

Opponensi vélemény

Dr. Palágyi Kálmán „Topológia-megőrzés és vékonyítás”

című MTA Doktori értekezéséről

Opponens: dr. Benedek Csaba, az MTA doktora, tudományos tanácsadó, Eötvös Loránd
Kutatási Hálózat, Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet

A disszertáció témája: dr. Palágyi Kálmán MTA Doktori disszertációjának témája a számítógépes képfeldolgozás és gépi látás jelentős területeihez, a digitális topológia automatikus vizsgálatához és alaki struktúrák hatékony leírásához kapcsolódik. A pályázó ezen a területen belül - több mint két évtizedes alkotómunkája során - főként az alakzatok lehetséges reprezentációnak elemzéséhez, topológiamegőrző vázkijelölő műveletek analíziséhez és új módszerek kifejlesztéséhez járult hozzá.

A topológiai és morfológiai vizsgálatok a digitális képfeldolgozás klasszikus témái, melyek szakterület kutatásának kezdeti időszakától fogva az érdeklődés középpontjában állnak. A kapcsolódó eszközöknek a segítségével gyorsan és kézenfekvő módon tudunk releváns jelentéssel bíró képi leírókat kinyerni, illetve képjavító valamint képmódosító operátokat létrehozni. Míg a kezdeti módszerek többnyire ad-hoc, heurisztikus algoritmusok alkalmazásán alapultak, az általánosság és kiszámíthatóság követelményeinek történő megfeleléshez szükségessé vált az egyes eljárások pontos matematikai leírása és vizsgálata tudományos módszerekkel. A jelen dolgozat is ennek a törekvésnek a fényében szolgáltat mind elméleti és mind gyakorlati kutatások révén többletinformációt a tudományos közösségnek.

A dolgozat formai és szerkesztési szempontból kiemelkedő igényességű. A nyelvezet gördülékeny, és amennyire egy matematikai fókuszú írásnál ez lehetséges, a leíró részek olvasmányosak, magukon hordozva szerző egyedi stílusjegyeit. Az ábrák informatívak, a szerző nagy gondot fordított az értekezés formátumához való igazításukhoz. A jelölésrendszer egységes és racionális, bár a téma jellege és a bemutatott szerteágazó módszerek által bevezetett számos fogalom és szempont miatt jelentős koncentrációt és erőfeszítést igényel a pontos követésük.

Szintén erőssége a dolgozatnak, hogy erős koherenciával rendelkezik, azaz az három fő téziscsoport ugyanarról a tématerületről tartalmaz kapcsolódó és egymást kiegészítő hozzájárulásokat: míg az első két téziscsoportnál elsősorban elméleti úton bizonyítható tételek szerepelnek, a harmadik téziscsoportban az alkalmazásokon, és az elméleti eredményeket felhasználó algoritmusok ismertetésén van a hangsúly.

A dolgozat publikációs háttere: a pályázó a disszertációhoz kapcsolódó saját publikációként 14 folyóiratcikket, 18 konferenciaközleményt és 3 Springers-es könyvfejezetet sorol fel. A folyóiratcikkek közül kiemelkedik két *IEEE Trans. Medical Image Processing*-ben megjelent tanulmány, amelyek a pályázó nemzetközi együttműködéseinek keretében, külföldi társzerzőkkel készültek. A pályázó szegedi tanszéki munkáinak eredményeként – főként doktoranduszaival közösen készült, illetve egyszemélyes - folyóiratcikkei szintén szakmailag jegyzett, impakt faktorral rendelkező, többnyire Scimago besorolás szerint Q2 (néhány Q3) kategóriájú folyóiratokban jelentek meg. A konferenci cikkek többsége nemzetközileg ismert IEEE Xplore/SPIE/Springer Lecture Notes in Computer Science kiadványokban került közlésre.

A dolgozat Achilles sarkának az eredmények igazolásának kérdését érzem, amelyet a szerző terjedelmi okokra hivatkozva mind az elméleti (tételbizonyítások), mind a gyakorlati (kísérleti kiértékelés és összehasonlítás más szakirodalmi módszerekkel) jellegű állítások esetén kihagyott az értekezésből, az olvasót a kapcsolódó publikációk vonatkozó fejezeteihez irányítva. Így, bár az MTA Műszaki Tudományok Osztályának doktori követelményrendszerében előírányzott terjedelmi korlátot valóban teljesíti dolgozat, az értekezés önmagában történő értékelhetőségét (amit szintén előír a szabályzat) ez a megközelítés megnehezíti.

