

Photon-Mapping

© 2009-2016 Josef Pelikán
CGG MFF UK Praha

pepca@cgg.mff.cuni.cz

<http://cgg.mff.cuni.cz/~pepca/>



Základy Photon-mappingu

- ◆ založen na **vrhání paprsků**
 - libovolná **geometrie scény**
 - využití dlouho laděných **knihoven, urychlovacích technik**, apod.
- světlo se sleduje **zepředu** (od zdroje) i **zezadu** (od kamery)
 - ◆ kamera reprezentuje důležitost (potenciál)
 - ◆ světla jsou zdroje fotonů
- ◆ oddělení geometrie scény od reprezentace světla
 - ◆ umožňuje mít libovolně složitou 3D scénu
 - ◆ reprezentaci světla lze nezávisle optimalizovat



Fotonová mapa (Photon-map)

- ◆ datová struktura ukládající **dopady jednotlivých fotonů**
 - reprezentuje dobře i velmi variabilní funkci osvětlení
 - zcela oddělena od geometrie scény
 - úsporná reprezentace v paměti
- „cache cest světla obousměrného Path-tracingu“
 - ◆ odhad funkce osvětlení však nevykazuje VF šum
 - ◆ .. při stejné kvalitě je mnohem rychlejší než M-C techniky
- ◆ ztráta **nestrannosti** !
 - ◆ ale konzistentní (konverguje při zvětšování počtu fotonů)



