

- [J5] L. Szécsi, K. Ralovich. Loose kd-trees on the GPU. IV. Hungarian Conference on Computer Graphics and Geometry, Budapest, Hungary, pp 94-101. 2007.
- [J6] L. Szécsi, L. Szirmay-Kalos, P. Anton. Environment mapping with halftoning 7th Conference of the Hungarian Association for Image Processing and Pattern Recognition. Budapest, Hungary, pp. 1-9. 2009.
- [H1] L. Szirmay-Kalos, L. Szécsi, M. Sbert. GPUGI: Global Illumination Effects on the GPU. Eurographics Tutorial, 2006. Hivatkozások: 4.



INTERAKTÍV GLOBÁLIS ILLUMINÁCIÓ VIRTUÁLIS FÉNYFORRÁSOKKAL

PhD értekezés tézisei

SZÉCSI LÁSZLÓ

Témavezető:
DR. SZIRMAY-KALOS LÁSZLÓ, MTA DOKTORA

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Irányítástechnika és Informatika Tanszék

Budapest

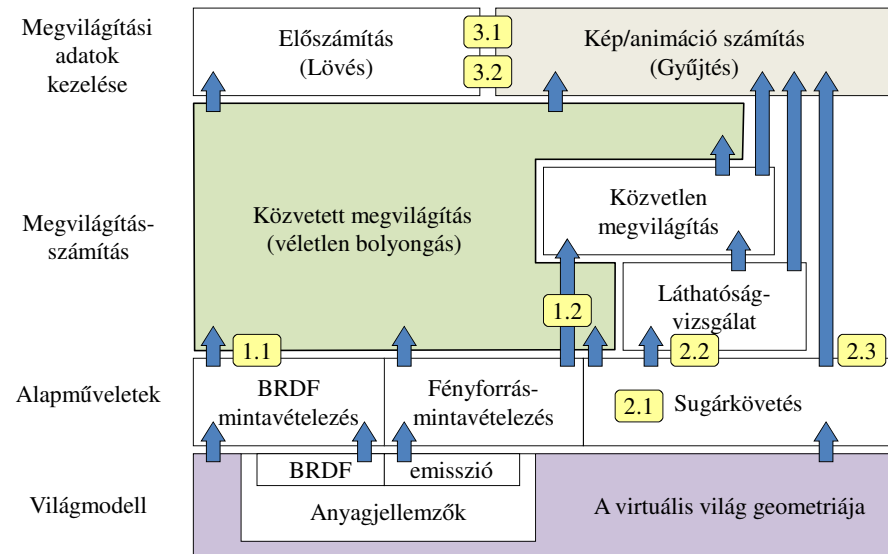
2009. június 18.

Témavázlat

Kutatási terület és célkitűzések

A számítógépes grafikán belül a képszintézis alapproblémája olyan, a virtuális világot ábrázoló kép kiszámítása, ami a valós világ látványának érzetét kelti. A valós világ objektumairól visszavert fény látványának megfelelő vizuális ingerek előállításához ki kell számolni, hogy milyen fényteljesítmény érkezne a szembe az egyes képelemeknek megfelelő térszögekből. A globális illuminációs algoritmusok arra töreksenek, hogy a fényátadást tetszőleges felületi modellek és többszörös fényvisszaverődések mellett értékeljék ki.

A virtuális fényforrások módszere, más néven közvetett foton-leképezés, egy globális illuminációs algoritmus, amely a lövő és gyűjtő típusú véletlen bolyongási módszereket ötvözi. Emellett a megvilágítási problémát egyszerű, absztrakt fényforrások hatásaira vezeti vissza.



1. ábra. A virtuális fényforrások módszerén alapuló képszintézis moduláris modellje és a tézisek hozzájárulásai.