A dolgozat felépítése és a tézispontok értékelése: a dolgozat első huszonnégyszáz oldala egy jól követhető bevezetőt tartalmaz a később használt fogalmak, jelölések és főbb alaptételek ismertetésével. Az értekezés további része a három téziscsoportot bemutatására épül, amelyek témája a pályázó fő kutatási területeinek feleltethetők meg.

Az első téziscsoport különböző elméleti eredményeket mutat be, melyeket a szerző – önállóan, illetve doktorandusz hallgatóival együttműködésben - bináris képműveletek topológia-megőrzése területén ért el. Egyaránt szerepelnek olyan módszerek, melyek segítségével egyes már létező operátorok topológia-megtartó képessége igazolható, eljárások, melyekkel új topológia-megőrző operátorok hozhatók létre, és hatékony számítási igényű vékonyító algoritmusok is bemutatásra kerülnek, mind 2D mind 3D bináris bemeneti képeket feldolgozva.

Az 1.1 altézis konfiguráció alapú elégséges feltételeket ismertet redukción alapuló és párhuzamosan elvégezhető topológia-megtartó képműveletek validációjára. Ahhoz hogy az eredmény könnyebben gyakorlatba ültethető legyen új topológia-megtartó vékonyító operátorok szerkesztéséhez, pont-alapú, szimmetrikus és aszimmetrikus feltételeket is megfogalmaztak a következő törlendő pont kiválasztási stratégiájának támogatására. Az operátorok a hagyományos 2D négyzetrácson túl a szabályos háromszög- és hexagonrácsra is általánosításra kerültek.

Az 1.2 altézis az előzőekre alapozva 3D képek topológia megőrző párhuzamos redukcióira ad elégséges feltételt, amely jó kiegészíti a szakirodalomban korábban már ismertetett konfiguráció alapú (3D) feltételeket.

Az 1.3 altézis a pályázó önálló, egyszerű cikkekkel alátámasztott munkájára épül, melyben két ekvivalens (azaz tetszőleges input képen ugyanazon eredményt adó) szekvenciális, illetve párhuzamos, garantáltan topológia-megőrző operátort definiál. Mind az ekvivalencia mind a topológia-megőrzési szabályok bizonyításra kerülnek.

Az 1.4 altézisben a szerző Kardos Péter doktoranduszával közösen egy kapcsolatgráfot épít fel a korábban tárgyalt különböző topológiamegőrző elégséges feltételek között, bemutatva, hogy három feltétel teljesen ekvivalens, míg bizonyos feltétel-párok között (például általános-egyszerű törlési szabály és P-elegyszerű halmazok törlése) egyoldalú következmény-viszony áll fenn.

A második téziscsoport különböző szekvenciális illetve párhuzamos valamint 2D illetve 3D vékonyítási eljárások topológia-őrző hatékony implementációjához javasol új megoldásokat.

A 2.1 altézis egy új általános és számítási igényt tekintve hatékony sémát mutat be topológia-megőrző vékonyítás feladatára, biztosítva, hogy csupán határpontok vizsgálatára szorítkozik a

megoldás, kizárólag egyszerű pontokat töröl a módszer, és mivel csak a lokális környezet határozza meg a műveleteket, valamennyi szóhajóhető részkonfiguráció előzetesen eltárolható és look-up-table-ből beolvasható.

A 2.2 altézis a topológiamegőrzés korábban ismertetett elégséges feltételeiből származtat 3D párhuzamos vékonyító algoritmusokat. A korábbi módszerek ugyanis az egyes algoritmusok megkonstruálása után utólag próbálták meg a topológiamegőrző tulajdonságot igazolni, ez a megközelítés azonban gyakran nehézkesnek vagy hibásnak bizonyult. A pályázó ezzel szemben a disszertációban már ismertetett pont alapú elégséges feltételeket kombinálta párhuzamos vékonyító stratégiákkal és geometriai feltételekkel, elérve, hogy az új algoritmusok garantálta topológiamegőrző tulajdonsággal rendelkezzenek.

A 2.2 altézis háttérét részletező fejezet nem csak egy algoritmust állít elő, hanem népes algoritmuscsaládokat (15 db 3D, és 75 db 2D-s algoritmust). Itt számomra mindenképpen hiányzott egy diszkussziós fejezet, ami valamilyen formában értékelte volna az elért eredményeket, például a következő kérdésekre válaszolva:

- Melyik/melyek a legjobb algoritmusok a fentiekből?
- Milyen szempont szerint lehet egyáltalán objektívan értékelni/összehasonlítani ezeket az egyes eljárásokat?
- Az egyes eljárások alkalmazásának milyen jellegű objektumok esetén van értelme, és hol nem várható az, hogy értékelhető eredményt adnak?
- Milyen módon tudják az eljárások a zajos (például binarizálási hibákkal terhelt) objektumokat kezelni?

