

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Efficient Parameter Optimization of Ensembles in Medical Image Analysis

Tóth János

Témavezető: Dr. Hajdu András



DEBRECENI EGYETEM
Informatikai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2022

Tartalom

1. Háttér	3
2. Az értekezés fő eredményei	6
2.1. Optimalizálás az adathalmaz mintavételezésével .	6
2.1.1. Szimulált hűtés mintavételezésen alapuló kiértékeléssel	6
2.1.2. A mintaméret meghatározása	9
2.2. Optimalizálás képleskálázással	10
2.2.1. Szimulált hűtés képleskálázáson alapuló kiértékeléssel	11
2.2.2. A skálázási szint kiválasztása	13
2.3. Optimalizálás kombinált zajos kiértékeléssel . . .	14
2.3.1. Szimulált hűtés kombinált zajos kiértékeléssel .	15
Hivatkozások	17
Publikációs lista	19

1. Háttér

Napjainkban az egészségügyi ellátásban feldolgozandó és elemzendő adatok többségét – a különböző omikai (például genomikai és proteomikai) adatok mellett – az orvosi képek teszik ki. Az orvosi képek manuális vizsgálata azonban munkaigényes és emberi hibáknak kitett folyamat. A diagnózis felállítását segítő megbízható automatizált módszerek iránti növekvő igény hívta életre az orvosi képelemzés interdiszciplináris kutatási területét. E terület célja a képfeldolgozásra, az alakfelismerésre, a gépi tanulásra és az orvostudományra támaszkodva olyan módszerek kifejlesztése, amelyek reprodukálható és objektív módon képesek kinyerni a klinikai szempontból releváns információkat az orvosi képekből.

Mivel az orvosi diagnózissal kapcsolatos eljárások kritikusak, általában nem lehet egyedi algoritmusokra támaszkodni a végrehajtásuk során. Emiatt gyakran algoritmusok egy együttesét alkalmazzák ilyen célokra (lásd például [1–5]).

Egy együttes (ensemble) olyan algoritmusokból (tagokból) épül fel, amelyek különböző elveken, modelleken stb. alapulnak egy adott probléma megoldására [6]. A tagok sokfélesége lehetővé teszi, hogy az együttes rugalmasabban reagáljon az eltérő körülményekre [7]. Az együttesek alapötlete az, hogy a tagok kimeneteit egy megfelelő aggregálósabály segítségével kombinálva olyan rendszer áll elő, amely felülmúlja az egyes tagok önálló teljesítményét, ha bizonyos feltételek teljesülnek azok diverzitására és egyéni teljesítményére vonatkozóan [8, 9].

Az együttesek esetében fontos figyelembe venni, hogy a tagok egyénileg optimális paraméterbeállításainak használata nem feltétlenül maximalizálja az együttes teljesítményét. Emiatt az együttes szintjén szükséges a paraméeroptimalizálást elvégezni,

ami a tagok paramétereinek számától és tartományától függően nagyméretű problémához vezethet.

Az ilyen nagyméretű kombinatorikus optimalizálási problémák megoldására jellemzően sztochasztikus keresőket alkalmaznak, amelyek példányalapú és modellalapú módszerekre oszthatók. E két csoport között a fő különbség az, hogy a példányalapú módszerek, mint például a szimulált hűtés (simulated annealing, SA) [10] és a genetikus algoritmusok [11] csak az aktuális megoldás(ok) alapján generálnak új jelölt megoldásokat, míg a modellalapú módszerek, mint például a hangyakolónia-optimalizálás [11] és a keresztentrópia módszer [12] költségesebb, adaptív sztochasztikus mechanizmusok segítségével generálják azokat.

A sztochasztikus keresők hatékonyan képesek jó megoldásokat találni nagyméretű problémákra, némi pontosságot feláldozva a keresés költségének jelentős csökkentése érdekében. Azonban még egy sztochasztikus keresés is lehet nagyon költséges, ha a megoldások kiértékelése maga is költséges, például a célfüggvény magas komplexitása vagy a tanulóhalmaz nagy mérete miatt, mely utóbbi gyakran szükséges a paraméterek túlillesztésének elkerüléséhez.

A kutatás célkitűzése az volt, hogy megoldást találjunk a fent említett problémára. Az értekezésben három sztochasztikus módszer kerül bemutatásra orvosi képelemzési feladatokat végző együttesek hatékony paraméteroptyimalizálására. Mindhárom módszer az SA metaheurisztikán alapul, amelyet egyszerűsége és kedvező tulajdonságai miatt széles körben használnak mind diszkrét, mind folytonos optimalizálási problémák megoldására.

A javasolt módszerek a keresés teljes költségének csökkentése érdekében zajos kiértékelést alkalmaznak különböző módokon. A célfüggvény értéke minden esetben részleges tanulóadatok használatával kerül becslésre a megoldások kiértékeléséhez, azaz az együttes teljesítményének kiértékeléséhez egy adott paraméter-

beállítás mellett. Természetesen a részleges tanulóadatok használatából eredő zaj miatt a keresők egy rosszabb megoldást jobbnak tekinthetnek és fordítva. Emiatt olyan stratégiák kerültek kidolgozásra az egyes módszerekhez, amelyek a kiértékeléshez használt adatok mennyiségével szabályozzák a zajt a keresési folyamat során az elérhető megoldás minőségének megőrzése érdekében.

A következő fejezetben röviden áttekintésre kerülnek az értekezés fő eredményei a három kidolgozott módszerhez kapcsolódóan. A 2.1. szakaszban egy olyan módszer kerül bemutatásra, amely a keresés költségét a megoldások a tanulóhalmaz véletlen mintavételezésével nyert részhalmazai felett történő kiértékelésével csökkenti [P4, P8, P14, P16, P18]. Egy másik megközelítésként, a 2.2. szakaszban bemutatásra kerül egy módszer, amely a keresés során a tanulóhalmazbeli képek egy piramis reprezentációjának egyre magasabb felbontású szintjeit használja a megoldások kiértékeléséhez [P4, P11]. Végül, a 2.3. szakaszban egy olyan módszer kerül bemutatásra, amely az előző két megközelítés együttes alkalmazásával képes tovább csökkenteni a keresés költségét, ha a tanulóhalmaz elemszáma kisebb, mint egy problémafüggő érték [P1, P4, P11].

2. Az értekezés fő eredményei

A következő szakaszokban az értekezés fő eredményei kerülnek bemutatásra a három kidolgozott módszerhez kapcsolódóan.

2.1. Optimalizálás az adathalmaz mintavételezésével

Az értekezésben bemutatott első módszer algoritmusegyüttesek paramétereinek nagyméretű (képi) tanulóhalmazok felett történő optimalizálásának gyorsítására került kidolgozásra. Ez egy olyan mintavételezésen alapuló kiértékelési módszert alkalmaz, amely a keresés költségének csökkentése érdekében minden keresési lépésben a tanulóadatokat csak egy véletlenszerűen kiválasztott, minimálisan szükséges számosságú részhalmazát használja. A keresési folyamat során szükséges mintaméretetek elméleti úton kerülnek meghatározásra az SA zajjal terhelt kiértékelés melletti konvergenciájára vonatkozó eredmények adaptálásával. A módszer hatékonysága két olyan algoritmusegyüttes paraméteroptimalizálási problémáján keresztül lett megmutatva, amelyek retinaképeket osztályoznak a diabéteszes retinopátia (DR) jelenléte szerint.

2.1.1. SA mintavételezésen alapuló kiértékeléssel

Az együttesek paraméteroptimalizálásának nagyméretű tanulóhalmazokon történő gyorsítása érdekében először azt vizsgáltuk, hogy milyen hatása van annak, ha a célfüggvény a tanulóhalmaz egy rögzített méretű, minden keresési lépésben véletlenszerűen kiválasztott részhalmazának felhasználásával kerül kiértékelésre. Hasonló heurisztikus elveket alkalmaz a sztochasztikus és a mini-batch gradiens módszer gépi tanulási feladatok esetében. Azaz,

a célfüggvény a tanulóhalmaz egyetlen elemén vagy egy rögzített elemszámú részhalmazán kerül kiértékelésre a modell súlyainak hangolása során [13].

