

Fotonové mapy

Martin Bulant

21. března 2011

1 Photon mapping

Fotonové mapy jsou podobné obousměrnému sledování cest, ale odlišují se tím, že se nedělá vše najednou. Je oddělena propagace světla do scény od jeho sbírání do výsledného obrázku. Algoritmus se tedy dělí na 2 základní části:

- Propagace světla ze zdrojů do scény a jeho uložení ve fotonové mapě.
- Zobrazení výsledného obrázku z dat uložených ve fotonové mapě.

Ve fotonových mapách se přepoužívají části světelných cest, to znamená že pro různé pixely ve výsledném obrázku se použije stejný foton z fotonové mapy a tedy i jemu odpovídající cesta ze zdroje až k jeho pozici ve fotonové mapě.

1.1 Vlastnosti fotonových map

Fotonové mapy nejsou nestranné, ale jsou konzistentní. Že nejsou nestranné znamená, že obsahují nějakou systematickou chybu. Tou je v tomto případě průměrování (rozmazávání) radiance získávané z fotonové mapy. Konzistence nám říká, že pokud použijeme nekonečný počet fotonů, dostaneme správný výsledek.

Další ne příliš pěknou vlastností je, že algoritmus má velké množství parametrů, které je třeba nastavit ještě před zahájením výpočtu. Důsledkem toho se může stát, že pro danou scénu, která není pro fotonové mapy úplně vhodná, nastavíme nedostatečně velké hodnoty parametrů a dostaneme škaredý výsledek i přes to, že stejné nastavení pro většinu scén dává výsledky pěkné.

Mezi tyto parametry patří celkový počet emitovaných fotonů, počet fotonů, které se budou brát pro odhad radiance, s čímž souvisí poměr, ve kterém se radiance bude průměrovat, dále také počet paprsků použitých pro final gathering a další.

1.1.1 Požadované chování

Chceme spojitou radianci na difúzních plochách. S tím má problémy hlavně přímé zobrazení fotonových map, kde se projevuje velký rozptyl v radianci. Ale i jiné metody se nemusí chovat pěkně. Například pokud se nastaví příliš velký

počet vzorků pro odhad radiance, čímž se zvětší poloměr oblasti ve které se tento počet vzorků nachází, důsledkem čehož se nezobrazí stíny. Naproti tomu při příliš malém počtu vzorků v odhadu dostaneme malý poloměr a tím ztratíme spojitost na difúzních plochách.

1.2 Emitování a sledování fotonů

Na emitování fotonů máme jeden hlavní požadavek, kterým je, aby všechny fotony měly stejnou energii. Pokud by ji neměly, tak i při difúzním osvětlení může vzniknout škaredý obrázek, který bude mít velký rozptyl radiance.

Při sledování cesty pro foton chceme zachovat konstantní tok fotonu. Toho dosáhneme například pomocí tzv. ruské rulety, tedy tím, že budeme více absorbovat fotony s malou energií. Aby se nám ve scéně neztrácela energie touto uměle přidanou absorpcí, musíme fotonům, které nebyly absorbovány, přidat tok i za fotony, které absorbovány byly. Tento přidaný tok pak kompenzuje přirozený úbytek energie fotonu při odrazu na ploše, a tok fotonu zůstává konstantní.

1.3 Ukládání fotonů

Fotony se ukládají především na difúzních površích, pokud pracujeme s lesklými, tak i na nich. Ale neukládají se pro zrcadlové plochy, neboť by se násobilo nulou a to z toho důvodu, že BRDF pro zrcadlovou plochu je delta distribuce. V první fázi se fotony pouze ukládají do lineárního pole a ve druhé fázi výpočtu se z nich postaví KD-strom kvůli zrychlení jejich vyhledávání.

Pro ukládání fotonů se používají 2 různé mapy. Globální mapa a mapa kaustik. Do první se ukládají všechny vystřelené fotony. Do druhé se ukládají pouze fotony, které prošly přes zrcadlový odraz nebo lom. Kaustiky se ukládají do zvláštní mapy, jelikož v globální mapě by pro ně nebyl dostatečný počet vzorků. Dotaz do mapy kaustik se provádí přímo pro primární paprsky, kdežto dotaz do méně přesné globální mapy se provádí až po jedné úrovni distribution ray tracingu (tj. final gather).

