

Diszkrét geometriai és fúziós módszerek objektumok detektálásához és a döntéstámogatáshoz

(Discrete Geometric and Fusion Based Techniques for Object
Detection and Decision Support)

Hajdu András

*Komputergrafika és Képfeldolgozás Tanszék
Debreceni Egyetem, Informatikai Kar*

MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

2015

Tartalomjegyzék

1 Bevezetés	1
2 Előzmények	1
2.1 Objektumok mintavételezése és tömörítése	1
2.2 Fúziós rendszerek objektumok detektálásában és a döntéshozásban	2
3 Kutatási módszer	3
4 Az értekezés tézisei	4
4.1 Objektumok optimális mintavételezése és tömörítése	4
4.2 Egy- és több példányban megjelenő objektumok detektálása	5
4.3 Összetett rendszerek a döntéstámogatásban	7
5 Az eredmények hasznosítása	8
A szerző publikációi	10
További hivatkozások	14

1. Bevezetés

A digitális képfeldolgozás számos szakterület számára nyújt segítséget a szükséges információk különféle képalkotókkal készített álló- és mozgóképekből való kinyerésével. Tipikus alkalmazási területként említhetjük a klinikai diagnosztikát vagy a biztonsági rendszereket. Gyakori, hogy a különféle információk kinyerését egy döntéstámogató lépés is követi, különösen olyan problémáknál, ahol elvárás az automatikus feldolgozás is. A számítógépes módszerek használata számos szempontból előnyösebb az emberi feldolgozásnál; a legkézenfekvőbb megfontolás az elemzés sebessége. Mind a számítási háttér, mind a metodológia rohamos fejlődése lehetővé teszi azonban olyan eljárások megjelenését is, amelyek már szemantikai értelemben is meghaladják a hagyományos emberi gondolkodást. Ennek a jelenségnek sokszor ismét csak a kapacitás áll a háttérben, mivel a számítógép képes rejtettebb leírók és összefüggések feltárására egyszerűen azáltal, hogy nagyszámú esetet vizsgál meg. Eljutunk tehát jellemzően azokhoz a megoldásokhoz, amikor a számítógép lényegesen több és mélyebben analizált információ alapján hozza meg a döntését.

A feldolgozási idő a számítógép esetében sem elhanyagolható szempont: hiába növekszik a számítási teljesítmény, ha azzal egyidejűleg az adott területen a képi felbontás és más feldolgozandó adat mennyisége is rohamosan nő. Ez az oka annak, hogy a viszonylag egyszerűbb, tágabb kontextust mellőző, képpont-szintű módszerek kutatásáról és fejlesztéséről sem szabad megfeledkezni. Az érdemi továbblépést azonban kétségtelenül azon módszerek fejlődése fogja meghozni, amelyek a képtartalmat szemantikus eszközökkel elemezik, figyelembe véve például az előforduló objektumok leíró tulajdonságait, valamint az egymáshoz vagy a környezetükhöz való viszonyukat. Mindenképpen javulást várhatunk továbbá a releváns adat kinyerésének és a döntés meghozatalának pontosságában, amennyiben a lehető legtöbb információt felhasználjuk ehhez.

Munkám során egyrészt olyan eszközöket dolgoztam ki, amelyek a képpont-szintű módszerek hatékonyságát tudják javítani az objektumok kinyerésében és reprezentálásában. Másrészt, az objektumok automatikus detektálásához és az arra épülő döntéshozáshoz fúziós technikákat fejlesztettem ki, amelyek a források függőségét és egyedi pontosságát figyelembe véve jutnak el a végeleges döntésig. Kapcsolódó eredményeimet az [1–55] munkák tartalmazzák, amelyek közül [1–16] a Science Citation Index (SCI) által referált folyóiratokban megjelent, [17–55] pedig egyéb referált közlemény.

2. Előzmények

2.1 Objektumok mintavételezése és tömörítése

Az objektumok detektálása és osztályozása a képfeldolgozás és gépi látás klasszikus problémaköre. Egy gyakori megközelítés adott képjellemzők (például élek) kinyerése, majd előre definiált sablonok illesztése az objektumok előfordulásának ellenőrzéséhez. A chamfer-illesztés [56] egyike az ilyen módszereknek. Az eljárás egy éldetektáló lépéssel bináris élképet nyer ki majd meghatározza annak távolságtranszformáltját [57, 58]. Ezt egy, az előre definiált sablonokat illesztő lépés követi a teljes képet bejárva [57, 59], amennyiben nem állnak rendelkezésre

a keresés gyorsítása számára lehetőségek (például a háttér kivonása [60, 61] vagy intenzitás alapú előszegmentálás [62]). A chamfer-illesztés igen népszerű valós idejű alkalmazásokban, ezért számos további eredmény született annak gyorsítására. Az egyik ilyen megközelítés az illesztett sablonok egyszerűsítése, kevesebb ponttal való reprezentálása. Ez megvalósítható a felbontás folyamatos finomításával [63], illetve az objektum körvonalát jól reprezentáló pontok kinyerésével. Ez utóbbi célra természetes megközelítés a nagy görbületi értékekkel rendelkező pontok kiválasztása [64], azonban az eljárás illesztési hibafüggvényre való optimális viselkedése elméleti szempontból nem nyert igazolást.

Az objektum körvonala digitális síkgörbéként is felfogható, mely a számítógépes grafika, diszkrét geometria és képfeldolgozás alapvető, sokat vizsgált geometriai eleme [65]. Speciális terület a digitális görbék tömörítése, melynek módszerei az objektumok hatékony tárolására is alkalmasak. Az olyan egyszerű reprezentációk mellett mint a lánckód, gyakori tömörítő megközelítés a görbék rövid, egyenes szakaszokból való felépítése [66]. Ezeket a módszereket egyszerű, magukat nem metsző görbékre dolgozták ki, ahol a görbét felépítő pontok sorrendje könnyen megadható. A korszerű JBEAM [67] eljárás rövid egyenes szakaszok egy ábécéjét tekintti a görbe leírására. Az eljárás a görbét tartalmazó kép 4-fa reprezentációján alapul, azt mindaddig finomítva, míg egy cellában már csak egy görbeszegmens marad. Az eljárás előnye, hogy tetszőleges topológiájú görbére használható, hátránya viszont, hogy ehhez nagyon finom felbontás válhat szükségessé, ami csökkenti a tömörítés hatásfokát.

