

Projekt zárójelentés

Virtuális világok szimulációja és megjelenítése, K-71992, témavezető: Szirmay-Kalos László, BME-IIT

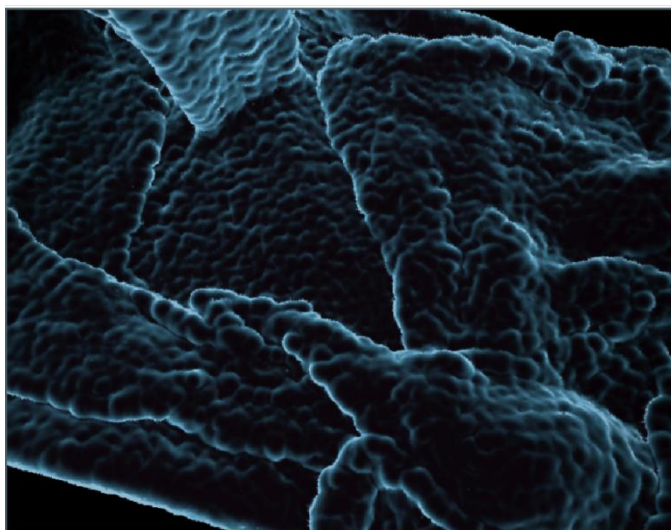
Eredeti projekt célok

A benyújtott pályázatban alapvetően két célt tűztünk ki:

1. A szimulációt és a képszintézist egyesítjük, azaz olyan módszereket dolgozunk ki, amelyet mind a virtuális világ felépítését/működtetését, mint pedig annak a megjelenítését párhuzamosan a grafikus kártyán (GPU) végzik el.
2. A természeti jelenségekhez és folyamatokhoz olyan matematikai gépeket hozunk létre, amelyek ezeket a jelenségeket automatikusan képesek követni.

A kitűzött célokat sikerült elérni, és több alkalmazási területen demonstráltuk a módszerek hatékonyságát, egyes alkalmazási területeken a hasznosítás is megkezdődött, illetve folyamatban van.

Eredmények



1. ábra. Százezer részecskét tartalmazó Lagrange-i (SPH) folyadékszimuláció és képszintézis valós időben (13 képkocka másodpercenként).



2. ábra. Többszörös szóródás szimuláció 4096³ felbontáson procedurálisan előállított áramlási modellben.

A *folyadékszimuláció* matematikai szempontból a Navier-Stokes egyenletek megoldását jelenti, azaz a matematikai gép egy parciális differenciálegyenlet, amelyhez Euler-i¹, azaz rácsalapú, illetve Lagrange-i^{2,3}, azaz részecske alapú, masszívan párhuzamos hardveren hatékonyan futtatható algoritmusokat dolgoztunk ki. A pályázat végén sikerült eredményeket elérni a *folyadékszabályozás* területén is, ahol az a cél, hogy rábírnjuk a folyadékot.

¹ Umenhoffer Tamás, Szirmay-Kalos László: *Interactive Distributed Fluid Simulation on the GPU*, MIPRO 2008: Grid and Visualization Systems. Opatija, Horvátország, 2008

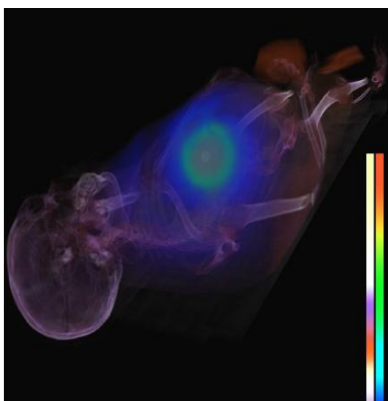
² Horváth Péter, Illés Dávid: *SPH-based Fluid Simulation in Distributed Environment*, MIPRO 2008: Grid and Visualization Systems. Opatija, Horvátország, 2008.

