

GPU-alapú vizualizáció és képfeldolgozás

OTKA K-101527

Kutatási eredményeink a következő négy témakörhöz kapcsolódnak: tomográfiás rekonstrukció [C3, C4, C5, C8, C16, J5], szegmentálás [C6, C7, C12, C15, J4], alaktartó interpoláció [C14, J3], vizualizáció [C1, C2, C9, C10, C11, C13, C17, J1, J2].

Tomográfiás rekonstrukció - CT

A CT képalkotás gyakorlatában a szűrt visszavetítésen alapuló rekonstrukció (Filtered Back-Projection - FBP) a leggyakrabban használt módszer. Bár az FBP a leghatékonyabb tomográfiás rekonstrukciós algoritmus, képminőség szempontjából jóval rosszabb eredményt ad mint a költségesebb iteratív módszerek (Algebrai rekonstrukció – ART, Expectation Maximization - EM). Kihhasználva a mai modern GPU-k számítási kapacitását az iteratív módszerek versenyképessé tehetők. Az FBP, ART és EM módszereket C++/CUDA környezetben implementáltuk és részletes összehasonlító elemzést végeztünk képminőség, numerikus pontosság és hatékonyság szempontjából [C3].



1.ábra: Aneurizma tomográfiás rekonstrukciója hagyományos CC rácson (a) illetve optimális BCC rácson (b) [J5].

Az algebrai rekonstrukciós algoritmust adaptáltuk optimális BCC (Body-Centered Cubic) rácusra, és összehasonlítottuk a hagyományos CC (Cartesian Cubic) rácson számított rekonstrukcióval [C16]. CC rácson a trilineáris interpolációs kernelt használtuk, míg BCC rácson egy négyirányú box spline kernelt valamint egy trilineáris B-spline kernelt teszteltünk. A BCC rács és a trilineáris B-spline kernel általunk javasolt kombinációja sokkal izotrópikusabb eredményt adott mint a másik kettő kombináció (1. ábra). Módszerünk különösen angiográfiás CT adatok rekonstrukciójára alkalmazható, mivel a rekonstruált erek vastagságát a rács orientációja csak minimális mértékben befolyásolja [C16, J5].

Tomográfias rekonstrukció - PET

Javasoltuk a maximum-likelihood elvű iteratív PET rekonstrukció egy módosítását annak érdekében, hogy a Monte Carlo módszer hibája csökkenthető legyen. Az átlagoló iteráció az előrevetítések eredményeit átlagolja. Demonstráltuk, hogy ezekkel a módszerekkel a számítási idő jelentősen csökkenthető. A javasolt algoritmusok beépültek a TeraTomo rendszerbe [C4, C5, C8].

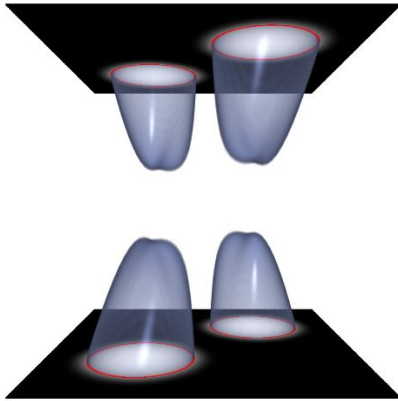
Szegmentálás

Zajos 3D orvosi adatok szegmentálására kidolgoztunk egy absztrakt távolság-transzformáción alapuló módszert, amely GPU-n jóval hatékonyabban implementálható mint a népszerű szinthalmazos (level set) szegmentálás [C7].

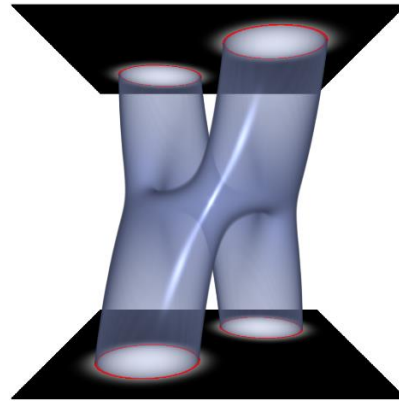
MRI szeletek automatikus osztályozásához kidolgoztunk egy olyan módszert, amely képes detektálni az alapvető anatómiai régiókat. Az egyes szeletek leíróvektorait Zernike-transzformációval generáltuk, amely alkalmasnak bizonyult a szeleten ábrázolt anatómiai struktúra geometriájának tömör és intuitív reprezentációjára [C6, C12]. Gépi tanuló módszert alkalmazva korrelációt kerestünk a kinyert leíróvektorok és a szeletek pozíciói között. A kezdeti klasszifikációt egy hibakorrekciós eljárással finomítottuk [C15, J4], amely figyelembe veszi az anatómiai régiók természetes sorrendjét.