2.2 Fúziós rendszerek objektumok detektálásában és a döntéshozásban

Szavazók vagy osztályozók egyedi eredményein alapuló együttes döntést hozó fúziós rendszereket számos területen használnak a döntési pontosság javításához. A több osztályozón alapuló döntési elveket a számítógépes alakfelismerés területén is megtaláljuk [68], neurális hálókön [69, 70], döntési fákön [71] vagy ezektől eltérő elveken alapuló modellek [72–74] alkalmazása mellett. Az objektumok detektálásának feladata szintén egy hagyományos és igen mozgalmas területe a képfeldolgozásnak. Egy fúziós rendszerben a komponensek egyedi kimenetei egyesítésének egyik klasszikus módja a többségi szavazás elvének használata. A kapcsolódó irodalom igen gazdag mind elméleti eredményekben, mind alkalmazásokban. Az egyik legfontosabb terület az igaz/hamis szavazatok egyesítésének kérdésköre, a leggyakoribb döntési szabály pedig az egyszerű- [69, 75, 76] vagy súlyozott többségi szavazás [75]. A többségi szavazás kutatásában kiemelkedő jelentőséggel bír a függő komponensek esete. Független szavazókra számos eredmény ismert, a függő komponensekből álló rendszerek minimális és maximális pontosságára pedig sikerült becsléseket adni. A függőségi viszony feltárása a komponensek közötti egyszerűbb statisztikák, illetve komplexebb diverzitási mérőszámok számolásával vagy tanító eljárásokkal történik. A fúziós modellek képfeldolgozási feladatokra való használatának fő akadálya, hogy a szavazatok térbeli interpretációja bonyolultabbá teszi a modellt. Nevezetesen, itt egy hibás szavazat önmagában nem jelent gondot, csak ha más hibás szavazatokkal találkozik a térben. A megfelelő geometriai feltételeket egy szegmentálási feladatnál az objektum alakja határozza meg, legyen az akár pont- akár régiószerűen detektálható. A szavazórendszerek általánosításának értelemszerűen ki kell terjednie a függő eset vizsgálatára, a megfelelő súlyszámító módszerek megadására a súlyozott modellekhez, valamint a tanulórendszerek térbeli feltételek

melletti értelmezésére.

A fúziós rendszerek egyik fontos alkalmazási területe a klinikai döntéstámogatás, ami lehetőleg automatikusan, emberi beavatkozást nem igénylő módon történik. Klasszikus megközelítés a képekből kinyert különféle leírókból tanulást használó osztályozókkal az eseteket orvosi kategóriákba sorolni. Számos osztályozási elv létezik, melyek fúziós rendszerben való egyesítése tovább emelheti a besorolás pontosságát. Különösen hatékony rendszer hozható létre, ha a fúziós stratégiát nem csupán a végleges döntés meghozásában, hanem a leírók kinyerésében is alkalmazzuk. Nagyon gyakori például, hogy a szükséges jellemzők detektálandó objektumokhoz kapcsolódnak, melyek esetére a fúziós rendszerek kiterjeszthetőségének problémakörét fentebb tárgyaltuk. Az értekezésben vizsgált klinikai szakterület a diabéteszes retinopátia szűrése, ahol a fúziós módszertannal kapcsolatban még csak bevezető eredmények léteznek; empirikus alapon sikerült megmutatni [77], hogy a betegség egyik jellemző tünetének (mikroaneurizma) detektálási szenzitivitása az egyes detektorok kimeneteinek egyesítésével emelkedhet.

3. Kutatási módszer

Munkám során mindig törekedtem arra, hogy kutatásaimat a megfelelő kísérleti validálás mellett elméleti igényességgel végezzem. A modellek elméleti megalapozottsága mindenképpen fontos, mivel a rájuk épülő rendszerek csak így jellemezhetők objektív módon. Nagyon gyakori azonban, hogy egy-egy gyakorlati feladat – sokszor bizonyíthatóan is – igen komplex elméleti problémákhoz vezet. Ilyen esetekben különösen nagy kihívást jelent olyan állítások megfogalmazása, amelyek gyakorlati szempontból is valóban értékesek.

A digitális képfeldolgozás történetét tekintve egyszerűbb, képpont-szintű technikák vizsgálatával indult a megfelelő elméleti háttér kialakítása mellett. Ez az igényesség azóta is jellemzi a szakterületet, a vizsgálatok alapvetően egzakt módon validálhatók. Az idő haladtával megjelentek a kifinomultabb, már nem csak a képpontokat, hanem azok magasabb szintű szerveződését is figyelembe vevő technikák. Nem merült ki azonban az alacsony szintű módszerek vizsgálata sem, mivel ezek kis erőforrásigényük miatt jól használhatók valós idejű alkalmazásokban. Az értekezésben tárgyalt, chamfer-illesztéshez kapcsolódó mintavételező eljárás is ide tartozik. Az alapmodell könnyen előállítható élképekre illeszt sablonokat egy adatbázisból megfelelő objektumok jelenlétének megállapításához. A közölt módszerek az eljárást tovább gyorsítják a sablonok olyan mintavételezésével, amiről bizonyítom, hogy a chamfer-illesztés szempontjából a legkisebb hibát okozzák. A sablonok adatbázisának tömörítésére is ajánlást adok, ahol a kulcskérdés általában a minőség romlása. A közölt módszer ilyen szempontból nem tartozik a veszteségmentes tömörítők közé, viszont megmutatom róla, hogy a görbék közelítési hibáját egy képpont alatt tartja, ami stabilan belül van az emberi látás által tolerálható hibahatáron (lásd MPEG-4 szabvány).

A képfeldolgozási módszerek eszköztára gazdagodásának köszönhetően egy adott feladatra növekvő számú, többé-kevésbé eltérő elveken alapuló megoldás született. A számítási kapacitás rohamos javulása egyre inkább lehetővé teszi, hogy ezeknek a módszereknek a kimeneteit egyesítve (fuzionálva) nagyobb pontosságú eredményt érhessünk el. A fúziós rendszerek vizsgálata mindig is kiemelten fontos volt szakértői és választási rendszerekben, így például a demokratikus alapelvek is ezen a több vélemény aggregálását figyelembe vevő módszertanon alapulnak. A szakterületet a matematikai igényesség is jellemzi, elsősorban a felhasználói oldalról érde-