³ László Szécsi, Dávid Illés: *Real-Time Metaball Ray Casting with Fragment Lists.*, Eurographics Short Papers. Cagliari, Olaszország, 2012

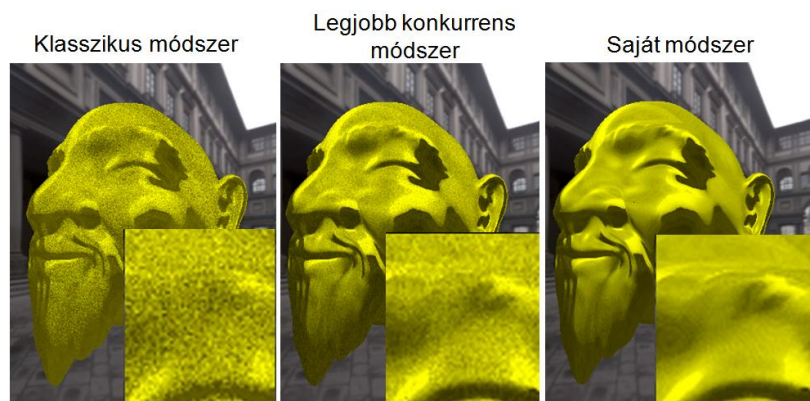
Térfogati modellekben a fényterjedés szimuláció egyik legidőigényesebb lépése a fotonok szabad úthosszának mintavételezése. Nagyfelbontású, heterogén, kevésbé szóró közegben a szóródási, illetve elnyelődési pont azonosításához egy egyenes mentén a teljes térfogatot be kell járni. Procedurális modellek esetén a térfogati modell nem áll expliciten rendelkezésre, mivel az olyan nagy, hogy nem tudnánk tárolni, csupán arra van lehetőség, hogy szükség esetén egy függvénnyel mintavételezzük a sűrűséget egy-egy diszkrét pontban, ami még tovább lassítja a folyamatot. A megoldásunkhoz a Woodcock módszerből indultunk ki, amely anélkül képes mintavételezni a szabad úthosszt, hogy a sűrűségmezőt mindig be kellene járnia. Nagy hátránya viszont, hogy a véletlen lépéshossza a legnagyobb határkeresztmetszettől függ, így ugyan véletlenszerűen, de nagyon sok lépést igényelhet. A Woodcock módszert általánosítottuk és ezt a problémáját megoldottuk^{4,5}. Példaképpen Perlin gépekkel reprezentált dinamikus áramlás szimulációban interaktív sebességgel készítettük többszörös fényszóródás szimulációt (2. ábra). Ezt a rendszert 4096^3 felbontású diszkrét rácson szimuláltuk, azaz a nem procedurális, valódi modellnyilvántartás az operatív memória méretének sokszorosát igényelte volna. A skálázhatóság demonstrálására hasonló szimulációkat egészen 32 ezer köbös modellekre is végeztünk.

A formális nyelvek, és azon belül az L-rendszerek szintén alkalmasak természeti folyamatok (fák, növények, autonóm növekvő városszerkezetek) leírására. Az *L-rendszerek masszívan párhuzamos kiértékelését ugyancsak sikerült megoldani*, amit virtuális valóság rendszerekben⁶, animációkban⁷ és geometria szintézisben⁸ alkalmaztunk. A megoldás alapja az volt, hogy a modern GPU-k geometriai árnyalója képes a topológiát a képszintézis közben, akár több lépésben módosítani, így az L-rendszerek szabályillesztését és kifejtését rá lehet bízni erre az egységre.

A transzport folyamatok mögötti matematikai gép az integrál egyenlet (általában másodfajú Fredholm féle), amelyet véges elem felbontással lineáris egyenlet megoldásra lehet visszavezetni, vagy a megoldást végtelen dimenziós integrálokkal kifejezve Monte Carlo eljárásokhoz folyamodhatunk.



3. ábra. Iteratív, véges elemes sugárzásterjedés számítás (rádióterápiás szimuláció).



4. ábra. Környezetleképzés fontosság szerinti mintavételezéssel.

⁴ L. Szirmay-Kalos, B. Tóth, M. Magdics: **Free Path Sampling in High Resolution Inhomogeneous Participating Media**. Computer Graphics Forum 30 :(1) pp. 85-97. (2011)

⁵ László Szirmay-Kalos, Balázs Tóth, Milán Magdics: **Monte Carlo Photon Transport on the GPU**, In: Wen-mei W Hwu (szerk.) GPU Computing Gems. Boston, MA: Morgan Kaufmann Publishers, Inc. pp. 234-255., 2011

⁶ Magdics Milán: **Real-time Evaluation of L-system Scene Models in Online Multiplayer Games.**, MIPRO 2009: 32nd International Convention on Information and Communication Technology, 2009

⁷ Magdics Milán: **Real-time Generation of L-system Scene Models for Rendering and Interaction.**, Spring Conference on Computer Graphics SCCG 2009

⁸ Magdics Milán, Klár Gergely: **Rule-based Geometry Synthesis in Real-time.**, GPU Pro: Advanced Rendering Techniques., 2010

