VALÓSZERŰ FÉMEK HATÉKONY MEGJELENÍTÉSE

Lazányi István Zsolt

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Irányítástechnika és Informatika Tanszék

konzulens

Dr. Szirmay-Kalos László

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Irányítástechnika és Informatika Tanszék

2008

Bevezetés

A számítógépes grafika fő célkitűzése, hogy a felhasználóban azt az illúziót keltse, hogy a számítógép képernyőjén keresztül valós tárgyakat lát [SKAC03, SP92]. Ennek feltétele, hogy a képernyő egyes pixeleinek fényerejét úgy válasszuk meg, hogy az megegyezzen a pixel által meghatározott irányban látható pont fényességével. Vagyis a képszintézis során azonosítanunk kell a látható pontokat, majd kiszámítanunk azok fényességét. Egy pixelen keresztül látható pont meghatározásához a szempozícióból egy félegyenest (ún. *sugarat*) indítunk a pixel középpontján keresztül, majd meghatározzuk a sugár és a virtuális térben található objektumok metszéspontját. A szemhez legközelebbi metszéspont fogja megadni az adott pixelben látható pontot.

A látható pont fényességének meghatározásához az illető objektum esetleges fénykibocsátásán kívül a többi objektum hatását is figyelembe kell vennünk. Ehhez összegeznünk kell az összes lehetséges irányból érkező megvilágítás hozzájárulását az ún. *árnyalási egyenlet* [Kaj86] szerint, vagyis meg kell határoznunk az árnyalt pontból látható összes pontot, és ki kell számítanunk a fényességüket. Ehhez pontonként megint csak meg kell határozni az összes látható pontot, kiszámítani hozzájárulásukat, és így tovább.

Összességében, az összes olyan fényutat azonosítanunk kell, amely egy fényforrásból indul, és egyszeres vagy többszörös visszaverődések és/vagy törések után a szemben ér véget. Ha elhanyagoljuk a közvetett (indirekt) megvilágítás hatását, akkor csak azokat a fényutakat vesszük számításba, amelyek a fényforrásból egy egyszeres visszaverődést vagy törést követően jutnak a szembe. Ebben az esetben *lokális illuminációs* módszerekről beszélünk. Hosszabb fényutak figyelembe vétele esetén beszélhetünk *globális illuminációs* módszerekről [Ant04, SK08, SKSS08].

Interaktív alkalmazások

Számítógépes játékokban és valósidejű rendszerekben az interaktivitás fenntartásához másodpercenként legalább 20 képet kell előállítanunk, még igen bonyolult virtuális világok megjelenítése esetén is. Ehhez olyan egyszerűsítési és előfeldolgozási technikákra van szükség, amelyek jelentősen csökkentik a megjelenítés idejét anélkül, hogy jelentősen rontanák a képek minőségét. Mivel az előfeldolgozás elsősorban statikus (és ezen belül diffúz felületű) objektumokra hatékony, a virtuális világ statikus és dinamikus elemeit rendszerint különválasztják. A statikus környezet fényviszonyait általában egy előfeldolgozási lépés során, globális illuminációs algoritmusok (pl. *radiozitás*) segítségével számítják ki.

A dinamikus objektumokra eső, valamint az általuk visszavert fények hatását viszont futás közben kell meghatároznunk. A dinamikus objektumok környezetre gyakorolt hatását általában *árnyék leképzéssel (shadow mapping)* kezelik, ami a statikus objektumokra jutó direkt megvilágítás modulálását jelenti a dinamikus objektumok jelenlétének megfelelően. Mivel a dinamikus objektumok általában sokkal kisebbek környezetüknél, ez a közelítés általában elfogadható. A statikus környezetről a dinamikus objektumokra jutó indirekt megvilágítást viszont meglehetősen pontosan kell előállítanunk. Ezen számításokat jelentősen felgyorsíthatjuk, ha a környezetet képek formájában tároljuk. Ez a technika a környezet leképzés (*environment mapping*) [BN76].