A fenti hiányolt részletekre a szerző maga is utal a téziszfüzetben, jelezve hogy a „validáció hiányát nem a szűkös terjedelem indokolja, hanem a vázkijelölés területének sajátosságai.” Bár nem vagyok a szűk terület szakértője, ez az indoklás alapvetően kérdésessé teszi számomra, hogy ha nem lehet számszerűsíteni az algoritmusaink teljesítményét, akkor mi alapján fejlesztjük őket, mi alapján állítjuk hogy ezek tényleg hasznosak (például egy biztonság kritikus rendszerben mennyire bízhatunk meg bennük?) és miért van szükség újabb szkeletonizáló módszerek fejlesztésére, akár a fent említett közel száz különböző új algoritmusra? A dolgozatban lévő ábrák tanulmányozása során (pl Fig. 3.7, Fig 3.8) számomra nem volt például teljesen világos, hogy van-e lényegi különbség az egyes variánsok lefutása között, és ha igen, ezeknek mi a jelentősége.

- Az előbb felvetett kérdésekkel kapcsolatos véleményének ismertetésére - ha van rá mód - kérem térjen ki a válaszában!

A 2.3 altézis vékonyító algoritmusok ekvivalenciájával foglalkozik. Egyrészt új ekvivalens 2D illetve 3D topológiamegőrző szekvenciális illetve párhuzamos implementációjú vékonyító algoritmusokat mutat be, másrészt eljárásokat ad mások által javasolt néhány párhuzamos algoritmus ekvivalens szekvenciális implementációjára. Kérdéseim itt is elsősorban a bemutatott példákkal, illetve az algoritmusok felhasználásával kapcsolatosak:

- Van-e becslése, hogy a jelenlegi architektúrákon és bizonyos példaként felhozható releváns felbontású és releváns adatokon mekkora az algoritmusok végrehajtási ideje, és a párhuzamosítással körülbelül milyen arányú futási időbeli nyereség érhető el?
- A Fig 3.10-en és Fig 3.11-en látható eredményeket miként értékeli, van-e számszerű, vagy kvalitatív konklúzió illetve magyarázat arra, hogy az egyes variánsok milyen objektumokon működnek jobban/rosszabbul.

A 2.4 altézis két új középvonallra vékonyító algoritmust mutat be (pontosabban egy új algoritmust és annak továbbfejlesztett változatát), melyek igazoltan maximálisak és megőrzik a topológiát. Néhány kérdésem ezzel kapcsolatban is felmerült:

- A kapcsolódó fejezet leírása számos technikai részletkérdést, különböző trükkök bemutatását is tartalmazza a hatékonyság növelésére (pl integer-kód hozzárendelése, LUT használata). Készült ezzel kapcsolatban olyan számszerű elemzés, hogy milyen mértékben csökkentették ezek a fejlesztések az algoritmus komplexitását?
- A fejezet, és a tézis is hangsúlyozza hogy az algoritmus sikerrel került alkalmazásra orvosi képfeldolgozási feladatokban. Kérdésem, hogy itt a siker pontosan miként volt mérve? Sikerült bizonyos szegmentálási feladatok eredményeit növelni például korábbi rivális módszerekkel szemben?
- A Fig. 3.12 ábrán bemutatott képpár alapján nagyon impresszív a 6SI-S-CT-EPRC algoritmus által okozott javulás. Itt az algoritmus egyes lépéseinek tanulmányozása során viszont nem volt világos, hogy $t=1$ választással miért tünteti el az eljárás a kis hibás oldalágakat, míg a végső terminálisok szintén kicsit ágai látszólag torzításmentesen a helyükön maradnak. Kérem a pályázót, ha van rá mód kicsit részletesebben szemléltesse ezt a jelenséget.

