

V osmém dílu tohoto seriálu jsme se hlouběji zabývali tím, jak se odráží světlo od povrchu objektu a jak se z tohoto odrazu v počítačové grafice odvozuje barva bodu. Zabývali jsme se odrazem jediného paprsku od jediného bodu na povrchu objektu a model, který tento jev popisuje, jsme označili jako lokální osvětlovací model.

## Globální osvětlovací modely

V praxi pochopitelně dochází k mnohonásobným odrazům světla mezi různými objekty a barva bodu je pak výslednicí komplikované trajektorie mnoha světelných částic. Techniky, které tento fakt berou v potaz, se označují jako *globální osvětlovací modely* a mezi jejich nejznámější reprezentanty patří radiační metoda (radiozita) a metoda rekurzivního sledování paprsku (raytracing).

### Odras světla

Empirické lokální osvětlovací modely, tedy modely založené na popisu, který není nijak fyzikálně podložen, a přesto poskytuje realistické výsledky, byly uvedeny v osmém dílu seriálu. Řekli jsme si také, že tyto modely v podstatě uvažují dva mezní případy odrazu světla – odraz *zrcadlový* (*specular*) a odraz *difuzní* (*diffuse*). Difuzní odraz způsobuje rovnoměrný rozptyl přicházejícího světla do všech stran, zatímco zrcadlový odraz odrazí dopadající světlo přesně podle zákona o rovnosti úhlu odrazu a úhlu dopadu tak, jak je uvedeno na obrázku. Podstatné je, že při difuzním odrazu světelného paprsku “vzniká” množství nových paprsků, zatímco při odrazu zrcadlovém žádný nový paprsek nevzniká.

Lokální osvětlovací modely se zabývají pouze odrazem světla od jediného bodu na povrchu objektu a nezabývají se násobnými odrazy, o což se pokoušejí osvětlovací modely globální. V těchto modelech je tedy smysluplné uvažovat například odraz světla mezi povrchy, který jsou ideálně difuzní a ideálně zrcadlové. Postupnou klasifikací podle mezních případů dostaneme čtyři základní možnosti transportu světla mezi různými druhy povrchů: difuzní – difuzní, zrcadlový – difuzní, difuzní – zrcadlový a zrcadlový – zrcadlový.

Důležité je, že se v realitě každý z těchto případů může vyskytnout jako důsledek libovolné kombinace odrazů předcházejících. Schematický obrázek ukazuje případ, kdy vznikl difuzně-zrcadlový odraz jako důsledek několika odrazů mezi zrcadly a jedinou difuzní plochou. Obecně může samozřejmě vzniknout libovolný typ odrazu jako důsledek libovolné posloupnosti předcházejících odrazů. Je zjevné, že přesnost výpočtu v tomto případě souvisí s kvalitou výsledného obrazu známou úměrou – čím lepší výsledek, tím delší dobu výpočtu musíme očekávat. Existují různé algoritmy, které popisují různé varianty odrazu světla, a hned na tomto místě je nutno podotknout, že žádný z nich nepopisuje přesně všechny čtyři zmíněné varianty.

Odras typu zrcadlo – zrcadlo je vynikajícím způsobem popsán všeobecně známou metodou *rekurzivního sledování paprsku* (*raytracingem*), o níž se zmíníme dále. Pokud se ve scéně vyskytne

difuzní povrch, dojde při užití této metody k simulaci odrazu světla pouze směrem k pozorovateli, ne však k dalším povrchům ve scéně. Jinými slovy řečeno difuzní povrch je zobrazen přesně, ale světlo se od něj dále nešíří. Metoda sledování paprsku tedy selhává v takových případech, jako je ten, uvedený na dalším obrázku. Pokud se v posloupnosti zrcadlových odrazů vyskytne jeden odraz difuzní, simulace se v tomto místě zastaví. Tuto vlastnost metody sledování paprsku prakticky nelze odstranit. Existuje nepřehledné množství pokusů a variant základního algoritmu, které do určité míry řeší jednotlivé patologické případy, ale řešení jako celek v této metodě není možné. Obrázky získané metodou - sledování paprsku mají proto vždy zřetelnou signaturu – nepřírozeně ostré odrazy, ostré stíny, konstantní nebo lineární barevné přechody na difuzních površích atp. Existují varianty základního algoritmu, které popisují i odraz mezi difuzním povrchem a zrcadlem.

