

Ing. Milan JANÁK, Ph.D.
Stavebná fakulta STU v Bratislave,
Katedra konštrukcií pozemných
stavieb

Počítačové simulácie globálnej osvetlenosti a jasu a ich praktické aplikácie

Computer Simulations of Global Illumination and Luminance and their Practical Applications

Recenzent
prof. Ing. Jiří Habel, DrSc.

V posledných rokoch vývoj v oblasti metód simulácie globálnej osvetlenosti ako aj v oblasti výkonných osobných počítačov priniesol nové druhy projektových nástrojov schopných predpovedať transfér svetla v komplexných trojrozmerných priestoroch s vysokým stupňom presnosti. V tomto príspevku je prezentovaný stručný opis niektorých metód simulácie globálnej a lokálnej osvetlenosti. Schopnosť týchto metód je demonštrovaná na príkladoch z praxe. Tieto príklady obsahujú aplikácie z oblasti denného a umelého osvetlenia.

Kľúčové slová: simulácia osvetlenia, sledovanie lúča, difúzne odrazy, aplikácie

In the recent years advancements in global illumination simulation and modeling as well as in computer power have brought new type of design tools capable of predicting light propagation in a complex three dimensional spaces with very high degree of accuracy. In this paper short introduction is given to the related available methods for global and local illumination simulation. To demonstrate the power and capabilities of these methods some selected examples are given. These examples include problems with day lighting and artificial lighting as well as.

Keywords: Lighting simulation, Ray tracing, Diffuse inter-reflection, Applications

1. ÚVOD

V poslednej dekáde je viditeľný prudký rozvoj metód matematického modelovania a simulácie globálnej osvetlenosti alebo ožiarenosti [1] a [2]. V podstate sa vývoj uberal dvomi základnými smermi a to jednak ray tracing (metódy sledovania lúča) a jednak radiosity. Vzhľadom na fakt, že pre efektívnu aplikáciu v oblasti budov musia byť metódy radiosity kombinované s ray tracing algoritmi, metódu radiosity ďalej v príspevku nerozoberáme.

2. METÓDY

V oblasti metód ray tracing sa uplatňujú dva základné smery, to t. z. forward ray tracing (sledovanie lúča smerom dopredu), t. z. backward ray tracing (sledovanie lúča smerom dozadu). Obidve metódy majú svoje špecifické výhody a efektívna aplikácia simulácie globálnej osvetlenosti v budovách si vyžaduje ich kombináciu. V ďalšej časti príspevku sú opísané príklady dvoch takýchto metód.

Simulačné prostredie programu osvetlenosti „Radiance“¹⁾ [1] predstavuje dnešnú špičku v simulácii lokálnej a globálnej osvetlenosti, pričom metóda programu je efektívnou kombináciou deterministických a stochastických techník spätného sledovania lúča (backward ray-tracing). Niektoré z najzaujímavejších techník sú popísané v tomto príspevku. V princípe program Radiance využíva techniku sledovania lúča pre rekurzívne (spätné t. z. od oka – kamery – meracieho bodu k svetelnému zdroju) vyhodnotenie nasledovnej integrálnej rovnice pre každý bod modelu:

$$L_r(\theta_r, \phi_r) = L_o(\theta_r, \phi_r) + \int_0^{2\pi} \int_0^\pi L_i(\theta_i, \phi_i) \cdot \rho_{bd}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \cdot |\cos \theta_i| \cdot \sin \theta_i \cdot d\theta_i \cdot d\phi_i \quad [W/(sr.m^2)] \quad (1)$$