Az algoritmus két részből áll. Először egy Monte Carlo véletlen bolyongásos fotonlövő fázissal állítjuk elő a színtér sugársűrűségét mintavételező virtuális fényforrásokat, azután

- [F6] L. Szirmay-Kalos, T. Umenhoffer, B. Tóth, L. Szécsi, M. Sbert. Volumetric Ambient Occlusion. *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp. 1-13. 2009. IF: 1.398
- [F7] L. Szirmay-Kalos, T. Umenhoffer, G. Patow, L. Szécsi, M. Sbert. Specular Effects on the GPU: State of the Art. *Computer Graphics Forum*, 26:1 pp. 1-24. 2009. IF: 1.107
- [F8] L. Szirmay-Kalos and L. Szécsi. Deterministic Importance Sampling with Error Diffusion. *Computer Graphics Forum*, 28:4 pp. 1-11. 2009. IF: 0.801
- [I1] L. Szécsi, L. Szirmay-Kalos, M. Sbert. Light Animation with Precomputed Light Paths on the GPU. *Graphics Interface 2006*, Quebec, Canada. pp 187-194. 2006. Hivatkozások: 4.
- [I2] L. Szécsi. The hierarchical ray engine. *Proceedings of WSCG (Full papers)*, 2006.
- [I3] Sz. Czuczor, L. Szirmay-Kalos, L. Szécsi. Photon map gathering on the GPU. *Proceedings of Eurographics (short papers)*, pp 117-120. 2005. Hivatkozások: 1.
- [I4] A. Barsi, L. Szécsi, L. Szirmay-Kalos. Real-time Image Based Lighting with Shadows. *HACIPPR Conference*, Veszprém, 2005.
- [I5] L. Szécsi, L. Szirmay-Kalos. Improved Indirect Photon Mapping with Weighted Importance Sampling. *Proceedings of Eurographics (short paper)*, pp 45-52. 2003.
- [I6] L. Szécsi, B. Benedek. Accelerating Animation Through Verification of Shooting Walks. *Spring Conference on Computer Graphics*, Budmerice, pp 255-261. 2003. Hivatkozások: 3.
- [I7] L. Szirmay-Kalos, V. Havran, B. Benedek, L. Szécsi. On the Efficiency of Ray-shooting Acceleration Schemes. *Spring Conference on Computer Graphics*, Budmerice, pp 255-261. 2003. Hivatkozások: 21.
- [I8] T. Umenhoffer, L. Szirmay-Kalos, L. Szécsi, B. Tóth, M. Sbert. Partial, Multi-scale Precomputed Radiance Transfer. *Spring Conference on Computer Graphics*, Budmerice, pp. 87-94. 2008.
- [I9] L. Szirmay-Kalos, L. Szécsi, A. Penzov. Importance Sampling with Floyd-Steinberg Halftoning. *Proceedings of Eurographics (short papers)*, pp 69-72. 2008.
- [J1] L. Szécsi. Conservative rasterization of texture atlases. *III. Hungarian Conference on Computer Graphics and Geometry*, Budapest, Hungary, pp 79-85. 2005.
- [J2] L. Szécsi, B. Benedek. Improvements on the kd-tree. *I. Hungarian Conference on Computer Graphics and Geometry*, Budapest, Hungary, pp 165-172. 2002.
- [J3] B. Benedek, L. Szécsi. Performance Improvements of Rendering Caustics using Photon Maps in Interactive Ray Tracing. *I. Hungarian Conference on Computer Graphics and Geometry*, Budapest, Hungary, pp 207-211. 2002.
- [J4] L. Szécsi. Procedural Ocean Waves. *IV. Hungarian Conference on Computer Graphics and Geometry*, Budapest, Hungary, pp 80-87. 2007.