Odraz světla mezi dvěma difuzními povrchy je skvěle popsán *radiační metodou (radiosity)*. Tato metoda však zase neposkytuje formální aparát pro simulaci zrcadlových odrazů, a tak jsou na obrázcích, které jsou výstupem radiační metody, resp. její základní varianty, všechna zrcadla černá. Dalším podstatným rozdílem mezi těmito algoritmy je, že zatímco metoda sledování paprsku poskytuje jedno, pohledově závislé řešení (tedy obrázek), radiační metoda poskytuje celkovou světelnou bilanci scény, kterou můžeme prohlížet ze všech možných stanovíšť.

Odraz zrcadlo – difuze je řešen empiricky tzv. metodou *zpětného rekurzivního sledování paprsku (backward raytracingem)*. V tomto algoritmu, na rozdíl od základní varianty algoritmu, se uvažuje šíření světla od světelného zdroje. Variantou tohoto postupu v radiační metodě je tzv. metoda *sledování fotonů (photon tracing)*.

## Útlum světla

Globální osvětlovací metody by rovněž měly popisovat pohlcování světla v prostředí, v němž se šíří, a jeho rozptyl na částicích prachu, vzduchu a aerosolů. Existují poměrně přesné popisy fyzikálních vlastností atmosféry a mraků a tato data nacházejí stále více cestu do algoritmů, které se využívají v počítačové grafice. Můžeme se tedy setkat s různými simulacemi průletu atmosférou, s popisem takových jevů, jako je halo kolem Slunce či Měsíce, s odrazem světla na sněhu atp. Příslušný obrázek ukazuje scénu ponořenou do syntetické mlhy. Algoritmy řešící spolehlivě tyto úlohy jsou však buď nesmírně výpočetně náročné, nebo naopak nepodávají realistické výsledky, a tak si na přesné algoritmy v této oblasti budeme muset zřejmě ještě nějaký ten pátek počkat.

V algoritmech, které se používají v praxi, se z těchto důvodů považuje útlum prostředí za konstantní a intenzita světla za klesající pouze s druhou mocninou vzdálenosti od světelného zdroje. To je nesmírně důležitý fakt, který umožňuje výrazně urychlit velké množství výpočtů, protože se můžeme zabývat pouze těmi odrazy, které k výsledné kvalitě obrazu přispívají výraznější měrou, řekněme alespoň deseti procenty pro jeden pixel. Pokud klesne intenzita světla pod námi zvolenou hodnotu, nemusíme se dalším transportem paprsku v prostoru již zabývat.

## Metoda sledování paprsku

Metoda rekurzivního sledování paprsku byla poprvé popsána někdy kolem roku 1980. Od té doby se tento algoritmus stal snad nejznámější aplikací počítačové grafiky, zejména proto, že jeho výstupem jsou tzv. *fotorealistické obrazy*. Tyto velmi přesvědčivé a především velice věrohodné obrazy přispěly k nesmírnému vzrůstu atraktivity počítačové grafiky v očích laické veřejnosti a vedly možná až

k přecenění významu počítačové grafiky jako celku. Algoritmus sám o sobě není nijak zvlášť komplikovaný, je však velice výpočetně náročný, a proto vznikla jeho různá vylepšení, která již složitá jsou.

