliš velká omezení – jednoduché tvary a situace

Kombinace

Lze též využít kombinace několika technik. Například pro mrak můžeme "vnitřek" reprezentovat analytickou funkcí a až na okrajích mít postavenou 3D mřížku dodávající detaily. Další možností je použít billboardy s elementární texturou, které se budou pomocí alfa kanálu míchat dohromady.

Výhody: v mnoha případech dobrý poměr zabrané paměti vůči detailům

Nevýhody: komplikovaná manipulace, vizuální problémy (billboardy mají tendenci být rozmazané a nevypadají realisticky, mraky například nemusí být ani uvnitř homogenní)

Neinteraktivní renderování

Pro offline renderování PMA je možné použít nám již známých metod, které je potřeba jen poupravit, aby počítaly s nepřítomností vakua ve scéně. Opět platí, že některé metody mohou být pro konkrétní případy méně vhodné.

Pathtracing

Pathtracing pro renderování PMA je vcelku výhodný vzhledem ke své univerzálnosti a jednoduchosti. Navíc je tzv. *unbiased*. Dají se ovšem nalézt patologické případy, kdy bude renderování neúnosně pomalé – typicky mraky, které jsou silně anizotropické a dostaví se stejný efekt jako při renderování velmi lesklých povrchů (obecně všech povrchů s vysokým albedem). Myšlenka úpravy pro renderování PMA pomocí pathtracingu spočívá ve vzorkování média ve směru pohledu kamery a generování náhodných procházek skrze médium.

Když dojde k interakci s médiem, je potřeba vzorkovat fázovou funkci a tím najít směr sekundárního paprsku. zároveň se v každém vrcholu cesty udělá napojení na zdroj světla (jako v obyčejném path traceru). Při výpočtu příspěvku světla je ale potřeba testovat nejen binární viditelnost vůči geometrii, ale ještě navíc transmitanci média (mezi zdrojem světla a osvětlovaným bodem). Zbývá ještě uvážit způsob generování bodů událostí.

Naivně lze místa událostí generovat náhodně, je to sice *unbiased*, avšak trvá celou věčnost než výsledný obraz zkonverguje. Rychlost se dá vylepšit díky zohlednění extinkčního koeficientu a upřednostňování míst nacházejících se blíže místu, ze kterého vzorkujeme (*de-facto importance sampling*, ačkoliv zde jako důsledek vlastností média a řešení extinkční rovnice):

$$\int_0^{d_{next}} \sigma_t(s) \cdot ds = -\ln(1 - \xi) \quad (3)$$

Implementačně se řeší pomocí tzv. *ray-marchingu*, který je sice jednoduchý, ale zavádí nám *bias*. Navíc je i málo efektivní, spočívá totiž v navzorkování (3) po malých, fixně zvolených krocích.

Mnohem lepší je použít metodu zvanou *woodcock tracking*, jež se k médiu chová jako by bylo homogenní. Vzorkování je adaptivní, pro délku kroku se používá: $-\ln(1 - \xi_1) \cdot \sigma_{sM}^{-1}$ a vzorkuje se dokud $\sigma_s(x) \cdot \sigma_{sM}^{-1} < \xi_2$, kde σ_{sM} je maximální hodnota rozptylového koeficientu v celém médiu (zjednodušeně se to dá přirovnat ruské ruletě známé z normálního pathtracingu). Tato metoda je však již o trochu komplikovanější, nicméně stále rychlá a *unbiased*.

Volumetrická radiozita

Pro renderování PMA můžeme použít též diskretizaci rovnice (2) a řešit přenos energie mezi buňkami média. Tento přístup je teoreticky *unbiased*, vyřeší nám energii celé scény a škáluje lineárně s počtem rozptylových událostí. Na druhou stranu je velmi pomalý, nehomogenní média se s pomocí něj renderují špatně a má vysoké paměťové nároky. Nehledě na problémy, které mohou způsobit další objekty ve scéně vyplněné PMA.

Volumetrické fotonové mapy

Posledním zmiňovaným způsobem jsou volumetrické fotonové mapy, které jsou analogií plošných fotonových map. Myšlenka rozšíření je taková, že budeme generovat náhodné procházky skrze PMA a ukládat fotony při každé rozptylové události. Následné sbírání energie je ovšem komplikovanější, protože musíme akumulovat výsledky z fotonů umístěných podél cesty trasovaného paprsku. Toho se dá docílit buď pomocí již zmíněného *ray-marchingu*, kde musím pro každý vzorek provést klasický k -NN (k -nearest neighbor) dotaz do fotonové mapy. Alternativně se dá užít tzv. *beam radiance estimate*, kdy se sbírají fotony podél celého paprsku z kamery najednou (takže stačí jediný dotaz). Ten je sice efektivní, ale zato poměrně komplikovaný. Podobně jako pro plošné fotonové mapy, i zde se objevují fleky korelovaného šumu, se kterými je třeba se nějak vypořádat.

Metoda je *biased* a je třeba ukládat ohromné množství fotonů, přesto jde o robustní, jednoduché a rychlé rozšíření algoritmu pro renderování B-rep scény. Tento přístup je hojně používaný.