kde

θ – polárny uhol meraný od normály povrchu [°],

Φ – azimutný uhol meraný okolo normály [°],

L_o – vlastná žiara [W/(sr.m²)],

L_r – žiara odrazeného zväzku lúčov [W/(sr.m²)],

L_i – žiara dopadajúceho zväzku lúčov [W/(sr.m²)],

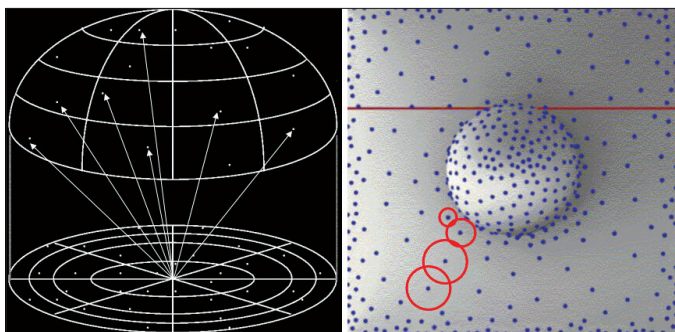
ρ – distribučná obojsmerná funkcia odrazu a prístupu žiarenia [1/sr].

Rovnica (1) vyjadruje vzťah odrazenej/prestupujúcej žiare k dopadajúcej žiare. Riešenie tejto rovnice v programe Radiance je založené na separácii tých príspevkov k celkovej ožiarenosti, ktoré sa dajú určiť deterministicky (napríklad priame svetelné zdroje, zrkadlové odrazy) a tie, ktoré sa musia počítať stochastickými metódami (napríklad difúzne odrazy). Príspevok k celkovej osvetlenosti od difúzných viacnásobných odrazov sa počíta stochastickým, t. z. Monte Carlo integrovaním ponad hemisféru [1]. Hemisféra (pozri obr. 1 – A) sa delí na N priestorových uhlov a do každého uhlu sa vyšle jeden lúč, a to náhodným smerom. Každý lúč späť vráti hodnotu jasu v bode, ktorý prešiel a so známou vzdialenosťou a uhlovej veľkosti sa vypočíta príspevok k osvetlenosti v danom bode. Bolo by veľmi neefektívne počítať takto difúznu osvetlenosť pre každý bod modelu (každý bod obrázku) vzhľadom na veľké množstvo lúčov, ktoré by bolo potrebné sledovať. Program Radiance počíta osvetlenosť Monte Carlo integrovaním v diskretných bodoch. Ostatné hodnoty sa určujú interpoláciou z už vypočítaných hodnôt. Obr. 1 ilustruje výsledok simulácie difúznej osvetlenosti poglobule umiestnenej na horizontálnej rovine. Modré body znázorňujú rozmiestnenie diskretných bodov, v ktorých sa priamo počítala difúzna osvetlenosť.

Ako je možné vidieť na obr. 1 sieť bodov pre výpočet osvetlenosti nie je rovnomerná. Hustota týchto testovacích bodov sa volí adaptívne podľa potreby dosiahnutia rovnakej chyby výpočtu v každej časti modelu. To znamená, že v miestach kde sa lokálna osvetlenosť mení dramatickejšie – v mieste veľkého gradientu osvetlenosti (napr. styk poglobule a horizontálnej roviny alebo styk horizontálnej roviny s vertikálnymi stenami pri obvode obrázku) je umiestnených oveľa viac bodov. Táto metóda umožňuje relatívne efektívne (presne a rýchlo) simulovať difúzne šírenie svetla viacnásobnými odrazmi.

Príspevok k celkovej osvetlenosti od priamych svetelných zdrojov, ako sú napríklad slnko a svietidlá, sa počíta deterministicky zo známej uhlovej veľkosti zdroja, vzdialenosti a svietivosti. Pre prekonanie problému pri modelovaní scén so stovkami priamych svetelných zdrojov používa program „Radiance“ štatisticky optimalizovaný algoritmus triedenia zdrojov podľa ich dôležitosti. Najdôležitejšie svetelné zdroje sa zarátajú deterministicky a pre výpočet zbytkového prínosu sa potom používa vážený štatistický odhad založený na teste viditeľnosti.

¹⁾ Program „Radiance“ je jedným z simulačných programov umožňujúcich modelovanie osvetľovacích sústav.