Podstata algoritmu spočívá v tom, že se sleduje dráha světla, které prochází každým pixelem obrazu. Toho se docílí tak (viz obrázek), že se vrhne paprsek směrem *od pozorovatele* do každého pixelu obrazovky. Předpokládá se, že v počítači je virtuální scéna, ve které jsou jednotlivé objekty a světla, a že poloze pozorovatele odpovídá virtuální kamera. Paprsek, který prochází pixelem, může mít různý osud. Může se odrazit od nějakého objektu některým ze způsobů, které jsou uvedeny na začátku článku, může narazit na jiný objekt, může zasáhnout nějakou část scény, která ho pohltí, může se utlumit v mlze, může scénu zcela opustit, může se rozdělit na dva paprsky či více paprsků, případně zasáhnout světelný zdroj. Nejčastějším případem je samozřejmě opuštění scény a odrazení od nějakého objektu. Test průsečíku paprsku s nějakým objektem a výpočet směru odraženého paprsku je tedy nejdůležitější součástí tohoto algoritmu. Všechny uvedené případy osudu paprsku musejí být explicitně testovány. Čtenář znalý programování si již patrně uvědomil, že implementace algoritmu sledování paprsku jako objektového programu je poměrně jednoduchá.

Samostatnou kategorií v této metodě je výpočet vržených stínů, které samozřejmě pocházejí od světelných zdrojů. Ty se vypočítávají tak, že se v místě každého odrazu paprsku světla od povrchu objektu vrhnou ještě ke všem světelným zdrojům sekundární, tzv. *stínovací paprsky (shadow rays)*. Ty pouze testují viditelnost světelného zdroje z příslušného místa. Pokud je světelný zdroj vidět, je bod tímto světlem osvětlen, pokud zdroj vidět není, leží ve stínu. Podle toho se příslušná intenzita jasu bodu sníží nebo zvýší. Stínovací paprsky se samozřejmě musí vrhat ke všem světelným zdrojům, takže počet použitých světél výrazně ovlivňuje rychlost výpočtu obrazu.

Jak je patrné, zásadní operací algoritmu je testování průsečíku paprsku s objektem. Těchto operací se skutečně provádí velice mnoho a různé techniky, které se pokoušejí o efektivní implementaci, se především snaží minimalizovat právě tyto výpočty. Nejčastější praktikou je různým způsobem rozdělit scénu a sdružovat objekty do skupin. Je potom jasné, že pokud paprsek nezasáhne skupinu, nemůže zasáhnout ani její jednotlivé objekty. Tomuto postupu se říká *hierarchizace scény*.

Jinou možností je využití tzv. *obklopujících obálek (convex hulls)*. Objekt sám o sobě může být poměrně komplikovaný, a test průsečíku paprsku s ním tedy výpočetně náročný. Pokud jej však obklopíme nějakým tělesem, se kterým je výpočet průsečíku jednoduchý, například koulí či kvádrem, můžeme provést nejprve test s touto obálkou, a pokud není zasažena ona, nemůže být zasažen ani vlastní objekt. Tento test končí neúspěchem ve více než devadesáti procentech případů, a proto je hojně využíván.

Existují kilogramy literatury zabývající se urychlováním metody sledování paprsku. Tato oblast ještě není zdaleka uzavřená – zejména proto, že algoritmus je komerčně velice úspěšný, a je tedy nesmírně často používán v praxi. Průměrná doba výpočtu jednoho snímku v rozlišení videa (i když je samozřejmě těžké říci, co je to průměrný snímek a na čem se počítá) se pohybuje někde mezi jednou minutou až několika hodinami. Je tedy zjevné, že urychlovací techniky jsou zde zcela na místě.

Jistě by se mnohé dalo urychlit hardwarově, ale jak se ukazuje, hardwarová akcelerace není vůbec jednoduchá. Algoritmus sám o sobě je rekurzivní, protože každý paprsek se odrazí a tím generuje další paprsek nebo paprsky. Rekurzivní algoritmy se ze své podstaty v hardwaru implementují obtížně. Druhým problémem je, že není příliš jasné, co by se v hardwaru mělo implementovat. Nejjednodušší by bylo implementovat test průsečíku paprsek – objekt, ale objektů je celá řada, a které z nich by se tedy měly vybrat? Světlem na konci tohoto tunelu je snad NURBS reprezentace, o níž jsme