A végelelemes megközelítésből adódó lineáris egyenletek általában óriási méretűek, így a mátrixot nem is tároljuk, hanem annak elemeit mindig újraszámoljuk, amikor az iteratív megoldónak egy elemre szüksége van. Az iteratív megoldás sebessége alapvetően függ attól, hogy honnan indítjuk az eljárást, ezért fontos, hogy jó közelítő megoldásaink legyenek. Közelítő megoldásokat analitikus formulákkal lehet kapni, de az integrálegyenletek általános alakban nem oldhatók meg analitikus formában. Ezért *olyan eljárást javasoltunk, amely egy végelelemes problémához egy analitikusan megoldható közelítőmodellt keres, majd az analitikus megoldással indítja az általános megoldó iterációját*⁹ (3. ábra).

Monte Carlo módszerek a nagydimenziós integrálokhoz a mintapontokat, ahol az integrandust kiértékelik, véletlenszerűen választják meg, ennek megfelelően a becslés is valószínűségi változó lesz. A becslés szórása kicsiny, azaz a pontossága statisztikai értelemben nagy, ha a minták valószínűségi sűrűség függvénye a lehetőségek szerint arányos az integrandussal. Adott sűrűségfüggvény szerint mintavételezni az inverziós eljárással lehetséges, de ez az eloszlásfüggvény invertálását igényli, amire csak algebrailag egyszerű esetekben van lehetőség. A másik eljárás az elvetéses módszer, de ennél egy-egy minta előállítása elvileg tetszőlegesen sok időt is felemészthet. A véletlen mintavételezés további hátránya, hogy a minták csak statisztikai értelemben követik az előírt sűrűségfüggvényt, azaz csak abban az esetben lesz a sűrűségük annak megfelelő, ha végtelen sok mintát használunk fel. A probléma formális vizsgálatára *általánosítottuk a kvázi-Monte Carlo módszerek egy alapegyenlőtlenségét, a Koksma-Hlawka egyenlőtlenséget olyan esetekre, amikor a minták nem egyenletes eloszlásúak, majd az elméleti következtetések levonása után, optimális mintavételezési eljárásokra tettünk javaslatot*¹⁰. Ezek során sikerült megmutatni a fontosság szerinti mintavételezés, több-dimenziós jelek frekvencia modulációja, illetve delta-szigma modulációja, valamint Floyd-Steinberg halftoning algoritmus közötti lényegi hasonlóságot. A módszert leginkább a környezet leképzésben alkalmaztuk¹¹ (4. ábra).



5. ábra. Ambiens takarás és többskálás fénytranszfer virtuális valóság rendszerekben.

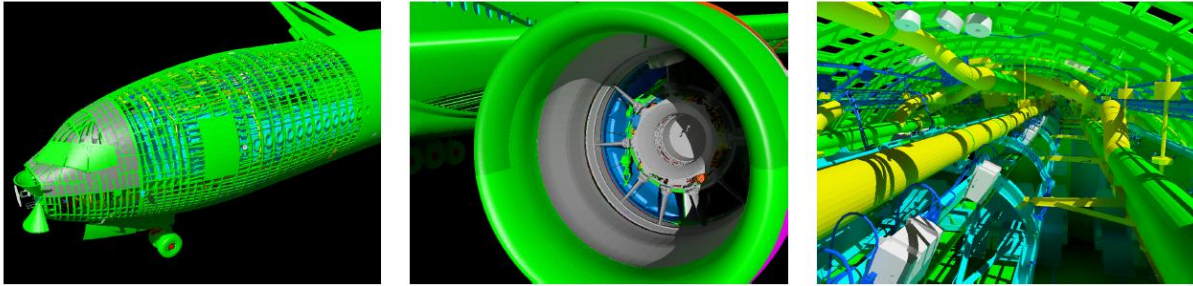
A bonyolult, a memóriaméreténél nagyobb, akár csak procedurálisan nyilvántartható modellek képszintézise folyamatosan a kutatási munkánk fókuszában volt. Ezeket a modelleket a méretük miatt nem lehet egyben elérni, azaz olyan lokális megközelítésekre van szükség, amelyek mindig csak a modell egy kis, összetartozó részét igénylik. Ezt a kis részt pedig procedurálisan létrehozhatjuk, illetve a memóriába tölthetjük. A lokális jellemzőkön alapuló képszintézis alapvető eljárása az ambiens takarás, amely a távolabbi elemek hatását az átlagukkal helyettesíti, de a közeliakat pontosan kezeli.