1. tézispont. *Kidolgoztam egy sztochasztikus módszert algoritmusegyüttesek nagyméretű tanulóhalmazok felett történő paraméteroptimalizálására. A módszer a szimulált hűtés metaheurisztikán alapul és mintavételezéses célfüggvénykiértékelést alkalmaz. Klinikai képhalmazokon végzett kísérleteken keresztül megmutattam, hogy e módszer alkalmazása az optimalizálási folyamat költségének jelentős csökkenését eredményezi a standard szimulált hűtéshez hasonlóan, miközben megőrzi az elérhető megoldás minőségét.*

Kapcsolódó publikációk: [P4], [P8], [P14], [P16], [P18]

A javasolt SA with Sampling-based Evaluation (SA-SBE) módszerhez kapcsolódó fő eredmény a tanulóhalmaz mintavételezésének és a célfüggvény zajjal terhelt kiértékelésének megfeleltetése. A fent említett heurisztikus módszerek rögzített mintaméretével ellentétben az SA-SBE esetén a keresési folyamat során szükséges mintaméretetek elméleti úton kerülnek meghatározásra az SA zajjal terhelt kiértékelés melletti konvergenciájára vonatkozó eredmények adaptálásával (lásd 2.1.2. szakasz).

Az SA-SBE alkalmazhatóságának és hatékonyságának kiértékeléséhez két algoritmusegyüttes paraméterei kerültek optimalizálásra a DR mikroaneurizmák (MA-k) detektálásán alapuló előszűrésére. Az *Ensemble 1* együttes kilenc hagyományos MA-detektáló algoritmusból áll, ami az *Ensemble 2* esetében egy olyan saját fejlesztésű módszerrel került bővítésre, amely két mély konvolúciós neurális hálózatot egyesít az MA-k detektálásához.

Mivel az MA-k pontszerű elváltozások, az együttes tagjai úgy kerültek implementálásra, hogy ne az MA-k régióit, hanem azok középpontjait nyerjék ki jelölteként. Emiatt a tagok által egy adott képen azonosított MA jelöltek aggregálásához be kellett vezetni egy közelségi relációt annak eldöntéséhez, hogy két jelölt ugyanazt a MA-t jelöli-e vagy sem. Ezenkívül kiszámításra került egy konfidencia érték is a tagok közötti egyetértés mértékének megadásához egy adott jelölt tekintetében. Ez az aggregációs módszer nagyon számításigényes, ezért ez a probléma alkalmas volt az SA-SBE hatékonyságának kiértékelésére.

Az együttesek paraméterei először a képszintű diagnosztikai pontosság szempontjából kerültek optimalizálásra. Ebben az esetben az álpozitív MA-k alacsony száma a kívánatos. Ezután az együttesek az egyes MA-k pontos detektálására lettek optimalizálva. A kísérletek eredményei mindkét esetben azt mutatták, hogy a javasolt módszer képes jelentősen csökkenteni az optimalizáláshoz szükséges időt anélkül, hogy az elérhető megoldás minősége romlana.

Az SA-SBE módszer és a kapcsolódó kvantitatív eredmények az értekezés 3. fejezetében kerülnek részletesen bemutatásra, és a [P4] folyóiratcikkből jelentek meg. A módszer alapját képező, az adathalmaz-mintavételezés együttesek paraméteroptymalizálásának gyorsítására való alkalmazására irányuló, előzetes vizsgálataink eredményeit a [P16] és a [P18] konferenciacikkekben tettük közzé. Az *Ensemble 2*-ben használt, mélytanuláson alapuló MA-detektor leírása a [P14] konferenciacikkből jelent meg. Továbbá, a retinaképek elemzésére alkalmazott együttes módszertant a [P8] folyóiratcikkből ismertettük.

2.1.2. A mintaméret meghatározása

2. tézispont. *Megadtam egy zárt alakú összefüggést egy megoldás egy adott iterációban történő kiértékeléséhez szükséges minimális mintaméret meghatározására, amely biztosítja a szimulált hűtés sztochasztikus konvergenciájának fenntartását tetszőleges hűtési ütemezés és tanulóhalmaz-méretet mellett.*

Kapcsolódó publikációk: [P4], [P16], [P18]

Annak érdekében, hogy ki lehessen aknázni a részleges tanulóadatok használatából eredő alacsonyabb számítási költséget az elérhető megoldás minőségének megőrzése mellett, kidolgozásra került egy mintavételi stratégia a zaj, azaz a minta alapján becsült célfüggvényérték és a teljes tanulóhalmaz alapján számított tényleges célfüggvényérték közötti különbség, szabályozására a pontatlan méréseket használó SA konvergenciájára vonatkozó eredményekből származtatott elméleti megkötések [14, 15] alapján.

Nevezetesen, az SA-SBE mintavételi stratégiája biztosítja azt, hogy a módszer ugyan azt a sztochasztikus konvergenciát mutassa a megoldások n méretű Λ_n minták használatával történő kiértékelése esetén, mint az SA a teljes N méretű Λ_N ($0 < n \leq N$) tanulóhalmaz használatával. Ennek érdekében a zaj $\sigma_{d_{\Lambda_n}}$ szórása a keresési folyamat során a módszer T hőmérsékletének függvényében kerül szabályozásra megfelelő méretű minták választásával.

1. tétel. *Tetszőleges hűtési ütemezés mellett, a k -adik iterációban minimálisan szükséges $n^{(k)}$ mintaméret, amely biztosítja az SA sztochasztikus konvergenciájának fenntartását a következő módon határozható meg:*

$$n^{(k)} = \frac{N\sigma_{max}^2}{(N-1)\sigma_{d_n}^{(k)2} + \sigma_{max}^2},$$

ahol σ_{max} a célfüggvény szórásának maximális lehetséges értéke, $\sigma_{d_n}^{(k)}$ pedig a $\sigma_{d_{\Lambda_n}}$ érték megengedett maximuma az aktuális $T^{(k)}$ hőmérséklet mellett az 1. lemma alapján.

1. lemma. A $\sigma_{d_n}^{(k)}$ egy kellően egyszerű általános alakja, amely a $T^{(k)}$ hőmérséklet mellett maximalizálja az értékét a következő módon adható meg:

$$\sigma_{d_n}^{(k)} \gtrsim T^{(k)}(1 - \epsilon)^k, \quad 0 < \epsilon \ll 1.$$

Az SA-SBE mintavételezési stratégiájának algoritmikus megvalósításának leírása, valamint a 1. tétel és a 1. lemma bizonyítása a disszertáció 3.2. szakaszában található, és a [P4] folyóiratcikkben került publikálásra. Az adathalmaz-mintavételezés együttesek paraméteroptymalizálásának gyorsítására való alkalmazására irányuló, előzetes vizsgálataink eredményei a [P16] és a [P18] konferenciacikkekben jelentek meg.

2.2. Optimalizálás képleskálázással

Egy másik megközelítésként az együttesek paraméteroptymalizálásának részleges tanulóadatok használatával történő gyorsítására, az értekezésben bemutatott második módszer a keresés előrehaladtával a megoldások kiértékeléséhez a tanulóhalmazbeli képek egy piramis reprezentációjának egyre magasabb felbontású

szintjeit használja. A konvergenciafeltételek teljesülésének biztosításához egy stratégia lett javasolva az egyes iterációkban használható legalacsonyabb felbontás meghatározására. E módszer alkalmazhatósága és hatékonysága egy komputertomográfiai felvételeken történő csontszegmentálásra kidolgozott algoritmusegyüttes paraméteroptimalizálási problémáján keresztül lett megmutatva.