Publikációk

- [B1] L. Szirmay-Kalos, L. Szécsi, M. Sbert. GPU-based Techniques for Global Illumination Effects. Morgan & Claypool, San Francisco, USA, 252 pps. 2008. Hivatkozások: 2.
- [D1] L. Szécsi. An Effective Implementation of the K-D Tree. in Graphics Programming Methods (editor: Jeff Lander), Charles River Media, Hingham, Massachusetts, pp 315-325, 2003. Hivatkozások: 5.
- [D2] L. Szécsi. Alias-free Hard Shadows with Geometry Maps. in ShaderX⁵: Advanced Rendering Techniques (editor: Wolfgang Engel), Charles River Media, Hingham, Massachusetts, pp 219-237, 2007.
- [D3] L. Szécsi, K. Arman. Procedural Ocean Effects. in ShaderX⁶: Advanced Rendering Techniques (editor: Wolfgang Engel), Charles River Media, Hingham, Massachusetts, pp 331-350, 2008.
- [D4] L. Szécsi, L. Szirmay-Kalos, M. Sbert. Interactive Global Illumination with Precomputed Radiance Maps. in ShaderX⁶: Advanced Rendering Techniques (editor: Wolfgang Engel), Charles River Media, Hingham, Massachusetts, pp 401-410, 2008.
- [D5] L. Szécsi. Instant Radiosity with GPU Photon Tracing and Approximate Indirect Shadows. in ShaderX⁷: Advanced Rendering Techniques (editor: Wolfgang Engel), Charles River Media, Hingham, Massachusetts, pp 479-494, 2009.
- [F1] A. Barsi, L. Szirmay-Kalos, L. Szécsi. Image-based Illumination on the GPU. Machine Graphics and Vision, Vol 14., No 2., pp 159-169, 2006. Hivatkozások: 3.
- [F2] M. Sbert, L. Szécsi, L. Szirmay-Kalos. Real-time Light Animation. Computer Graphics Forum, Vol 23., No 3., pp 291-299, 2004. Hivatkozások: 8. IF: 0.801
- [F3] L. Szécsi, M. Sbert, L. Szirmay-Kalos. Combined Correlated and Importance Sampling in Direct Light Source Computation and Environment Mapping. Computer Graphics Forum, Vol 23., No 3., pp 585-593, 2004. Hivatkozások: 12. IF: 0.801
- [F4] L. Szécsi, L. Szirmay-Kalos. Efficient Approximate Visibility Testing Using Occluding Spheres. Journal of WSCG, Vol 12., No 3., pp 435-442, 2004.
- [F5] L. Szécsi, L. Szirmay-Kalos, Cs. Kelemen. Variance Reduction for Russian Roulette. Journal of WSCG, Vol 11. No 3., pp 456-463, 2003.

ezekkel a fényforrásokkal megvilágítva rajzoljuk ki a színteret.

Egy véletlen bolyongással előállított út nem más, mint az árnyalási egyenlet megoldásának egy mintája:

$$L(\vec{x}, \omega) = L^e(\vec{x}, \omega) + \int_{\Omega} f_r(\omega, \vec{x}, \omega') \cdot \cos \theta' \cdot L(h(\vec{x}, -\omega'), \omega') \, d\omega',$$

ahol L a keresett sugársűrűség-függvény, L^e az emisszió, Ω a minden irányt tartalmazó halmaz, $h(\vec{x}, -\omega')$ az \vec{x} pontból $-\omega'$ irányban látható felületi pont, és θ' az ω' irány és a felületi normális közötti szög. Az $f_r(\omega, \vec{x}, \omega') \cdot \cos \theta'$ szorzat annak a valószínűségi sűrűség-függvénye, hogy az \vec{x} pontba ω irányból érkező fény ω' irányba verődik vissza. Az f_r a kétirányú visszaverődés-eloszlási függvény, vagyis a BRDF, ami a felületi fényvisszaverő tulajdonságot írja le.