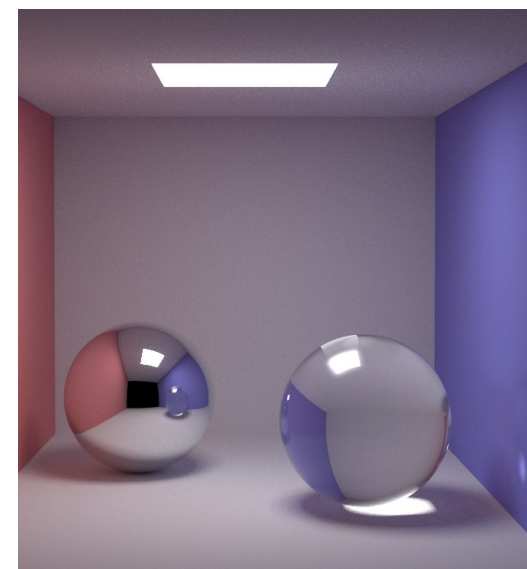
Struktura algoritmu

◆ Photon-tracing

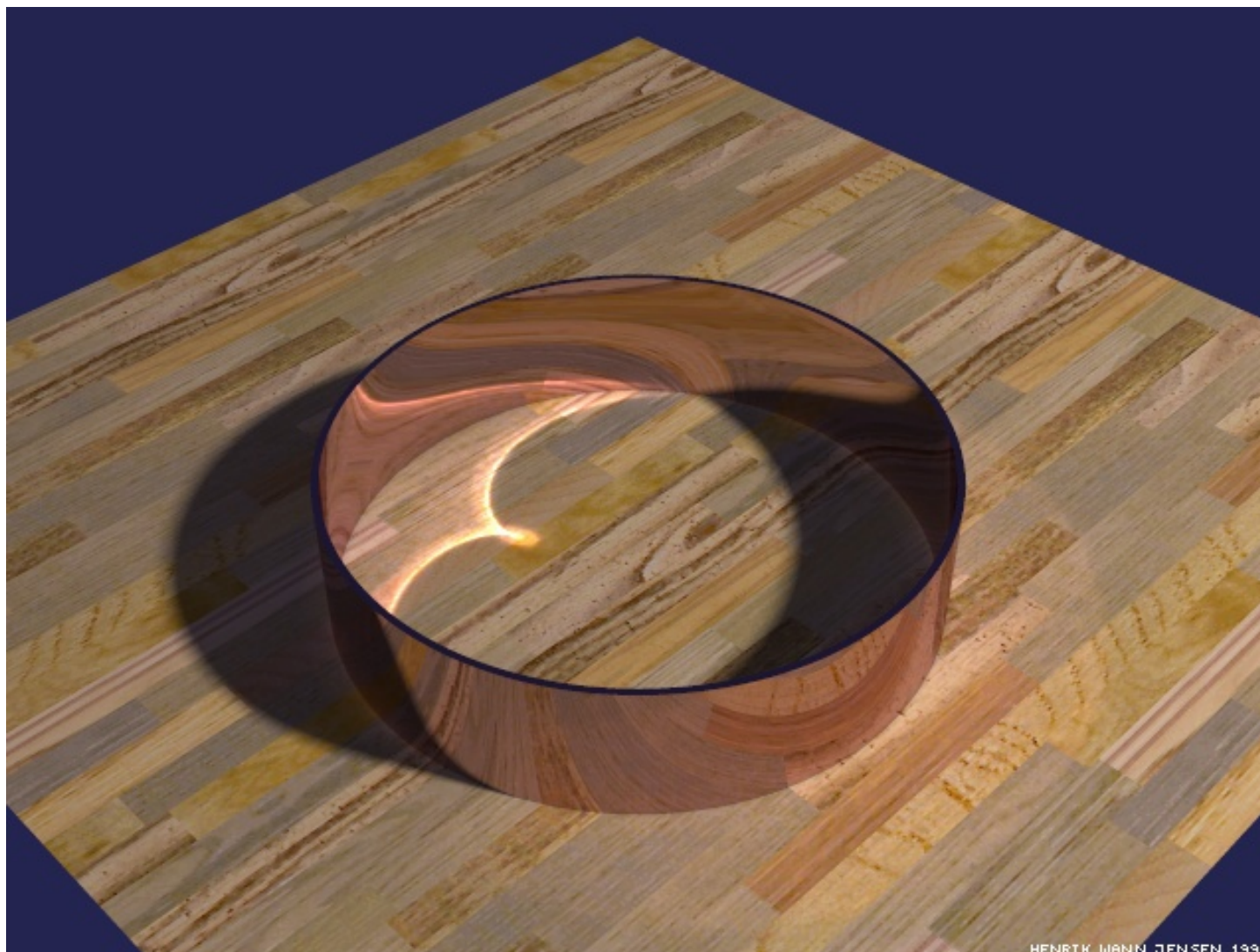
- ◆ fotony jsou generovány světelnými zdroji,
- ◆ propagují se do scény (Monte-Carlo)
- ◆ a ukládají se do fotonových map (**globální** pro pomalé změny a **kaustická** pro koncentraci světla)

◆ zobrazení (Rendering)

- ◆ informace uložené ve fotonové mapě se používají k efektivnímu zobrazení scény
- ◆ obyčejný Ray-tracing nebo
- ◆ Monte-Carlo metoda (Path-tracing)