kes kérdésekben. Szép elméleti eredmények születtek arra az esetre, amikor a fúziós rendszer komponensei egymástól függetlenül döntenek. Ez az ideális eset azonban meglehetősen ritka a gyakorlatban, a függő eset elméleti vizsgálatát pedig nagyban nehezíti, hogy általános esetben a rendszer teljes, precíz függőségi viszonyainak feltárása NP-teljes probléma. Az értekezésben közölt eredmények elsősorban arra koncentrálnak, hogy a fúziós módszertan képtartományban való felhasználásához új elméleti levezetésekkel is alátámasztott modelleket vezessenek be. Nevezetesen, az objektumokat egy képponttal reprezentáló detektorok eredményeinek egyesítésére terjesztettem ki a klasszikus egyszerű többségi és súlyozott többségi szavazómodellt. Az eljárás az objektum alakotani jellemzőjét mint geometria feltételt figyelembe véve tudja jellemezni a rendszerpontosságot. A független komponensek esete itt is egyszerűbb, ám a függőség problematikáját is több szempontból tárgyalom. Elméletileg alátámasztott módon intervallumot adok a rendszerpontosságra az egyedi komponensek pontosságának ismerete alapján, valamint meghatározom a megfelelő súlyozást a térbeli rendszerhez. Kiterjesztem továbbá a függőség vizsgálatát a klasszikus esetben is szolgáló ún. diverzitási mérőszámokat a térbeli reprezentációra, és eljárást adok fúziós rendszerek összeállítására a segítségükkel.

Az értekezésben közölt gyakorlati eredményekkel kapcsolatban fokozott hangsúlyt fektettem arra, hogy azok más kutatók munkáival kvantitatív módon összehasonlíthatóak legyenek. Ennek a területen lényegében az egyetlen objektív formája a publikus adatbázisokon való tesztelés, amennyiben ezek rendelkezésre állnak. Ezekben az adatbázisokban a képek mellett általában kézi annotációk is elérhetők. Az annotációk publikus halmazán az algoritmusok taníthatók és pontosságuk is felmérhető. Az igazán objektív összehasonlításra akkor van lehetőség, ha az egyes megközelítések összevetése a kézi annotációk publikusan nem elérhető adatait használva végezhető el. Kutatásaim mindegyikében törekedtem a kiértékelést az adott pillanatban így elérhető adatokon végezni.

4. Az értekezés tézisei

Az alábbiakban az általam elért új tudományos eredményeket foglalom össze három téziscsoportban; a közölt eredmények a PhD fokozatom megszerzése után születtek. Minden tézispont végén megadom az eredményekről beszámoló publikációimat.

4.1 Objektumok optimális mintavételezése és tömörítése

Az objektumok detektálásának egyik lehetséges módja előre elkészített sablonok illesztése a vizsgált képre. Valós idejű alkalmazásoknál az illesztési idő csökkentése kritikus kérdés. Hasonlóan fontos az illesztéshez használni kívánt sablonok hatékony tömörítése a korlátozott erőforrásokat használó eszközökön való tárolásukhoz. A területen új, részben általam igazolt elméleti eredményeken alapuló **módszereket adtam** objektumok mintavételezéséhez és tömörítéséhez, melyek hatékonyságát kísérletileg is **igazoltam**.

1. A központi Voronoi felbontás elméletének [78, 79] kiterjesztésével **bevezettem** egy új mintavételező eljárást, ami egyaránt alkalmas folytonos- és diszkrét térbeli objektumok egyszerűsítésére. A hibát itt az alakzat pontjainak a mintavételezési pontoktól való távolság-integrálja adja, a hagyományos esettől eltérően az eredeti objektum egy dilatált variánsában. **Igazoltam**, hogy ez a technika optimális az ún. chamfer-illesztést használó detektáló

módszerekben. **Megmutattam**, hogy a módszer görbeszerű sablonok mellett hogyan alkalmazható tartomány jellegű objektumokra is, melyhez egy súlyfüggvényt is **bevezettem** a mintavételezés objektum középvonalára történő koncentrálására. A módszer felhasználásra került a SHARE¹ rendszer hőkamerás videófelvevételekben emberi jelenlétet detektáló moduljában. Összegezve, az optimális viselkedést elméletileg is bizonyítva és kísérletileg is alátámasztva **megmutattam** a javasolt mintavételezők hatékonyságát. *Kapcsolódó publikációk: SC² folyóiratban: [1], egyéb: [17–19].*

2. Új eljárást **dolgoztam ki** tetszőleges topológiájú digitális görbék tömörítéséhez. Más megközelítésekkel szemben a módszer a teljes görbét végigköveti, így egyenes szakaszok egy ábécéjéből gazdaságos közelítést ad. A görbék bejárásához gráfelméleti, hatékony tömörítést szolgáló **módszereket adtam** meg. Nevezetesen, a görbék Euler-felbontással Euler-gráfokra bontva bejárhatók, illetve a felbontás mellőzhető a kínai postás probléma megoldásának adoptálásával, ahol a súlyokat a görbedarabok tömörítési igénye adja. A vázkijelöléssel nyert digitális görbék vázkijelölés során deformálódó kereszteződéseinek detektálásához és javításához saját elméleti eredményeken alapuló módszert **vezettem be**; az elméleti modell a kereszteződő szegmenseket sávok formájában kezeli, és azok vastagságának, valamint bezárt szögének függvényében határozza meg a deformáció nagyságát. A görbetömörítő eljárás felhasználásra került a SHARE rendszer sablon-adatbázisainak tárolásában. Összegezve, **igazoltam** egy új, elméleti levezetésen alapuló és kísérletileg is validált görbetömörítő eljárás hatékonyságát. *Kapcsolódó publikációk: SCI folyóiratban: [2], egyéb: [20, 21].*

4.2 Egy- és több példányban megjelenő objektumok detektálása

Az egyik leggyakoribb képfeldolgozási feladat adott objektumok jelenlétének és helyzetének minél pontosabb meghatározása. Megjelenési formájuk (például alak, szín) mellett számos esetben az egyes típusú objektumok lehetséges számáról (egy vagy több) is rendelkezünk információval. A detektálási pontosság növelésének egyik lehetséges módja minél több olyan szempontot figyelembe venni, amit a feladat megoldására a szakterületen már kidolgoztak. A területen új, térbeli szavazórendszerek modelljeit vezettem be, melyek alkalmasságát elméleti eszközökkel **bizonyítottam** és kísérletileg is **igazoltam**.