A klasszikus kvadratúrák dimenzionális robbanását elkerülendő, az integrál kiértékelésére a Monte Carlo módszer alkalmazható. Ez az integrált várható értéként fejezi ki, amit véletlen minták átlagával közelíthetünk:

$$I = \int_{\mathcal{U}} f(\mathbf{u}) \, d\mathbf{u} = \int_{\mathcal{U}} \frac{f(\mathbf{u})}{p(\mathbf{u})} \cdot p(\mathbf{u}) \, d\mathbf{u} = E \left[\frac{f(\mathbf{u})}{p(\mathbf{u})} \right] \approx \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{f(\mathbf{u}_j)}{p(\mathbf{u}_j)},$$

ahol $\mathbf{u} = [u^{(1)}, \dots, u^{(d)}]$ az integrálási változó, $p(\mathbf{u})$ pedig egy valószínűségi sűrűség-függvény a d -dimenziós \mathcal{U} integrálási tartományban, és a $\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_M$ pontokat véletlen módon, a fenti eloszlással állítjuk elő. A fontosság szerinti mintavételezés alap gondolata, hogy a véletlen minták eloszlásfüggvénye hasonlítson az integrandusra, így a véletlen becslő szórása kicsi legyen. Az **1. téziscsoport** azzal foglalkozik, hogyan lehet a véletlen bolyongások során felmerülő Monte Carlo becslők szórását csökkenteni.

Az iránytartomány fontosság szerinti mintavételezésének alapja a BRDF, vagyis az integrál lokálisan kiértékelhető része. A gyakorlatban a BRDF-ek több elemi függvény összegként állnak elő. Ezek a diffúz, spekuláris, törő vagy más, összetettebb fény-felület kölcsönhatásokat írják le. A véletlen utak végessé tételére az orosz rulett módszerét alkalmazzuk, vagyis ahhoz is rendelünk valamennyi valószínűséget, hogy a sétát a felületi pontból nem folytatjuk. Ez viszont többszörösít eredményez, hiszen a nulla hozzájárulású tartományt mintavételezzük.

A véletlen séták előállításához arra is szükség van, hogy a mintavételezett irányok mentén sugarakat kövessünk, vagyis meghatározzuk a színtér objektumaival vett legközelebbi metszéspontot. Ezen túl a második, gyűjtő fázisban, amikor az összes virtuális fényforrás hatását figyelembe véve kell árnyalunk egy felületi pontot, minden fényforrás láthatóságát meg kell határozunk, ami árnyék-sugarak követését jelenti. A **2. téziscsoportban** mindkét feladatra megoldást nyújtó módszerek szerepelnek.

Ahhoz, hogy egy fényút hozzájárulása ne nulla legyen, a fényforrást össze kell kötnie a szemmel. Szükség van egy determinisztikus lépésre, ami egy lövésétát a szemhez, vagy egy gyűjtőjétát egy fényforrás valamely pontjához kapcsol. A területi fényforrásokat mintavételezni kell, hogy a felületi pontok közvetlen megvilágítását kiszámolhassuk. Kiterjedt fényforrások esetén, ami égboltfény és kép alapú megvilágítás esetén különösen jellemző, a becslő szórása is nagy lesz. Van azonban analitikusan kiértékelhető képlet sokszög alakú fényforrásokra, amely viszont a takarásokat nem veszi figyelembe. A korrelált mintavételezés az analitikus képletet, mint előzetes információt kihasználva képes arra, hogy teljesen eltüntesse a nem takarások okozta zajt.

A virtuális fényforrások módszerénél a teljesítménykorlátot a végső gyűjtési rész jelenti, amikor a képpontokban látható felületelemek megvilágítását nagy számú virtuális fényforrás

mellett kell kiszámítani. Egyetlen felületi pont megvilágításának meghatározásához minden fényforrásra egy árnyék-sugár követésével egyenértékű láthatósági vizsgálatot kell végezni. Milliós nagyságrendű képpont és ezres nagyságrendű virtuális fényforrás esetén ez több-milliárd árnyék-sugarat jelent. A teljes színtér-geometria figyelembe vételével követni a sugarakat nem lehetséges interaktív sebességcélok mellett. Az indirekt megvilágítás jellemzően alacsony frekvenciája miatt azonban a közelítő megoldás is megfelelő.

