

Szakmai zárójelentés a „Diszkrét tomográfia új irányzatai és alkalmazása a neutron radiográfiában” című OTKA 48476 pályázathoz

A számítógépes tomográfia alapfeladata egy adott objektum belsejének vizsgálata annak jelentős károsítása, roncsolása nélkül. A vizsgált tárgy rekonstruálása legtöbbször annak kétdimenziós szeleteinek előállításával történik. Matematikailag a feladat lényegében egy kétdimenziós függvény (a keresztmetszeti kép) meghatározása annak bizonyos irányokból vett vonal menti integráljaiból (vetületek). A klasszikus rekonstrukciós módszerek, mint az iteratív technikák vagy a szűrt visszavetítésen alapuló rekonstrukció több száz vetületet igényelnek ahhoz, hogy a gyakorlatban is elfogadható minőségű képet nyerjünk. Ilyen nagyszámú vetület megalkotása azonban bizonyos alkalmazásoknál fizikai akadályokba ütközhet, költséges lehet, vagy már károsítja a vizsgált objektumot. A diszkrét tomográfia (DT) során feltételezzük, hogy a rekonstruálandó képen csak néhány különböző (előre ismert) szürke intenzitás jelenhet meg. Ezzel a többletinformációval a jó minőségű képalkotáshoz szükséges vetületek száma jelentősen csökkenthető. Mivel a klasszikus képrekonstrukciós módszerek kevés vetülettel nem adnak jó eredményt, így a DT saját matematikai háttérrel és azon alapuló rekonstrukciós eszköztárral rendelkezik. A DT egy speciális eseteként jelentkezik a bináris tomográfia, ahol a rekonstruálandó képen csak fekete és fehér pixelek lehetnek.

A "Diszkrét tomográfia új irányzatai és alkalmazása a neutron radiográfiában" című projekt során alapvetően a DT alábbi területein végeztük eredményes kutatásokat:

I. Újfajta vetületi geometriák: A hagyományos párhuzamos vetületekből történő rekonstrukcióra vonatkozó eredményeink vizsgálata legyező-nyaláb vetületi geometria esetén.

II. Geometriai tulajdonságokon alapuló rekonstrukció: A korábban bevezetett geometriai tulajdonságokon alapuló rekonstrukciós és egyértelműségi eredmények kiterjeszhetőségének vizsgálata, újfajta geometriai jellemzők bevezetése.

III. Emissziós diszkrét tomográfia: Egzisztencia, unicitás és rekonstrukció vizsgálata abszorpciós vetületek esetén.

IV. Neutron és Röntgen tomográfia nemroncsoló teszteléshez: 2D és 3D rekonstrukciós algoritmusok fejlesztése neutron tomográfiás alkalmazásokhoz és azok tesztelése.

V. Bináris rekonstrukciós algoritmusok tesztelése: Bináris rekonstrukció nagyméretű optimalizálási formában felírva, annak megoldásának lehetőségei. Benchmark halmazok és kiértékelések.

VI. Előfeldolgozás a bináris tomográfiában: A rekonstruálandó kép geometriai és egyéb strukturális információinak kinyerése közvetlenül a vetületekből.

Az alábbiakban részletesen összefoglaljuk a fenti témapontokban elért eredményeinket.

I. Újfajta vetületi geometriák

Kidolgoztunk és megvalósítottunk egy diszkrét tomográfiai keretrendszert, mely alkalmas a legyezőnyaláb vetületképzésre illetve az alkalmazott rekonstrukciós módszer paramétereinek változtatásakor fellépő hatások vizsgálatára zajos és zajmentes esetben. A legyezőnyaláb vetületeken alapuló rekonstrukcióra vonatkozó főbb eredményeink:

- a) Szimulációs kísérleteket végeztünk a legyezőnyaláb geometriával készült vetületek paramétereinek változtatásának vizsgálatára a vetületek vonal menti és területi integrálokkal való előállításánál. A kísérleti eredmények alapján megállapítottuk, hogy a legyezőnyaláb és párhuzamos vetületek között nincs érdemi különbség az adott DT rekonstrukciós módszer használatakor az általunk vizsgált fantomok esetében. Kísérleteink alátámasztják azt is, hogy a vonal menti és területi integrálok alkalmazása között sincs lényegi eltérés ugyanezen fantomok esetén.
- b) Megvizsgáltuk legyezőnyaláb vetületek esetén az alkalmazott rekonstrukciós algoritmus paramétereinek hatását különböző regularizációs kifejezésekre. Fontos eredmény volt, hogy a célfüggvényben használt prototípus és a nagy összefüggő területeket preferáló regularizációs kifejezések alkalmazásával további minőségi javulást lehet elérni adott fantomok esetén abban az esetben, ha a vetületek zajosak.
- c) A müncheni „Corporate Technology PS 9, Siemens AG”-vel való együttműködés keretében tanulmányoztuk a megvalósított diszkrét tomográfiai rendszer viselkedését a vetületi adatok mérése közben fellépő fizikai torzításokkal szemben. Sikeresen alkalmaztuk a DT módszert szimulációval előállított és valós adatokon. A legyezőnyaláb felvételi mód alkalmazásával csővezetékek korróziójának vizsgálatára adtunk egy lehetséges diszkrét tomográfiai rekonstrukciós módszert (KFKI Atomenergia Kutatóintézetben folyó Nemzetközi Atomenergetikai Ügynökség (IAEA) HUN-12109 számú kutatás). Az adott szoftver fantomokat sikeresen rekonstruáltuk korlátozott mennyiségű információ (kis vetületszám és csökkentett számú mérési adatok) felhasználásával.

Az témaponthoz tartozó fontosabb publikációk: [4,5,10]

II. Geometriai tulajdonságokon alapuló rekonstrukció

A diszkrét rekonstrukciós probléma megoldható közvetlen módszerekkel, vagy optimalizálás segítségével is. A feladat azonban általában alulhatározott és az alkalmazásokban a vetületek zajjal terheltek. Így bármilyen a képről előzetesen rendelkezésünkre álló információ kiaknázása a direkt és az optimalizáláson alapuló rekonstrukció esetében is döntő jelentőségű. Az egyik fő kihívást az jelenti, hogy a rendelkezésre álló vetületek száma kevés, így egy adott rekonstrukciós feladatnak sok (az eredeti képtől akár jelentősen eltérő) különböző megoldása is lehet.

A bizonytalanság csökkentésének egyik módja az lehet, hogy a lehetséges megoldások terét szűkítjük és csak bizonyos geometriai tulajdonságokkal (konvexitás, összefüggőség, irányítottság) rendelkező bináris képeket fogadunk el a rekonstrukció során. A projekt egyik jelentősebb irányvonala annak megvizsgálása volt, hogy az előbb említett tulajdonságok kombinációi milyen esetekben eredményezhetnek hatékony (gyors és csak kis mértékben bizonytalan) közvetlen módszert alkalmazó rekonstrukciót. Emellett új tulajdonságok hatásait is vizsgáltuk. A problémakörrel kapcsolatos eredményeink az alábbiak:

- a) Egy korábbi eredmény szerint a horizontálisan vagy vertikálisan konvex ÉK-irányított poliominók a horizontális és vertikális vetületeikből egyértelműen rekonstruálhatók polinomiális időben. Megvizsgáltuk, hogy a konvexitás irányának változtatása milyen módon befolyásolja a fenti eredményt. Azt tapasztaltuk, hogy a fenti tétel továbbra is igaz marad, ha diagonális konvexitást feltételezünk a rekonstruálandó ÉK-irányított poliominóról. Azt is bizonyítottuk, hogy bármilyen más irányú konvexitás feltételezése esetén előfordulhat, hogy exponenciálisan sok megoldás lesz ugyanazokkal a horizontális és vertikális vetületekkel.
- b) Kidolgoztunk egy polinomiális futási idejű algoritmust, mely a horizontális és vertikális vetületekből rekonstruálja az összes azokkal a vetületekkel rendelkező olyan Q -konvex halmazt, melynek legalább két komponense van. Az algoritmus az adott feladat összes megoldását megtalálja. Megmutattuk, hogy a hv -konvex 8 -összefüggő halmazok részosztályát képezik a Q -konvex halmazok osztályának. Összehasonlítva az általunk kidolgozott algoritmust a korábban publikáltakkal azt találtuk, hogy a hv -konvex 8 -összefüggő halmazok osztályán az nemcsak a legrosszabb eset, de az átlagos futási idő tekintetében is gyorsabb a korábbiaknál. Ezen kívül azt is megmutattuk, hogy a Q -konvex, de nem 8 -összefüggő halmazok esetén a rekonstrukció tovább gyorsítható és a lehetséges megoldások száma legfeljebb kettő. Emellett az általános Q -konvex osztályra is hatékony rekonstrukciós algoritmust adtunk.
- c) Bevezettük a felbontható diszkrét halmazok osztályát és egy olyan polinomiális futási idejű rekonstrukciós algoritmust adtunk erre az osztályra, mely négy vetületet használ. Az eredmény azért is jelentős, mert a nemzetközi irodalomban is csak igen kevés négy vetületen alapuló direkt rekonstrukciós módszer jelent eddig meg. Megvizsgáltuk a kapcsolatot a felbontható és a Q -konvex halmazok osztályai között és összegeztük az ebből a kapcsolatból adódó következményeket néhány jól ismert halmazosztály rekonstrukciós bonyolultságára vonatkozólag, amennyiben a rekonstrukció során négy vetület