1.4 Zobrazování fotonové mapy

Zobrazení lze provádět např. pomocí sledování paprsku s dotazy do fotonové mapy, kdy po dopadu na zrcadlový povrch pokračujeme v raytracingu. Radiance se z fotonové mapy odhaduje tak, že se v kouli o určitém poloměru kolem aktuálně zkoumaného průsečíku vyhledají všechny fotony. To má ovšem problém s hranicemi kaustik a s rohy, kde se do hledané oblasti započítají i nesprávné fotony.

Pro odhad radiance z fotonové mapy se použije vzorec:

$$L_r(x, \vec{\omega}_o) \approx \frac{1}{N} \frac{1}{\pi r^2} \sum_{p=1}^k f_r(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_p) \Phi_p(x_p, \vec{\omega}_p),$$

kde $L_r(x, \vec{\omega}_o)$ je odražená radiance z bodu x ve směru ω_o , N je celkový počet fotonů, r je poloměr oblasti, ve které se nacházejí fotony pro odhad radiance, $f_r(x, \vec{\omega}_p, \vec{\omega}_o)$ je BRDF v bodě x pro příchozí směr $\vec{\omega}_p$ a odchozí směr $\vec{\omega}_o$ a $\Phi_p(x_p, \vec{\omega}_p)$ je tok fotonu v bodě x_p ze směru $\vec{\omega}_p$.

1.4.1 Přímé zobrazení fotonové mapy

Fotonovou mapu lze zobrazovat přímo, ale to nedává příliš pěkné obrázky, protože na difúzních plochách, kde byla malá hustota fotonů, vzniká velký rozptyl radiance. Ale pokud bychom chtěli zobrazovat pouze kaustiky, tak nám přímé zobrazení stačí. Je tomu tak proto, že kaustika je zaostření světla, to znamená, že je v ní vyšší hustota fotonů a díky tomu jsme schopni přesněji odhadnout radianci.

1.4.2 Final gathering

Od přímého zobrazení fotonové mapy se liší tím, že v místě dopadu primárního paprsku se nevezmou hodnoty přímo z fotonové mapy, ale provede se ještě jeden distribuovaný krok, spočívající v navzorkování polokoule nad místem dopadu a vržení paprsků získanými směry. Dotazy do fotonové mapy se pokládají až pro místa průsečíků těchto paprsků se scénou. Radiance získaná z těchto paprsků se samozřejmě musí přenásobit BRDF. Použitím final gatheringu se zbavíme příliš velké nepřesnosti, která je v globální fotonové mapě.

Final gathering se dá pro difúzní osvětlení a Lambertovské povrchy zrychlit tak, že se použije irradiance caching. Ten využívá výsledky z předchozích dotazů pro final gathering a lze ho ještě zpřesnit použitím translačních a rotačních gradientů.

Místo final gatheringu by šlo použít i sledování cest (path tracing), což by ale zbytečně zvýšilo náročnost celého algoritmu.

1.5 Výhody fotonových map

Fotonové mapy jsou výborné pro zobrazování kaustik. Je to i díky tomu, že je lze filtrovat. Dále jsou dobré pro zobrazování difúzních povrchů, ale to jen v tom případě, že se použije final gathering nejlépe ještě vylepšený o irradiance caching. Další výhodou je, že pro stejně kvalitní obrázky jsou většinou rychlejší než nestranné Monte Carlo techniky jako např. (obousměrné) sledování cest.

1.6 Problémy fotonových map

Prvním problémem je bias, který vzniká z důvodu pevného celkového počtu fotonů a pevného počtu fotonů použitých pro odhad radiance. Dalším je neprogresivita a to především fixnost parameterů. Máme pevně daný počet průchodů, v první fázi provedeme pouze jedno sledování fotonů a pak už se pouze zobrazují získané výsledky. Z toho plyne, že přesnost se dá nastavit pouze na začátku výpočtu. Dalším je paměťová náročnost, která je důsledkem velkého počtu fotonů, které jsou potřebné pro složité kaustiky. Dalším je, že nelze automatizovat

nastavení parametrů. Posledním problémem jsou lesklé plochy, kde se nám při final gatheringu na nich díky úzkému laloku BRDF opět zvýrazní nepřesnosti globální fotonové mapy. To se sice dá řešit použitím dalších rekurzivních kroků final gatheringu, ale tím se ztratí velká část výhod fotonových map.