Alaktartó interpoláció

Térfogati modellek folytonos metamorfózisához kidolgoztunk egy újszerű módszert, amely a Radon-transzformáltak alaktartó interpolációján alapul (2. ábra). Elsődleges célunk az volt, hogy minél több irányból számolt 1D vetületek folytonos átmenetét biztosítsuk. Ehhez először elvégeztük a Radon-transzformációt, majd a megfelelő vetületek, mint 1D sűrűségeloszlások alaktartó eloszlás-interpolációjával kiszámoltuk az átmeneti állapotok Radon-transzformáltját, végül kiértékeljük az inverz Radon-transzformációt a klasszikus szűrt visszavetítés (Filtered Back-Projection) algoritmussal. A módszert leíró konferenciacikk elnyerte az International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP) konferencia legjobb cikke (Best Paper Award) díjat [C14].



Távolságmezők interpolációja.



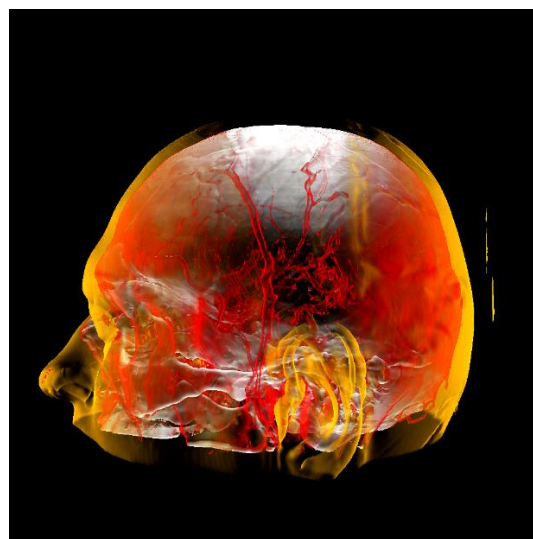
Radon-transzformáltak
alaktartó interpolációja [C14].

2.ábra: Az alaktartó interpolációra kidolgozott módszerünk a hagyományos, távolságtranszformáción alapuló megközelítéssel szemben képes drasztikusan eltérő keresztmetszeti szeletek között is interpolálni.

A témában végzett további kutatásaink során beláttuk, hogy a 3D alaktartó interpoláció teljesen konzisztens, mivel az interpolált 2D vetületek egy tényleges 3D sűrűségfüggvény 2D vetületeinek felelnek meg [J3].