Fémek megjelenítése

A számítógépes játékokban tipikusan diffúz felületű, textúrázott falak határolják a játékteret, amelyek visszaverik a mozgó objektumok színes fényeit. Ezek a színpompás visszaverődések nemcsak a látvány fokozásához jönnek jól, hanem a képszintézis hiányosságait is könnyedén elrejthetjük velük. Szintén gyakori a tükröző, fémes objektumok (páncélzatok és fegyverek) megjelenítése, amelyek csillogásukkal növelik a megjelenítés kontrasztját, és növelik a játékélményt. Azonban a teljesítmény növelése érdekében a fémek általában egységesen „szürkén" kerülnek megjelenítésre, holott az acél, az ezüst és az alumínium ránézésre is megkülönböztethetők (főleg az ezüst sárgás árnyalata ismerhető fel könnyen).

A fémek számos olyan anyagi tulajdonsággal rendelkeznek, amelyet érdemes grafikai szempontból is megvizsgálnunk. Például a fémek törésmutatója *komplex* szám, ahol a képzetes rész az elektromágneses hullámok kioltásáért felelős. Ezért nem tudnak az elektromágneses hullámok a fémek belsejébe hatolni, ahogy azt a Faraday-kalitka is demonstrálja. A fémek törésmutatója jelentősen hullámhosszfüggő, így a belőle származtatott *Fresnel tényező*, amely a beeső és a visszavert fény arányát írja le különböző beesési szögekre, szintén hullámhosszfüggő lesz, ami színes tükröződéseket eredményez (szemben például a műanyagokkal, ahol a tükröződő fényfolt az anyag színétől függetlenül fehér).

Optikai tulajdonságaiktól függően a fémek különféle visszaverő tulajdonságokkal rendelkezhetnek. Míg az optikailag sima, polírozott fémfelületek ideális tükörnek tekinthetők, az optikailag durva (pl. oxidálódott) fémfelületek csillogó (*glossy*) vagy extrém esetben matt (*diffuse*) felületeknek felelnek meg. Vagyis fémek hatékony megjelenítéséhez pontos, de könnyen számítható visszaverődési modellekre és képszintézis módszerekre van szükség, mind ideális, mind nemideális visszaverődések tekintetében. Mindezeken felül, a direkt megvilágítás mellett legalább egyszeres indirekt visszaverődéseket is kezelnünk (vagy legalább közelítenünk) kell.

A disszertáció szerkezete

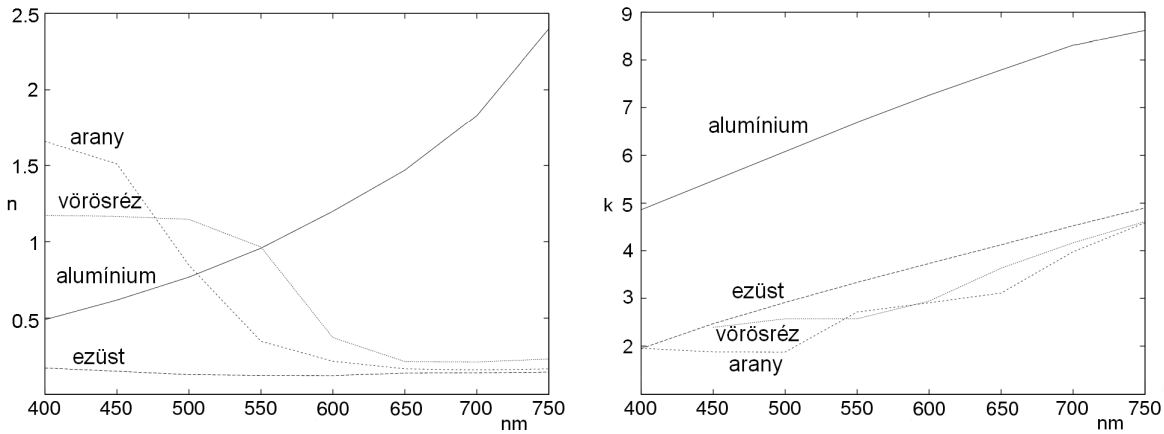
A disszertáció első, bevezető fejezete definiálja a megvilágítási számítások alapvető mennyiségeit, bevezeti az árnyalási egyenletet és bemutatja a grafikus kártyák képességeit. Ezt követően a második fejezet irodalmi áttekintést nyújt a disszertáció által érintett témakörökben.

A következő négy fejezet mutatja be az új tudományos eredményeket. Nevezetesen, a 3. fejezet a Fresnel függvény egy lehetséges egyszerűsítését javasolja fémek esetére, míg a 4. és 5. fejezet ideális illetve nemideális visszaverődések gyors, közelítő megjelenítésével foglalkozik. A 6. fejezet egy központiprocesszor-alapú globális illuminációs módszert mutat be, amely kihasználja a grafikus hardver képességeit is. Az utolsó két fejezet tartalmazza a tézisek listáját és a publikációs jegyzéket.