használható. Ezután megvizsgáltuk, hogyan terjeszthető ki a négy vetületet használó rekonstrukciós technika a hv-konvex halmazok osztályra. Ezek alapján kidolgoztunk egy gyors és pontos heurisztikát olyan diszkrét halmazok négy vetületből történő rekonstruálására, melyek hv-konvexek és a komponenseik úgy nevezett felbontható konfigurációt alkotnak.

- d) A felbonthatóság fogalmát tovább általánosítva eljutottunk a diszjunkt komponensekből álló bináris képek osztályához, melyre egy két vetületet használó gyors backtracking eljárást dolgoztunk ki. Az kidolgozott eljárás azért is jelentős, mert továbbfejlesztése révén lehetővé válik bizonyos osztályokra egy a korlátozás és szétválasztás (B&B) módszerén alapuló rekonstrukció is. Tudomásunk szerint a B&B algoritmusok hatékony alkalmazására ez az első eredmény a DT területén.

Az témaponthoz kapcsolódó legfontosabb publikációk: [7,11,12,13,16,19]

III. Emissziós diszkrét tomográfia

Az emissziós tomográfia esetén a sugárzás a vizsgált objektum belsejéből érkezik. Ez a vetületképzés a transzmissziós diszkrét tomográfiától (ahol a sugárzás az anyagon áthaladva jut el a detektorokig) eltérő elméleti megfontolásokat kíván. A projekt során bizonyos elnyelési együtthatók esetére sikerült az egyértelműségre vonatkozóan pozitív és negatív feltételeket adnunk, illetve egy hatékony rekonstrukciós algoritmust is kidolgoztunk. Egy alkalmazási lehetőségként dinamikus struktúrák faktoranalízisen alapuló rekonstrukcióját dolgoztuk ki.

Az témaponthoz tartozó fontosabb publikációk: [1,2,3,9]

IV. Neutron és Röntgen tomográfia nemroncsoló teszteléshez

A partner KFKI-val kísérleteket végeztünk komplex neutron-, gamma-, és Röntgen-sugárzással készített vetületi adatokon. Számos tárgyról készítettünk vetületi képeket és próbáltuk azokat a DT módszereivel rekonstruálni. Megvizsgáltuk, hogy milyen módon optimalizálhatók bizonyos előfeldolgozási lépések annak érdekében, hogy a rekonstrukció pontossága javuljon. A rekonstrukciót szimulált hűtéssel végeztük, melyre kidolgoztunk pixel alapú és geometriai objektum alapú módszereket, kifejezetten a nemroncsoló tesztelési alkalmazásokat szem előtt tartva. Vizsgálataink különböző ipari alkatrészek nemroncsoló tesztelésére terjedtek ki, így például csövek korróziójának vagy turbinalapátok sérüléseinek megállapítására.

Az témáponthoz kapcsolódó legfontosabb publikációk: [14,15]

V. Bináris rekonstrukciós algoritmusok tesztelése

A különböző kidolgozott rekonstrukciós eljárások korrekt összehasonlítására az alábbi módszereket dolgoztuk ki:

- a) Amennyiben a rekonstrukciót optimalizálási feladatként ragadjuk meg, úgy több módszer is kínálkozik a célfüggvény globális optimumának meghatározására. Mi erre a szimulált hűtési eljárást javasoltuk. Egy külföldi kutatócsoport ugyanezt a problémát konvex-konkáv optimalizálás segítségével próbálta meg legyőzni. A projekten belül lehetőségünk nyílt a saját módszerünk és a külföldi kutatók által kidolgozott eljárás hatékonyságának összevetésére, melynek eredményeként azt találtuk, hogy (legalább is a vizsgált képek esetében) a két módszer megközelítőleg hasonlóan teljesít.
- b) Kidolgoztunk egy eljárást, mellyel a hv-konvex bináris képek osztályának elemei egyenletes eloszlás szerint generálhatók. Ezen eljárás segítségével a különböző (egzakt vagy heurisztikus) rekonstrukciós algoritmusok pontosan összemérhetővé válnak az átlagos futási idő és a pontosság tekintetében. Néhány fontos statisztikát is ismertetettünk a hv-konvex halmazosztályra vonatkozólag, melyek összefüggésben állnak a rekonstrukció nehézségével. Az ismertetett generáló metódus könnyen kiterjeszthető számos olyan bináris képeket tartalmazó osztályra, melyek elemeinek komponensei diszjunktak.