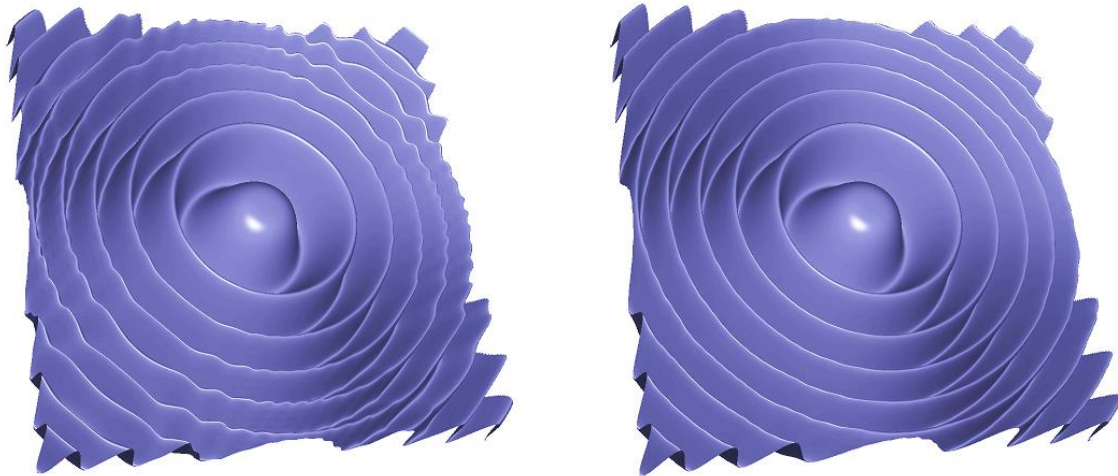
Vizualizáció

3D orvosi adatok (CT, MRI) interaktív megjelenítéséhez egy új, illusztratív jellegű térfogat-vizualizációs modellt javasoltunk, amely a voxelek opacitását a megvilágítás irányától függően definiálja [C1] (3. ábra). Háromszöghálós geometriai modellek nem fotorealisztikus megjelenítéséhez pedig kidolgoztunk egy GPU alapú módszert, amely kiaknázza a hardveresen támogatott geometria-processzálást (geometry shader) a sziluettek és a belső élek kiemeléséhez [C2].



3.ábra: Megvilágítástól függő opacitásmoduláció [C1].

Optimális BCC rácson mintavételezett térfogati adatok folytonos rekonstrukciójára korábban olyan nem szeparálható box spline szűrőket használtak, melyek bázisvektorai megegyeznek a BCC rácsot kifestítő vektorokkal. A box spline szűrőket ugyanakkor sokkal bonyolultabb GPU-n kiértékelni mint a szeparálható B-spline szűrőket. A B-spline szűrők viszont nem illeszkednek a BCC rács nem szeparálható geometriájára. Ahhoz, hogy a hatékony B-spline szűrőket a BCC rács geometriájára szabjuk, egy nem szeparálható koszinuszos ablakozó függvényt (windowing function) javasoltunk. Demonstráltuk, hogy az ablakozott B-spline szűrők mind hatékonyság mind pedig képminőség szempontjából felülmúlják a box spline szűrőket. Eredményeinket a szakterület legrangosabb folyóiratában (IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics) publikáltuk [J1].



Ötödfokú box-spline rekonstrukció.

Koszinuszos B-spline rekonstrukció [J1].

4.ábra: A Marschner-Lobb tesztjel rekonstrukciója hagyományos ötödfokú box-spline szűrővel illetve az általunk javasolt koszinuszosan súlyozott köbös B-spline szűrővel.

Korábban a box spline szűrőket úgy szabták egy adott rácsra, hogy a rácsot kifestítő elsődleges irányvektorok feszítették ki magát a box spline szűrőt is. Beláttuk, hogy ebben az esetben a rekonstrukciós szűrő és a rács kitüntetett irányai megegyeznek, ezért egymás anizotrópikus viselkedését erősítik. Javasoltuk a box spline szűrők „újraszabását” úgy, hogy a szűrőt és a rácsot eltérő irányú vektorok feszítsék ki. Ekkor a rekonstrukciós szűrő és a rács kompenzálják egymás anizotrópikus viselkedését, ami összeségében egy izotrópikusabb térfogat-reprezentációt eredményez [C16, J5].

A CC, BCC és FCC (Face-Centered Cubic) rácsokat korábban úgy hasonlították össze aliasing hatás szempontjából, hogy azonos mintavételi sűrűség mellett mintavételezték a klasszikus Marschner-Lobb (ML) tesztjelet és elemezték a rekonstruált jelben megjelenő artfaktumokat. Beláttuk, hogy ez az összehasonlítás jogtalan előnyt ad az FCC mintavételezésnek, mivel a mintavételező rácsook koordinátatengelyekkel párhuzamos orientációja egyértelműen az FCC rácsnak kedvez [C10]. Ennek az az oka, hogy az ML tesztjel spektruma gyakorlatilag korong alakú ezért a rekonstrukció nagyon érzékeny a mintavételező rács irányára. A CC,

BCC és FCC rácsokhoz ezért megkerestük azt az elforgatást, amely a lehető legnagyobb aliasing hatást eredményezi [J2]. A folytonos rekonstrukciók alapján megállapítottuk, hogy nem igaz az a korábban publikált feltételezés, miszerint az FCC mintavételezés alacsonyabb aliasing hatást biztosít mint a BCC mintavételezés.