A 2. téziscsoport vázkijelölő eljárásainak hatékonyságával kapcsolatban az eddigieken túl még néhány általánosabb kérdésem is felmerült:

- A dolgozatban bár sokféle alternatív módszerről esik szó, ezek mind egy módszer családnak, a bináris morfológiai megközelítés zászlója alá tartoznak. Vannak-e arra vonatkozó tapasztalatai, illetve eredményei a pályázónak, hogy a vázkijelölés, mint feladat morfológiai alapú megoldása más lehetséges módszertani megközelítésekhez (pl inverz energiaminimalizációs módszerek, gépi tanulás módszerek) képest mennyire versenyképes?
- Ha a vázkijelölés elmúlt pár évben megjelent szakirodalmát vizsgáljuk, mennyire teljesül, hogy a mélytanulási módszerek, mint olyan sok más területen, itt is átvették a hatalmat? Másik oldalról megközelítve, a dolgozatban szereplő tudást/know-how-t a szerző szerint mennyire lehetne felhasználni az eddigieknél hatékonyabb deep learning alapú eljárások elkészítéséhez (például új architektúrák, illetve veszteség-függvények szerkesztéséhez)?

A 3. téziscsoport az eddig ismertetett (elméleti) eljárások gyakorlati alkalmazhatóságának szemléltetésére helyezi a hangsúlyt. A szerző a téziszűzetben több lehetséges alkalmazást is említ, melyek közül terjedelmi okokból csak egy kiválasztott probléma, a légutak kvantitatív analízise került bele a dolgozatba. Ezen belül a 3.1. altézis algoritmust mutat be tüdőjáratok középvezetékének meghatározására, míg 3.2 altézis a légútfa szimbolikus leírására és ágainak kvantitatív jellemzésére.

A 3. téziscsoport értékelésére külön kitérnék. A sok közül egyetlen minta alkalmazás kiválasztását és bemutatását a terjedelmi korlátok miatt elfogadható megoldásnak tartom. Ugyanakkor mivel itt nem új elméleti eredményről van szó, hanem egy – a szerző állítása szerint - gyakorlatban jól működő módszerről, a validáció prezentációjának hiányában az újabb tézisértékű tudományos állítás nehezebben értelmezhető. Jelen formájában a fejezet számomra inkább az előző két téziscsoport egy érdekes alkalmazási példáját mutatja be. A téziszűzet bevezetőjében a szerző a következőképpen tér ki erre a kérdésre: „a szűkös terjedelem miatt kimaradt – a szakterület elvárásait kielégítő gondos és részletes – validáció csak a vonatkozó közleményekben található meg.” Ezzel kapcsolatban azonban több észrevételt is tennék:

- A dolgozat illetve a tézisfüzet alapján nehéz összepárosítani a bemutatott algoritmusokat és az adott algoritmus validációját is tartalmazó publikációkat (a tézisfüzetben nem szerepel ennek pontos részletezése, az értekezésben pedig a sorszámozás formátuma nem különbözteti meg a saját és szakirodalmi hivatkozásokat, a pdf fájlban sincsenek hiperlinkek a hivatkozások sorszámai és a referencialista egyes elemei között)
- Saját utánajárásom során azt találtam, hogy [Palágyi EtAl 06] jelű publikáció például lefedi az itt szereplő eredmények egy számottevő részét, itt valóban szerepelnek számszerű értékek is, azonban a más módszerrel történő összehasonlítás kizárólag szöveges diszkusszió alapú. Kérdésem, hogy itt nem lehetett volna-e számszerű, vagy ábrák alapján bemutatatható kvalitatív összehasonlítást végezni a terület (publikáció idején) aktuális referenciamódszereivel?

A fent leírtak alapján arra kérném a pályázót, hogy a harmadik téziscsoport tudományos állítását lehetőleg egyértelműsítse írásos válaszában, és az ehhez szükséges igazolási módszerek bemutatásával és a tézisállítást alátámasztó eredmények riportolásával egészítse ki a pályázati anyagot.

Összegzés

A dolgozat számos értékes elméleti és gyakorlati eredményt tartalmaz topológiamegőrző transzformációk és vázkijelölési eljárások elemzésére, validációjára és új hasznos eljárások létrehozására vonatkozóan. A publikációk rangja, száma és a hivatkozások sokasága igazolja, hogy a szerző kiváló ismerője és nemzetközi szintű művelője a választott területnek. A dolgozat jó felépítésű, nagyon színvonalas munka.

Az első két téziscsoportban bemutatott, elsősorban elméleti jellegű eredményekhez kapcsolódó altéziseket elfogadom. A harmadik téziscsoport kapcsán az állítások pontosításával, és azok igazoltságával kapcsolatban szeretnék a szerzőtől írásos visszajelzést kérni.

A dolgozat eredményeit elegendőnek tartom az MTA doktori cím megszerzéséhez, a nyilvános védés kitűzését és a fokozat odaítélését támogatom.

Budapest, 2021. április 9-én



.....
dr. Benedek Csaba

MTA Doktora, tudományos tanácsadó

ELKH SZTAKI