2.2.1. SA képleskálázáson alapuló kiértékeléssel

E módszer a tanulólalmazbéli képek egy piramis reprezentációját használja a megoldások kiértékelésének gyorsításához. Egy L szintű képpiramis egy kép $L \in \mathbb{N}$ hierarchikusan leskálázott változatának egy gyűjteménye, amelyben minél magasabb az l szint ($l \in 0, 1, \dots, L-1$), annál alacsonyabb a kép felbontása. Megjegyzendő, hogy a képpiramis L szintjeinek számát a tanulólalmazbéli képek felbontásától és az alkalmazási területtől függően kell megválasztani.

3. tézispont. *Kidolgoztam egy sztochasztikus módszert képfeldolgozó (szegmentáló) algoritmusegyüttesek paraméteroptimalizálására. A módszer a szimulált hűtés metaheurisztikán alapul és a keresés során a tanulólalmazbéli képek egy piramis reprezentációjának egyre magasabb felbontású szintjeit használja a célfüggvény kiértékeléséhez. Klinikai képadatokon végzett kísérleteken keresztül megmutattam, hogy e módszer alkalmazása az optimalizálási folyamat költségének jelentős csökkenését eredményezi az eredeti felbontás használatához hasonlóan, miközben megőrzi az elérhető megoldás minőségét.*

Kapcsolódó publikációk: [P4], [P11]

Feltételezve, hogy a célfüggvény-érték kiszámításának költsége arányos a tanulóhalmazbeli képek felbontásával, a célfüggvény-érték becslésének kiszámítása az l -edik skálázási szintet (a hozzá tartozó γ_l skálázási tényezővel) használva $1/\gamma_l^2$ -szer alacsonyabb költséggel jár, mint az eredeti felbontás használata. Azonban az l -edik skálázási szint használata egy d_l zajt eredményez, amely a becsült és a tényleges célfüggvény-érték különbsége.

A javasolt SA with Downscaling-based Evaluation (SA-DBE) módszer esetében egy olyan stratégia került kidolgozásra a konvergenciafeltételek biztosításához, amely minden iterációban meghatározza a zaj maximálisan megengedett szórását, és ez alapján a legmagasabb használható l skálázási szintet (lásd 2.2.2. szakasz).

Annak demonstrálására, hogy a javasolt módszer képes csökkenteni a keresés időigényét az elérhető megoldás minőségének megőrzése mellett, egy öt hagyományos algoritusból álló csontszegmentáló együttes paraméteroptimalizálási problémája került felhasználásra. Az algoritmusok kimenetei bináris maszkok, amelyek aggregálásával egy valószínűségi térkép állt elő a csontstruktúrák kinyeréséhez.

Az SA-DBE módszer részletes leírása és a kapcsolódó csontszegmentálási eredmények az értekezés 4. fejezetében található, és a [P11] konferenciacikkben jelentek meg. Továbbá, a zaj egy adott iterációban megengedett maximális szórására vonatkozó elméleti eredmények, amelyek a skálázási szint kiválasztási stratégia kidolgozásához kerültek felhasználásra, a [P4] folyóiratcikkben kerültek publikálásra.

2.2.2. A skálázási szint kiválasztása

4. tézispont. *A tanulóhalmazbeli képek egy adott piramis reprezentációját tekintve megadtam egy stratégiát a legmagasabb skálázási szint kiválasztásához, amely egy adott iterációban használható a megoldás kiértékeléséhez a szimulált hűtés sztochasztikus konvergenciájának fenntartása mellett.*

Kapcsolódó publikációk: [P4], [P11]

A módszer konvergenciájának fenntartásához kidolgozásra került egy stratégia, amely minden k iterációban kiválasztja a megfelelő l skálázási szintet a kapcsolódó konvergenciakritériumok [14, 15] alapján a zaj szabályozásához.

Ehhez a stratégiához meg kell határozni a zaj σ_{d_l} szórását a képpiramis minden egyes l skálázási szintjéhez. Érdeemes megjegyezni, hogy a zaj nagysága és tulajdonságai jelentősen eltérhetnek a különböző célfüggvények esetében. Bizonyos esetekben a σ_{d_l} maximális értékének elméleti meghatározása egy adott l szintre vonatkozóan egyszerű lehet, míg más célfüggvények esetén ez egy nehéz probléma.

Továbbá, egy adott, természetes képekből álló adathalmazt tekintve a zaj empirikus szórása egy l szint esetén várhatóan jelentősen kisebb lesz, mint az elméleti maximum. Ezért még abban az esetben is, ha a zaj elméleti maximális szórása meghatározható, előnyös a σ_{d_l} értékét a képpiramis minden egyes l szintjére úgy becsülni, hogy ezeket az értékeket az kiértékeléshez használt ground truth-on megmérjük.

Miután a σ_{d_l} értéket a képpiramis minden egyes l szintjéhez megbecsültük, a javasolt stratégia meghatározza a legmagasabb l szintet (azaz a legkisebb felbontást), ahol a σ_{d_l} kisebb vagy egyen-

lő a zaj szórásának maximális megengedett $s^{(k)}$ értékénél, amely érték az alkalmazott hűtési ütemezésből és az SA konvergenciafeltételeiből származtatható.

A javasolt skálázási szint kiválasztási stratégia részletes leírása az értekezés 4.2.1. és 4.2.2. szakaszaiban található, és a [P11] konferenciacikkben került publikálásra. E megközelítés egy konkrét megvalósításának leírásért lásd az értekezés 4.4.3. szakaszát.

2.3. Optimalizálás kombinált zajos kiértékeléssel

Az értekezésben bemutatott harmadik módszer azon a megfigyelésen alapul, hogy az optimalizálási feladattól függően a képek leskálázása kisebb szórású zajt eredményezhet, mint az adathalmaz mintavételezése ugyanolyan költségnyereség mellett. Ezért ez a módszer olyan célfüggvény-kiértékelést alkalmaz, amely a tanulóadatokat mintavételezését és a mintabeli képek leskálázását kombinálja az együttes paramétoptimalizálásának további gyorsítására. Ehhez kidolgozásra került egy olyan stratégia, amely a pontatlan méréseket használó SA konvergenciájára vonatkozó eredmények adaptálásával határozza meg a megfelelő skálázási szintet és mintaméretet minden iterációban. Egy komputertomográfiai felvételeken tüdőszegmentálást végző algoritmus együttes paramétoptimalizálási problémáján keresztül meg lett mutatva, hogy ez a módszer lehetővé teszi az optimalizálási folyamat időigényének további csökkentését az előző két módszerhez viszonyítva a megoldás minőségének megőrzése mellett, ha a tanulóhalmaz mérete egy problémaspecifikus érték alatt van.

2.3.1. SA kombinált zajos kiértékeléssel

5. tézispont. *Kidolgoztam egy sztochasztikus módszert képfeldolgozó (szegmentáló) algoritmusegyüttesek paraméteroptimalizálásának gyorsításához. A módszer a szimulált hűtés metaheurisztikán alapul és a célfüggvény kiértékeléséhez a tanulólthalmaz mintavételezését a képek leskálázásával kombinálja. Klinikai képadatokon végzett kísérleteken keresztül megmutattam, hogy a mintaméret és a skálázási szint megfelelő kombinációinak használatával az egyes iterációkban a keresési folyamat költsége kisebb, mint ezen megközelítések közül csak az egyik használatával, feltéve, hogy a tanulólthalmaz elemszáma egy problémaszpecifikus értéknél kisebb.*

Kapcsolódó publikációk: [P1], [P4], [P11]

Az adathalmaz-mintavételezés és a képleskálázás kombinálásakor egy olyan d zaj áll elő, amely az adathalmaz mintavételezéséből származó d_n és a képek leskálázásából származó d_l zajok összege. Mivel a d_n és a d_l egymástól függetlenek, ezért e zajok összegének σ_d szórása a szórásnégyzeteik összegének négyzetgyökeként számítható ki.

