

TOPOLOGIA-MEGŐRZÉS ÉS VÉKONYÍTÁS
(Topology Preservation and Thinning)

Palágyi Kálmán

*Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar
Informatikai Intézet
Képfeldolgozás és Számítógépes Grafika Tanszék*

MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

2019

Tartalomjegyzék

1	A kutatás területei és módszerei	1
2	Az értekezés tézisei	4
	1. téziscsoport: a topológia megőrzése	4
	2. téziscsoport: a vékonyítás fejlett módszerei	6
	3. téziscsoport: légútjáratok kvantitatív analízise	8
3	Az eredmények hasznosulása	10
	A szerző hivatkozott publikációi	11
	További hivatkozott közlemények	15

1 A kutatás területei és módszerei

A *digitális képfeldolgozás* [GONZALES_WOODS_08] módszereinek alapvető célja a vizuális információ minőségének javítása az emberi értelmezés számára, valamint a képi adatok feldolgozása az autonóm *számítógépes látás* [SONKA_HLAVÁČ_BOYLE_14] elősegítéséhez. A számítógépes látás generikus modelljének [AWCOCK_THOMAS_96] fázisai: képkalkotás, előfeldolgozás (a nyers digitális kép helyreállítása és javítása), szegmentálás, *alakreprezentáció* (alakleíró jellemzők kinyerése a szegmensekből) [COSTA_CESAR_09], továbbá felismerés / osztályozás.

Kutatásaim fókuszában a *digitális topológia* [KONG_ROSENFELD_89] és az alakreprezentáció áll, különös tekintettel a topológia-megőrző *vázkijelölésre* [SAHA_BORGEFORS_SANNITI-DI-BAJA_17]. A digitális topológia az objektumok “topológiai” tulajdonságaival (pl. összefüggőség) foglalkozik, továbbá olyan algoritmusok tervezésével, amelyek eldöntik ezen tulajdonságok teljesülését, vagy megőrzik azokat [KONG_ROSENFELD_96], a vázkijelölés pedig – amely Blum fél évszázados javaslatára [BLUM_67] tekint vissza – kulcsszerepet játszik a digitális képfeldolgozás és a számítógépes látás számos problémája megoldásában [SIDDIQI_PIZER_08].

A digitális topológián belül a képműveletek topológia-megőrzését, a vázkijelölés területén pedig a vékonyítás fejlett, “gyors”, valamint garantáltan topológia-megőrző módszereit kutattam. Terjedelmi korlátok miatt, disszertációmban a PhD fokozatom megszerzése óta eltelt közel két évtized tudományos eredményeinek csak egy részét tudtam – három téziscsoportba rendezve – részletesen bemutatni.

Az első téziscsoport a bináris képműveletek topológia-megőrzése területén elért eredmények közül tartalmaz néhányat. Az értekezésből ki kellett hagynom a három szabályos 2D mozaik (vagyis a háromszög-, a négyzet- és a hatszög-mozaik) egyszerű pontjainak háromféle (formális, csatolt halmazos, valamint illesztőmintákkal történő) jellemzését [KARDOS_PALÁGYI_13_A], [KARDOS_PALÁGYI_13_B], [KARDOS_PALÁGYI_15], [KARDOS_PALÁGYI_17], a P-egyszerű pontok formális leírását és illesztőmintákkal való megadását [KARDOS_PALÁGYI_16], továbbá az addíciók és a vegyes 2D képműveletek topológia-megőrzésére vonatkozó elegendő feltételeket [KARDOS_PALÁGYI_14], [KARDOS_PALÁGYI_17].

A második téziscsoport ugyancsak egy szűkre szabott válogatás a vékonyítás fejlett módszereihez kötődő eredmények közül. Nem tértem ki például a topológia-megőrzés pont-alapú (szimmetrikus és aszimmetrikus) elegendő feltételeiből származtatott 2D párhuzamos vékonyító algoritmus-családokra [NÉMETH_KARDOS_PALÁGYI_11_A], [NÉMETH_PALÁGYI_11], kimaradt számos (illesztőmintákkal megadott törlési szabályú) 3D középfelületre vékonyító al-

goritmus [PALÁGYI_02], [PALÁGYI_08], csakúgy, mint a “földnyelv”-pontokat összegyűjtő [PALÁGYI_14_D] és a “horgony”-pontokat megőrző zsugorításon alapuló [PALÁGYI_NÉMETH_19_A] 3D középvonalak meghatározó eljárások, eltekintettem számos ekvivalens (vagyis minden lehetséges bemenő képre ugyanazt produkáló szekvenciális és párhuzamos) algoritmus [PALÁGYI_14_C], [PALÁGYI_NÉMETH_KARDOS_15_B], [PALÁGYI_NÉMETH_17] bemutatásától, nem jutott hely az iteráció-szintű kontúrsimítással kombinált 3D vékonyításnak [NÉMETH_KARDOS_PALÁGYI_11_D], továbbá a “biztos” vázpontok felismerésével gyorsított vékonyításnak [PALÁGYI_NÉMETH_18], [PALÁGYI_NÉMETH_19_B] sem.