A szakirodalomban többen egymástól függetlenül javasolták az FCC rácsot Nyquist-küszöb alatt történő mintavételezésre. Az indoklás szerint kihasználható, hogy az FCC rács duálisa a BCC rács, ami egy optimális gömblefedő rács. Az optimális gömblefedés a frekvenciatartományban pedig sejtetően a periodikus ismétlődések minimális átlapolódását eredményezi. Beláttuk, hogy ez a megközelítés hibás, mivel a gömblefedési feladatban egy rögzített sugarú gömbhöz tartozó térlefedő rácsok sűrűsége eltérő. A korábbi elméleti összehasonlítások azért torzítanak, mivel valójában különböző mintavételi sűrűségű rácsok aliasing hatását mérik össze [C17].

Angiográfiás CT/MR adatok hatékony vizualizációjához kidolgoztunk egy GPU-alapú analitikus MIP (Maximum Intensity Projection) algoritmust [C11]. A hagyományos diszkrét közelítéssel csak jelentős túlmintavételezés árán lehet hasonló képminőséget elérni, így a renderelés sebessége jelentősen csökken. Bár az analitikus kiértékelés több aritmetikai műveletet igényel, cellánként átlagosan csak három trilineáris mintavételezésre van szükség. Mivel GPU-n az aritmetikai műveletek költsége elhanyagolható a trilineáris mintavételezés költségéhez képest, ezért az analitikus megközelítés még hatékonyabb renderelést is biztosít mint a rosszabb minőségű hagyományos, diszkrét közelítésen alapuló implementáció.

CT és MR adatok szintfelületeinek pontos és hatékony megjelenítéséhez kidolgoztunk egy olyan GPU-alapú módszert, amely a nézeti sugarak és a szintfelület közötti metszéspontokat analitikusan értékeli ki. Trilineáris interpolációt feltételezve egy kocka alakú cellán áthaladó sugár sűrűségprofilja egy harmadfokú polinom. A legközelebbi metszéspont a polinom első gyökének felel meg. A harmadfokú gyökkeresés azonban költséges művelet, ezért a sugár által metszett cellák mentén először megkeressük a hozzájuk tartozó polinom szélsőértékeit. Ezt a műveletet hatékonyan el lehet végezni egy másodfokú egyenlet megoldásával. A harmadfokú egyenletet elég arra az első cellára megoldani, melyre a szintfelületet definiáló küszöbérték a minimum és a maximum közé esik. Megmutattuk, hogy az analitikus megoldás gyorsabb mint a hasonló képminőséget produkáló diszkrét felülmintavételezés [C13].

Összefoglalás

A projekt során a tomográfias rekonstrukció, a szegmentálás, az alaktartó interpoláció, valamint a vizualizáció gyakorlati alkalmazásaihoz dolgoztunk ki hatékony GPU-alapú algoritmusokat. Demonstráltuk, hogy a GPU párhuzamos számítási kapacitása jól kiaknázható olyan számításigényes feladatok megoldásához mint az iteratív tomográfias rekonstrukció, a gépi tanuláson alapuló szegmentálás, vagy a térfogati adatok Radon-transzformáción alapuló alaktartó interpolációja. Ezen túlmenően hatékony vizualizációs módszereket javasoltunk, amelyek a GPU beépített trilineáris mintavételező képességének kihasználásával végeznek el olyan összetett számításokat mint a magasabb rendű interpolációs szűrés, az analitikus MIP kiértékelés, vagy a szintfelületek és a nézeti sugarak metszéspontjainak analitikus meghatározása.

Budapest, 2017. január 20.

Dr. Csébfalvi Balázs
vezető kutató

Publikációk

Konferenciacikkek:

[C1] Balázs Csébfalvi, Balázs Tóth, Stefan Bruckner, Eduard Gröller: Illumination-Driven Opacity Modulation for Expressive Volume Rendering, *Vision, Modeling & Visualization*, 103-109, Magdeburg, Németország, 2012

[C2] Balázs Hajagos, László Szécsi, Balázs Csébfalvi: Fast silhouette and crease edge synthesis with geometry shaders, *Spring Conference on Computer Graphics (SCCG)*, 78-83, Smolenice, Szlovákia, 2012

[C3] Gábor Jakab, Tamás Huszár, Balázs Csébfalvi: Iterative CT Reconstruction on the GPU, *Hatodik Magyar Számítógépes Grafika és Geometria Konferencia*, 124-131, Budapest, Magyarország, 2012

[C4] 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*, 2150-2155, Anaheim, USA, 2012