Obr. 1 A – delenie hemisféry, B – rozmiestnenie bodov priameho výpočtu difúznej osvetlenosti pre model pologule s difúznym osvetlením [1]

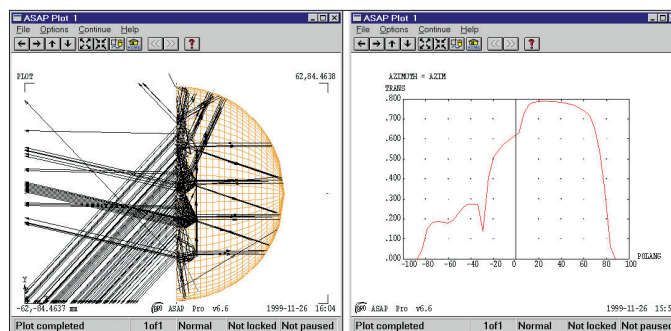
Ďalším problémom pri výpočte priamej zložky osvetlenosti je nedostatočné testovanie svetelného zdroja iba jedným lúčom (zvyčajne vyslaným do stredu zdroja) a to hlavne pre veľké a blízke zdroje, kde dochádza k veľkým nepresnostiam výpočtu priamej zložky. Program Radiance tu aplikuje algoritmus adaptívneho delenia priamych zdrojov. Priamy zdroj sa adaptívne delí na menšie časti dovtedy, kým sa dosiahne stanovené kritérium pomeru veľkosti zdroja a vzdialenosti k nemu.

Pri riešení úloh globálnej osvetlenosti sa často vyskytujú zrkadlové odrazy priamych svetelných zdrojov (napríklad svetelné police, špeciálne žalúzie, prizmatické sklá), ktoré je najlepšie hodnotiť v deterministickej časti simulácie. Problémom je vedieť, ktorým smerom vyslať lúč tak, aby tento trafil priamy zdroj zrkadiaci sa v danom povrchu. Program Radiance tu aplikuje algoritmus tzv. virtuálnych svetelných zdrojov. Tento algoritmus pracuje automaticky a optimalizuje výpočet zrkadlovo odrazenej zložky vzhľadom na možnú viditeľnosť medzi lúčom – odrazovou plochou alebo viacerými plochami a priamym zdrojom svetla.

Program Radiance ponúka aj možnosť tzv. sekundárnych svetelných zdrojov. Typickým príkladom je okno v scéne s denným osvetlením. Okno – tabuľa skla nie je pre program Radiance zdrojom svetla a príspevok z neho sa počíta stochastickým Monte Carlo integrovaním [1], ktoré je časovo veľmi náročné pretože pre dosiahnutie žiadanej presnosti sa musia používať vysoké hodnoty delenia integračnej hemisféry. Tu software Radiance ponúka možnosť predpočítať krivku svietivosti okna a transformovať ho na sekundárny priamy svetelný zdroj, ktorý je už potom efektívne započítaný deterministickou časťou výpočtu. Program Radiance ďalej ponúka celý rad vyspelých techník modelovania komplexných funkcií odrazu a priestupu svetla, vzorov, textúr, animácií, funkčného programovacieho jazyku atď., ktorými sa tu pre krátkosť príspevku nebudeme zaoberať.

Jednou zo základných nevýhod metód spätného sledovania lúča je, že pre komplikované optické systémy (napr. viacnásobné zrkadlové odrazy od zakrivených plôch) sú tieto metódy neefektívne na lokalizáciu malých, ale veľmi dôležitých, zdrojov svetla (napr. slnečný disk na oblohe). Efektívna metóda pre analýzu takýchto optických systémov, ktoré sa čoraz častejšie aplikujú v budovách, je t.z. metóda forward ray tracing – sledovanie lúča od svetelného zdroja. Jedným z reprezentantov forward ray tracing je programové prostredie ASAP [3]. Pre krátkosť príspevku nie je možné poskytnúť detailný opis metód simulácie propagácie lúča. V princípe, metóda sleduje každý definovaný lúč (svetelný zdroj je zväzok lúčov s preddefinovanou 3D distribúciou svietivosti) od jeho počiatku cez daný optický systém (pozri obr. 2). Pri každej interakcii lúča s optickým modelom sa vyhodnocujú optické vlastnosti modelu v mieste dopadu lúča a tento lúč sa potom ďalej odrazí, lomí, absorbuje, prepúšťa až pokiaľ neopustí daný optický systém. Je možné modelovať komplexné optické vlastnosti odrazu a priepustnosti v spektrálnej závislosti a závislosti na polarizácii elektromagnetického žiarenia.