A harmadik téziscsoportba a 3D vékonyító algoritmusaim alkalmazásai közül csupán a CT-vizsgálatokból szegmentált tüdőjáratok fastruktúrájának kvantitatív elemzésére adott komplex módszer ismertetésére szorítkozhattam. Fájó szívvel kellett lemondanom arról, hogy a disszertáció megírása felidézze bennem az alábbi területeken végzett kutatások örömét és izgalmát: a veseerek alatti (infarenális) aorta szakasz tágulatának (aneurizma) mérése, a tracheális sztenózis (légcsőszűkület) detektálása és megítélése, a vastagbél virtuális boncolása, a polip-detektálás vastagbélben, [SORANTIN_ETAL_02], [SORANTIN_ETAL_06], [SORANTIN_ETAL_08], a májszegmentálás műtéttervezéshez [BEICHEL_ETAL_05], valamint a szinaptikus kapcsolatok azonosítása [MATEJEK_ETAL_19]. A nem tárgyalt alkalmazásokon – a szegedi kollégák mellett – a Medizinische Universität Graz (Austria), a Graz University of Technology (Austria) és a Harvard University (Cambridge, MA, USA) munkatársaival dolgoztam együtt.

Az első két téziscsoport eredményeinek elérésében fontos szerepe volt Kardos Péternek és Németh Gábornak (volt doktoranduszaimnak, jelenleg tanszéki kollégáimnak). Míg az azokhoz kapcsolódó eredmények a Szegedi Tudományegyetem Informatikai Intézetének falain belül (csupán a szakdolgozóim által létrehozott 3D képmegjelenítő és képszerkesztő eszközök segítségével) születtek meg, a harmadik téziscsoport eredményeinek elérését Milan Sonka (a University of Iowa professzora, az orvosi képfeldolgozás területének egyik vezető kutatója) kitüntető vendégkutatói meghívásainak köszönhetem.

A topológia-megőrző bináris képműveletekre vonatkozó eredmények (vagyis az első téziscsoportba soroltak) elméletiek, ugyanakkor jelentős a gyakorlati hasznuk, hiszen egyfelől új eszközöket nyújtanak a képműveletek topológiai korrektségének igazolásához, másrészt pedig alkalmasak garantáltan topológia-megőrző képműveletek létrehozására (generálására) is. A téziscsoport eredményeit a disszertáció 2. fejezete mutatja be, ahová nem emeltem be a közleményeimből a tételek és lemmák bizonyítását. A 3. fejezet (vagyis a második téziscsoport eredményeinek taglalása) sem tartalmazza az új vékonyító algoritmusok és módszerek garantált tulajdonságaira vonatkozó állítá-

sok (lemmák és tételek) bizonyításait, mivel azok egyfelől megtalálhatók az idézett publikációkban, másrészt pedig a beillesztésük befogadhatatlanul vaskos értekezéshez vezetett volna. Az olvasónak feltűnhetett az is, hogy nem szerepel a dolgozat 3. fejezetében bemutatott (a második téziscsoportához tartozó) algoritmusok és módszerek kvantitatív összehasonlítása és kiértékelése. A validáció hiányát nem a szűkös terjedelem indokolja, hanem a vázkijelölés területének sajátosságai.

A *váz* (skeleton) [BLUM_67] egy olyan alakleíró jellemző, ami a folytonos objektumokra definiált (és egyértelműen létezik a folytonos világban). A digitális bináris képek objektumaira viszont nem ismert az “igazi” váz, ráadásul vázkijelölésen nem a folytonos váz közelítését, hanem változatos *vázszerű jellemzők* meghatározását értjük. 2D-ben a *középvonal* és a *topológiai mag*, 3D-ben pedig a *középfelszín*, a középvonal és a topológiai mag kivonása tartozik a vázkijelölés területéhez. Diszkrét objektumokra nem definiáltak egyértelműen a vázszerű jellemzők, továbbá még nem létezik széles körben elfogadott módszer a vázkijelölő algoritmusok jóságának mérésére sem – ahogy leszögezik ezt áttekintő művükben a terület szaktekintélyei [SAHA_BORGEFORS_SANNITI-DI-BAJA_16].

A disszertációmban tehát a második téziscsoport tárgyalásakor nem számolok be képi adatbázisokon végrehajtott tesztelések eredményeiről, nem találhatók invariancia-vizsgálatok geometriai transzformációkra, továbbá változatos típusú és mértékű zajterhelésre sem. Kutatásaimban (és a disszertációm 3. fejezetében) a hangsúlyt a matematikai megalapozottságra helyeztem, vagyis bizonyos tulajdonságok (pl. a topológia megőrzése vagy a maximalitás) teljesülését garantálom minden lehetséges (gyakorlatilag végtelen számú) input képre.

A dolgozatban a harmadik (a tüdőjáratok kvantitatív jellemzésére vonatkozó) téziscsoport ismertetésekor, sajnálatomra, sem tudtam kitérni a validációra. A szűkös terjedelem miatt kimaradt – a szakterület elvárásait kielégítő gondos és részletes – validáció csak a vonatkozó közleményekben található meg.