[C5] Magdics Milán, Tóth Balázs: Stochastic Iteration in PET Reconstruction, *Hatodik Magyar Számítógépes Grafika és Geometria Konferencia*, 132-138, Budapest, Magyarország, 2012

[C6] Márton Tóth, Dávid Dvorszki, Balázs Csébfalvi: GPU-Accelerated Segmentation of Medical Volume Data, *Hatodik Magyar Számítógépes Grafika és Geometria Konferencia*, 101-106, Budapest, Magyarország, 2012

[C7] Márton Tóth, Dávid Dvorszki, Balázs Csébfalvi: Robust Volume Segmentation using an Abstract Distance Transform, *16th Central European Seminar on Computer Graphics (CESCG)*, 211-217, Smolenice, Szlovákia, 2012

[C8] 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, USA, 2012

[C9] Tamás Vízvári, Tamás Umenhoffer: Terrain rendering with layered displacement maps, Hatodik Magyar Számítógépes Grafika és Geometria Konferencia, 89-95, Budapest, Magyarország, 2012

[C10] Viktor Vad, Balázs Csébfalvi, Moncef Gabbouj: Calibration of the Marschner-Lobb Signal on CC, BCC, and FCC Lattices, EuroVis, 19-23, Bécs, Ausztria, 2012

[C11] Józsa Péter, Csébfalvi Balázs: Analitikus MIP grafikus hardveren, Képfeldolgozók és Alakfelismerők Társaságának 9. országos konferenciája (KÉPAF), 2013

[C12] Tóth Márton József, Ruskó László, Csébfalvi Balázs, Blaskovics Tamás: Anatómiai régiók automatikus detektálása, Képfeldolgozók és Alakfelismerők Társaságának 9. országos konferenciája (KÉPAF), 2013

[C13] Józsa Péter, Tóth Márton József, Csébfalvi Balázs: Analytic Isosurface Rendering and Maximum Intensity Projection on the GPU, Winter School of Computer Graphics (WSCG) 2014 Full Papers Proceedings, 47-56, Plzen, Csehország, 2014

[C14] Márton József Tóth, Balázs Csébfalvi: Shape Transformation of Multidimensional Density Functions using Distribution Interpolation of the Radon Transforms, International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP), 5-12, Lisszabon, Portugália, 2014

[C15] Tóth Márton József, Blaskovics Tamás, Ruskó László, Delso Gaspar, Csébfalvi Balázs: Automated Detection of Anatomical Regions in Magnetic Resonance Images, Vision, Modeling, and Visualization, Darmstadt, Németország, 2014

[C16] Gergely Rácz, Balázs Csébfalvi: Tomographic Reconstruction on the Body-Centered Cubic Lattice, Spring Conference on Computer Graphics, Smolenice, 23-29, Szlovákia, 2015

[C17] Viktor Vad, Balázs Csébfalvi, Peter Rautek, Eduard Gröller: Reproducibility, Verification, and Validation of Experiments on the Marschner-Lobb Test Signal, EuroVis Workshop on Reproducibility, Verification, and Validation in Visualization, Cagliari, Olaszország, 2015

Folyóiratcikkek:

[J1] Balázs Csébfalvi: Cosine-Weighted B-Spline Interpolation: A Fast and High-Quality Reconstruction Scheme for the Body-Centered Cubic Lattice, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 19, No. 9, pages 1455-1466, 2013

[J2] Viktor Vad, Balázs Csébfalvi, Peter Rautek, Eduard Gröller: Towards an Unbiased Comparison of CC, BCC, and FCC Lattices in Terms of Prealiasing, Computer Graphics Forum, Vol. 33, No. 3, pages 81-90, 2014

[J3] Márton József Tóth, Balázs Csébfalvi: Distribution Interpolation of the Radon Transforms for Shape Transformation of Gray-Scale Images and Volumes, Communications in Computer and Information Science, Vol. 550, pages 15-28, 2015

[J4] Márton József Tóth, László Ruskó, Balázs Csébfalvi: Automatic recognition of anatomical regions in three-dimensional medical images, Computers in Biology and Medicine, Vol. 76, pages 120-133, 2016

[J5] Balázs Csébfalvi, Gergely Rácz: Retailoring Box Splines to Lattices for Highly Isotropic Volume Representations, Computer Graphics Forum, Vol. 35, No. 3, pages 411-420, 2016