A sugárkövetés gyorsításának bevált módszere az, hogy a teret rekurzívan cellákra bontjuk, majd a sugár által meglátogatott cellákat azonosítjuk, és a sugár-primitív metszéspont számítását csak a cellákban levő objektumokkal hajtjuk végre. A teljesítmény legjelentősebb mérőszáma az, hogy várhatóan hány metszéspont-számítást kell végeznünk, mire megtaláljuk a legközelebbi találatot. A legerjedtebb térfelosztó adatszerkezetek a szabályos rács, az oktális fa, a kd-fa, illetve a befoglalótér-fogat-hierarchia.

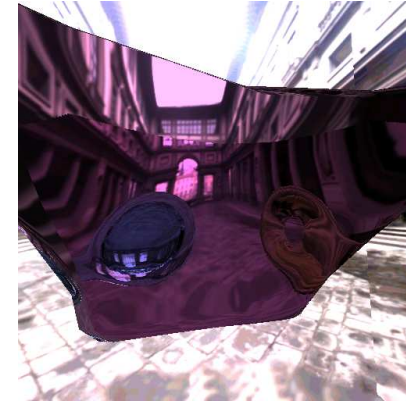
A grafikus hardvert inkrementális képszintézisre építették. A sugárkövetés, és különösen a véletlen bolyongáson alapuló algoritmusok jobban illeszkednek a memória-mutatókkal szabadon dolgozó CPU-khoz, ahol az összes színtérellemhez inkoherens, véletlen módon is lehetséges hozzáférni. Ennek ellenére, a programozható grafikus processzorok fejlődése már lehetővé teszi a sugárkövetés hardver-támogatott magvalósítását is. Az eltérő architektúra és az ezzel járó korlátozások miatt a CPU algoritmusokat nem lehet közvetlenül átültetni. A *sugármotor* megoldás a sugarakat textúra-elemekhez rendeli, és teljes képernyős téglalapként rajzolja ki a sugárkövetési primitíveket, ezzel a pixel árnyaló egység kiszámolhatja minden sugár metszéspontját minden háromszöggel. A követni való sugarakat a CPU küldi a grafikus kártyára, az eredményeket pedig vissza kell olvasnia.

Bármennyi sugarat is tudunk követni egy másodperc alatt, ez soha nem lesz összevethető a természetben látható fényjelenségekben részt vevő fotonok számával, és ezzel örökké a valóság korlátja marad. Azonban minden helyzetben és környezetben hatalmas mértékű a koherencia a fénypályák között, ennek a kihasználása pedig az interaktív működés elérésének a kulcsa. Ezért tárolnunk és újrahasznosítanunk kell a korábban követett sugarakat. Az ilyen módszerek jellemzően kellemesebb látványélményt kiváltó simaságra cserélik a véletlenszajt, mivel a magasfrekvenciás tartományból az alacsonyba tolják a hibát. A sugár-újrahasznosítás mindig a sugarak tárolásából, majd felhasználásukkal új fénypályák építéséből áll. Mindeközben továbbra is cél marad a fontosság szerinti mintavételezés megőrzése. A virtuális fényforrások valójában nem mások, mint sugarakból álló, tárolt lövőséták.

A **3. téziscsoportban** két, sugár-újrahasznosításon alapuló algoritmust írok le, amelyek a virtuális fényforrás módszert sugársűrűség-adatok előzetes kiszámítására használják, az eredményeket pedig textúrákban tárolják. Egyikük a fény-animációt teszi lehetővé, ahol a korábbi képkockákban nyert adatokat újraszűzve és a képkalkotásban felhasználva, a globális illuminációs megoldás töredékidő alatt előállítható egyetlen különálló kép kiszámítási idejéhez képest. Végül, az előszámlolt fénypályák módszere a kamera és a fények egyidejű, valós-idejű animációját teszi lehetővé.