2 Az értekezés tézisei

Az alábbiakban összefoglalom a disszertációba beválogatott, a PhD-dolgozatom megvédése óta eltelt közel húsz évben elért tudományos eredményeimet. A három téziscsoportba rendezett eredmények tömör bemutatása mellett megadom az alátámasztó közleményeket, valamint a társszerzős kutatásoknál kitérek a partnerek hozzájárulásra is.

1. téziscsoport: a topológia megőrzése

- **1.1. tézis:** Elegendő feltételek 2D párhuzamos topológia-megőrző képműveletekre

Kong és Ronse kizárólag a négyzetmozaikon mintavételezett bináris képek topológia-megőrző redukcióira adtak konfiguráció-alapú elegendő feltételt [RONSE_88, KONG_95], amit Kardos Péterrel és Németh Gáborral egyszerűbbé tettünk és kiterjesztettük mindhárom szabályos 2D mozaik képeire (ld. a disszertáció 2.1.1. pontjában a 2.1.1. és a 2.1.2. tételeket).

A konfiguráció-alapú feltételek csupán a topológia-megőrzés ellenőrzésére alkalmazhatók, képműveletek tervezésére és generálására már nem. Ez indokolta, hogy Kardos Péterrel és Németh Gáborral közösen megfogalmaztunk olyan (szimmetrikus és aszimmetrikus) pont-alapú elegendő feltételeket, amelyek az egyedi pontok törölhetőségét vizsgálják (ld. a disszertáció 2.1.2. pontjában a 2.1.3. és a 2.3.4. tételeket).

A tézispontra vonatkozó közlemények:

- [KARDOS_PALÁGYI_13_A] (folyóiratcikk),
- [KARDOS_PALÁGYI_13_B] (konferenciacikk),
- [KARDOS_PALÁGYI_13_C] (konferenciacikk),
- [KARDOS_PALÁGYI_14] (konferenciacikk),
- [KARDOS_PALÁGYI_15] (folyóiratcikk),
- [KARDOS_PALÁGYI_17] (folyóiratcikk),
- [NÉMETH_KARDOS_PALÁGYI_11_A] (folyóiratcikk),
- [NÉMETH_PALÁGYI_11] (folyóiratcikk),
- [PALÁGYI_KARDOS_17] (konferenciacikk).

- **1.2. tézis:** Pont-alapú elegendő feltételek 3D párhuzamos topológia-megőrző redukciókra

Szimmetrikus és aszimmetrikus pont-alapú elegendő feltételeket adtam a topológia-megőrző párhuzamos 3D redukciókra (ld. a disszertáció 2.2. pontjában a 2.2.1. és a 2.2.2. tételeket).

A tézisponthoz kapcsolódó közlemény:

- [PALÁGYI_NÉMETH_KARDOS_12] (könyvfejezet).

• **1.3. tézis: Ekvivalens szekvenciális és párhuzamos képműveletek**

A tézispont (előzmények nélküli) valamennyi eredményét egyedül értem el.

Az *általános-egyszerű* (general-simple) átírási szabályokkal olyan szekvenciális és párhuzamos képművelet-párokhoz jutunk, amelyek ekvivalensek (vagyis ugyanazt az eredményt szolgáltatják minden lehetséges bemenő bináris képre). Mivel az általános-egyszerű átírási szabályok csak egyszerű pontokat törölhetnek vagy tölthetnek ki, így a szekvenciális műveleteik topológia-megőrzők. Ennélfogva a velük ekvivalens párhuzamos műveletek is garantáltan megőrzik a topológiát.

A legfontosabb eredmény egy merőben új elegendő feltétel topológia-megőrző képműveletekre. Kritériumom az átírási szabályokra vonatkozik, míg az összes többi megközelítés az átszínezhető egyedi pontokat vagy ponthalmazokat vizsgálja. Az új feltétel egyaránt érvényes redukciókra, addíciókra és vegyes képműveletekre, valamint alkalmazható tetszőleges dimenziójú, mintavételezésű és topológiájú képekre is.

A tézispontot a disszertáció 2.3. pontja ismerteti, az eredményeket pedig a 2.3.1-2.3.4. tételek mondják ki.

A tézispontot alátámasztó közlemények:

- [PALÁGYI_13] (konferenciatickk),
- [PALÁGYI_14_A] (folyóiratcikk),
- [PALÁGYI_14_B] (konferenciatickk).

• **1.4. tézis: A topológia-megőrző párhuzamos redukciókra adott elegendő feltételek kapcsolata**

Kardos Péterrel közösen feltártuk a konfiguráció-alapú, a pont-alapú, a P-egyszerű halmazokon [BERTRAND_95] alapuló, valamint az általános-egyszerű átírási szabályokkal adott elegendő feltételek kapcsolatát.

A tézispontot a disszertáció 2.4. pontja ismerteti, az eredményeket pedig a 2.4.1-2.4.7. tételek mondják ki.

A tézispont legfontosabb közleményei:

- [PALÁGYI_16] (konferenciatickk),
- [PALÁGYI_KARDOS_17] (konferenciatickk),
- [PALÁGYI_18] (folyóiratcikk).

2. téziscsoport: a vékonyítás fejlett módszerei

- **2.1. tézis:** Általános implementációs séma szekvenciális és párhuzamos vékonyító algoritmusokra

Kidolgoztam egy olyan módszert, amely megoldást nyújt valamennyi (szekvenciális és párhuzamos) vékonyító algoritmus szekvenciális számítóműveken is “gyors” és memória-takarékos implementációjára.