Photon-mapping - příklady

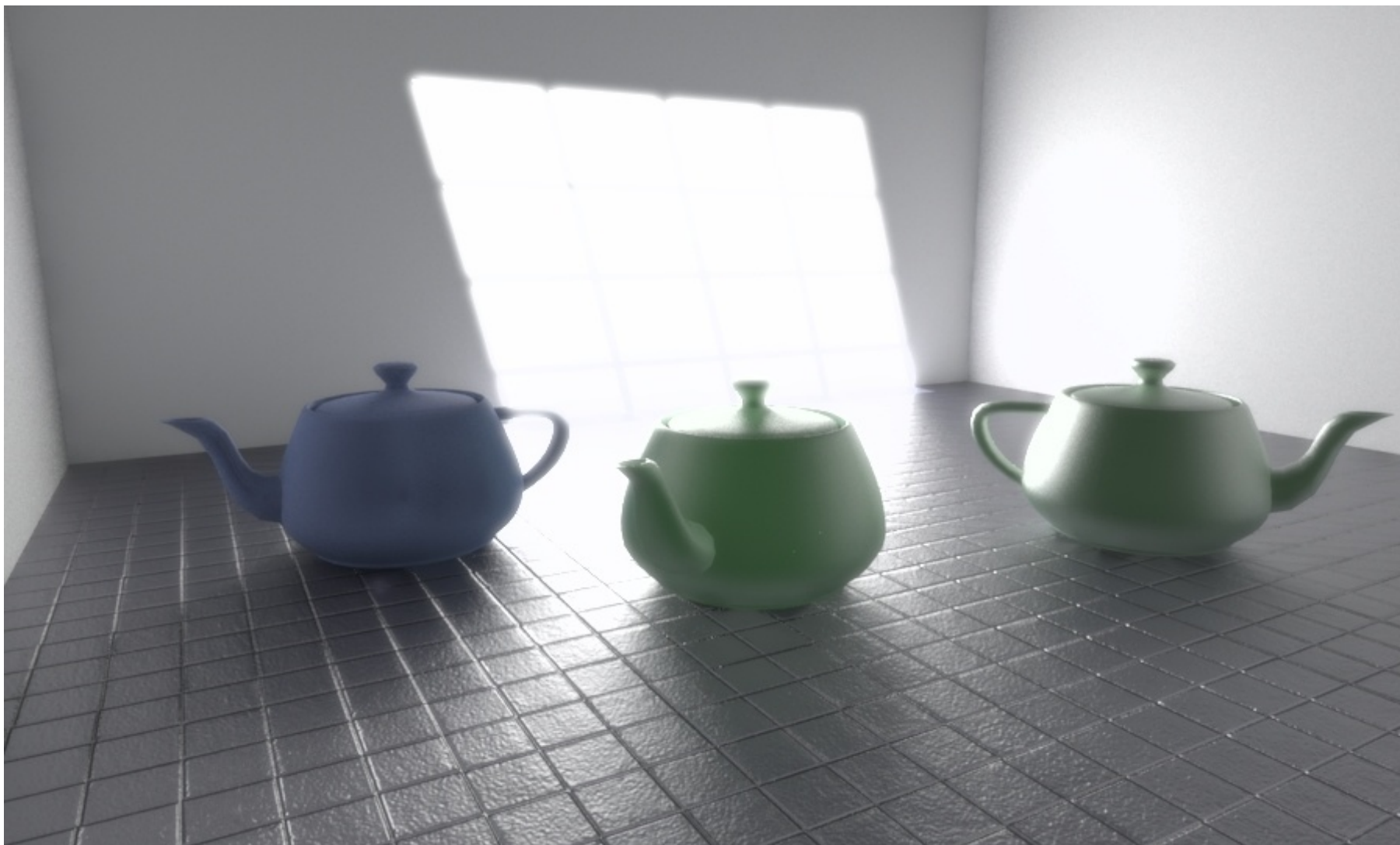


HENRIK WANN JENSEN 1996

Photon-mapping - příklady



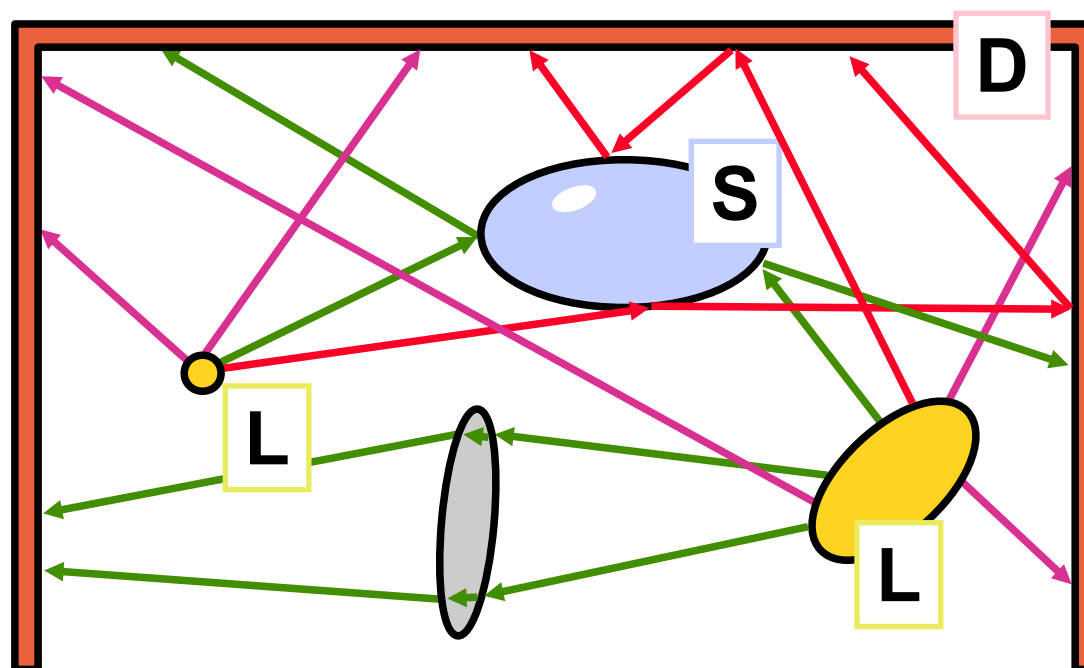
Photon-mapping - příklady





Photon-tracing

- ▶ **generování fotonů** světelnými zdroji,
- ▶ jejich **náhodný průchod scénou** a
- ▶ **ukládání do fotonové mapy**






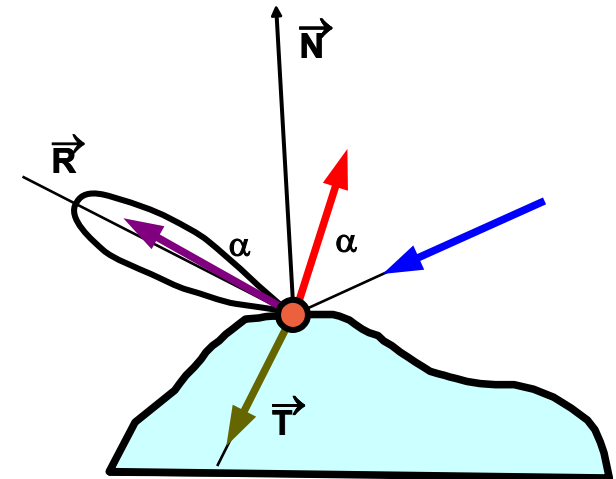


Generování fotonů

- ◆ nejvýhodnější přístup – každý foton nese **stejnou světelnou energii**
- ◆ **náhodné vzorkování** vyzařovacích funkcí světelných zdrojů
 - ◆ „rejection sampling“ pro obtížné distribuce
- ◆ **více světelných zdrojů..**
 - ◆ distribuce mezi nimi na základě jejich celkového výkonu
- ◆ **efektivní vzorkování**
 - ◆ předem připravené **projekční mapy** (viz akcelerace Ray-tracingu)

Průchod scénou (Photon scattering)

- ◆ při odrazu nebo lomu by se mohla **měnit energie fotonů**
 - ◆ foton. mapa by pak obsahovala neekvivalentní záznamy
- ◆ zachování konstantní energie fotonu .. **Ruská ruleta**
 - ◆ foton se náhodně **šíří dál s původní energií** nebo **zcela zanikne**
 - ◆ **rozhodování** mezi:
 - 1. difusním odrazem (D) 