hovořili v jednom z předcházejících dílů seriálu a která se stává standardem v CAD a modelování vůbec. Tato reprezentace umožňuje jednotné vyjádření všech používaných objektů, a to jak klasických koulí a kvádrů, tak i volně definovaných ploch, které se používají například v CAD nebo ve strojírenství. K výpočtu průsečíku s libovolným objektem je tedy zapotřebí jediná procedura, která vypočítá průsečík NURBS plochy s paprskem. Tento výpočet však není nijak jednoduchý, nicméně objevují se již první vlašťovky, a tak se snad dočkáme hardwarových akceleratorů pro metodu sledování paprsku už v brzké době.

Jak bylo řečeno výše, sledování paprsku můžeme ukončit tak, že se stanoví limit, pod který nesmí klesnout intenzita světla. To však platí v případě, když postupujeme od světelného zdroje. V metodě sledování paprsku ale postupujeme od pozorovatele ke zdroji světla, takže toto kritérium není možné použít. Obvykle se tedy stanovuje počet nezbytných odrazů a ukazuje se, že sedm je pro většinu aplikací zcela postačující. V některých případech – například ve scénách, kde jsou skleněné objekty – je nutné použít odrazů daleko více.

Jak již bylo řečeno, metoda sledování paprsku výtečně popisuje přenos světla mezi zrcadlovými plochami. Obrázky, které jsou výstupem metody sledování paprsku, mají tedy charakteristické rysy, které jsou důsledkem tohoto faktu. Obvykle mají ostré stíny, jsou nepřírodně lesklé a textury, které jsou na površích objektů, působí při bližším pohledu nevěrohodně. To nelze zlepšit zvýšením kvality renderingu, ale jen použitím jiných metod, konkrétně takových, které simulují přenos světla mezi difuzními povrchy.

S metodou sledování paprsku je spojeno několik nepřesností v terminologii, a proto se pokusím vysvětlit některé z nich hned na tomto místě.

*Vrhání paprsku (ray casting)* je zvláštním případem sledování paprsku, ve kterém se neuvažují žádné odrazy. Jedná se tedy o pouhé vyšetření průsečíku paprsků vržených od pozorovatele do scény s tím, že se mohou nebo nemusí vypočítávat stíny.

*Distribuovaná metoda sledování paprsku (distributed raytracing)* není paralelní nasazení metody sledování paprsku, ale metoda, která vrhá do jediného pixelu více paprsků. To se obvykle provádí za účelem snížení aliasu a jedná se v podstatě o vzorkování s vyšší frekvencí tak, jak bylo popsáno ve druhém dílu seriálu.

*Paralelní sledování paprsku (parallel raytracing)* je aplikací sledování paprsku na více počítačích či procesorech. Obvykle se aplikuje rozdělení obrazu na pruhy nebo čtverce a každý z nich je vypočítáván na jiném procesoru.

Jak je ze schematického obrázku zřejmé, metoda sledování paprsku poskytuje jediný, pohledově závislý výpočet scény. To je její předností a nevýhodou zároveň. Pokud máme scénu, která se nijak nemění, a jediné, co se v ní pohybuje, je kamera (walk through), musíme touto metodou vypočítávat scénu pro každý snímek znovu, což je časově nesmírně náročné. Výhodou pohledově závislého renderingu je, že se vypočítávají pouze ty pixely, které jsou nezbytné. Bude-li například někde v dálce nesmírně komplikovaný objekt, může se stát, že ho vůbec žádným paprskem nezasáhneme. Tato metoda je tedy částečně adaptivní v tom smyslu, že se zabývá pouze tím, co je nezbytně nutné.