A disszertáció 3.1. pontjában bemutatott tézispont alátámasztó közleményei:

- [PALÁGYI_06] (konferenciacikk),
- [PALÁGYI_ETAL_06] (folyóiratcikk),
- [PALÁGYI_08] (folyóiratcikk).

- **2.2. tézis:** A topológia-megőrzés elegendő feltételeiből származtatott 3D párhuzamos vékonyító algoritmusok

Számos párhuzamos vékonyító algoritmus – dacára annak, hogy rangos fórumokon publikálták azokat – nem állta ki az idők próbáját, mivel nem őrzik meg a topológiát. Sajnálatos módon, közülük néhánynál a topológiai korrektség bizonyítása bizonyult hibásnak. Ennélfogva az algoritmus-tervezésnek rendkívül kockázatos módszere az, hogy először konstruáljunk valamiképpen átírási szabályokat, majd a topológia-megőrzés konfiguráció-alapú elegendő feltételei segítségével bizonyítsuk a vázkijelöléssel szemben támasztott alapvető követelmény teljesülését.

A hagyományos tervezési módszer helyett egy biztonságos, egyedi bizonyításokat nem igénylő megközelítést javasoltam topológia-megőrző vékonyító algoritmusok megalkotására: kombináljuk a pont-alapú elegendő feltételeinket párhuzamos vékonyító stratégiákkal és geometriai kényszerfeltételekkel.

A javasolt módszerrel garantáltan topológia-megőrző algoritmus-családokat lehet előállítani, pl. a disszertációban részletezett módon öt párhuzamos vékonyító stratégia (teljesen párhuzamos, 6-aliterációs, valamint almezős: 2, 4 és 8 almezővel) és háromféle végpontkritériummal 15 darab párhuzamos 3D algoritmust generál. A disszertációban kitérek a módszer “gyors” implementációjára is. Megjegyezésre érdemes, hogy további népes 3D algoritmus-családokat is közöltünk, továbbá csak a négyzetmozaikon mintavételezett képekre 75 különböző 2D algoritmust generáltunk ki.

A tézispontot a disszertáció 3.2. pontja ismerteti. A kapcsolódó közlemények megírásában Kardos Péter és Németh Gábor segített, továbbá

tiszteletreméltóan nagy és igényes munkájuk fekszik az algoritmusok implementálásában is.

A tézispont legfontosabb közleményei:

- [NÉMETH_KARDOS_PALÁGYI_11_A], (folyóíratcikk),
- [NÉMETH_KARDOS_PALÁGYI_11_C], (konferenciaticikk),
- [NÉMETH_PALÁGYI_11], (folyóíratcikk),
- [NÉMETH_PALÁGYI_12], (konferenciaticikk),
- [PALÁGYI_NÉMETH_09] (konferenciaticikk),
- [PALÁGYI_NÉMETH_KARDOS_12] (könyvfejezet).

• 2.3. tézis: Ekvivalens vékonyító algoritmusok

Egy szekvenciális és egy párhuzamos vékonyító algoritmus ekvivalens, ha ugyanazt az eredményt adják minden lehetséges input képre. Sikertült konstruálnom 2D és 3D ekvivalens (és topológia-megőrző) vékonyító algoritmus-párokat, továbbá bizonyítottam, hogy bizonyos létező (mások által javasolt) 2D és 3D párhuzamos algoritmusokhoz is megadhatók velük ekvivalens szekvenciális eljárások.

Valamennyi fent említett algoritmus-pár implementálását és tesztelését Kardos Péter és Németh Gábor végezte el.

A disszertáció 3.3. pontjában – terjedelmi korlátok miatt – mindössze négy 3D ekvivalens szekvenciális és párhuzamos vékonyító algoritmus-párt mutattam be részletesen.

A tézispont közleményei:

- [PALÁGYI_NÉMETH_17] (folyóíratcikk),
- [PALÁGYI_NÉMETH_KARDOS_15_A] (konferenciaticikk),
- [PALÁGYI_NÉMETH_KARDOS_15_B] (konferenciaticikk),
- [PALÁGYI_14_C] (konferenciaticikk).

• 2.4. tézis: Maximális 3D középvonalra vékonyító algoritmusok

Számos 3D vékonyító algoritmus nem képes 1-voxel vastagságú középvonalat produkálni tetszőleges objektumra, vagyis nem vékonyít maximálisan.

A dolgozatban bemutattam két olyan 3D középvonalra vékonyító algoritmusomat, amelyek igazoltam maximálisak, megőrzik a topológiát, hatékonyan implementálhatók (‘‘gyorsak’’), valamint már számos orvosi alkalmazásban is sikeresnek bizonyultak.

A disszertáció 3.4. pontjában bemutatott tézispont közleményei:

- [PALÁGYI_ETAL_01] (konferenciaticikk),

- [PALÁGYI_TSCHIRREN_SONKA_03] (konferenciaticikk),
- [PALÁGYI_ETAL_06] (folyóiratcikk).