Az SA with Combined Noisy Evaluation (SA-CNE) módszer célja a keresés teljes költségének minimalizálása, például a számítási idő tekintetében. Ehhez minden k iterációban meg kell találni azt az l skálázási szintet és n mintaméretet, amelyek kombinációja minimalizálja a $C_{l,n}^{(k)}$ költséget, miközben biztosítani kell, hogy $\sigma_d^{(k)}$ kisebb legyen, mint annak $s^{(k)}$ megengedett maximális értéke, hasonlóan, mint a 2.1. és 2.2. szakaszokban bemutatott módszerek esetében.

A módszer először minden l skálázási szinthez, ahol a szinthez tartozó zaj szórására teljesül, hogy $\sigma_{d_l} \leq s^{(k)}$, meghatározza a minimálisan szükséges n mintaméretet az 1. tétel alapján. Ezt követően kiszámítja az (l, n) párhoz tartozó $C_{l,n}^{(k)}$ költséget. Végül pedig kiválasztja a kiértékeléshez azt az (l, n) párt, amely esetében a $C_{l,n}^{(k)}$ költség minimális.

A fenti kiválasztási stratégia biztosítja, hogy a keresés előrehaladtával az l skálázási szint monoton csökken, ha a szintekhez tartozó zaj σ_{d_l} szórása monoton csökken, ami egy természetes feltetelezés. Így a javasolt módszer az előző iterációban használnál magasabb szintekre nem számítja ki a $C_{l,n}^{(k)}$ költséget.

Az SA-CNE részletes leírása és a kapcsolódó tüdőszegmentációs eredmények az értekezés 5. fejezetében található, és a [P1] folyóiratcikkekben kerültek közlésre. Az adathalmaz-mintavételezésen és a képleskálázáson alapuló sztochasztikus optimalizáló módszerek, valamint a kapcsolódó elméleti eredmények, amelyekre a javasolt módszer támaszkodik, a [P4] folyóiratcikkekben, illetve a [P11] konferenciatickekben jelentek meg.

Hivatkozások

- [1] D. West, P. Mangiameli, R. Rampal és V. West, „Ensemble strategies for a medical diagnostic decision support system: A breast cancer diagnosis application,” *European Journal of Operational Research*, vol. 162, no. 2, pp. 532–551, 2005.
- [2] Antal B. és Hajdu A., „An ensemble-based system for microaneurysm detection and diabetic retinopathy grading,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 59, pp. 1720–1726, 2012.
- [3] A. Teramoto, H. Fujita, O. Yamamuro és T. Tamaki, „Automated detection of pulmonary nodules in PET/CT images: Ensemble false-positive reduction using a convolutional neural network technique,” *Medical Physics*, vol. 43, no. 6, pp. 2821–2827, 2016.
- [4] Harangi B., „Skin lesion classification with ensembles of deep convolutional neural networks,” *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 86, pp. 25–32, 2018.
- [5] J. Kang és J. Gwak, „Ensemble of instance segmentation models for polyp segmentation in colonoscopy images,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 26440–26447, 2019.
- [6] L. I. Kuncheva, *Combining Pattern Classifiers: Methods and Algorithms*. Wiley Publishing, 2014.
- [7] G. Brown, J. Wyatt, R. Harris és X. Yao, „Diversity creation methods: a survey and categorisation,” *Information Fusion*, vol. 6, no. 1, pp. 5–20, 2005.

- [8] M. Mohandes, M. Deriche és S. Aliyu, „Classifiers combination techniques: A comprehensive review,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19626–19639, 2018.
- [9] T. G. Dietterich, „Ensemble methods in machine learning,” in *Multiple Classifier Systems*, (Berlin, Heidelberg), pp. 1–15, Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [10] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt és M. P. Vecchi, „Optimization by simulated annealing,” *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983.
- [11] S. Mirjalili, *Evolutionary Algorithms and Neural Networks*. Springer International Publishing, 2019.
- [12] R. Y. Rubinstein és D. P. Kroese, *The Cross-Entropy Method*. Springer New York, 2004.
- [13] C. C. Aggarwal, *Neural Networks and Deep Learning*. Springer International Publishing, 2018.
- [14] S. B. Gelfand és S. K. Mitter, „Simulated annealing with noisy or imprecise energy measurements,” *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 62, no. 1, pp. 49–62, 1989.
- [15] W. J. Gutjahr és G. C. Pflug, „Simulated annealing for noisy cost functions,” *Journal of Global Optimization*, vol. 8, no. 1, pp. 1–13, 1996.

Publikációs lista

Folyóiratcikkek angol nyelven

- [P1] **Tóth J.**, Tomán H., Hajdu A., *Using Noisy Evaluation to Accelerate Parameter Optimization with Simulated Annealing*, Computers and Electrical Engineering, 2022. (közlésre benyújtva) (SJR: Q1, IF: 4,152)
- [P2] X. Huang, S. Zhou, **Tóth J.**, Hajdu A., *Cuproptosis-related gene index: a predictor for pancreatic cancer prognosis, immunotherapy efficacy, and chemosensitivity*, Frontiers in Immunology, vol. 13, 978865, 2022. (közlésre elfogadva) (SJR: Q1, IF: 8,786) doi:10.3389/fimmu.2022.978865
- [P3] Bogacsovics G., **Tóth J.**, Hajdu A., Harangi B., *Enhancing CNNs Through the Use of Hand-crafted Features in Automated Fundus Image Classification*, Biomedical Signal Processing and Control, vol. 76, 103685, 2022. (SJR: Q1, IF: 5,076) doi:10.1016/j.bspc.2022.103685
- [P4] **Tóth J.**, Tomán H., Hajdu A., *Efficient Sampling-based Energy Function Evaluation for Ensemble Optimization Using Simulated Annealing*, Pattern Recognition, vol. 107, 107510, 2020. (SJR: D1, IF: 7,740) doi:10.1016/j.patcog.2020.107510
- [P5] P. Porwal *et al.* (**Tóth J.**, Baran Á., Harangi B., Hajdu A.), *IDRiD: Diabetic Retinopathy – Segmentation and Grading Challenge*, Medical Image Analysis, vol. 59, 101561, 2020. (SJR: D1, IF: 8,545) doi:10.1016/j.media.2019.101561

- [P6] **Tóth J.**, Tornai R., Labancz I., Hajdu A., *Efficient Visualization for an Ensemble-based System*, Acta Polytechnica Hungarica, vol. 16, no. 2, pp. 59-75, 2019.
(SJR: Q2, IF: 1,219) doi:10.12700/APH.16.2.2019.2.4
- [P7] Antal B., M. K. G. S. Tavares, Kovács L., Harangi B., Lázár I., Nagy B., Kovács Gy., Szakács J., **Tóth J.**, Petó T., Csutak A., Hajdu A., *Data Analysis Applied to Diabetic Retinopathy Screening: Performance Evaluation*, Annales Mathematicae et Informaticae, vol. 49, pp. 3-9, 2018.
(SJR: Q3) doi:10.33039/ami.2018.10.002
- [P8] Besenczi R., **Tóth J.**, Hajdu A., *A Review on Automatic Analysis Techniques for Color Fundus Photographs*, Computational and Structural Biotechnology Journal, vol. 14, pp. 371-384, 2016.
(SJR: Q1) doi:10.1016/j.csbj.2016.10.001

Folyóiratcikkek magyar nyelven

- [P9] Bogacsovics G., Hajdu A., Harangi B., Lakatos I., Lakatos R., Szabó M., Tiba A., **Tóth J.**, *Napelemfarmok Magyarország területén történő elhelyezését segítő döntéstámogató rendszer fejlesztése*, Közigazgatás-tudomány, vol. 1, no. 2, pp. 134-145, 2021. doi:10.54200/kt.v1i2.23
- [P10] Bogacsovics G., Hajdu A., Harangi B., Lakatos I., Lakatos R., Szabó M., Tiba A., **Tóth J.**, Tarcsi Á., *Adat-elemzési folyamat és keretrendszer a közigazgatás számára*, Közigazgatás-tudomány, vol. 1, no. 2, pp. 146-158, 2021. doi:10.54200/kt.v1i2.24