## **Radiační metoda**

Již jsem se zmínil o tom, že radiační metoda popisuje přenos mezi difuzními povrchy, což metoda sledování paprsku neumožňuje. Abychom začali tam, kde jsme skončili v předcházejícím odstavci,

znovu připomínám, že tato metoda vypočítává světelnou bilanci celé scény. Jinými slovy řečeno, jejím výsledkem není jediný obrázek, ale vypočítané intenzity a barvy světla na všech plochách ve scéně. Jakým způsobem je zobrazíme, je potom na nás. Obyčejně se k tomu používají hardwarové akcelerátory grafických pracovních stanic a OpenGL.

Je zřejmé, že pokud se v takové scéně bude pohybovat pouze kamera, můžeme generovat velice efektivní průchody scénou. Zcela podstatnou nevýhodou je, že radiační metoda neumožňuje počítat scény, které jsou otevřené. Z toho pramení i fakt, že radiační metoda nachází aplikace hlavně v architektuře a stavebnictví, kde se používá zejména pro simulaci interiérů.

Zatímco metoda sledování paprsku je zcela empirická, radiační metoda je založena na pozorování přenosu energie mezi povrchy, a je tedy založena na fyzikální bázi. Z toho plyne i poměrně nepříjemný fakt, že její popis není zdaleka tak snadný jako popis metody sledování paprsku, a stejně tak je velice náročná i její implementace.

Velmi zjednodušeně řečeno pracuje radiační metoda na tom principu, že se pro každou plochu, která se ve scéně nachází, vypočítá, jak moc "vidí" ostatní plochy. K tomu se mohou použít klasické přesné geometrické algoritmy, dnes se ale častěji používá aproximace pomocí ray castingu. Míra viditelnosti se označuje jako *form factor* a je úhelným kamenem celé metody, protože je nesmírně výpočetně náročná. Musí se totiž vypočítat, jak každá ploška ovlivňuje každou plošku, a ve druhé fázi se z těchto údajů a z údajů o světelných zdrojích vypočítá, kolik světla a odkud na kterou plošku dopadá. Velice příjemné je, že tento výpočet lze provádět inkrementálně, tedy tak, že se nejprve určí, co zasáhnou světelné zdroje, poté se určí, co zasáhne první odraz, druhý atd. Tím řešení postupně konverguje a je možné je ukončit na základě již několikrát zmiňovaného kritéria o útlumu světla se vzdáleností, případně na základě jiných kritérií. Scéna se nám tak jakoby rodí před očima, "vykukuje" z úplné tmy do stále se projasňujícího obrazu.

Další jev, který radiační metoda umožňuje simulovat, je tzv. *krváčení barev (color bleeding)*. To je důsledkem difuzního odrazu světla a projevuje se tak, že například na zcela bílé ploše, která sousedí s plochou červenou, jsou zřetelné červené artefakty.

Zatímco časová náročnost metody sledování paprsku se měří v minutách, u radiační metody jde spíše o desítky minut až hodiny. Tento fakt společně s již zmíněným omezením radiační metody na uzavřené scény by tuto metodu zdánlivě odsuzovaly k nepoužitelnosti. Skutečně komerčních aplikací, které tuto metodu používají, není zdaleka tolik, jako těch, jež používají sledování paprsku, na druhou stranu je však tato metoda natolik obecná a navíc fyzikálně korektní, že je předmětem velice intenzivního výzkumu v oblasti počítačové grafiky.

V předcházejících letech se chvíli zdálo, že cesta k simulaci všech druhů odrazu vede přes kombinaci sledování paprsku a radiační metody. V současné době radiační metoda opustila své původní hranice a stává se zcela obecným, i když časově stále neúnosně náročným nástrojem pro simulaci šíření světla v prostoru. Tím navíc počítačová grafika překročila své hranice a stala se interdisciplinární, protože výsledky radiační metody nacházejí uplatnění i v takových aplikacích, jako je přenos energie mezi objekty, simulace šíření světla, nauka o materiálech z hlediska optických vlastností aj.

*Bedřich Beneš*

**Doporučená literatura:**

A. Watt, M. Watt: Advanced Animation and Rendering Techniques, Addison Wesley 1992

J. Žára, B. Beneš, P. Felkel: Moderní počítačová grafika, Computer Press 1998