Praktické využitie metódy forward ray tracing v oblasti budov je možné vidieť pre výpočty napr. smerových priepustností, absorpcie a odrazu kom-



Obr. 2 Príklad interaktívneho výsledku metódy sledovania lúča pre prizmatické zasklenie a výslednej krivky smerovej priepustnosti žiarenia

plexných transparentných systémov budov. Tak napr. metóda backward ray tracing potrebuje nahradiť komplexné optické systémy už výslednými svetelnými zdrojmi s predpočítanými krivkami svietivosti alebo výslednými funkciami smerových charakteristík, tak, aby sa eliminovala jedna z hlavných nevýhod tejto metódy. Podobne aj globálne termodynamické simulácie budov [4] potrebujú ako vstup poznať optické smerové charakteristiky transparentných konštrukcií, aby mohli simulovať efekt slnečnej ožiarenosti stavebných konštrukcií, ktorý predstavuje jeden z podstatných energetických tokov v budove.

3. PRÍKLADY APLIKÁCIE

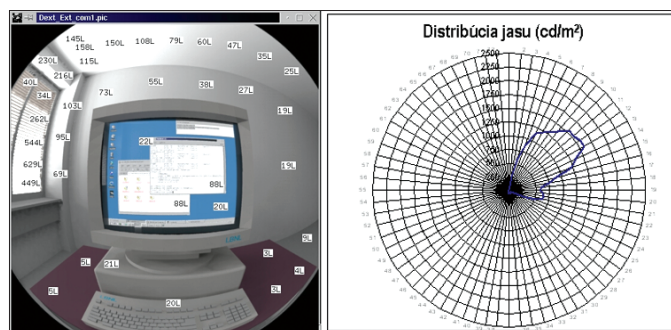
Praktické aplikácie vyššie opísaných metód sú dokumentované na príklade riešenia problémov denného a umelého osvetlenia.

3.1 Denné osvetlenie

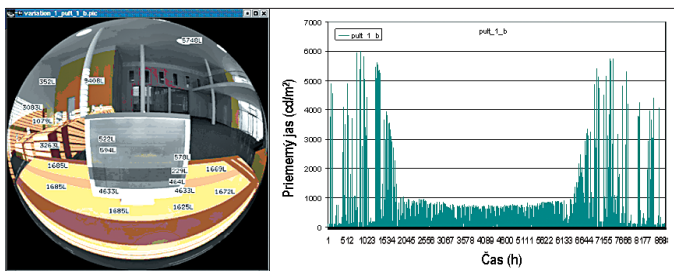
Aplikácia vyššie opísaných metódik simulácie problémov lokálnej a globálnej osvetlenosti je dokumentovaná na príklade hodnotenia dostupnosti denného svetla a vizuálnej pohody pre počítačovú učebňu. Priestory s výskytom počítačových obrazoviek sú veľmi citlivé na vysoké hodnoty jasov (cd/m^2) okien a povrchov miestností, ktoré je potrebné kontrolovať z dôvodu zabezpečenia optimálnej vizuálnej pohody pri práci na obrazovke. V našom prípade bol zámer architekta použiť špeciálne zakrivené horizontálne otáčacie žalúzie. Spodná strana listu žalúzie má tmavý matný náter (činiteľ odrazu 0,25) a horná strana listu je pokovovaná lešteným hliníkom – efektívne zrkadlo s činiteľom odrazu 0,92.

Na obr. 3. je vidieť, že špeciálne tienenie zlepšuje situáciu, a to ak v distribúcii jasov, tak v distribúcii denného svetla. V poslednej dobe sa okrem hodnotenia dennej osvetlenosti za stacionárnej okrajovej podmienky (napr. zamračená alebo jasná obloha) čoraz viac používa dynamická simulácia, ktorá využíva spojené dynamické modely rozloženia jasov oblohy.