 - 2. lesklým odrazem (S, S_M) 
 - 3. lomem 
 - na každém difusním povrchu: příspěvek do fotonové mapy



Datová struktura fotonové mapy



foton:

- ♦ **poloha** dopadu (float[3])
 - ♦ **směr** dopadu (float[2] nebo komprese do int8[2])
 - ♦ **energie** fotonu (RGB, spektrum nebo RGBE = int8[4])
 - ♦ příznaky pro konstrukci stromu (např. „splitting plane“)
- ♦ fotonová mapa musí být **rychlá** i při **velkém množství záznamů**
- ♦ 10^5 až 10^7 jednotlivých záznamů
 - ♦ operace: **rychlé vyhledávání nejbližších sousedů**
 - K nejbližších nebo všech v daném okolí (poloměr R)
 - ♦ osvědčil se **KD-strom** (binární, data ve všech uzlech)

KD–strom



- ◆ ve fázi konstrukce se jen ukládají záznamy, před použitím je dobré ho **vyvážit**
- ◆ **optimalizace** pro geometrické vyhledávání:
 - ◆ **směr dělení** (splitting plane) se určí podle složky souřadnic s maximálním rozsahem (nebo rozptylem)
 - ◆ uložení v poli – **bez použití ukazatelů !**
- ◆ à la Jensen:
 - ◆ uložení jako halda (potomci mají indexy **$2i$** a **$2i+1$**)
- ◆ à la Hooley („cache-friendly“):
 - ◆ medián se nechává na místě, zbytek jako v quick-sortu