2 Progressive photon mapping

Od obyčejných fotonových map se liší tím, že je zde prohozeno pořadí průchodů. Nejdříve se do scény vystřelí paprsky z kamery a průsečíky se zaznamenají. Až poté se do scény střílejí fotony. Díky tomuto prohození lze druhý průchod libovolněkrát opakovat. To umožňuje pracovat s větším počtem fotonů. Díky opakování druhého kroku můžeme progresivně zmenšovat poloměr ve kterém se počítá odhad radiance. To jsme navíc schopni provádět takovým způsobem, že současně se zmenšováním poloměru jsme schopni zmenšovat i bias a rozptyl radiance. Při každé iteraci se vystřelí nějaký počet fotonů, které se na konci iterace zase zahodí a jejich příspěvek se uloží do kumulovaných veličin.

2.1 První fáze

V první fázi se provádí raytracing až k difuzní ploše s možným zakončením dříve pomocí ruské rulety. Přičemž je třeba si pro každý průsečík uložit následující informace: pozice, normála, směr, BRDF, pozice pixelu, váhový koeficient (tj. váha s jakou daný bod přispívá k výsledné barvě pixelu). Pro každý průsečík budeme během výpočtu udržovat následující statistiky: poloměr, počet akumulovaných fotonů, akumulovaný tok.

2.2 Druhá fáze

Výhodou druhé fáze v progresivních fotonových mapách je, že po každé iteraci druhého kroku lze scénu vykreslit, což zlepšuje obrázek, jelikož se v každém kroku zpřesní globální osvětlení.

Při každé iteraci se do scény vystřelí nové fotony, pomocí nich se upřesní globální osvětlení a fotony můžeme zahodit. Pro každý bod získaný v první fázi si pamatujeme tok jemu odpovídajících fotonů.

2.2.1 Odhad hustoty

Ve fotonových mapách lze průměrovat více map se stejným poloměrem, ale bohužel to nezlepšuje přesnost, výsledek nebude obsahovat větší detaily, než jednotlivé mapy použité k průměrování.

Zde jednotlivé fotonové mapy získané v jednotlivých iteracích kombinujeme takovým způsobem, že výsledný odhad radiance konverguje k přesné hodnotě radiance v daném bodě.

2.2.2 Podmínky konvergence

Pro přesný odhad radiance $L(x, \vec{\omega})$ z bodu x ve směru $\vec{\omega}$ platí tento vzorec:

$$L(x, \vec{\omega}) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{p=1}^{\lfloor N^\beta \rfloor} \frac{f_r(x, \vec{\omega}, \vec{\omega}_p) \Phi_p(x_p, \vec{\omega}_p)}{\pi r^2}$$

Kde N je celkový počet fotonů, N^β je počet fotonů použitý pro odhad radiance, kde $\beta \in (0, 1)$ a r je poloměr oblasti, ve které se odhaduje radiance.

Základní podmínkou konvergence nejen progresivních fotonových map, ale i obyčejných fotonových map je, že počet fotonů jde do nekonečna. V progresivních fotonových mapách je dle vzorce výše třeba zvolit β tak, aby i počet vzorků v odhadu konvergoval k nekonečnu, ale řádově pomaleji. Důsledkem čehož pak poloměr konverguje k nule. Po každé iteraci je tedy třeba zmenšit poloměr ve kterém se počítá odhad radiance a zároveň zvýšit počet fotonů ze kterých se radiance odhaduje.

2.2.3 Redukce poloměru

Tím že nastřílíme do scény nové fotony, můžeme si dovolit zmenšit poloměr při zachování alespoň stejné hustoty a tedy i přesnosti. Poloměr budeme zmenšovat jen v tom případě, že se zvýší počet akumulovaných fotonů. Pro nový poloměr $\hat{R}(x)$ kolem bodu x platí vzorec:

$$\hat{R}(x) = R(x) \sqrt{\frac{N(x) + \alpha M(x)}{N(x) + M(x)}}$$

Kde $R(x)$ je původní poloměr, $N(x)$ je počet dosud akumulovaných fotonů, $M(x)$ je počet nových fotonů v disku o poloměru $R(x)$ a α udává, jak velkou část z nových fotonů chceme přidat k již akumulovaným.