A legfontosabb vonatkozó publikációk: [8,17,20]

VI. Előfeldolgozás a bináris tomográfiában

A II. pontban ismertetett módszerek rávilágítanak arra, hogy a rekonstruálandó kép geometriai tulajdonságainak előzetes ismerete alapján lehetőség van a megfelelő rekonstrukciós algoritmus kiválasztására és/vagy annak paramétereinek beállítására. A továbbiakban ezért azt tanulmányoztuk, hogy ha explicit módon nem áll rendelkezésre az ilyen jellegű tudás, akkor kizárólag a vetületekből van-e lehetőség ilyen információ kinyerésére megfelelő biztonsággal. Kísérleteinkben döntési fákat használtunk. A tanulás során az attribútumok a vetületi értékek (vagy azok ügyesen képzett csoportjai) voltak. A kidolgozott tanulóalgoritmussal a rekonstrukció előlépéseként sikeresen szeparálni tudtuk a hv-konvex képeket a teljesen véletlen vagy a hv-konvexekhez nagyon hasonlító képektől is. Hasonló eredményeket értünk el 4- illetve 8-összefüggő hv-konvex halmazok szétválasztására vonatkozólag. A neutron tomográfiára kidolgozott objektum alapú módszer feltételezi, hogy a keresztmetszeti képen ismert számú kör alakú objektum helyezkedik el. Kísérletet tettünk ezért a körök számának meghatározására is a vetületi értékek alapján és ezen alapulva kidolgoztunk egy geometriai objektum alapú genetikus algoritmust is, mellyel a neutron tomográfiás nemroncsoló tesztelésnél használt fantomképeket eredményesen sikerült rekonstruálnunk.

Az témaponthoz tartozó fontosabb publikációk: [18,21]

Egyéb tevékenységek

A kidolgozott eljárásaink egy részét az általunk fejlesztett DIRECT elnevezésű diszkrét tomográfiai keretrendszerben implementáltuk, mely a www.inf.u-szeged.hu/~direct weboldalon érhető el. Ennek segítségével lehetőség nyílt az ismertett eljárások tesztelésére és a különböző megközelítések hatékonyságának összevetésére is.

A fent részletezett főbb eredményeink mellett keletkezett néhány publikációnk a DT egyéb problémáival, feladataival kapcsolatosan is. A kutatási eredményeink több, mint 40 tudományos közleményben való megjelentetésén túl kiemelésre méltó, hogy a projekt futamideje alatt két résztvevő kutató (Balázs Péter és Nagy Antal) is doktori fokozatot szerzett a (többnyire a projekt során elért eredményeiket tartalmazó) doktori értekezésük sikeres megvédése után [6,13].

A projekt futamidején túl az elért eredményeinkkel kapcsolatban várhatóan további közleményeink jelennek meg (1 elfogadott, 2 benyújtott folyóiratcikk, 1 benyújtott konferencia-közlemény). A neutron tomográfiához kidolgozott pixel-alapú és geometriai objektum alapú optimalizálási módszereinkről meghívott előadást fogunk tartani a 2009. július 20-24. között Bécsben megrendezésre kerülő Applied Inverse Problems konferencián a "Discrete Tomography and Image Reconstruction in Material Science" szekcióban. A projekt több helyen nyitott végű, a branch-and-bound alapú diszkrét rekonstrukció (II.d), a geometriai objektum alapú rekonstrukció és annak alkalmazásai a nemroncsoló-tesztelésben (IV.), valamint a tanulóeljárások alkalmazása képi jellemzők vetületekből történő kinyerésére (VI.) olyan kutatási területekre vezetnek, melyeken elképzeléseink szerint további jelentős elméleti eredményeket lehet elérni, és ezzel egyidőben a gyakorlat számára is új jellegű és hatékonyabb diszkrét képképző eljárások tervezhetők és kivitelezhetők.