Hledání nejbližších sousedů

- ◆ používá se **halda** pro uložení větví, do kterých jsem ještě nevstoupil
- ◆ ořezávání průchodu:
 - ◆ podle vzdálenosti již nalezeného K-tého nejbližšího fotonu (hledám-li K nejbližších)
 - ◆ podle daného poloměru vyhledávání R



Odhad radiance I

Vyzařovaná **radiance z bodu x**:

$$L_r(x, \omega_o) = \int_{\Omega} f_r(x, \omega_i \rightarrow \omega_o) \cdot \underline{L_i(x, \omega_i)} \cdot \cos \theta_i d\omega_i$$

Vyjádření pomocí **světelného toku**:

$$L_r(x, \omega_o) = \int_{\Omega_x} f_r(x, \omega_i \rightarrow \omega_o) \cdot \frac{\partial^2 \Phi_i(x, \omega_i)}{\partial A_i}$$



Odhad radiance II

Odhad radiance z **fotonové mapy v okolí bodu x**:
(najdu **n** nejbližších fotonů)

$$L_r(x, \omega_o) \approx \sum_{p=1}^n f_r(x, \omega_p \rightarrow \omega_o) \cdot \frac{\Delta \Phi_p(x, \omega_p)}{\Delta A}$$

Při **kruhovém** okolí (n-tý foton má vzdálenost **r**):

$$L_r(x, \omega_o) \approx \frac{1}{\pi r^2} \sum_{p=1}^n f_r(x, \omega_p \rightarrow \omega_o) \cdot \Delta \Phi_p(x, \omega_p)$$



Filtrace ve fotonové mapě

- ◆ pokud se použije menší množství fotonů, průběh odhadu radiance je rozmazaný („box filter“)
 - ◆ obzvlášť vadí u kaustické mapy
- ◆ vhodnější filtry zdůrazňují záznamy ve středu prohledávání
 - ◆ kuželový filtr
 - ◆ Gaussovský filtr
 - ◆ **diferenciální kontrola** – pokud se přidáváním dalších (vzdálenějších) fotonů odhad monotónně mění, ukončím přidávání a vrátím aktuální výsledek



Globální zobrazování I

Shrnutí již dříve uvedených vzorců:

$$L_o(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + L_r(x, \omega_o)$$

Odražená radiance:

$$L_r(x, \omega_o) = \int_{\Omega_x} f_r(x, \omega_i, \omega_o) \cdot L_i(x, \omega_i, \omega_o) \cdot \cos \theta_i \, d\omega_i$$

Složky funkce odrazivosti:

$$f_r(x, \omega_i, \omega_o) = f_{r,d}(x, \omega_i, \omega_o) + f_{r,s}(x, \omega_i, \omega_o)$$

Globální zobrazování II



Klasifikace přicházející radiance L_i :

$L_{i,l}(x, \omega_i)$ světlo přicházející přímo ze světelných zdrojů L

$L_{i,c}(x, \omega_i)$ kaustika – světlo ze zdrojů koncentrované lesklými odrazy/lomy $L S^+$

$L_{i,d}(x, \omega_i)$ nepřímé světlo odražené minimálně jedenkrát difusně $L S^* D (D|S)^*$

$$L_i(x, \omega_i) = L_{i,l}(x, \omega_i) + L_{i,c}(x, \omega_i) + L_{i,d}(x, \omega_i)$$