Konferenciatickek

- [P11] **Tóth J.**, Kapusi T. P., Harangi B., Tomán H., Hajdu A., *Accelerating the Optimization of a Segmentation Ensemble using Image Pyramids*, 11th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA 2019), Dubrovnik, Horvátország, 2019. szeptember 23-25., pp. 43-48. doi:10.1109/ISPA.2019.8868860
- [P12] Harangi B., **Tóth J.**, Bogacsovics G., Kupás D., Kovács L., Hajdu A., *Cell Detection on Digitized Pap Smear Images using Ensemble of Conventional Image Processing and Deep Learning Techniques*, 11th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA 2019), Dubrovnik, Horvátország, 2019. szeptember 23-25., pp. 38-42. doi:10.1109/ISPA.2019.8868683
- [P13] Harangi B., **Tóth J.**, Baran Á., Hajdu A., *Automatic Screening of Fundus Images Using a Combination of Convolutional Neural Network and Hand-Crafted Features*, 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2019), Berlin, Németország, 2019 július 23-27., pp. 2699-2702. doi:10.1109/EMBC.2019.8857073
- [P14] Harangi B., **Tóth J.**, Hajdu A., *Fusion of Deep Convolutional Neural Networks for Microaneurysm Detection in Color Fundus Images*, 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2018), Honolulu, HI, USA, 2018. július 17-21., pp. 3705-3708. doi:10.1109/EMBC.2018.8513035

- [P15] **Tóth J.**, Bartha L., Szabó T., Lázár I., Harangi B., Hajdu A., *An Online Application for Storing, Analyzing, and Sharing Dermatological Data*, IEEE 6th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2015), Győr, Magyarország, 2015. október 19-21., pp. 339-342. doi:10.1109/CogInfoCom.2015.7390615
- [P16] **Tóth J.**, Tomán H., Hajdu A., *Improving the Performance of an Ensemble-based Exudate Detection System Using Stochastic Parameter Optimization*, 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2015), Milánó, Olaszország, 2015. augusztus 25-29., pp. 5243-5246. doi:10.1109/EMBC.2015.7319574
- [P17] **Tóth J.**, Kovács L., Harangi B., Kiss Cs., Mohácsi A., Orosz Z., Hajdu A., *An Online Benchmark System for Image Processing Algorithms*, IEEE 5th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2014), Vietri sul Mare, Olaszország, 2014. november 5-7., pp. 377-382. doi:10.1109/CogInfoCom.2014.7020482
- [P18] **Tóth J.**, Szakács L., Hajdu A., *Finding the Optimal Parameter Setting for an Ensemble-based Lesion Detector*, IEEE 21st International Conference on Image Processing (ICIP 2014), Párizs, Franciaország, 2014. október 27-30., pp. 3532-3536. doi:10.1109/ICIP.2014.7025717
- [P19] **Tóth J.**, Papp I., Tornai R., Labancz I., Hajduné Pocsai E., Hajdu A., *Cognitive Visualization for the Design of Complex Systems*, IEEE 4th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2013), Bu-

dapest, Magyarország, 2013. december 2-5., pp. 363-368.
doi:10.1109/CogInfoCom.2013.6719272

- [P20] Lámfalusi Cs., Girus D., Kruppa K., **Tóth J.**, Hajduné Pocsai E., Kunkli R., Hajdu A., Bálint L. B., *Extending the Visualization Capabilities of a Genome Browser*, IEEE 4th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2013), Budapest, Magyarország, 2013. december 2-5., pp. 419-422.
doi:10.1109/CogInfoCom.2013.6719283
- [P21] Hajdu A., **Tóth J.**, Pistár Z., Domokos B., Török Zs., *An Ensemble-based Collaborative Framework to Support Customized User Needs*, IEEE 3rd International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2012), Kassa, Szlovákia, 2012. december 2-5., pp. 285-290.
doi:10.1109/CogInfoCom.2012.6421995

Konferenciakivonatok

- [P22] Hajdu A., Harangi B., **Tóth J.**, Pap M., Baran Á., *Combining Convolutional Neural Networks and Hand-Crafted Features in Medical Image Classification Tasks*, 20th European Conference on Mathematics for Industry, Budapest, Magyarország, 2018. június 18-22., p. 299.
- [P23] **Tóth J.**, Kovács L., Harangi B., Kiss Cs., Mohácsi A., Orosz Z., Hajdu A., *An Online System for Algorithm Benchmarking*, IEEE 5th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2014), Vietri sul Mare, Olaszország, 2014. november 5-7., pp. 383.
doi:10.1109/CogInfoCom.2014.7020483

- [P24] Lámfalusi Cs., Girus D., Kruppa K., **Tóth J.**, Hajduné Pocsai E., Kunkli R., Hajdu A., Bálint L. B., *Adding a Scalable Visualization Technique to the UCSC Genome Browser*, IEEE 4th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2013), Budapest, Magyarország, 2013. december 2-5., pp. 943.



Nyilvántartási szám: DEENK/384/2022.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Tóth János

Doktori Iskola: Informatikai Tudományok Doktori Iskola

MTMT azonosító: 10056957

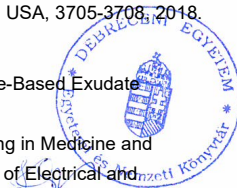
A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (2)

1. **Tóth, J.**, Tomán, H., Hajdu, A.: Efficient sampling-based energy function evaluation for ensemble optimization using simulated annealing.
Pattern Recognit. 107, 1-12, 2020. ISSN: 0031-3203.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.patcog.2020.107510>
IF: 7.74
2. Besenczi, R., **Tóth, J.**, Hajdu, A.: A review on automatic analysis techniques for color fundus photographs.
Comput. Struct. Biotechnol. J. 14, 371-384, 2016. ISSN: 2001-0370.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csbj.2016.10.001>

Idegen nyelvű konferencia közlemények (4)

3. **Tóth, J.**, Kapusi, T. P., Harangi, B., Tomán, H., Hajdu, A.: Accelerating the Optimization of a Segmentation Ensemble using Image Pyramids.
In: 11th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA 2019).
Eds.: S. Lončarić, R. Bregović, M. Carli, M. Subašić, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Piscataway, NJ, USA, 43-48, 2019. ISBN: 9781728131405
4. Harangi, B., **Tóth, J.**, Hajdu, A.: Fusion of deep convolutional neural networks for microaneurysm detection in color fundus images.
In: 2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) / Gregg Suaning, Olaf Dossel, IEEE, Hawaii, USA, 3705-3708, 2018.
ISBN: 9781538636466
5. **Tóth, J.**, Tomán, H., Hajdu, A.: Improving the Performance of an Ensemble-Based Exudate Detection System using Stochastic Parameter Optimization.
In: 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Eds.: Sergio Cerutti, Paolo Bonato, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Seattle (WA), USA, 5243-5246, 2015.





6. **Tóth, J.**, Szakács, L., Hajdu, A.: Finding the optimal parameter setting for an ensemble-based lesion detector.
Proc. Int. Conf. Image Proc. 3532-3536, 2014. ISSN: 1522-4880.