1. A képen egy példányban megjelenő, egy képponttal reprezentálható objektumok detektálásához fúziós módszereket **vezettem be**, amelyek különböző elveken alapuló detektorok kimeneteit egyesítik többségi- vagy súlyozott többségi szavazómodellek alapján. A detektálási pontosság növeléséhez számos további lépést is tettem. Gráfelméleti **eljárást dolgoztam ki** több, egy példányban előforduló objektum egyidejű detektálására azok kölcsönös geometriai elhelyezkedésének figyelembevételével. A maximális súlyú klikkek meghatározásával szintén gráfelméleti **módszert adtam** arra, hogy az egyedi detektorok több jelölést is adhassanak az objektum helyére. Az egyedi detektoroktól származó teljes informá-

¹EU FP6 Information Society Technologies, FP6-004218, SHARE: Mobile Support for Rescue Forces, Integrating Multiple Modes of Interaction.

²Science Citation Index.

ciómennyiség figyelembevételéhez axiomatikus és Bayes modelleken alapuló aggregációs modelleket **vezettem be**. Az egyes detektorok függőségi viszonyait azok egyedi szórásán, illetve páronkénti kovarianciáján alapuló statisztikai módszerekkel **tártam fel**; a függőséget a detektorok kimeneteinek megfelelő súlyozásával kompenzáltam, ahol a súlyokat a végső jelölt szórását minimalizáló szélsőérték-probléma megoldásai adják. A kidolgozott módszerek implementálásra kerültek a DRSCREEN rendszerbe a vak- és sárgafolt retina-képeken történő detektálásához. Összegezve, a megfelelő elméleti módszerek adoptálása mellett **kísérletileg igazoltam** egy új fúziós módszer hatékonyságát. *Kapcsolódó publikációk: SCI folyóiratban: [3, 4], egyéb: [22, 23].*

2. A klasszikus többségi és súlyozott többségi szavazást **kiterjesztettem** térbeli szavazómodellekké, ahol az egyes szavazatok detektorok jelöltjeiként, képpontok formájában érkeznek. Ehhez egy olyan valószínűségi elemet vezettem be, ami speciálisan megfeleltethető egy detektálni kívánt objektum alakjára vonatkozó feltételnek. **Feltártam** a kiterjesztett modell pontosságának viselkedését a szavazásban részt vevő komponensek egyedi pontosságának és függőségi viszonyainak függvényében. Nevezetesen, lineáris programozási eszközökkel elméleti eredményeket **bizonyítottam** egy valószínűségi változórendszer maximális és minimális függetlenségére vonatkozóan. **Meghatároztam** a rendszer pontosságának változását abban a gyakorlati szempontból fontos esetben, amikor egy új komponens kerül felvételre. Körszerű objektumok detektálásához **levezettem** a kiterjesztett modell valószínűségi elemének viselkedését. Ehhez egy tartományra véletlenszerűen ejtett pontok halmazának átmérőjére vonatkozó elméleti eredményeket továbbfejlesztve **megmutattam**, hogy a független detektorok téves kimeneteinek adott körlapba való esésének valószínűsége exponenciálisan csökken a detektorok számával. A súlyozott többségi szavazást **kiterjesztettem** az új térbeli szavazómodellre; körszerű objektumok detektálásához a súlyokat a klasszikus esetben használt módszer általánosításával **határoztam meg**. A térbeli szavazórendszer függőségi viszonyainak pontosabb feltárásához klasszikus diverzitási mérőszámokat **általánosítottam** és **módszert adtam** a rendszer általuk történő összeállítására. A kidolgozott modellek hatékonyságát a vakfolt detektálásának problémáján keresztül **demonstráltam**; az eredmények a DRSCREEN³ rendszerbe kerültek implementálásra. Összegezve, **bizonyítottam** egy új térbeli szavazómodell alkalmasságát ponttal reprezentálható objektumok detektálására. *Kapcsolódó publikációk: SCI folyóiratban: [5], egyéb: [24–26].*
3. A képen több példányban megjelenő objektumok detektálásához új, fúziós technikán alapuló eljárást **vezettem be**. A módszer az összetett rendszer pontosságát a komponensek diverzifikálásával növeli, amit előfeldolgozó és jelöltállító párokból képzett detektorokkal ér el. A minél pontosabb összetett rendszer előfeldolgozó és jelöltállító algoritmusokból való meghatározására sztochasztikus keresésen alapuló **eljárást adtam**, amit az objektumdetektálásban használt hibafüggvényekre nézve kimerítően **teszteltem**. A megközelítés hatékonyságát mikroanurizmák retinaképeken való detektálásán **ellenőriztem**. Az összetett rendszer pontosságának növeléséhez **módszert adtam** arra, hogy a keretrendszer az objektumok megjelenési jegyeit és térbeli helyzetét is figyelembe tudja venni. Az eredmények a DRSCREEN rendszerbe implementálásra kerültek. Összegezve, **megmutattam**, hogy a

³TECH08-2 grant of the Hungarian National Office for Research and Technology (NKTH), DRSCREEN - Developing a computer-based image processing system for diabetic retinopathy screening.

fúziós rendszerek diverzifikálására bevezetett új eljárás hatékonyan alkalmazható objektumok detektálására. *Kapcsolódó publikációk: SCI folyóiratban: [6–8], egyéb: [27–32].*

4.3 Összetett rendszerek a döntéstámogatásban

Csakúgy, mint az objektumok detektálásakor, a döntéstámogatásban is célszerű minél több szempontot, véleményt figyelembe venni. A klasszikus szakterületi megközelítés információk (sajátságok) kinyerése, majd általában gépi tanulást használva ezek alapján adott osztályozási elv melletti döntés meghozatala. A kinyert sajátosságok minőségének javítása mellett tehát hasznos lehet az azokból döntést hozó megközelítések kombinálása is. A területen új **módszert adtam** osztályozók fuzionálására, mely megközelítést egy komplex alkalmazásban kísérletileg is **igazoltam**.