Új tudományos eredmények

1 Fémek megjelenítése

A felületi visszaverődések színét a Fresnel együttható határozza meg, amely közvetlenül kifejezhető az anyag törésmutatójából [Gla95]. A Fresnel együttható kiszámítása meglehetősen számításigényes. Nemfémek esetére Schlick adott egy egyszerű, jól használható közelítést, amely azonban fémekre – azok komplex törésmutatója miatt – nem alkalmazható közvetlenül (1.1. ábra).



(a) (b)

1.1. ábra. A törésmutató értékei különböző fémekre, különböző hullámhosszakon: (a) valós rész, (b) képzetes rész.

I. tézis: Fémek gyors, valószerű megjelenítése

A disszertáció kapcsolódó fejezete: 3. fejezet
Kapcsolódó publikáció: [P1]

A Schlick-féle képlet egyszerű transzformációjával (átskálázással) olyan közelítést javasoltam a Fresnel együtthatóra, amely komplex törésmutatók esetén is alkalmazható:

$$F^*(n,k,\cos\theta) := F_\perp^* + (1-F_\perp^*)(1-\cos\theta)^5,$$

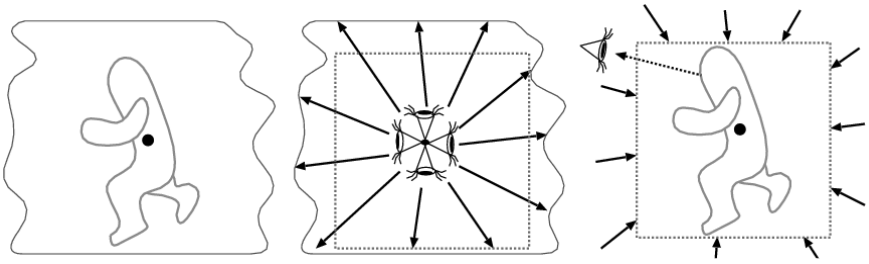
ahol

$$F_\perp^* = \frac{(n-1)^2+k^2}{(n+1)^2+k^2}.$$

A közelítés hibája egy racionális kifejezés alkalmazásával tovább csökkenthető. Ehhez az alábbi kifejezést javasoltam: $ax(1-x)^\alpha$, ahol az a és α paraméterek egyszerű peremfeltételekből nyerhetők. Az eredményül kapott képlet a grafikus hardveren is kiértékelhető, és használatával felgyorsítható a valószerű fémek megjelenítése.

2 Ideális visszaverődések megjelenítése

A *környezet leképezés* során a virtuális világ dinamikus objektumaihoz egy-egy *referencia-pontot* rendelnek, és a környezetet ezekből a pontokból „lefényképezik”, majd az objektumok környezetét az ideális visszaverődések számítása során az így kapott képekkel helyettesítik (2.1. ábra).



(a) (b) (c)

2.1. ábra. A környezet leképzés lépései. (a) Az objektum középpontjának meghatározása, (b) a középpontból képek készítése és (c) megvilágítás számítása a képek alapján.

A környezet leképezés alapvető feltételezése, hogy a környezet végtelen távol van a megjelenítendő objektumoktól, így a környezet felé tartó sugarak esetében a kiindulópont érdektelenné válik. Ez azt jelenti, hogy a sugarakat akár a referenciapontból is indíthatjuk, és a környezetet pedig a referenciapontból készített képekkel helyettesíthetjük. Azonban, ha a környezet objektumtól mért távolsága összemérhető az objektum méretével, ez az alapvető feltételezés már nem állja meg a helyét, és az objektum felületén megjelenített tükröződés nem fogja tudni megfelelően visszaadni a környezet esetleges közelségét.