További közlemények

Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (2)

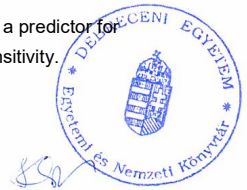
7. Bogacsovics, G., Hajdu, A., Harangi, B., Lakatos, I., Lakatos, R., Szabó, M., Tiba, A., **Tóth, J.**, Tarcsi, Á.: Adatelemzési folyamat és keretrendszer a közigazgatás számára.
Közigazgatástudomány. 1 (2), 146-158, 2021. ISSN: 2786-1910.
DOI: <http://dx.doi.org/10.54200/kt.v1i2.24>
8. Bogacsovics, G., Hajdu, A., Harangi, B., Lakatos, I., Lakatos, R., Szabó, M., Tiba, A., **Tóth, J.**: Napelemfarmok Magyarország területén történő elhelyezését segítő döntéstámogató rendszer fejlesztése.
Közigazgatástudomány. 1 (2), 134-145, 2021. ISSN: 2786-1910.
DOI: <http://dx.doi.org/10.54200/kt.v1i2.23>

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (2)

9. **Tóth, J.**, Tornai, R., Labancz, I., Hajdu, A.: Efficient Visualization for an Ensemble-based System.
Acta Polytech. Hung. 16 (2), 59-75, 2019. ISSN: 1785-8860.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12700/APH.16.2.2019.2.4>
IF: 1.219
10. Antal, B., Tavares, M. K. G. S., Kovács, L., Harangi, B., Lázár, I., Nagy, B., Kovács, G., Szakács, J., **Tóth, J.**, Pető, T., Csutak, A., Hajdu, A.: Data analysis applied to diabetic retinopathy screening: performance evaluation.
Ann. Math. Inform. 49, 3-9, 2018. ISSN: 1787-5021.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33039/ami.2018.10.002>

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (3)

11. Huang, X., Zhou, S., **Tóth, J.**, Hajdu, A.: Cuproptosis-related gene index: a predictor for pancreatic cancer prognosis, immunotherapy efficacy, and chemosensitivity.
Front. Immunol. Epub, 1-31, 2022. EISSN: 1664-3224.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fimmu.2022.978865>
IF: 8.786 (2021)





12. Bogacsovics, G., **Tóth, J.**, Hajdu, A., Harangi, B.: Enhancing CNNs through the use of hand-crafted features in automated fundus image classification.
Biomed. Signal Process. Control. 76, 1-10, 2022. ISSN: 1746-8094.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bspc.2022.103685>
IF: 5.076 (2021)
13. Porwal, P., Pachade, S., Kokare, M., Deshmukh, G., Son, J., Bae, W., Liu, L., Wang, J., Liu, X., Gao, L., Wu, T., Xiao, J., Wang, F., Yin, B., Wang, Y., Danala, G., He, L., Choi, Y. H., Lee, Y. C., Jung, S. H., Li, Z., Sui, X., Wu, J., Li, X., Zhou, T., **Tóth, J.**, Baran, Á., Kori, A., Chennamsetty, S. S., Safwan, M., Alex, V., Lyu, X., Cheng, L., Chu, Q., Li, P., Ji, X., Zhang, S., Shen, Y., Dai, L., Saha, O., Sathish, R., Melo, T., Araújo, T., Harangi, B., Sheng, B., Fang, R., Sheet, D., Hajdu, A., Zheng, Y., Mendonça, A. M., Zhang, S., Campilho, A., Zheng, B., Shen, D., Giancardo, L., Quelled, G., Mériaudeau, F.: IDRiD: Diabetic Retinopathy: segmentation and grading challenge.
Med. Image Anal. 59, 1-26, 2020. ISSN: 1361-8415.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.media.2019.101561>
IF: 8.545

Magyar nyelvű konferencia közlemények (1)

14. Ayoub, A., Hajdu, A., Nagy, Á., Szakács, J., **Tóth, J.**: Automatikus pigmenthálózat-detektálás dermatoszkópos képeken.
In: Képfeldolgozók és Alakfelismerők 9. országos konferenciája. Szerk.: Czúni László, NJSZT-KÉPAF, Bakonybél, 439-449, 2013.

Idegen nyelvű konferencia közlemények (8)

15. Harangi, B., **Tóth, J.**, Baran, Á., Hajdu, A.: Automatic screening of fundus images using a combination of convolutional neural network and hand-crafted features.
In: 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Ed.: Riccardo Barbieri, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Piscataway, NJ, USA, 2699-2702, 2019. ISBN: 9781538613122
16. Harangi, B., **Tóth, J.**, Bogacsovics, G., Kupás, D., Kovács, L., Hajdu, A.: Cell detection on digitized Pap smear images using ensemble of conventional image processing and deep learning techniques.
In: 11th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA 2019). Eds.: S. Lončarić, R. Bregović, M. Carli, M. Subašić, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Piscataway, NJ, USA, 38-42, 2019. ISBN: 9781728131405
17. **Tóth, J.**, Bartha, L., Szabó, T., Lázár, I., Harangi, B., Hajdu, A.: An online application for storing, analyzing, and sharing dermatological data.
In: 6th IEEE Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2015 : Proceedings, October 19-21, 2015, Széchenyi István University Győr, Hungary, IEEE, Danvers, 339-342, 2015. ISBN: 9781467381284





18. **Tóth, J.**, Kovács, L., Harangi, B., Kiss, C., Mohácsi, A. I., Orosz, Z., Hajdu, A.: An Online Benchmark System for Image Processing Algorithms.
In: 5th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications. Ed.: Baranyi Péter, CogInfoCom, Vietri sul Mare, Italy, 377-385, 2014. ISBN: 9781479972807
19. Lámfalusi, C., Girus, D., Kruppa, K. T., **Tóth, J.**, Hajduné Pocsai, E., Kunkli, R., Hajdu, A., Bálint, B. L.: Adding a scalable visualization technique to the UCSC genome browser.
In: 4th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2013 : Proceedings, December 2-5, 2013 Budapest, Hungary. Ed.: Péter Baranyi, IEEE, Danvers, 943-944, 2013. ISBN: 9781479915439
20. **Tóth, J.**, Papp, I., Tornai, R., Labancz, I., Hajduné Pocsai, E., Hajdu, A.: Cognitive visualization for the design of complex systems.
In: 4th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2013 : Proceedings, December 2-5, 2013 Budapest, Hungary. Ed.: Péter Baranyi, IEEE, Danvers, 419-422, 2013. ISBN: 9781479915439
21. Lámfalusi, C., Girus, D., Kruppa, K. T., **Tóth, J.**, Hajduné Pocsai, E., Kunkli, R., Hajdu, A., Bálint, B. L.: Extending the visualization capabilities of a genome browser.
In: 4th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2013 : Proceedings, December 2-5, 2013 Budapest, Hungary. Ed.: Péter Baranyi, IEEE, Danvers, 419-422, 2013. ISBN: 97814799115439
22. Hajdu, A., **Tóth, J.**, Pistár, Z., Domokos, B., Török, Z.: An ensemble-based collaborative framework to support customized user needs.
In: 3rd IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications, CogInfoCom 2012 : Proceedings, December 2-5, 2012 Košice, Slovakia. Ed.: Péter Baranyi, IEEE, Danvers, 285-290, 2012. ISBN: 9781467351874

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (2)

23. Hajdu, A., Harangi, B., **Tóth, J.**, Pap, M., Baran, Á.: Combining Convolutional Neural Networks and Hand-Crafted Features in Medical Image Classification Tasks.
In: 20th European Conference on Mathematics for Industry : Book of Abstracts. Ed.: Bodó Á., Fekete I., Izsák F., Maros G., Simon L. P, Bolyai János Matematikai Társulat, Budapest, 299, 2018.





24. **Tóth, J.**, Kovács, L., Harangi, B., Kiss, C., Mohácsi, A. I., Orosz, Z., Hajdu, A.: An Online System for Algorithm Benchmarking.

In: 5th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications. Ed.: Baranyi Péter, CogInfoCom, Vietri sul Mare, Italy, 383, 2014. ISBN: 9781479972807

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 31,366

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 7,74

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2022.08.09.