3. téziscsoport: légútjáratok kvantitatív analízise

A disszertációmban – terjedelmi korlátok miatt – a 3D vékonyító algoritmusaim alkalmazásai közül csak a CT-vizsgálatokból szegmentált tüdőjáratok fastruktúrájának kvantitatív elemzésére adott komplex módszert tudtam részletesen ismertetni.

- **3.1. tézis: Tüdőjáratok középvonalának megbízható meghatározása**

A 3D középvonal alkalmas alakleírója a légútfának (mint hengeres / csőszerű struktúrának), viszont a geometriai és topológiai szempontokból egyaránt korrekt középvonaluk kinyerése inspirálónan nehéz feladatnak bizonyult.

A probléma megoldására az általam kidolgozott (implementált és tesztelt) módszer az alábbi lépésekből áll: a szegmentáció korrekciója (saját üregfeltöltő algoritmussal, továbbá az “alagutak” és “öblök” eliminálása morfológiai zárással); a fa gyökérének detektálása; középvonal kivonása (egy maximálisan vékonyító és topológia-megőrző algoritmusommal); váz tisztítás (saját, hossz- és mélység-információt egyaránt figyelembe vevő eljárással); a középvonal simítása (topológia-megőrző lokális algoritmusommal).

- **3.2. tézis: A légútfa szimbolikus leírása és ágainak kvantitatív jellemzése**

A javasolt módszerem komponensei: elágazás-pontok detektálása; formális fa generálása; a szegmentált (kiterjedt) fa ágakra bontása; kvantitatív indexek (térfogat, felszín, hossz és átlagos átmérő) számítása az egyes ágakra; a középvonalra merőleges 2D képszeletek meghatározása.

A téziscsoport eredményeit a University of Iowa (Iowa City, IA, USA) vendégkutatójaként, egy interdiszciplináris kutatócsoport tagjaként sikerült elérnem. Eric A. Hoffman radiológus-professzor (a tüdőgyógyászat kiemelkedő kutatója) és munkatársai biztosították az in vivo CT mellkasvizsgálatokat, valamint ők szkennelték be változatos orientációkban a légút-fantomokat is. Juerg Tschirren (a projekt futamideje alatt Sonka professzor doktorandusza, majd az eredmények piacra vezetésére alapított cég, a VIDA Diagnostics igazgatója) oldotta meg a légútfák szegmentálását, ő tervezte meg a formális

leírás XML-struktúráját, továbbá ő dolgozott ki egy módszert a légútfák illesztésére (a középvonal elágazás-pontjai alapján). Milan Sonka, az orvosi képfeldolgozás területének egyik vezető kutatója – a projekt koordinálásán túl – a validációt tervezte meg.

A disszertáció 4. fejezetében bemutatott téziscsoport kiemelt közleményei:

- [PALÁGYI_TSCHIRREN_SONKA_03] (konferenciacikk),
- [HOFFMAN_ETAL_03] (folyóiratcikk),
- [TSCHIRREN_ETAL_05] (folyóiratcikk),
- [PALÁGYI_ETAL_06] (folyóiratcikk),

3 Az eredmények hasznosulása

Az elmúlt két évtizedben (szerte a világból, Kanadától Új-Zélandig) számos kutató fordult hozzám vázkijelöléssel kapcsolatos problémákkal és / vagy kérte tőlem a 3D középfelszínre vagy középvonalra vékonyító algoritmusaim forráskódjait. Visszajelzéseik helyett most csupán azokat az 3D orvosi alkalmazásokat sorolom fel, amelyek közös publikációkhoz is vezettek:

Erich Sorantin (University Hospital Graz, Austria) professzorral, a Szege-di Tudományegyetem díszdoktorával (és munkatársaival) ezidáig az alábbi problémákkal foglalkoztam: a veseerek alatti (infarenális) aorta szakasz tágulatának (aneurizma) mérése, a tracheális sztenózis (légcsőszűkület) detektálása és megítélése, a vastagbél virtuális boncolása, valamint a polipdetektálás vastagbélben és végbélben.

A középvonal segítségével történő (műtéttervezésben alkalmazott) májsegmentálásban Reinhard Beichel (Graz University of Technology, Austria) és kutatótársai partnere voltam.

Ahogy azt a 3. téziscsoportnál leírtam, megadtam, hogy vendégkutatóként a University of Iowa (Iowa City, IA, USA) kiváló kutatóival a légútjara-tok kvantitatív analízisén dolgozhassak.

Nemrégiben keresett meg Brian Matejek, a Harvard University (Cambridge, MA, USA) kutatója, akinek olyan algoritmusra volt szüksége, amely képes “korrekt” 3D középvonalak “gyors” meghatározására elektronmikroszkópból származó (tera- és petabájtokban mérhető adatot tartalmazó) képekre. Együttműködésünk első eredményét (és közleményét) a szinaptikus kapcsolatok azonosításában értük el.