1. **Bevezettem** egy új, összetett döntéstámogató modellt, melynek komponensei klasszikus osztályozó eljárások. Az osztályozók fuzionálása axiomatikus, többségi-, illetve súlyozott többségi szavazómodellek segítségével történik. Különböző, az osztályozás pontosságát mérő energiafüggvények figyelembevételével **módszert adtam** a megfelelő egyedi osztályozók és a döntéseik fuzionálására szolgáló modell kiválasztására. A megközelítés hatékonyságát két- és több osztályos besorolási feladatra is **ellenőriztem** a szakterületi elvárásokkal összhangban. Nevezetesen, a kidolgozott döntéstámogató modell implementálásra került a diabéteszes retinopátiát retinaképek alapján automatikusan szűrő DRSCREEN rendszerbe. Összegezve, **megmutattam** az osztályozók fuzionálásán alapuló új modell hatékonyságát döntéstámogatási problémákban. *Kapcsolódó publikációk: SCI folyóiratban: [9], egyéb: [33, 34].*
2. Az előző pontban ismertetett összetett döntéstámogató rendszer által használt sajátosságok, illetve a rendszer egyes elemei minőségének javításához számos kutatási eredményem kötődik. A korábbi tézispontokban ismertetett eredmények mellett saját eljárásokat **dolgoztam ki** az egyértelműen betegség jeleit mutató, illetve rossz minőségű, automatikus feldolgozásra nem alkalmas képek előszűrésére a lokális mintázat inhomogenitásának mérése alapján. Matematikai morfológiai eszközökkel a sárgafolt, rejtett Markov mezőt használva a retina érhálózatának, míg intenzitásprofilok vizsgálatával mikroaneurizmák kinyerésére **adtam eljárást**. Az intenzitásprofilok gépi tanuláson alapuló vizsgálatához számos új, a profilok függvényként történő interpretációján alapuló sajátosságot **vezettem be**. A mikroaneurizmák detektálására használt összetett rendszer mintájára **megadtam** egy tartomány jellegű objektumok detektálására alkalmas fúziós módszert, melynek hatékonyságát exudátumok – a diabéteszes retinopátiához köthető másik gyakori elváltozások – kinyerésére **ellenőriztem**. Az eredmények a DRSCREEN rendszer egyes komponenseiben kerültek felhasználásra. Összegezve, **megmutattam**, hogy egy komplex döntéstámogató rendszer pontossága hogyan javítható komponensei hatékonyságának növelésével. *Kapcsolódó publikációk: SCI folyóiratban: [10], egyéb: [35–38].*

A közölt eredményekhez számos további kutatásom kapcsolódik, melyeket az esetleges lazább kötődés, illetve terjedelmi okok miatt a disszertációban nem fejtettem ki részletesen és a tézispontokban sem soroltam fel. *Kapcsolódó publikációk: SCI folyóiratban: [11–16], egyéb: [39–55].*

5. Az eredmények hasznosítása

A disszertációban bemutatott eredmények olyan kutatásokhoz kötődnek, melyeket konkrét gyakorlati feladatok inspiráltak. Így a kapott megoldások értelemszerűen felhasználásra kerültek a kapcsolódó alkalmazásokban. Az elsődleges cél teljesítése mellett megvizsgáltam az eredmények más területeken való hasznosíthatóságát is.

A kontúr-, illetve régió jellegű objektumok egyszerűsítésére és tömörítésére vonatkozó eljárásaim beépítésre kerültek a SHARE projekt prototípusába emberi alakzatok detektálására, illetve a szükséges sablonadatbázis hatékony tárolására. A chamfer-illesztés alapú technikákat viszonylag kis számításigényük és egyszerű implementálhatóságuk miatt elsősorban valós idejű alkalmazásokban használják. A sablonillesztés tipikus felhasználási területe a gépjárművekbe szerelt gyalogos- vagy más érdekes objektum detektálása előre elkészített sablonadatbázisok segítségével. Ezen a területen a mintavételező, további gyorsítást eredményező megközelítéseim megjeleníthetősége kézenfekvőnek tűnik. Másik potenciális felhasználási terület a pontfelhő alapú regisztráció, ahol az illesztési eljárás megfelelő mintavételezéssel felgyorsítható.

A szavazórendszerek használata számos szakterületen egyértelmű pontosságnövekedést hoz. A modellek általam megadott térbeli kiterjesztése lehetővé teszi a képfeldolgozó algoritmusok kimenetéből ilyen rendszerek előállítását. Az ezen elven működő bemutatott objektumdetektorok közül több beépítésre került a diabéteszes retinopátia szűrésére alkalmas DRSCREEN rendszerünkbe. A rendszert publikus – klinikai szakemberekkel által annotált – adatbázison már teszteltük, ahol bizonyította a hatékonyságát. A rendszert teszt üzemmódban már elérhetővé tettük, ahol a tervezett – esetlegesen üzleti megfontolásoktól is függő - felhasználási modell alapján webes szolgáltatásként mindenki számára lehetővé kívánjuk tenni, hogy akár nagyobb mennyiségben is elvégezhesse a feltöltött retinaképeinek szűrését. A rendszer klinikai gyakorlatba való bevezetéséhez nagyon alapos további tesztelés szükséges, amelyet jelenleg is folytatunk. Szemészeti partnereink (Debreceni Egyetem és Moorfields Eye Hospital, London) klinikai felügyelete és annotációs munkája mellett kialakítottunk egy tesztelésre alkalmas több ezer képet tartalmazó adatbázist. Előkészület alatt áll továbbá a szakterület két nagy kutatóhelyével közösen egy jóval nagyobb adatbázison való tesztelés is, ami a korszerű rendszerek jelenlegi hatékonyságát hivatott lemérni. A klinikai gyakorlatban a rendszer várhatóan két módon tud megjeleni. Egyrészt egy teljesen automatikus szűrőrendszerként a webes alkalmazásunkhoz hasonlóan, másrészt egy előszűrő/döntéstámogató rendszerként, ami a képeket a szakember számára már előzetes címkézéssel látja el.

A retinaképek feldolgozásában használt képfeldolgozó algoritmusokról és a kapcsolódó fúziós technikáról egyetemi oktatási segédanyag készült, amit a képfeldolgozást oktató kurzusokon használunk. Mivel számos algoritmus MATLAB[®]-ban¹ került implementálásra, ezért alkalmas a tudományos szoftverek alkalmazásának gyakorlati példákon történő illusztrálására is a kapcsolódó kurzusokon. A tárgyalt objektumdetektálási eljárások közül több elosztott környezetben került implementálásra, így esettanulmányként megjelent a párhuzamos programozást oktató kurzusokon. Az eredményeket számos hazai és nemzetközi fórumon bemutattam, melyek közül meghívott előadóként a Szegedi Tudományegyetem Informatikai Tanszékcsoport Szemináriumait (2008, 2015), valamint a 8th International Conference on Applied Informatics (ICAI 2010 (Eger)), 12th Symposium on Programming Languages and Software Tools (SPLST

¹A MATLAB[®] a The MathWorks, Inc. bejegyzett védjegye.