2.2.4 Korekce toku

Pro nové fotony se tok spočítá pomocí součinu jejich toku s odpovídající hodnotou BRDF. Pro neměnný poloměr by byl nový tok součtem toků starých a nových fotonů, bohužel my musíme ještě provést korekci na nový poloměr. Abychom toto mohli provést, předpokládáme konstantní hustotu fotonů uvnitř kruhu. Pro výsledný tok $\tau_{\hat{N}}(x, \vec{\omega})$ z bodu x ve směru $\vec{\omega}$ pro nový počet akumulovaných fotonů \hat{N} platí:

$$\tau_{\hat{N}}(x, \vec{\omega}) = (\tau_N(x, \vec{\omega}) + \tau_M(x, \vec{\omega})) \frac{N(x) + \alpha M(x)}{N(x) + M(x)}$$

Kde $N(x)$ je počet dosud akumulovaných fotonů, $M(x)$ je počet nových fotonů a α udává, jak velkou část z nových fotonů chceme přidat k již akumulovaným.

2.2.5 Odhad radiance

Abychom mohli obrázek vykreslit po i krocích. Musíme být schopni odhadnout radianci po i -tém kroku. Pro výpočet radiance platí vzorec:

$$L(x, \vec{\omega}) \approx \frac{\tau_i(x, \vec{\omega})}{N_e(i)\pi R_i(x)^2}$$

Kde $L(x, \vec{\omega})$ je odchozí radiance z bodu x ve směru ω , $\tau_i(x, \vec{\omega})$ je tok jdoucí z bodu x ve směru ω po i -tém kroku, $R_i(x)$ je poloměr po i -tém kroku a N_e je celkový dosud emitovaný počet fotonů.

2.3 Výsledky

Oproti fotonovým mapám dávají progresivní fotonové mapy ostřejší obrázky. Hlavní výhodou je, že lze použít velké množství fotonů. Bohužel i progresivní fotonové mapy mají stále nějaké problémy:

- špatně zobrazují lesklé povrchy
- mají fixní počet paprsků na pixel a proto se špatně dělá rozmazání pohybem a hloubka ostrosti
- pokud zvolíme příliš malý počet paprsků, už to není možné zachránit zvyšováním počtu fotonů

Druhý bod souvisí s tím, že progresivní fotonové mapy jsou schopny spočítat korektní radianci pro konkrétní bod. Ale efekty jako rozmazání pohybem a hloubka ostrosti potřebují radianci v nějaké oblasti. Což je důvod vzniku Stochastických progresivních fotonových map.

3 Stochastic Progressive Photon Mapping

Stochastické progresivní fotonové mapy začínají stejně jako progresivní fotonové mapy, ale po iteraci progresivních fotonových map lze provést distribuovaný raytracing a pak se vrátit zpět ke střílení fotonů. Důsledkem toho už body, ve kterých se odhaduje radiance z fotonové mapy nejsou fixní. Místo bodů se pracuje s oblastmi, kdy oblast většinou odpovídá pixelu. Pracuje se tedy se statistikami (odhad radiance, tok a poloměr) sdílenými pro jednotlivé oblasti.

3.1 Stochastický odhad radiance

Jde o stochastické rozšíření původního estimátoru pro oblasti. Ukládají se pouze akumulované statistiky pro oblasti. Progresivní fotonové mapy nemají pro hloubku ostrosti v neostrých místech dostatek paprsků, čímž v těchto místech vznikají šmouhy. Ovšem stochastické progresivní fotonové mapy to zvládají jak lesklé povrchy, tak rozmazání pohybem.

3.2 Výhody Stochastických progresivních fotonových map

Pro většinu scén konvergují rychleji a algoritmus použije méně paměti než je tomu u progresivních fotonových map. Velmi dobře zobrazují efekty, kde je třeba mít spočítanou radianci pro oblast, jako rozmazání pohybem a hloubka ostrosti.

3.3 Odhad chyby

Existuje softwarové prostředí, pomocí kterého lze odhadovat chybu odhadu hustoty fotonů. Přičemž pro nestranné metody se jako chyba bere rozptyl, jinak se bere rozptyl a bias. To umožňuje automaticky zastavit výpočet pokud už se s chybou obrázku dostaneme pod zadanou hranici.

Reference

- [1] Hachisuka, T.; Jensen, H. W.: Stochastic Progressive Photon Mapping. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Asia 2009)*, 2009.
- [2] Hachisuka, T.; Jensen, H. W.; Ogaki, S.: Progressive Photon Mapping. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Asia 2008)*, 2008.
- [3] Křivánek, J.: Fotonové mapy. 2010.
URL <<http://cgg.mff.cuni.cz/~pepca/lectures/pdf/pg3-06-pm.pdf>>
- [4] Šváb, T.: Progressive photon mapping. 2011.
URL <<http://cgg.mff.cuni.cz/~jaroslav/teaching/npgr031/04-stgi-ppm-slides%20-%20tomas%20svab.pdf>>