A fenti alkalmazások kiemelt közleményei:

- [BEICHEL_ETAL_05] (konferenciatickk),
- [HOFFMAN_ETAL_03] (folyóiratcikk),
- [MATEJEK_ETAL_19] (konferenciatickk),
- [PALÁGYI_ETAL_01] (konferenciatickk),
- [PALÁGYI_ETAL_06] (folyóiratcikk),
- [SORANTIN_ETAL_02] (folyóiratcikk),
- [SORANTIN_ETAL_06] (könyvfejezet),
- [SORANTIN_ETAL_08] (könyvfejezet).
- [TSCHIRREN_ETAL_05] (folyóiratcikk),

A szerző hivatkozott publikációi

Könyvfejezetek

PALÁGYI_NÉMETH_KARDOS_12

K. Palágyi, G. Németh, P. Kardos: Topology preserving parallel 3D thinning algorithms, In: V.E. Brimkov, R.P. Barneva (Eds.), Digital Geometry Algorithms. Theoretical Foundations and Applications to Computational Imaging, Springer, 165–188, 2012.

SORANTIN_ETAL_06

E. Sorantin, D. Mohadjer, L.G. Nyúl, K. Palágyi, F. Lindbichler, B. Geiger: New advances for imaging of laryngotracheal stenosis by post processing of spiral-CT data, In: W. Hruby (Ed.), Digital (R)Evolution in Radiology – Bridging the Future of Health Care, Springer, 297–308, 2006.

SORANTIN_ETAL_08

E. Sorantin, E. Balogh, A. Vilanova i Bartrolí, K. Palágyi, L.G. Nyúl, F. Lindbichler, A. Ruppert: Virtual dissection of the colon based of spiral CT data, In: E. Neri, D. Caramella, C. Bartolozzi (Eds.), Image Processing in Radiology - Current Applications, Springer, 257–268, 2008.

Folyóiratcikkek

HOFFMAN_ETAL_03

E.A. Hoffman, J.M. Reinhardt, M. Sonka, B.A. Simon, J. Guo, O. Saba, D. Chon, S. Samrah, H. Shikata, J. Tschirren, K. Palágyi, K.C. Beck, G. McLennan: Characterization of the Interstitial Lung Diseases via Density-Based and Texture-Based Analysis of Computed Tomography Images of Lung Structure and Function, Academic Radiology 10, 1104–1118, 2003. (*Impact Factor*: 1.409)

KARDOS_PALÁGYI_13_A

P. Kardos, K. Palágyi: Topology-preserving hexagonal thinning, Int. J. Computer Mathematics 90, 1607–1617, 2013. (*Impact Factor*: 0.721)

KARDOS_PALÁGYI_15

P. Kardos, K. Palágyi: Topology preservation on the triangular grid, Annals of Mathematics and Artificial Intelligence 75, 53–68, 2015. (*Impact Factor*: 0.944)

KARDOS_PALÁGYI_17

P. Kardos, K. Palágyi: On topology preservation of mixed operators in triangular, square, and hexagonal grids, Discrete Applied Mathematics 216, 441–448, 2017. (*Impact Factor*: 0.932)

NÉMETH_KARDOS_PALÁGYI_11_A

G. Németh, P. Kardos, K. Palágyi: 2D parallel thinning and shrinking based on sufficient conditions for topology preservation, Acta Cybernetica 20, 125–144, 2011.

NÉMETH_KARDOS_PALÁGYI_11_B

G. Németh, P. Kardos, [K. Palágyi](#): Thinning combined with iteration-by-iteration smoothing for 3D binary images, *Graphical Models* 73, 335–345, 2011. (*Impact Factor*: 1.000)

NÉMETH_PALÁGYI_11

G. Németh, [K. Palágyi](#): Topology preserving parallel thinning algorithms, *Int. J. Imaging Systems and Technology* 21, 37–44, 2011. (*Impact Factor*: 0.779)

PALÁGYI_ETAL_06

[K. Palágyi](#), J. Tschirren, E.A. Hoffman, M. Sonka: Quantitative analysis of pulmonary airway tree structures, *Computers in Biology and Medicine* 36, 974–996, 2006. (*Impact Factor*: 1.068)

PALÁGYI_08

[K. Palágyi](#): A 3D fully parallel surface-thinning algorithm, *Theoretical Computer Science* 406, 119–135, 2008. (*Impact Factor*: 0.806)

PALÁGYI_14_A

[K. Palágyi](#): Equivalent sequential and parallel reductions in arbitrary binary pictures, *Int. J. Pattern Recognition and Artificial Intelligence* 28, 1460009-1–1460009-16, 2014. (*Impact Factor*: 0.669)

PALÁGYI_NÉMETH_17

[K. Palágyi](#), G. Németh: A pair of equivalent sequential and fully parallel 3D surface-thinning algorithms, *Discrete Applied Mathematics* 216, 348–361, 2017. (*Impact Factor*: 0.932)

PALÁGYI_18

[K. Palágyi](#): How sufficient conditions are related for topology-preserving reductions, *Acta Cybernetica* 23, 939–958, 2018.