2011 (Tallin)), 16th, 18th, 21st, 22nd, 23rd Summer School on Image Processing (SSIP 2008 (Vienna), 2010 (Cluj-Napoca), 2013 (Veszprém), 2014 (Zagreb), 2015 (Szeged)) eseményeket emelhetem ki. A retinaképek elemzése jelenleg egy sokakat érintő, kurrens, nagyobb rendezvényeken több szekciót is felölelő terület. A témában szekciót szerveztem a 7th, 8th IEEE-EURASIP International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA 2013, 2015), illetve felkérést kaptam szekciókban való megjelenésre a 36th, 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2014, 2015) konferencián. A képi adatok különösen a feldolgozásra használt fúziós módszerekkel együtt nagy mennyiségű adatfeldolgozási és vizualizációs problémákat is indukálnak, illetve az összetett rendszerek kollaboratív formában való megvalósítása kognitív kérdéseket is felvet. Ehhez a területhez kötődően szekciót szerveztem a 3th, 4th, 5th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2013, 2014, 2015) konferenciákon.

A kidolgozott fúziós modellek más képfeldolgozási problémáknál is hatékonyan használhatónak ígérkeznek. Természetes továbblépés a régió alapú kimenetekkel rendelkező eljárások egyesítésére vonatkozó elmélet kidolgozása hasonló elvek mentén. További elméleti visszacsatolás lehet geometriailag jól leírható, de bonyolultabb alakú objektumok vizsgálata; a kapcsolódó feltételrendszer az értekezésben közölt alapmodell segítségével kidolgozhatónak ígérkezik.

Fúziós módszertanaink megkövetelik egy adott problémára különféle megoldásokat kínáló algoritmusok objektív összehasonlítását. Eerre a célra egy webes kollaboratív keretrendszert fejlesztettünk, melynek prototípusa tesztelésre már elérhető. A rendszer segítségével adatbázisok és kapcsolódó manuális annotációk tehetők publikussá. Az egyes algoritmusok kimenetei feltölthetők a rendszerbe olyan esetekre, ahol a manuális annotáció nem publikus; a kiértékelés automatikusan történik meg a rendszerben, ami a tiszta versenyt szolgálja. A rendszer kialakításában a dolgozatban a retinaképekhez kötődő detektálási feladatok és hibamérő függvények adták az alapot. A rendszer támogatja a szakterület kutatócsoportjainak közös munkáját, valamint lehetőséget teremt a fúziós módszerek beható vizsgálatára, mivel ugyanazon adatokra gyűjti össze a kimeneteket. A fúziós rendszerek képfeldolgozási feladatokra való alkalmazásakor számomra mindig nagyon motiváló volt az a gondolat, hogy a terület egyes kutatói úgy tudnak potenciálisan pontosabb rendszereket készíteni, hogy közben meg tudják őrizni saját függetlenségüket is. A módszerek kvantitatív összehasonlítását adó elkerülhetetlen számháború mellett pedig arra is lehetőség nyílik, hogy szerényebb teljesítményű eljárások is értékes részei legyenek az ilyen rendszereknek, amennyiben kellőképpen más elveken alapulnak.

A szerző publikációi

- [1] **A. Hajdu** and I. Pitas, "Optimal approach for fast object-template matching", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 16, no. 8, pp. 2048–2057, 2007, IF: 2.462.
- [2] **A. Hajdu** and I. Pitas, "Piecewise linear digital curve representation and compression using graph theory and a line segment alphabet", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 17, no. 2, pp. 126–133, 2008, IF: 3.315.
- [3] R. Qureshi, L. Kovács, B. Harangi, B. Nagy, T. Peto, and **A. Hajdu**, "Combining algorithms for automatic detection of optic disc and macula in fundus images", *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 116, no. 1, pp. 138–145, 2012, IF: 1.232.
- [4] B. Harangi and **A. Hajdu**, "Detection of the optic disc in fundus images by combining probability models", *Computers in Biology and Medicine*, vol. 65, pp. 10–24, 2015, IF: 1.240.
- [5] **A. Hajdu**, L. Hajdu, A. Jonas, L. Kovács, and H. Tomán, "Generalizing the majority voting scheme to spatially constrained voting", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 22, no. 11, pp. 4182–4194, 2013, IF: 3.111.
- [6] B. Antal and **A. Hajdu**, "Improving microaneurysm detection using an optimally selected subset of candidate extractors and preprocessing methods", *Pattern Recognition*, vol. 45, no. 1, pp. 264–270, 2012, IF: 2.632.
- [7] B. Antal and **A. Hajdu**, "An ensemble-based system for microaneurysm detection and diabetic retinopathy grading", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 59, no. 6, pp. 1720–1726, 2012, IF: 2.348.
- [8] B. Antal and **A. Hajdu**, "Improving microaneurysm detection in color fundus images by using context-aware approaches", *Computerized Medical Imaging and Graphics*, vol. 37, no. 5–6, pp. 403–408, 2013, IF: 1.496.
- [9] B. Antal and **A. Hajdu**, "An ensemble-based system for automatic screening of diabetic retinopathy", *Knowledge-Based Systems*, vol. 60, pp. 20–27, 2014, IF: 3.058.
- [10] I. Lázár and **A. Hajdu**, "Retinal microaneurysm detection through local rotating cross-section profile analysis", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 32, no. 2, pp. 400–407, 2013, IF: 3.799.
- [11] **A. Hajdu**, "Geometry of neighbourhood sequences", *Pattern Recognition Letters*, vol. 24, no. 15, pp. 2597–2606, 2003, IF: 0.809.
- [12] A. Fazekas, **A. Hajdu**, and L. Hajdu, "Metrical neighborhood sequences in $\mathbb{Z}^n$ ", *Pattern Recognition Letters*, vol. 26, no. 13, pp. 2022–2032, 2005, IF: 1.138.
- [13] **A. Hajdu**, L. Hajdu, and R. Tijdeman, "General neighborhood sequences in $\mathbb{Z}^n$ ", *Discrete Applied Mathematics*, vol. 155, no. 18, pp. 2507–2522, 2007, IF: 0.625.
- [14] **A. Hajdu** and T. Tóth, "Approximating non-metrical minkowski distances in $\mathbb{Z}^2$ ", *Pattern Recognition Letters*, vol. 29, no. 6, pp. 813–821, 2008, IF: 1.559.
- [15] G. Kovács and **A. Hajdu**, "Translation invariance in the polynomial kernel space and its applications in knn classification", *Neural Processing Letters*, vol. 37, no. 2, pp. 207–233, 2013, IF: 1.240.