⁹ László Szirmay-Kalos, Gábor Liktör, Tamás Umenhoffer, Balázs Tóth, Shree Kumar, Glenn Lupton: **Parallel Iteration to the Radiative Transport in Inhomogeneous Media with Bootstrapping**, IEEE TRANSACTIONS ON VISUALIZATION AND COMPUTER GRAPHICS 17:(2) pp. 146-158., 2011

¹⁰ Szirmay-Kalos László, Szécsi László: **Deterministic Importance Sampling with Error Diffusion**, COMPUTER GRAPHICS FORUM (ISSN: 0167-7055) 28:(4) pp. 1056-1064. Paper 108. (2009),

¹¹ László Szirmay-Kalos, László Szécsi, Anton A Penzov: **Environment Mapping with Floyd-Steinberg Halftoning**, Wolfgang Engel (szerk.) GPU Pro: Advanced Rendering Techniques. pp. 108-117., 2010

Az ambiens takarási modellhez egy alapvetően új geometriai értelmezést adtunk, amelynek előnye, hogy hatékonyabban kiszámítható, azaz kevesebb mintával is pontosabb eredményekhez jutunk¹². A módszert térfogati modellekre is kiterjesztettük¹³, egy további általánosítását pedig virtuális valóság rendszerekben is alkalmaztuk¹⁴ (5. ábra).



6. ábra. A Boeing 777 modell (337 millió háromszög, 15 Gbyte adat) interaktív bejárása ányékokkal, direct megvilágítással és egy szóródási lépést megengedő indirekt megvilágítással¹⁵.

Az *out-of-core vizualizáció* olyan modellel foglalkozik, amelyek nem férnek el a memóriában, így egy-egy lépésben csak részleteiben vizsgálhatók. Ezekre egy sugárkövetéses eljárást valósítottunk meg, amely interaktív bejárást tesz akár az elérhető legbonyolultabb CAD modell, a Boeing modell esetében is (6. ábra).

A fényterjedés szimuláció alapú képszintézis során a fizikai törvényeket kell megoldani. Az illusztratív képszintézisben (NPR) azonban egy humán illusztrátor munkáját szimuláljuk. A kutatás során sikerült olyan vonalkázó, kontúrozó és festő algoritmust kidolgozni, amely egyszerre követi a rajzolás 2D struktúráját és azon 3D felületek deformációját, amelyet az illusztrátort ábrázol¹⁶. Ezzel lehetővé vált, hogy ezt a megjelenítési technikát ne csupán állóképekre, hanem animációkra és filmekre is alkalmazhassuk.

A skalármezőkkel leírt modellek rekonstrukciója és megjelenítése kutatásunk központi kérdése volt. A rekonstrukció valamely mérés, például CT és Pozitron Emissziós Tomográfia (PET) berendezés mérése alapján történt. Ebben az esetben egy inverz feladatot kell megoldani, ugyanis a fizikai folyamatok szimulációjával azt tudjuk megtenni, hogy ha ismert a sűrűségmező, akkor ki tudjuk számítani a mérés várható értékét. A mérés véletlen értéke alapján pedig egy iteratív eljárással kell megkeresni azt a sűrűségeloszlást, amely éppen az adott mérésnek felel meg a legnagyobb valószínűséggel (maximum likelihood becslés). A problémát az teszi nehezzé, hogy az ismeretlen eloszlást tipikus százmilliárdnyi végelemmel írjuk le, a mérési értékek is ebbe a nagyságrendbe esnek, a fizikai modell, ami a kettő közötti kapcsolatért felel, pedig végtelen dimenziós integrálokat tartalmaz. Az *integrálok Monte Carlo kiértékeléséhez és az inverz feladat megoldásához új algoritmusokat dolgoztunk ki és a módszert PET rekonstrukcióban alkalmaztuk*^{17, 18}.

¹² Szirmay-Kalos László, Umenhoffer Tamás, Tóth Balázs, Szécsi László, Mateu Sbert: **Volumetric Ambient Occlusion**, IEEE COMPUTER GRAPHICS AND APPLICATIONS (0272-1716), 2010

¹³ Marc Ruiz, László Szirmay-Kalos, Tamás Umenhoffer, Imma Boada, Miquel Feixas, Mateu Sbert: **Volumetric Ambient Occlusion for Volumetric Models**, VISUAL COMPUTER (ISSN: 0178-2789) 23:(3) pp. 1-13. (2010)

¹⁴ László Szirmay-Kalos, Balázs Tóth, Tamás Umenhoffer: **Fast screen-space ambient occlusion and indirect lighting**, Game Engine Gems. pp. 249-262., 2010

¹⁵ A. Áfra: *Interactive Ray Tracing of Large Models Using Voxel Hierarchies*, Computer Graphics Forum, 2012.