SORANTIN_ETAL_02

E. Sorantin, Cs. Halmai, B. Erdőhelyi, [K. Palágyi](#), L.G. Nyúl, K. Ollé, B. Geiger, F. Lindbichler, G. Friedrich, K. Kiesler: Spiral-CT-based assessment of tracheal stenoses using 3-D-skeletonization, *IEEE Transactions on Medical Imaging* 21, 263–273, 2002. (*Impact Factor*: 2.911)

TSCHIRREN_ETAL_05

J. Tschirren, G. McLennan, [K. Palágyi](#), E.A. Hoffman, M. Sonka: Matching and anatomical labeling of human airway tree, *IEEE Transactions on Medical Imaging* 24, 1540–1547, 2005. (*Impact Factor*: 3.939)

Konferenciatickek

BEICHEL_ETAL_05

R. Beichel, T. Pock, Ch. Janko, B. Zotter, B. Reitingner, A. Bornik, H. Bischof, [K. Palágyi](#), E. Sorantin, G. Werkgartner, M. Sonka: Liver segment approximation in CT data for surgical resection planning, In: *Medical Imaging 2004: Image Processing*, Proceedings of SPIE Vol. 5370, 1435–1446, 2005.

KARDOS_PALÁGYI_13_B

P. Kardos, [K. Palágyi](#): On topology preservation in triangular, square, and hexagonal grids, In: Proc. 8th Int. Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, IEEE/EURASIP, ISPA 2013, 782–787, 2013.

KARDOS_PALÁGYI_13_C

P. Kardos, [K. Palágyi](#): Sufficient conditions for topology preserving additions and general operators, In: Proc. 14th Int. Conf. Computer Graphics and Imaging, CGIM 2013, 107–114, 2013.

KARDOS_PALÁGYI_14

P. Kardos, [K. Palágyi](#): Sufficient conditions for general 2D operators to preserve topology, In: Proc. 16th Int. Workshop on Combinatorial Image Analysis, IWCIA 2014, LNCS 8466, Springer, 101–112, 2014.

MATEJEK_ETAL_19

B. Matejek, D. Wei, X. Wang, J. Zhao, [K. Palágyi](#), H. Pfister: Synapse-aware skeleton generation for neural circuits, In: Proc. 22nd Int. Conf. on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention, MICCAI 2019, Lecture Notes in Computer Science 11764, Springer, 227–235, 2019.

NÉMETH_KARDOS_PALÁGYI_11_C

G. Németh, P. Kardos, [K. Palágyi](#): A family of topology-preserving 3D parallel 6-subiteration thinning algorithms, In: Proc. 14th Int. Workshop on Combinatorial Image Analysis, IWCIA 2011, LNCS 6636, Springer, 17–30, 2011.

NÉMETH_PALÁGYI_12

G. Németh, [K. Palágyi](#): 3D parallel thinning algorithms based on isthmuses, In: Proc. 14th Int. Conf. Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems, ACIVS 2012, LNCS 7517, Springer, 325–335, 2012.

PALÁGYI_ETAL_01

[K. Palágyi](#), E. Sorantin, E. Balogh, A. Kuba, Cs. Halmai, B. Erdőhelyi, K. Hausegger: A sequential 3D thinning algorithm and its medical applications, In: Proc. 17th Int. Conf. Information Processing in Medical Imaging, IPMI 2001, LNCS 2082, Springer, 409–415, 2001.

PALÁGYI_TSCHIRREN_SONKA_03

[K. Palágyi](#), J. Tschirren, M. Sonka: Quantitative analysis of intrathoracic airway trees: methods and validation, In: Proc. 18th Int. Conf. Information Processing in Medical Imaging, IPMI 2003, LNCS 2732, Springer, 222–233, 2003.

PALÁGYI_06

[K. Palágyi](#): Computationally efficient thinning in 3D, In: Proc. ECCV 2006 Workshop on Computation Intensive Methods for Computer Vision, CIMCV 2006, 85–98, 2006.

PALÁGYI_NÉMETH_09

[K. Palágyi](#), G. Németh: Fully parallel 3D thinning algorithms based on sufficient conditions for topology preservation, In: Proc. 15th IAPR Int. Conf. Discrete Geometry for Computer Imagery, DGCI 2009, LNCS 5810, Springer, 481–492, 2009.

PALÁGYI_13

[K. Palágyi](#): Deletion rules for equivalent sequential and parallel reductions, In: Proc. 18th Iberoamerican Congress on Pattern Recognition, Part I, CIARP 2013, LNCS 8285, Springer, 17–24, 2013.

PALÁGYI_14_B

[K. Palágyi](#): Topology-preserving general operators in arbitrary binary pictures, In: Proc. 19th Iberoamerican Congress on Pattern Recognition, CIARP 2014, LNCS 8827, Springer, 22–29, 2014.

PALÁGYI_14_C

[K. Palágyi](#): Equivalent 2D sequential and parallel thinning algorithms, In: Proc. 16th Int. Workshop on Combinatorial Image Analysis, IWCIA 2014, LNCS 8466, Springer, 91–100, 2014.

PALÁGYI_NÉMETH_KARDOS_15_A

[K. Palágyi](#), G. Németh, P. Kardos: Topology-preserving equivalent parallel and sequential 4-subiteration 2D thinning algorithms, In: Proc. 9th Int. Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, IEEE/EURASIP, ISPA 2015, 306–311, 2015.

PALÁGYI_NÉMETH_KARDOS_15_B

[K. Palágyi](#), G. Németh, P. Kardos: Equivalent sequential and parallel subiteration-based surface-thinning algorithms, In: Proc. 17th Int. Workshop on Combinatorial Image Analysis, IWCIA 2015, LNCS 9448, Springer, 31–45, 2015.