II. tézis: Tükröző felületek közelítő megjelenítése hardvertámogatással

A disszertáció kapcsolódó fejezete: 4. fejezet
Kapcsolódó publikációk: [P2, P3]

A „klasszikus” környezet leképzés módosításával gyors, közelítő módszert javasoltam a visszaverődések megjelenítésére. A számítások elvégzéséhez a környezeti térképben a környezettől való távolságot is tárolom. Ezáltal lehetővé válik az $\vec{x}$ pontból $\vec{R}$ irányban látható pont meghatározása, vagyis a $\vec{q} = \vec{x} + \vec{R} \cdot d$ sugáregyenlet megoldása. Az eredményt numerikus közelítő módszerek alkalmazásával keressük meg. Például a d_p paraméterértékhez tartozó kiindulási közelítés az alábbi képlettel finomítható:

$$d_l = d_p + |\vec{r}| \cdot (1 - |\vec{p}|/|\vec{p'}|),$$

ahol $\vec{r}$ a klasszikus környezet leképzés által javasolt metszéspont, $\vec{p}$ az aktuális közelítés, a $|\vec{p}|/|\vec{p'}|$ tényező pedig a közelítés jóságát írja le. Két közelítés közötti interpolációhoz pedig az alábbi képlet használható:

$$d_{new} = d_l + (d_l - d_p) \cdot \frac{1 - |\vec{l}|/|\vec{l'}|}{|\vec{l}|/|\vec{l'}| - |\vec{p}|/|\vec{p'}|},$$

ahol $\vec{l}$ és $\vec{p}$ a két közelítés, valamint d_l és d_p a megfelelő paraméterértékek.

A módszer gyors és pontos abban az esetben, ha a környezet nagyméretű síklapokból áll, és elfogadható közelítést ad egyéb esetekben is. A módszer jól illeszkedik a grafikus hardver architektúrájához.

3 Nemideális visszaverődések gyors megjelenítése

Nemideális visszaverődések esetén nem elegendő egyetlen iránnyal számolni a visszaverődések számítása során, hanem számos különböző irány figyelembevételére van szükség, jelentősen megnövelve a számításigényt (3.1. ábra).

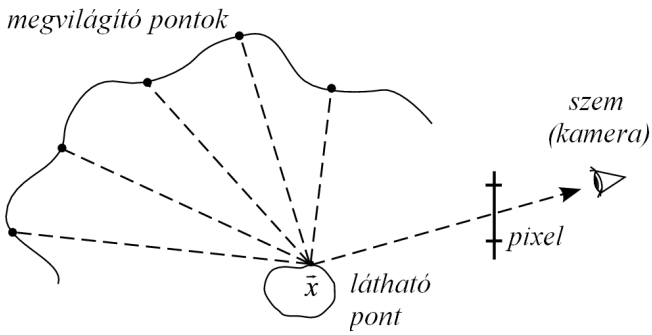


Figure 3.1. Nemideális visszaverődés meghatározása az $\vec{x}$ pontban.

Ezeket a számításokat általában már egy előfeldolgozási lépésben elvégzik, és a kapott *spekuláris és diffúz környezeti térképeket* használják a tényleges megjelenítéshez [KVHS00, KM00]. A megjelenített objektum elmozdulása esetén azonban ezeket a térképeket megfelelő gyakorisággal újra kell generálni, hogy a zavaró váltásokat elkerüljük. Egy lehetséges alternatíva a több környezeti térkép használata, ennek a memóriaigénye azonban jelentős [GSHG98].

III. tézis: Csillogó és matt felületek közelítő megjelenítése hardvertámogatással

A disszertáció kapcsolódó fejezete: 5. fejezet
Kapcsolódó publikációk: [P4, P5, P6]

Csillogó és matt objektumok megjelenítésére javasoltam gyors, közelítő módszert. Több környezeti térkép használata helyett az objektum középpontjából készített környezeti térkép információit használom, és a környezetből érkező megvilágítás átstrukturálásával (klaszterezésével) érek el teljesítménynövekedést. Ezáltal lehetővé válik, hogy a szükséges számításokat az objektum minden egyes pontjára elvégezzük, amely látványos helyfüggő (lokalizációs) hatásokat eredményez.