Globální zobrazování III



Odražená radiance (vynechán bod odrazu \mathbf{x}):

$$\begin{aligned} L_r(\omega_o) = & \int_{\Omega_x} f_r(\omega_i, \omega_o) \cdot L_{i,l}(\omega_i, \omega_o) \cdot \cos \theta_i \, d\omega_i + \\ & \int_{\Omega_x} f_{r,s}(\omega_i, \omega_o) \cdot (L_{i,c}(\omega_i, \omega_o) + L_{i,d}(\omega_i, \omega_o)) \cdot \cos \theta_i \, d\omega_i + \\ & \int_{\Omega_x} f_{r,d}(\omega_i, \omega_o) \cdot L_{i,c}(\omega_i, \omega_o) \cdot \cos \theta_i \, d\omega_i + \\ & \int_{\Omega_x} f_{r,d}(\omega_i, \omega_o) \cdot L_{i,d}(\omega_i, \omega_o) \cdot \cos \theta_i \, d\omega_i \end{aligned}$$



Přesnost výpočtů

◆ „přesný“ výpočet

- ◆ je-li bod x přímo vidět na obrázku .. nebo
- ◆ je-li vidět přes několik málo lesklých odrazů .. nebo
- ◆ je-li paprsek velmi krátký (eliminace „color bleeding“)

◆ přibližný výpočet

- ◆ v ostatních případech
- ◆ .. jestliže byl paprsek od oka odražen alespoň jednou difusně
- ◆ .. nebo má-li paprsek malou váhu (kumulovaný koeficient odrazu)



Přímé osvětlení

Světlo dopadající přímo ze světelných zdrojů:

$$\int_{\Omega_x} f_r(\omega_i, \omega_o) \cdot L_{i,l}(\omega_i, \omega_o) \cdot \cos \theta_i \, d\omega_i$$

- ◆ v R-T se počítá pomocí stínovacích paprsků
 - ◆ vícenásobné paprsky pro plošné zdroje („Distr. R-T“)
- ◆ přesný výpočet: stínovací paprsky nebo foton. mapa
 - ◆ urychlení .. fotonová mapa obsahuje i „**stínové fotony**“
- ◆ přibližný výpočet: jen podle globání fotonové mapy
 - ◆ bez jakýchkoli sekundárních paprsků



Zrcadlový a lesklý odraz

Nepřímé světlo odražené lesklou složkou BRDF:

$$\int_{\Omega_x} f_{r,s}(\omega_i, \omega_o) \cdot (L_{i,c}(\omega_i, \omega_o) + L_{i,d}(\omega_i, \omega_o)) \cdot \cos \theta_i \, d\omega_i$$

- ◆ klasická Monte-Carlo technika („Distributed R-T“)
 - ◆ přesnost úplně stačí i v náročnějších situacích (přímá viditelnost)
 - ◆ pro uspokojivou přesnost výsledku stačí použít pouze několik odražených paprsků



Kaustika

Světlo ze zdroje koncentrované na matném povrchu:

$$\int_{\Omega_x} f_{r,d}(\omega_i, \omega_o) \cdot L_{i,c}(\omega_i, \omega_o) \cdot \cos \theta_i \, d\omega_i$$

- ◆ přesný výpočet: kaustická fotonová mapa
 - ◆ tato mapa obsahuje velkou koncentraci fotonů, přesnost je tedy velká (ostrá kaustika)
- ◆ přibližný výpočet: podle globání fotonové mapy



Mnohonásobný měkký odraz

Světlo odražené mnohokrát difusně:

$$\int_{\Omega_x} f_{r,d}(\omega_i, \omega_o) \cdot L_{i,d}(\omega_i, \omega_o) \cdot \cos \theta_i \, d\omega_i$$

- ◆ přesný výpočet: „Distributed R-T“ (Monte-Carlo)
 - ◆ optimalizace vzorkování podle globální fotonové mapy (znám směry dopadů fotonů v okolí daného bodu)
 - ◆ další urychlení: „Irradiance caching“ (Ward 1988)
- ◆ přibližný výpočet: podle globální fotonové mapy

Literatura



- ◆ Henrik Wann Jensen: ***Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping***, A K Peters, 2001
- ◆ Henrik Wann Jensen et al.: ***A Practical Guide to Global Illumination using Photon Mapping***, SIGGRAPH 2002 Course
- ◆ Matt Pharr, Greg Humphreys: ***Physically Based Rendering, 2nd Edition: From Theory To Implementation***, Morgan Kaufmann, 2010
- ◆ Philip Dutre, Kavita Bala, Philippe Baekert: ***Advanced Global Illumination***, A K Peters, 2006