- [16] B. Harangi and **A. Hajdu**, "Automatic exudate detection by fusing multiple active contours and regionwise classification", *Computers in Biology and Medicine*, vol. 54, pp. 156–171, 2014, IF: 1.475.
- [17] **A. Hajdu**, A. Roubies, and I. Pitas, "Optimized chamfer matching for snake-based image contour representations", in *IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, 2006, pp. 1017–1020.
- [18] **A. Hajdu**, C. Giamas, and I. Pitas, "Object simplification using a skeleton-based weight function", in *IEEE International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, vol. 2, 2007, pp. 1–4.
- [19] R. Harangozó, P. Veres, and **A. Hajdu**, "Subsampling strategies to improve learning-based retina vessel segmentation", in *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2009, pp. 3349–3352.
- [20] **A. Hajdu** and I. Pitas, "Compression optimized tracing of digital curves using graph theory", in *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, vol. 6, 2007, pp. 453–456.
- [21] H. Tomán, **A. Hajdu**, J. Szakács, D. Hornyik, A. Csutak, and T. Pető, "Thickness-based binary morphological improvement of distorted digital line intersections", in *Fifth Hungarian Conference on Computer Graphics and Geometry*, 2010, pp. 133–139.
- [22] B. Harangi, R. Qureshi, A. Csutak, T. Pető, and **A. Hajdu**, "Automatic detection of the optic disc using majority voting in a collection of optic disc detectors", in *IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)*, 2010, pp. 1329–1332.
- [23] B. Harangi and **A. Hajdu**, "Improving the accuracy of optic disc detection by finding maximal weighted clique of multiple candidates of individual detectors", in *9th IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)*, 2012, pp. 602–605.
- [24] H. Tomán, L. Kovács, . Jónás, L. Hajdu, and **A. Hajdu**, "A generalization of majority voting scheme for medical image detectors", in *Hybrid Artificial Intelligent Systems*, ser. Lecture Notes in Computer Science, E. Corchado, M. Kurzyński, and M. Woźniak, Eds., vol. 6679, Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 189–196.
- [25] H. Tomán, L. Kovács, A. Jónás, L. Hajdu, and **A. Hajdu**, "Generalized weighted majority voting with an application to algorithms having spatial output", in *Hybrid Artificial Intelligent Systems*, ser. Lecture Notes in Computer Science, E. Corchado, V. Snasel, A. Abraham, M. Wozniak, M. Grana, and S. Cho, Eds., vol. 7209, Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 56–67.
- [26] **A. Hajdu**, L. Hajdu, L. Kovács, and H. Tomán, "Diversity measures for majority voting in the spatial domain", in *Hybrid Artificial Intelligent Systems*, ser. Lecture Notes in Computer Science, J. Pan, M. Polycarpou, M. Woźniak, A. de Carvalho, H. Quintián, and E. Corchado, Eds., vol. 8073, Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 314–323.
- [27] B. Antal and **A. Hajdu**, "An ensemble-based microaneurysm detector for retinal images", in *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2011, pp. 1621–1624.
- [28] B. Antal, I. Lázár, and **A. Hajdu**, "An ensemble approach to improve microaneurysm candidate extraction", in *Communications in Computer and Information Science*, M. Obaidat, G. Tsihrintzis, and J. Filipe, Eds., vol. 222, Springer Verlag, 2012, ch. Signal Processing and Multimedia Applications, pp. 378–394.

- [29] B. Antal and **A. Hajdu**, "Evaluation of preprocessing methods for microaneurysm detection", in *International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA)*, 2013, pp. 723–726.
- [30] B. Antal and **A. Hajdu**, "Improving microaneurysm detection in color fundus images by using an optimal combination of preprocessing methods and candidate extractors", in *European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2010, pp. 1224–1228.
- [31] B. Antal, I. Lázár, **A. Hajdu**, Z. Török, A. Csutak, and T. Pető, "Evaluation of the grading performance of an ensemble-based microaneurysm detector", in *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2011, pp. 5943–5946.
- [32] B. Antal, I. Lázár, and **A. Hajdu**, "An adaptive weighting approach for ensemble-based detection of microaneurysms in color fundus images", in *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2012, pp. 5955–5958.
- [33] B. Antal, **A. Hajdu**, Z. Szabó-Maros, Z. Török, A. Csutak, and T. Pető, "A two-phase decision support framework for the automatic screening of digital fundus images", *Journal of Computational Science*, vol. 3, no. 5, pp. 262–268, 2012.
- [34] B. Antal and **A. Hajdu**, "A prefiltering approach for an automatic screening system", in *IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP)*, 2009, pp. 265–268.
- [35] G. Kovács and **A. Hajdu**, "Extraction of vascular system in retina images using averaged one-dependence estimators and orientation estimation in hidden markov random fields", in *IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)*, 2011, pp. 693–696.
- [36] B. Antal and **A. Hajdu**, "A stochastic approach to improve macula detection in retinal images", *Acta Cybernetica*, vol. 20, pp. 5–15, 2011.
- [37] I. Lázár and **A. Hajdu**, "Microaneurysm detection in retinal images using a rotating cross-section based model", in *IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)*, 2011, pp. 1405–1409.
- [38] B. Nagy, B. Antal, B. Harangi, and **A. Hajdu**, "Ensemble-based exudate detection in color fundus images", in *International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA)*, 2011, pp. 700–703.
- [39] **A. Hajdu**, L. Hajdu, and R. Tijdeman, "Approximation of the euclidean distance by chamfer distances", *Acta Cybernetica*, vol. 20, no. 3, pp. 399–417, 2012.
- [40] A. Roubies, **A. Hajdu**, and I. Pitas, "Improving concavity performance of snake algorithms", in *International Symposium on Control, Communications, and Signal Processing (ISCCSP)*, 2006, pp. 1–4.
- [41] **A. Hajdu** and I. Pitas, "Content adaptive heterogeneous snakes", in *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, vol. 1, 2007, pp. 253–256.
- [42] **A. Hajdu** and I. Pitas, "Tracing on heterogeneous grids to improve the concavity performance of snake algorithms", in *International Symposium on Signal Processing and Its Applications (ISSPA)*, 2007, pp. 1–4.
- [43] I. Lázár and **A. Hajdu**, "Segmentation of vessels in retinal images based on directional height statistics", in *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2012, pp. 1458–1461.