¹⁶ Tamás Umenhoffer, László Szécsi, László Szirmay-Kalos: **Hatching for Motion Picture Production**, COMPUTER GRAPHICS FORUM 30:(2), 2011.

¹⁷ Milán Magdics, László Szirmay-Kalos, Balázs Tóth, Balázs Csébfalvi, Tamás Bükki: **Higher Order Scattering Estimation for PET**, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Anaheim, 2012.

¹⁸ László Szirmay-Kalos, Milán Magdics, Balázs Tóth, Tamás Umenhoffer, Judit Lantos, Gergely Patay: **Fast Positron Range Calculation in Heterogeneous Media for 3D PET Reconstruction**, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Anaheim, 2012

Hasznosítás

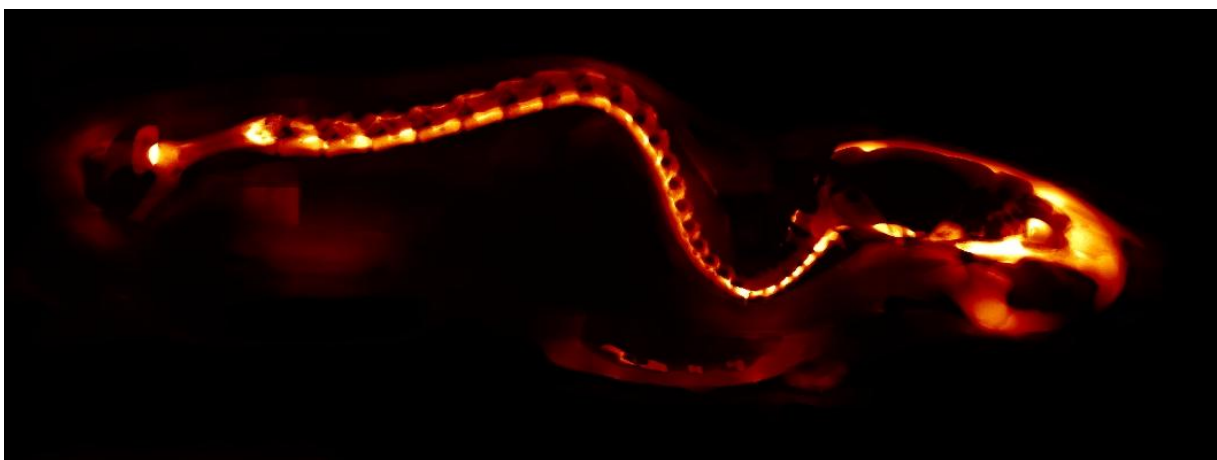
Az elméleti eredményekről 60 publikáció, közöttük 14 folyóirat cikk készült. A projekt során ketten (Szécsi László és Umenhoffer Tamás) védtek meg a PhD értekezésüket, két doktori eljárás (Tóth Balázs és Magdics Milán) folyamatban van. Az elért eredmények hasznosíthatók a CAD rendszerek fizikai szimulátoraiiban, a virtuális valóságrendszerekben, számítógépes játékokban, a filmkészítés során használt produkciós rendszerekben és az orvosi képalkotó berendezések működtetésében és méretezésében.

Konkrét gyakorlati hasznosítási lépések a következők voltak:

- A *Paida Technologies* (<http://paidiatech.com/>) a képszintézis algoritmusainkat játékmotorokba építette be.
- A NPR algoritmusunk produkciós rendszerekbe is beépült (Maya/RenderMan, 3DStudioMax/VRay) és a *Lichthof Productions* (<http://lichthof.hu>) az „Egill, the last pagan” című filmjét, ha talál rá finanszírozást, ezzel a rendszerrel fogja szintetizálni (7. ábra).
- A fotonvizualizációs módszerünk és inverz probléma GPU klaszteres megoldása a *Mediso Kft.* (<http://www.mediso.com/>) PET rekonstrukciós szoftverébe beépült, jelenleg beta-tesztelés alatt áll (8. ábra).



7. ábra. Az *Egill* című film DVD borító terve, amely a *Lichthof Productions*-nál készült a projekt során létrehozott vonalkázás, festés és kontúrozás algoritmusok felhasználásával.



8. ábra. PET/CT funkcionális rekonstrukció ^{18}F izotóppal végrehajtott egér csontvizsgálat során $432 \times 422 \times 1056$ felbontáson.