Short thesis for the degree of doctor of philosophy (PhD)

Efficient Parameter Optimization of Ensembles in Medical Image Analysis

János Tóth

Supervisor: Dr. András Hajdu



UNIVERSITY OF DEBRECEN
Doctoral School of Informatics

Debrecen, 2022

Contents

1	Background	3
2	Main results of the dissertation	6
2.1	Optimization with dataset sampling	6
2.1.1	Simulated annealing with sampling-based evaluation	6
2.1.2	Determination of the sample size	8
2.2	Optimization with image downscaling	10
2.2.1	Simulated annealing with downscaling-based evaluation	10
2.2.2	Selection of the scaling level	12
2.3	Optimization with combined noisy evaluation . .	13
2.3.1	Simulated annealing with combined noisy evaluation	14
	References	16
	List of Publications	18

1 Background

Today, medical images – along with various omics (e.g., genomics and proteomics) data – make up the majority of data that needs to be processed and analyzed in healthcare. However, the manual examination of the medical images is a labor-intensive process and subject to human error. The demand for reliable automated methods to assist in diagnosis has given rise to the interdisciplinary research field of Medical Image Analysis. The aim of this field is to develop methods that can extract clinically relevant information from medical images in a reproducible and objective manner, relying on image processing, pattern recognition, machine learning, and medicine.

Because the procedures related to medical diagnosis are critical, it is usually not possible to rely on individual algorithms for their implementation. For this reason, an ensemble of algorithms is often used for such purposes (see, e.g., [1–5]).

Ensembles are constructed from such algorithms (members) that are based on different principles, models, etc., to solve a specific problem [6]. The diversity of the members allows the ensemble to respond more flexibly to different conditions [7]. The basic idea of ensembles is that by combining the output of multiple algorithms using an appropriate aggregation rule, a system can be created that outperforms each of its constituent members if certain conditions on their diversity and individual performance are met [8, 9].

A critical issue with ensembles is that using the individually optimal parameter setting of the members may not necessarily maximize the performance of the ensemble itself. For this reason, parameter optimization at the ensemble level is required, which

can lead to a large-scale problem depending on the number and range of the parameters of the members.

To solve such large-scale combinatorial optimization problems, stochastic search methods are commonly used. These methods can be divided into instance-based and model-based ones. The main difference between these two groups is that instance-based methods, such as simulated annealing (SA) [10] and the genetic algorithms [11], generate new candidate solutions based on the current solution(s), while model-based methods, such as ant colony optimization [11] and the cross-entropy method [12], generate candidate solutions through more expensive, adaptive stochastic mechanisms.

Stochastic approaches can efficiently find good solutions to large-scale problems by sacrificing some accuracy for a substantial reduction in search cost. However, even a stochastic search can be very expensive if the evaluation of a solution is itself expensive, e.g., due to the high complexity of the objective function or the large size of the dataset, which latter is often necessary to avoid parameter overfitting.

The goal of the research was to find solutions to the aforementioned problem. In the dissertation, three stochastic methods are proposed for the efficient parameter optimization of ensembles performing medical image analysis tasks. The proposed methods are based on the metaheuristic SA, which is widely used to solve both discrete and continuous optimization problems due to its simplicity and appealing properties.

Each of the proposed methods uses noisy evaluation in different ways to reduce the overall search cost. Different approaches are proposed to approximate the value of the objective function with partial training data to evaluate solutions, i.e., the performance of the ensemble at a given parameter setting. Of course,

the noise introduced by using partial training data may cause the search method to consider an inferior solution as superior due to the inaccurate value of the objective function and vice versa. For this reason, appropriate strategies have been developed for each method to control the noise during the search process by the amount of data used for evaluation in order to maintain the achievable solution quality.

The next section briefly summarizes the main results of the dissertation in relation to the three methods developed. In Section 2.1, a method is presented that reduces the cost of the search by evaluating the solutions using subsets of the training set obtained by random sampling [P4, P8, P14, P16, P18]. As another approach, in Section 2.2, a method is presented that uses increasingly higher resolution levels of a pyramid representation of the training set images to evaluate solutions [P4, P11]. Finally, in Section 2.3, a method is presented that can further reduce the search cost by combining the previous two approaches, given that the cardinality of the training set is below a problem-specific value [P1, P4, P11].

2 Main results of the dissertation

The main results of the dissertation, corresponding to the three proposed methods, are presented in the following sections.

2.1 Optimization with dataset sampling

The first method presented in the dissertation was developed to accelerate the parameter optimization of ensembles on large (image) datasets. It employs a sampling-based evaluation method that considers a randomly selected subset of the training data with the minimum required cardinality in each iteration to reduce the cost of the search. The sample sizes required during the search process are theoretically determined by adapting convergence results on noisy evaluation in SA. The effectiveness of the method was demonstrated using the parameter optimization problem of two ensembles that classify retinal images according to the presence of diabetic retinopathy (DR).

2.1.1 SA with sampling-based evaluation

To accelerate parameter optimization of ensembles on large training sets, we first investigated the effects of evaluating the objective function using a fixed-size subset of the training set chosen randomly at each search step. Similar heuristic principles are used in the stochastic and mini-batch gradient descent algorithms in machine learning tasks. That is, the objective function is evaluated on a single element or a fixed-size subset of the training set while the weights of the model are adjusted [13].

Thesis 1. *I have developed a stochastic method for the parameter optimization of ensembles on large training sets. This method is based on the metaheuristic simulated annealing and uses sampling-based objective function evaluation. Through experiments on clinical image sets, I have shown that the application of this method leads to a significant reduction in the cost of the optimization process compared to the standard simulated annealing, while maintaining the quality of the achievable solution.*

Related publications: [P4], [P8], [P14], [P16], [P18]

The main contribution of the proposed method SA with Sampling-based Evaluation (SA-SBE) is the correspondence of dataset sampling with the noisy evaluation of the objective function. In contrast to the fixed sample size of the heuristic methods mentioned above, in SA-SBE the sample sizes required during the search process are theoretically determined by adapting the convergence results on noisy evaluation in SA (see Section 2.1.2).

To evaluate the applicability and efficiency of SA-SBE, the parameters of two ensembles were optimized for pre-screening DR based on microaneurysm (MA) detection. *Ensemble 1* consisted of nine conventional MA detector algorithms, while for *Ensemble 2* these were complemented by a proprietary method that fuses two deep convolutional neural networks for the detection of MAs.

Since MAs are dot-like lesions, the ensemble members were implemented to extract MA centers as candidates rather than image sub-regions. For this reason, to aggregate the MA candidates identified by the members for a given image, a proximity relation was introduced to decide whether two candidates indicate the same MA or not. In addition, a confidence value was also

calculated to describe the degree of agreement between members with respect to a particular candidate. This ensemble aggregation method is very computationally expensive, so this problem was suitable to evaluate the efficiency of SA-SBE.

First, the parameters of the ensembles were optimized for diagnostic accuracy at the image level. In this case, a low number of false positive MAs is desired. Next, the ensembles were optimized for the accurate detection of individual MAs. In both cases, the experimental results indicated that the proposed method is able to substantially reduce the time required for the optimization without compromising the quality of the achievable solution.

The description of SA-SBE and the corresponding quantitative results are presented in more detail in Chapter 3 of the dissertation and have been published in [P4]. Our preliminary studies on the application of dataset sampling to accelerate parameter optimization of ensembles, which form the basis of this method, have been published in [P16] and [P18]. The deep learning-based MA detector used in *Ensemble 2* has been proposed in [P14]. In addition, the ensemble methodology applied in this chapter for retinal image analysis has been described in [P8].

2.1.2 Determination of the sample size

Thesis 2. *Considering an arbitrary cooling schedule and training set size, I have given a closed-form equation to determine the minimum sample size required to evaluate a solution in a given search iteration to maintain the convergence of SA in probability.*

Related publications: [P4], [P16], [P18]

To benefit from the lower computational cost of using partial training data while maintaining the achievable quality of the final solution, a sampling strategy had to be developed to control the noise, i.e., the difference between the objective function value estimated using a sample and the actual objective function value computed using the entire training set, based on theoretical constraints derived from results on the convergence of SA using imprecise measurements [14, 15].

Specifically, the sampling strategy of SA-SBE ensures that the method exhibits the same convergence in probability evaluating solutions using samples Λ_n of size n as SA using the entire training set Λ_N of size N ($0 < n \leq N$). To accomplish this, the standard deviation of the noise $\sigma_{d_{\Lambda_n}}$ is controlled with respect to the temperature T of the method during the search process by using samples of appropriate size.