Alkalmazott módszerek

Munkám a Monte Carlo mintavételezés elméletének, a globális illuminációnak, a sugár-újrahasznosításnak és a párhuzamos architektúrákat kihasználó módszereknek kiterjedt irodalmára alapoz. Ezek a területek egymásra épülve kapcsolódnak össze a valós-idejű globális illumináció problémájára adott megoldásaimban. Ezen területek mindegyikén értem el új eredményeket, részben azzal, hogy új elméleti következtetésekre jutottam, részben azzal, hogy létező ismereteket adaptáltam a virtuális fényforrások problémájára. Minden eredményt mérések támasztanak alá. A számítógépes grafikában elkerülhetetlen módon, ehhez meg kel-



4. ábra. Törő objektumok valós-idejű animációja a gyorsított sugármotorral.



5. ábra. Képernyőképek a fényforrás interaktív mozgása közben.



3. ábra. Takaró gömb halmazok.

képkocka kiszámításánál is használható. A fényutakat virtuális fényforrások formájában tárolom, illetve ezekből számítom ki a végleges képet. Egy képkocka számításánál a korábban generált virtuális fényforrásokat újra lehet értékelni, és korábban kiszámolt hozzájárulásaikat újrasúlyozva alkotható meg az új kép. Ennek eredményeképpen gyors animáció jön létre, ahol egy képkocka számítására egy állókép előállításához szükséges időkhöz képest csak a töredéke jut. [F2]

3.2 tézis: *Dinamikus közvetett megvilágítás előre kiszámolt fényutakkal*

Bevezettem a fényút-térkép fogalmát, ahol az előre generált fényutak felületi belépési és értékpontokat kötnek össze. Az LPM (előszámított fényút-térkép) elemei azokat az irradianciákat tárolják, ami a belépési pontra eső egységnyi irradiancia hatására a fényúton keresztül az értékpontokat éri. Az LPM kiszámításához a virtuális fényforrás módszert alkalmaztam, azzal az eltéréssel, hogy a végső gyűjtést nem képelemenként, hanem értékpontként hajtottam végre. A színtér megjelenítésekor az LPM adatokat az aktuális megvilágítás alapján kombinálva az értékpontok indirekt illuminációját kapjuk. A köztes felületi pontokra a szín interpolációval számolható. A módszer a grafikus kártyán működik, valósidejű fény- és kamera-animációt biztosítva. [I1, J1, I8, D4, B1]

lett valószínűleg az új algoritmusokat, a grafikus hardver kihasználásával, ahol ez lehetséges, illetve szükséges volt. A mért eredményeket összevettem az saját elméleti jóslataimmal, az irodalomban szereplő eredményekkel, illetve korábbi algoritmusok általam megvalósított változataival.

Új tudományos eredmények

1. téziscsoport: *Mintavételezés véletlen bolyongási algoritmusokban*

1.1 tézis: *Szóráscsökkentés és spektrális optimalizáció orosz rulett, illetve összetett BRDF mintavételezése esetén*

Az orosz rulett módszer többletzajt visz a sugársűrűség Monte Carlo becslőjébe, mivel megsejti a fontosság szerinti mintavételezés elvét azzal, hogy nem nulla valószínűséget rendel a fényút megszakításához, vagyis a zero hozzájárulási tartományt mintavételezi. Megmutattam, hogy ez a hatás csökkenthető egy módosított, de torzítatlan becslő segítségével, amely nem nulla hozzájárulást rendel a fényút megszakításához.

Többfajta véletlen becslőt állítottam és vetettem össze aszerint, hogy hogyan használják az egyes BRDF elemekhez tartozó valószínűsősűrűség-függvényeket a mintagenerálásra, illetve hogyan kombinálják a mintához tartozó hozzájárulásait.