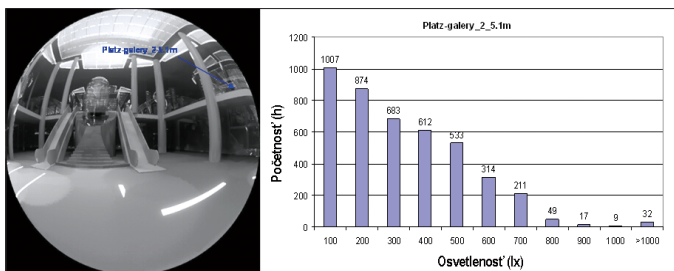
Na obr. 4 je dokumentovaný príklad hodnotenia a optimalizácie vizuálnej pohody pre terminálové pracovisko v bankovej hale. Na obr. 4 – B je prík-



Obr. 3 A – výsledok stacionárnej simulácie pre zamračenú oblohu – niektoré bodové hodnoty jasov (cd/m^2) pre prípad so špeciálnymi žalúziami, B – Prepočítaná distribúcia svietivosti okna so špeciálnymi žalúziami



Obr. 4 A – výsledok simulácie jasu pre stacionárnu situáciu jasnej oblohy, B – výsledky dynamickej celoročnej simulácie priemerného jasu pre dané pracovisko



Obr. 5 A – výsledok simulácie pre stacionárnu situáciu jasnej oblohy, B – štatistické spracovanie výsledkov dynamickej celoročnej simulácie osvetlenosti (lx) v kontrolnom bode

lad dynamickej simulácie priemerného jasu, ktorý poukazuje ako na absolútne hodnoty jasu, tak na čas a početnosť jeho výskytu.

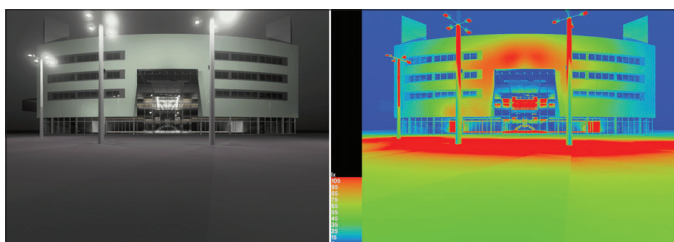
Na obr. 5 je dokumentovaný príklad hodnotenia efektívnosti tienenia veľkých zasklených plôch svetlíkov v nákupno – zábavnom stredisku. Na obr. 5 – B je dokumentovaná celoročná štatistika osvetlenosti (lx) v kontrolnom bode na základe, ktorej sa hodnotila a optimalizovala efektívnosť tieniaceho zariadenia.

3.2 Umelé osvetlenie

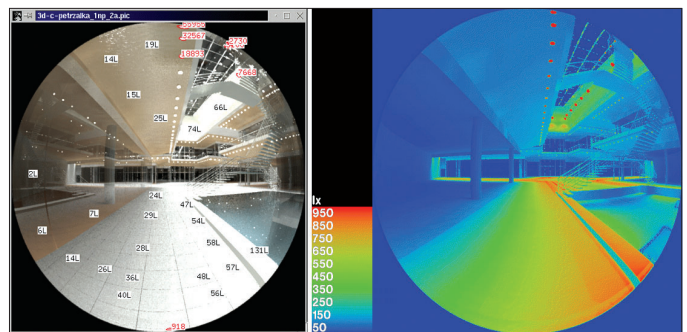
Aplikácia vyššie opísaných metódik simulácie problémov lokálnej a globálnej osvetlenosti je dokumentovaná na niekoľkých príkladoch hodnotenia rôznych systémov umelého osvetlenia interiérov a exteriérov budov. V praxi často stojíme pred úlohou návrhu a posúdenia osvetlenia komplikovaných priestorov, kde bežné zjednodušené metódy výpočtu vykazujú značné chyby a navyše neposkytujú kvalitatívne informácie o riešenom probléme. Práve počítačová simulácia globálnej a lokálnej osvetlenosti umožňuje simulovať komplikované scény s dostatočnou presnosťou a taktiež poskytuje kvalitatívne informácie o riešenej úlohe (napr. fotorealistické zobrazenie, alebo modelovanie subjektívneho vnemu scény).