A kutatás legfontosabb közleményei

- [1] A. Frosini, S. Rinaldi, E. Barcucci, A. Kuba: An efficient algorithm for reconstructing binary matrices from horizontal and vertical absorbed projections, *Electronic Notes in Discrete Mathematics* 20, 347-363, 2005
- [2] A. Kuba, G. Woeginger: Two remarks on reconstructing binary vectors from their absorbed projections, in *Proc. Discrete Geometry for Computer Imagery, DGCI 2005, LNCS 3429*, 148-152, 2005
- [3] A. Kuba, M. Nivat: A sufficient condition for non-uniqueness in binary tomography with absorption, *Discrete Applied Mathematics* 346, 335-357, 2005
- [4] A. Nagy, A. Kuba: Reconstruction of binary matrices from fan-beam projections, *Acta Cybernetica* vol. 17/2 359-385, 2006
- [5] A. Nagy, A. Kuba: Parameter settings for reconstructing binary matrices from fan-beam projections, *Journal of Computing and Information Technology* vol. 14, No.2, 100-110, 2006
- [6] Nagy Antal: Diszkrét tomográfiai és PACS képfeldolgozó rendszerek, Szegedi Tudományegyetem, doktori értekezés, 2006
- [7] S. Brunetti, A. Daurat, A. Kuba: Fast filling operations used in the reconstruction of convex lattice sets, in *Proc. Discrete Geometry for Computer Imagery, DGCI 2006, LNCS 4245*, 98-109, 2006
- [8] S. Weber, A. Nagy, T. Schüle, C. Schnörr, A. Kuba, A benchmark evaluation of large-scale optimization approaches to binary tomography, in *Proc. Discrete Geometry for Computer Imagery, DGCI 2006, LNCS 4245*, 146-156, 2006
- [9] E. Barcucci, A. Frosini, A. Kuba, A. Nagy, S. Rinaldi, M. Samal, S. Zopf: Emission discrete tomography, In G.T. Herman, A. Kuba (Eds.), *Advances in Discrete Tomography and Its Applications*, Birkhäuser, Boston, pp. 333-366, 2007
- [10] J. Baumann, Z. Kiss, S. Krimmel, A. Kuba, A. Nagy, L. Rodek, B. Schillinger, J. Stephan: Discrete tomography methods for nondestructive testing, In G.T. Herman, A. Kuba (Eds.), *Advances in Discrete Tomography and Its Applications*, Birkhäuser, Boston, pp. 303-331, 2007
- [11] P. Balázs: A decomposition technique for reconstructing discrete sets from four projections, *Image and Vision Computing (Elsevier)* 25:10 1609-1619, 2007
- [12] P. Balázs: Decomposition algorithms for reconstructing discrete sets with disjoint components, In G.T. Herman, A. Kuba (Eds.), *Advances in Discrete Tomography and Its Applications*, Birkhäuser, Boston, pp. 153-173, 2007
- [13] P. Balázs: Binary tomography using geometrical priors: Uniqueness and reconstruction results, doktori dolgozat, Szegedi Tudományegyetem, *Képfeldolgozás és Számítógépes Grafika Tanszék*, 2007
- [14] M. Balaskó, A. Kuba, A. Tanács, Z. Kiss, A. Nagy, and B. Schillinger: Comparison radiography and tomography possibilities of FRM-II (20 MW) and Budapest (10 MW) research reactor, *Proceedings of the Eight World Conference WCNR-8*, 18-27, 2008

- [15] M. Balaskó, E. Sváb, Z. Kiss, A. Tanács, A. Nagy, and A. Kuba: Study of the inner structure of a damaged control rod by neutron and x-ray radiography and discrete tomography, Proceedings of the Eight World Conference WCNR-8, 294-303, 2008
- [16] P. Balázs: On the ambiguity of reconstructing hv-convex binary matrices with decomposable configurations, Acta Cybernetica 18(3), 367-377, 2008
- [17] P. Balázs: A framework for generating some discrete sets with disjoint components by using uniform distributions, Theoretical Computer Science (Elsevier) 406, 15-23, 2008
- [18] P. Balázs, M.Gara: Decision trees in binary tomography for supporting the reconstruction of hv-convex connected images, Proc. Int. Conf. Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems, ACIVS 2008, LNCS 5259, 433-443, 2008
- [19] P. Balázs: Reconstruction of binary images with few disjoint components from two projections, Proc. Int. Symposium on Visual Computing, ISVC 2008, LNCS 5359, 1147-1156, 2008
- [20] P. Balázs: A benchmark set for the reconstruction of hv-convex discrete sets, Discrete Applied Mathematics (Elsevier), to appear, 2009
- [21] M. Gara, P. Balázs: Döntési fákon alapuló előfeldolgozás a bináris tomográfiában, Proc. 7th Conf. of the Hungarian Association of Image Processing and Pattern Recognition, Budapest, 9 pages (in Hungarian), 2009