Az egyes klaszterek hozzájárulásának számításához a környezeti térképben tárolt távolságinformációkat használom. Ezen információk alapján a referenciapontra vonatkoztatott térszögek az alábbiak szerint lokalizálhatók:

$$\Delta\omega^* \approx \Delta\omega \cdot \frac{r^2}{r^{*2}},$$

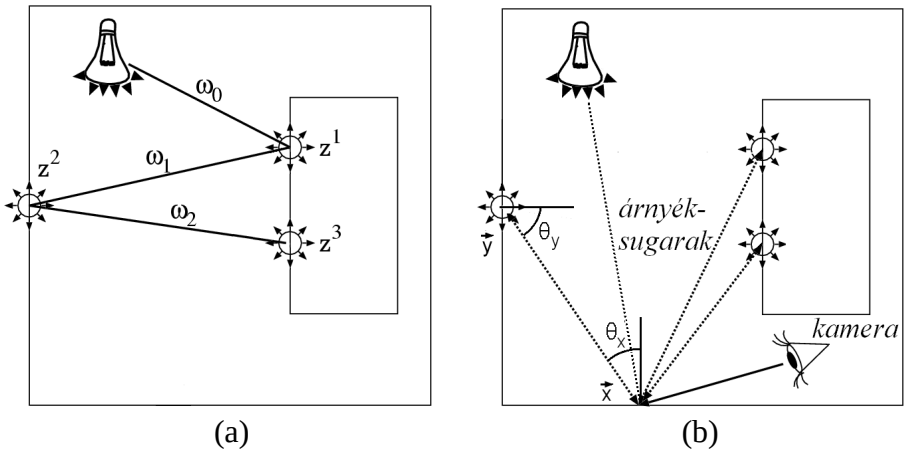
ahol $\Delta\omega$ és $\Delta\omega^*$ a referenciapontra illetve a megjelenített pontra vonatkozó térszögek, míg r és r^* a referenciapont illetve a megjelenített pont környezettől való távolsága. A klasztereket körlemezzel közelítve (*disc-to-point approximation*) a képletet az alábbiak szerint pontosíthatjuk:

$$\Delta\omega^* \approx 2\pi - \frac{2\pi}{\sqrt{1 + \left(\left(\frac{2\pi}{2\pi - \Delta\omega}\right)^2 - 1\right) \cdot \frac{r^2}{r^{*2}}}}.$$

A módszer jól illeszkedik a grafikus hardver architektúrájához, és látványos megjelenítést eredményez.

4 Többszörös visszaverődések megjelenítése

Az eddig ismertetett tézisek kiegészítéseképpen javasoltam egy módosított globális illuminációs módszert is. A többszörös visszaverődések kezelésére is képes globális illuminációs módszerek hosszú fényutakkal dolgoznak, ezért az elfogadható teljesítmény elérése érdekében az egy pixelben kiszámolt fényutakat más pixelekben is fel kell tudnunk használni. Ezen az ötleten alapul a *virtuális fényforrások* módszer [Kel97], amely az egyes fényutak teljesítményét virtuális fényforrások formájában tárolja el, és a teljes fényút újrafelhasználását lehetővé teszi egyetlen láthatóságvizsgálat (az ún. *árnyéksugár*) felhasználásával (4.1. ábra).



4.1. A virtuális fényforrás algoritmus. (a) Virtuális fényforrások létrehozása, (b) virtuális fényforrások hozzájárulásának meghatározása az $\vec{x}$ pontra.

IV. tézis: A virtuális fényforrás módszer gyorsítása a grafikus hardver felhasználásával

A disszertáció kapcsolódó fejezete: 6. fejezet
Kapcsolódó publikáció: [P7]

A hagyományos, központi processzor (CPU) alapú virtuális fényforrás módszer gyorsítására az alábbi javaslatokat tettem. A virtuális fényforrás láthatóságának vizsgálatát a fényforrás lehetséges hozzájárulásának nagyságától teszem függővé, és a lehetséges hozzájárulások számítását a grafikus hardver (GPU) igénybevételével végzem.

Ezáltal a hozzájárulások számítása (GPU) és a láthatóságszámítás (CPU) egymástól függetlenül, párhuzamosan végezhető. A kis hozzájárulással rendelkező virtuális fényforrások elhanyagolásával további gyorsítás érhető el.

Az eredmények hasznosítása

A javasolt módszerek elsődleges célja, hogy a számítógépes játékokat globális illuminációs hatásokkal tegyék élethűebbé. A bemutatott módszerek nemcsak különálló tesztalkalmazások formájában készültek el, hanem a GameTools FP6 (IST-2-004363) projekt keretében egy grafikus játékmotorban is megvalósításra kerültek, így remélhetően a jövőbeli megjelenítő motorokban is feltűnhetnek majd (www.gametools.org).