Na obr. 6 je uvedený príklad výsledku simulácie osvetlenia veľkého priestoru átria, pasáže a galérií obchodného centra. Ako je možné vidieť na obr. 6 ide o priestor so značnou mierou komplikovanosti geometrie, veľké množstvo zasklených plôch a niekoľko stoviek svetidiel na rôznych výškových úrovniach.

Okrem kvantitatívnych parametrov ako sú osvetlenosť, rovnomernosť, jas a pod. nám tieto výsledky poskytujú celkom jasnú, fyzikálne pravdivú predstavu o tom, ako by takáto inštalácia vyzerala v skutočnosti.



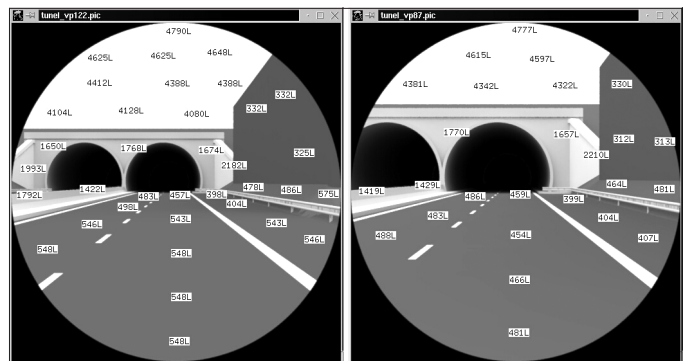
Obr. 7 A – výsledky simulácie subjektívneho vnemu, B – osvetlenosti (lx) pre prípad osvetľovania vonkajšej fasády



Obr. 6 Výsledky simulácie osvetlenosti (lx) a oslnenia – jasu ($cd.m^2$) pre prípad osvetľovania priestoru átria, pasáže a galérií obchodného centra so stovkami svetelných zdrojov

Na obr. 7 je dokumentovaný príklad použitia simulácie osvetlenia pre prípad osvetľovania externej fasády. Ako je možné vidieť na obrázku opäť sa jedná o geometricky značne komplikovanú scénu, v ktorej hrajú významnú úlohu ako vonkajšie tak aj stovky vnútorných svetidiel.

Na obr. 8 je uvedený príklad výpočtu jasu L_{20} ($cd.m^{-2}$) v zornom poli vodiča približujúceho sa k portálu tunela. Vzhľadom na fakt, že hodnota L_{20} ($cd.m^{-2}$) je základom pre určenie potrebných úrovní jasu v jednotlivých zónach tunelu od umelého osvetlenia, ide o zaujímavý problém integrovaného hodnotenia denného a umelého osvetlenia.



Obr. 8 Výsledky simulácie rozloženia jasu pre určenie hodnoty L_{20} (cd/m^2) pre dve rôzne kritické vzdialenosti od portálu tunela

4. ZÁVERY

V príspevku je uvedený stručný prehľad metód počítačovej simulácie osvetlenosti a jasu s dôrazom na metódy sledovania lúča. Zámerom bolo poskytnúť informáciu o súčasnom stave problematiky a na príkladoch z praxe dokumentovať možnosti tohto prístupu pri hodnotení systémov denného, umelého a združeného osvetlenia. Záverom je možné konštatovať, že simulácia lokálnej a globálnej osvetlenosti poskytuje silný inžiniersky nástroj pre návrh a hodnotenie osvetľovacích systémov a posúva ich na novú kvalitatívnu úroveň.

Podakovanie

Tento príspevok vznikol za podpory grantovej úlohy Ministerstva školstva a športu SR VEGA 1/0308/03.

Spojení na autora: tel: +421 2 59274 397, e-mail: milan@svf.stuba.sk

Použité zdroje:

- Ward G. J.: The RADIANCE Lighting Simulation and Rendering System, Computer Graphics, July 1994, pp. 459-72.
- Sillion F X, Puech C.: Radiosity and Global Illumination. Morgan Kaufmann Publishers, Inc. San Francisco, California, 1994.
- ASAP 6.5 Optical modeling software – Reference Guide. Brealut Research Organization, Tucson, AZ, USA., 1999.
- Clarke J A.: Energy Simulation in Building Design Adam Hilger Bristol and Boston, 1985.