PALÁGYI_16

[K. Palágyi](#): P-simple points and general-simple deletion rules, In: Proc. 19th IAPR Int. Conf. Discrete Geometry for Computer Imagery, DGCI 2016, LNCS 9647, Springer, 143–153, 2016.

PALÁGYI_KARDOS_17

[K. Palágyi](#), P. Kardos: A single-step 2D thinning scheme with deletion of P-simple points, In: Proc. 22nd Iberoamerican Congress on Pattern Recognition, CIARP 2017, LNCS 10657, Springer, 475–482, 2018.

További hivatkozott közlemények

AWCOCK_THOMAS_96

G.W. Awcock, R. Thomas: Applied image processing, McGraw–Hill, Inc., 1996.

BERTRAND_95

G. Bertrand: On P-simple points, *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris, Série Math.* I(321), 1077–1084, 1995.

BLUM_67

H. Blum: A transformation for extracting new descriptors of shape, In: W. Wathen-Dunn (Ed.), *Models for the perception of Speech and visual form*, MIT Press, 362–380, 1967.

COSTA_CESAR_09

L.F. Costa, R.M. Cesar: *Shape classification and analysis: Theory and practice* (2nd edition), CRC Press, 2009.

GONZALES_WOODS_08

R.C. Gonzalez, R.E. Woods: *Digital Image Processing* (3rd Edition), Prentice Hall, 2008.

KARDOS_PALÁGYI_16

P. Kardos, [K. Palágyi](#): Unified characterization of P-simple points in triangular, square, and hexagonal grids, In: *Proc. Int. Symposium on Computational Modeling of Objects Presented in Images: Fundamentals, Methods, and Applications, CompIMAGE'16*, LNCS 10149, Springer, 79–88, 2016.

KONG_ROSENFELD_89

T.Y. Kong, A. Rosenfeld: Digital topology: Introduction and survey, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 48, 357–393, 1989.

KONG_95

T.Y. Kong: On topology preservation in 2-d and 3-d thinning, *Int. J. Pattern Recognition and Artificial Intelligence* 9, 813–844, 1995.

KONG_ROSENFELD_96

T.Y. Kong, A. Rosenfeld (eds.): *Topological Algorithms for Digital Image Processing*, Elsevier Science B. V., 1996.

NÉMETH_KARDOS_PALÁGYI_11_D

G. Németh, P. Kardos, [K. Palágyi](#): Thinning combined with iteration-by-iteration smoothing for 3D binary images, *Graphical Models* 73, 335–345, 2011.

PALÁGYI_02

[K. Palágyi](#): A 3-subiteration 3D thinning algorithm for extracting medial surfaces, *Pattern Recognition Letters* 23, 663–675, 2002.

PALÁGYI_08

[K. Palágyi](#): A 3D fully parallel surface-thinning algorithm, *Theoretical Computer Science* 406, 119–135, 2008.

PALÁGYI_14_D

[K. Palágyi](#): A sequential 3D curve-thinning algorithm based on isthmuses, In: Proc. 10th Int. Symposium on Visual Computing, ISVC'14, Lecture Notes in Computer Science 8888, Springer, 406–415, 2014.

PALÁGYI_NÉMETH_18

[K. Palágyi](#), G. Németh: Fixpoints of iterated reductions with equivalent deletion rules, In: Proc. 19th Int. Workshop on Combinatorial Image Analysis, IWCIA 2018, LNCS 11255, Springer, 17–27, 2018.

PALÁGYI_NÉMETH_19_A

[K. Palágyi](#), G. Németh: Centerline extraction from 3D airway trees using anchored shrinking, In: Proc. 14th Int. Symposium on Visual Computing, ISVC 2019, Lecture Notes in Computer Science 11845, Springer, 419–430, 2019.

PALÁGYI_NÉMETH_19_B

[K. Palágyi](#), G. Németh: Endpoint-based thinning with designating safe skeletal points, In: Proc. 6th Int. Symposium on Computational Modeling of Objects Presented in Images: Fundamentals, Methods, and Applications, CompIMAGE'18, Lecture Notes in Computer Science 10986, Springer, 3–15, 2019.

RONSE_88

C. Ronse: Minimal test patterns for connectivity preservation in parallel thinning algorithms for binary digital images, Discrete Applied Mathematics 21, 67–79, 1988.

SAHA_BORGEFORS_SANNITI-DI-BAJA_16

P.K. Saha, G. Borgefors, G. Sanniti di Baja: A survey on skeletonization algorithms and their applications, Pattern Recognition Letters 76, 3–12, 2016.

SAHA_BORGEFORS_SANNITI-DI-BAJA_17

P.K. Saha, G. Borgefors, G. Sanniti di Baja (Eds.): Skeletonization: Theory, methods and applications, Academic Press, 2017.

SIDDIQI_PIZER_08

K. Siddiqi, S. Pizer (Eds.): Medial representations – Mathematics, algorithms and applications, Computational Imaging and Vision 37, Springer, 2008.

SONKA_HLAVÁČ_BOYLE_14

M. Sonka, V. Hlaváč, R. Boyle: Image Processing, Analysis, and Machine Vision (4th Edition), Cengage Learning, 2014.