Egy véletlen bolyongással nyert fényút minden reprezentatív hullámhosszon szállít fényt. Bebizonyítottam, hogy az orosz rulett és az elemi BRDF kiválasztása is javítható, ha a választási valószínűségeket hullámhosszonként külön értékeljük, és az eredményeket átlagoljuk. Amennyiben színes fény verődne vissza egy komplementer színkompenensekkel jellemezhető felületről, az új módszer elkerüli a valójában csekély hozzájárulású fényutak bejárását. [F5]

1.2 tézis: *A korrelált és a fontosság szerinti mintavételezés kombinációja*

A takaratlan sokszögfényforrásokra, illetve környezeti megvilágításra felírható, analitikusan integrálható képlet segítségével, csak a képlet által jósolt és a valódi megvilágítás különbségét kell integrálni. Ez a korrelált mintavételezés, ami minden, nem a takarás miatt megjelenő zajt megszüntet, de a takart részekben többletszórást eredményez. Olyan mintavételezési sémát javasoltam, ami a korrelált és a fontosság szerinti mintavételezést a mintákból számolt súly alapján kombinálja, ezzel minden tartományban kisebb szórású becslőt eredményez. [F3]

2. téziscsoport: *A sugárkövetés gyorsítása*

2.1 tézis *Gyors adatstruktúrák térfelosztáson alapuló sugárkövetéshez*

A klasszikus, térfelosztáson alapuló sugárkövetési megoldásokat vizsgáltam, és olyan módosításokat javasoltam, amelyek a rendelkezésre álló hardver memória- és gyorsítótár elérési jel-



2. ábra. Csökkentett szórású környezeti leképezés kombinált korrelált és fontosság szerinti mintavételezéssel.

legzetességeit figyelembe veszik. A háromszögháló tárolására új reprezentációt javasoltam, amelyhez a feldolgozó egységeknek minimális mennyiségű adatot kell beolvasnia, és a metszéspontszámítás az eddig ismert megoldásoknál gyorsabb. Másrészt a térfelosztó adatszerkezetek, különösen a kd-fa és a befoglalóintervallum-hierarchia (BIH) építéséhez és bejárásához javasoltam a CPU gyorsítótár soraihoz, illetve a grafikus kártya textúráihoz illeszkedő reprezentációkat. [I7, D1, J2, J5, H1, D5, B1]

2.2 tézis: *Közelítő láthatóság-vizsgálat takaró gömbökkel*

Közelítő láthatóság-vizsgálati algoritmust javasoltam, amely különösen nagyszámú, pontszerű fényforrás estén hatékony. Az árnykoló testek háromszöghálóval adott geometriáját gömbök halmazára cserélem Delaunay gúlákra bontás segítségével. Ezután egy új összevono algoritlussal csökkentem a gömbök számát, miközben a halmaz árnyékvető képessége a lehető legkisebb mértékben változik. Ennek meghatározásához a sugártalalat valószínűségén alapuló metrikát definiáltam. A felületi pontok árnyalásánál a gömböket takaró korongoknak tekintve az indirekt fényforrások láthatósága különösen hatékonyan eldönthető. [F4]

2.3 tézis: *Sugárkövetés sugár-hierarchiával*

A sugármotoron (ray engine) alapuló, specializált és javított módszert javasoltam. Az eredeti megoldással szemben, ami minden sugarat minden primitívvel elmetesz, az új algoritmus a sugarak fölé épít gyorsító-hierarchiát, a képtérbeli koherencia kihasználásával. [I2]

3. téziscsoport: *Sugár-újrahasznosítás virtuális fényforrásokkal*

3.1 tézis: *Valósídejű fényanimáció fényutak újrahasznosításával*

Az animációnak arra a speciális esetére javasoltam eljárást, amikor a fényforrás mozog, de a kamera egy helyben marad. Ebben az esetben a fényutak változatlan része több későbbi