- [44] B. Harangi and **A. Hajdu**, “Improving automatic exudate detection based on the fusion of the results of multiple active contours”, in *IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)*, 2013, pp. 45–48.
- [45] B. Harangi and **A. Hajdu**, “Detection of exudates in fundus images using a markovian segmentation model”, in *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2014, pp. 130–133.
- [46] B. Harangi, I. Lázár, and **A. Hajdu**, “Automatic exudate detection using active contour model and regionwise classification”, in *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2012, pp. 5951–5954.
- [47] B. Harangi, B. Antal, and **A. Hajdu**, “Automatic exudate detection with improved naive bayes classifier”, in *International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS)*, 2012, pp. 1–4.
- [48] B. Nagy, B. Antal, and **A. Hajdu**, “Image database clustering to improve microaneurysm detection in color fundus images”, in *International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS)*, 2012, pp. 1–6.
- [49] B. Nagy, B. Antal, and **A. Hajdu**, “Image database clustering to improve exudate detection in color fundus images”, in *International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA)*, 2013, pp. 727–731.
- [50] J. Tóth, L. Szakács, and **A. Hajdu**, “Finding the optimal parameter setting for an ensemble-based lesion detector”, in *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2014, pp. 32532–3536.
- [51] J. Tóth, H. Tomán, and **A. Hajdu**, “Improving the performance of an ensemble-based exudate detection system using stochastic parameter optimization”, in *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2015, pp. 1–4.
- [52] **A. Hajdu**, C. Giamas, N. Vretos, and I. Pitas, “Metadata description of thermal videos for rescue operations”, in *International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, vol. 2, 2007, pp. 1–4.
- [53] **A. Hajdu**, T. Pető, A. Biró, R. Harangozó, J. Hülvely, Z. Török, and A. Csutak, “Extracting metadata from fundus images for the screening of diabetic retinopathy”, in *IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP)*, 2009, pp. 259–263.
- [54] Z. Török, T. Pető, E. Csősz, E. Tukacs, M. Molnár, M. Maros-Szabó, A. Berta, J. Tózsér, **A. Hajdu**, V. Nagy, B. Domokos, and A. Csutak, “Tear fluid proteomics multimarkers for diabetic retinopathy screening”, *BMC Ophthalmology*, vol. 13, no. 40, pp. 1–8, 2013, IF: 1.075.
- [55] Z. Török, T. Pető, E. Csősz, E. Tukacs, M. Molnár, A. Berta, J. Tózsér, **A. Hajdu**, V. Nagy, B. Domokos, and A. Csutak, “Combined methods for diabetic retinopathy screening, using retina photographs and tear fluid proteomics biomarkers”, *Journal of Diabetes Research*, vol. Article ID 623619, pp. 1–8, 2014, IF: 3.536.

További hivatkozások

- [56] H. Barrow, J. Tenenbaum, R. Bolles, and H. Wolf, "Parametric correspondence and chamfer matching: two new techniques for image matching", in *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI) - Volume 2*, Cambridge, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1977, pp. 659–663.
- [57] D. Gavrilu and V. Philomin, "Real-time object detection for smart vehicles", in *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, vol. 1, 1999, pp. 87–93.
- [58] M. Kumar, P. Torr, and A. Zisserman, "Extending pictorial structures for object recognition", in *British Machine Vision Conference*, London, 2004, pp. 789–798.
- [59] D. Huttenlocher, G. Klanderman, and W. Rucklidge, "Comparing images using the hausdorff distance", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 15, no. 9, pp. 850–863, 1993.
- [60] P. Felzenszwalb and D. Huttenlocher, "Pictorial structures for object recognition", *International Journal of Computer Vision*, vol. 61, no. 1, pp. 55–79, 2005.
- [61] T. Zhao and R. Nevatia, "Stochastic human segmentation from a static camera", in *Workshop on Motion and Video Computing*, Orlando, Florida, 2002, pp. 9–14.
- [62] F. Xu, X. Liu, and K. Fujimura, "Pedestrian detection and tracking with night vision", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 63–71, 2005.
- [63] G. Borgefors, "Hierarchical chamfer matching: a parametric edge matching algorithm", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 10, no. 6, pp. 849–865, 1988.
- [64] J. You, W. Zhu, E. Pissaloux, and H. Cohen, "Hierarchical image matching: a chamfer matching algorithm using interesting points", in *Third Australian and New Zealand Conference on Intelligent Information Systems (ANZIIS)*, 1995, pp. 70–75.
- [65] A. Rosenfeld, "Arcs and curves in digital pictures", *Journal of ACM*, vol. 20, no. 1, pp. 81–87, 1973.
- [66] R. Klette and A. Rosenfeld, "Digital straightness—a review", *Discrete Applied Mathematics*, vol. 139, no. 1–3, pp. 197–230, 2004.
- [67] X. Huo and J. Chen, "Jbeam: multiscale curve coding via beamlets", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 14, no. 11, pp. 1665–1677, 2005.
- [68] L. Lam and C. Suen, "Application of majority voting to pattern recognition: an analysis of its behavior and performance", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 27, no. 5, pp. 553–568, 1997.
- [69] L. Hansen and P. Salamon, "Neural network ensembles", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no. 10, pp. 993–1001, 1990.
- [70] S. Cho and J. Kim, "Combining multiple neural networks by fuzzy integral for robust classification", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 25, no. 2, pp. 380–384, 1995.

- [71] E. Kong and T. Dietterich, "Error-correcting output coding corrects bias and variance", in *International Conference on Machine Learning*, 1995, pp. 313–321.
- [72] T. Ho, J. Hull, and S. Srihari, "Decision combination in multiple classifier systems", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 16, no. 1, pp. 66–75, 1994.
- [73] Y. Huang and C. Suen, "A method of combining multiple experts for the recognition of unconstrained handwritten numerals", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 17, no. 1, pp. 90–94, 1995.
- [74] L. Xu, A. Krzyzak, and C. Suen, "Methods of combining multiple classifiers and their applications to handwriting recognition", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 22, no. 3, pp. 418–435, 1992.
- [75] L. Kuncheva, *Combining Pattern Classifiers: Methods and Algorithms*. Wiley-Interscience, 2004.
- [76] L. Kuncheva, C. Whitaker, C. Shipp, and R. Duin, "Limits on the majority vote accuracy in classifier fusion", *Pattern Analysis & Applications*, vol. 6, no. 1, pp. 22–31, 2003.
- [77] M. Niemeijer, M. Loog, M. D. Abramoff, M. A. Viergever, M. Prokop, and B. van Ginneken, "On combining computer-aided detection systems", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 30, no. 2, pp. 215–223, 2011.
- [78] Q. Du, V. Faber, and M. Gunzburger, "Centroidal voronoi tessellations: applications and algorithms", *SIAM Review*, vol. 41, no. 4, pp. 637–676, 1999.
- [79] Q. Du, M. Gunzburger, and L. Ju, "Constrained centroidal voronoi tessellations for surfaces", *SIAM Journal on Scientific Computing*, vol. 24, no. 5, pp. 1488–1506, 2003.