Kapcsolódó publikációk

[P1] I. Lazányi and L. Szirmay-Kalos. Fresnel term approximations for metals. Short Papers Proceedings of the 13rd International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG '05), Plzen – Bory, Czech Republic, pp. 77–80, 2005.

[P2] L. Szirmay-Kalos, B. Aszódi, I. Lazányi, and M. Premecz. Approximate raytracing on the GPU with distance impostors. Computer Graphics Forum (Eurographics '05 Proceedings), 24(3):695–704, 2005.

[P3] L. Szirmay-Kalos, B. Aszódi, and I. Lazányi. Ray-tracing effects without tracing rays. Wolfgang Engel, editor, ShaderX 4: Lighting & Rendering, pp. 397–407. Charles River Media, 2005.

[P4] I. Lazányi and L. Szirmay-Kalos. Real-time indirect illumination gathering with localized cube maps. III. Magyar Számítógépes Grafika és Geometria Konferencia, pp. 86–93, 2005.

[P5] L. Szirmay-Kalos and I. Lazányi. Indirect diffuse and glossy illumination on the GPU. Proc. Spring Conference on Computer Graphics (SCCG '06), Cesta Papiernica, Slovakia, pp. 29–35, 2006.

[P6] I. Lazányi and L. Szirmay-Kalos. Indirect diffuse and glossy illumination on the GPU. Wolfgang Engel, editor, ShaderX 5: Advanced Rendering Techniques, pp. 345–358. Charles River Media, 2006.

[P7] I. Lazányi and L. Szirmay-Kalos. Speeding up the virtual light sources algorithm. Proc. 20th Spring Conference on Computer Graphics (SCCG '04), Budmerice, Slovakia, pp. 112–120, 2004.

Egyéb publikációk

[P8] I. Lazányi. Preprocessing virtual worlds for virtual reality applications. Proc. 7th Central European Seminar on Computer Graphics (CESCG '03), Budmerice, Slovakia, pp. 195–204, 2003.

[P9] B. Aszódi, Sz. Czuczor, I. Lazányi, and L. Seregi. Virtuális valóság oktatórendszer atomerőművi környezetben. Multimédia az oktatásban konferencia, Dunaújváros, 2002.

Hivatkozások

[Ant04] Gy. Antal. Global Illumination Methods for Architectural Scenes. PhD thesis, ELTE, Budapest, 2004.

[BN76] J. F. Blinn and M. E. Newell. Texture and reflection in computer generated images. Communications of the ACM, 19(10):542–547, 1976.

[Gla95] A. Glassner. Principles of Digital Image Synthesis. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Francisco, 1995.

[GSHG98] G. Greger, P. Shirley, P. Hubbard, and D. Greenberg. The irradiance volume. IEEE Computer Graphics and Applications, 18(2):32–43, 1998.

[Kaj86] J. T. Kajiya. The rendering equation. Computer Graphics (SIGGRAPH '86 Proceedings), pp. 143–150, 1986.

[Kel97] A. Keller. Instant radiosity. In SIGGRAPH '97 Proceedings, pp. 49–55, 1997.

[KM00] J. Kautz and M. McCool. Approximation of glossy reflection with prefiltered environment maps. In Proceedings of Graphics Interface, pp. 119–126, 2000.

[KVHS00] J. Kautz, P. Vázquez, W. Heidrich, and H-P. Seidel. A unified approach to prefiltered environment maps. In 11th Eurographics Workshop on Rendering, pp. 185–196, 2000.

[Sch93] Ch. Schlick. A customizable reflectance model for everyday rendering. In Fourth Eurographics Workshop on Rendering, pp. 73–83, 1993.

[SK08] L. Szirmay-Kalos. Monte-Carlo Methods in Global Illumination – Photo-realistic Rendering with Randomization. VDM, Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, 2008.

[SKAC03] L. Szirmay-Kalos, Gy. Antal, and F. Csonka. Háromdimenziós grafika, animáció és játékfejlesztés. ComputerBooks, Budapest, 2003.

[SKSS08] L. Szirmay-Kalos, L. Szécsi, and M. Sbert. GPU-Based Techniques for Global Illumination Effects. Morgan and Claypool Publishers, San Rafael, USA, 2008.

[SP92] V. Székely, A. Poppe. Számítógépes grafika alapjai IBM PC-n. ComputerBooks, Budapest, 1992.