Theorem 1. *For an arbitrary cooling schedule, the minimum sample size $n^{(k)}$ required at the k -th iteration to maintain the convergence of SA in probability can be determined as*

$$n^{(k)} = \frac{N\sigma_{max}^2}{(N-1)\sigma_{d_n}^{(k)2} + \sigma_{max}^2}, \quad (1)$$

where σ_{max} is the maximum possible value of the objective function standard deviation, and $\sigma_{d_n}^{(k)}$ is the maximum allowed value of each $\sigma_{d_{\Lambda_n}}$ for the current temperature $T^{(k)}$ and can be derived using Lemma 1.

Lemma 1. *A sufficiently simple general form of $\sigma_{d_n}^{(k)}$ that maximizes its value at the temperature $T^{(k)}$ can be given as*

$$\sigma_{d_n}^{(k)} \gtrsim T^{(k)}(1-\epsilon)^k, \quad 0 < \epsilon \ll 1. \quad (2)$$

The description of the algorithmic realization of the sampling strategy of SA-SBE and the proofs of Theorem 1 and Lemma 1 can be found in Section 3.2 of the dissertation and have been published in [P4]. The preliminary studies on the application of dataset sampling to accelerate parameter optimization of ensembles have been published in [P16] and [P18].

2.2 Optimization with image downscaling

As an alternative approach to accelerate the parameter optimization of ensembles using partial training data, the second method presented in the dissertation uses increasingly higher resolution levels of a pyramid representation of the images in the training set to evaluate solutions as the search progresses. To ensure that the convergence conditions are met, a strategy has been proposed to determine the lowest image resolution that can be used in each iteration. The applicability and efficiency of this method has been shown through the parameter optimization problem of an ensemble for bone segmentation on computed tomography images.

2.2.1 SA with downscaling-based evaluation

To accelerate the evaluation of a solution, this method uses a pyramid representation of the images in the training set. An L -level image pyramid is a collection of $L \in \mathbb{N}$ hierarchically downscaled versions of an image, in which the higher the level l ($l \in 0, 1, \dots, L - 1$), the lower the image resolution is. Note that the number of levels L in the image pyramid should be chosen depending on the resolution of the images in the dataset and also the application domain.

Thesis 3. *I have developed a stochastic method for the parameter optimization of image processing (segmentation) ensembles. The method is based on the metaheuristic simulated annealing and uses increasingly higher resolution levels of a pyramid representation of the images in the training set to evaluate the objective function during the search. Through experiments on clinical image data, I have shown that the application of this method results in a significant reduction in the cost of the optimization process compared to using the original resolution, while maintaining the quality of the achievable solution.*

Related publications: [P4], [P11]

Assuming that the cost of calculating the objective function value is proportional to the resolution of the images in the training set, the calculation of the objective function value estimate using the l -th level version of the input images (with an associated scaling factor γ_l) has $1/\gamma_l^2$ times lower cost. On the other hand, using the scaling level l introduces a noise d_l , which is the difference of the estimated and the actual objective function value.

In the case of the proposed method SA with Downscaling-based Evaluation (SA-DBE), a strategy to determine the maximum allowed standard deviation of the noise, and thus the lowest scaling level l that can be used, in each iteration had to be developed in order to ensure that the convergence conditions are met (see Section 2.2.2).

To show that the proposed method is capable of reducing the time requirement of the search while preserving the quality of the achievable solution, the parameter optimization problem

of a bone segmentation ensemble consisting of five conventional algorithms was considered. The output of the algorithms are binary masks that were aggregated to obtain a probability map for extracting the bone structures.

The detailed description of SA-DBE and the corresponding bone segmentation results can be found in Chapter 4 of the dissertation and were published in [P11]. In addition, the theoretical results on the maximum allowed standard deviation of the noise in a given search iteration, which were used to develop the scaling level selection strategy, were published in [P4].

2.2.2 Selection of the scaling level

Thesis 4. *Considering a given pyramid representation of the images in the training set, I have proposed a strategy to select the highest scaling level that can be used to evaluate a solution in a given search iteration to maintain the convergence of SA in probability.*

Related publications: [P4], [P11]

To maintain the convergence of the method, a strategy was proposed to select the appropriate scaling level l in each iteration k in order to control the noise according to the corresponding convergence conditions [14, 15].

This strategy requires the determination of the standard deviation of the noise σ_{d_l} for each scaling level l of the image pyramid. It should be noted that the amount of noise and its properties can vary significantly for different objective functions. In some cases, the theoretical determination of the maximum value of σ_{d_l} for

a given level l may be straightforward, while for other objective functions it becomes a difficult problem.

Moreover, considering a given dataset of natural images, the empirical standard deviation of the noise for a level l is likely to be much lower than the theoretical maximum. Therefore, even in the case when the theoretical maximum noise standard deviation can be determined, it is beneficial to estimate σ_{d_l} for each level l of the image pyramid by measuring these values on the ground truth used for the evaluation.

Having σ_{d_l} estimated for each level l of the image pyramid, the proposed strategy determines the highest level l (i.e., the lowest resolution) where σ_{d_l} is less than or equal to the maximum allowed value $s^{(k)}$ of the standard deviation of the noise, which value is derived from the cooling schedule applied and the convergence conditions of SA.

The detailed description of the proposed scaling level selection strategy can be found in Section 4.2.1 and 4.2.2 of the dissertation and have been published in [P11]. For a concrete realization of this approach, see Section 4.4.3 of the dissertation.

2.3 Optimization with combined noisy evaluation

The third method presented in the dissertation is based on the observation that, depending on the optimization problem, image downscaling can introduce noise with a lower standard deviation than dataset sampling with the same cost gain. Therefore, it employs an evaluation method that combines sampling of the training data with image downscaling to further accelerate the parameter optimization of ensembles. To this end, a strategy that determines the appropriate scaling level and sample size in each

iteration by adapting the convergence results for noisy evaluation was proposed. Using the parameter optimization problem of an ensemble that segments the lungs in computed tomography scans, it was shown that this method allows further reduction of the time requirement of the optimization process while maintaining solution quality compared to the previous two methods when the size of the dataset is below a problem-specific value.

2.3.1 SA with combined noisy evaluation

Thesis 5. *I have developed a stochastic method for accelerating the parameter optimization of image processing (segmentation) ensembles. This method is based on the metaheuristic simulated annealing and combines training set sampling with image downscaling for the evaluation of the objective function. Through experiments on clinical image data, I have shown that when using appropriate combinations of sample size and scaling level in each iteration, the cost of the search process is lower than using either of these approaches alone, provided that the cardinality of the training set is below a problem-specific threshold.*

Related publications: [P1], [P4], [P11]

Combining dataset sampling and image downscaling, we have to deal with a noise d that is the sum of noises originating from the dataset sampling d_n and the image downscaling d_l . Since d_n and d_l are uncorrelated, the standard deviation of the sum of these noises σ_d can be calculated as the square root of the sum of their variances.

The aim of the method SA with Combined Noisy Evaluation (SA-CNE) is to minimize the total cost of the search, e.g., in terms of computation time. For this, the scaling level l and sample size n whose combination will minimize the cost $C_{l,n}^{(k)}$ in each iteration k have to be found while ensuring that $\sigma_d^{(k)}$ is less than its maximum allowed value $s^{(k)}$, similarly as in the case of the methods presented in Section 2.1 and 2.2.

First, for each scaling level l whose corresponding noise standard deviation $\sigma_{d_l} \leq s^{(k)}$, the method determines the minimum required sample size n using Theorem 1. Then, it calculates the corresponding cost $C_{l,n}^{(k)}$. Finally, it selects the (l, n) pair for the evaluation for which $C_{l,n}^{(k)}$ is minimal.

The above selection strategy ensures that the scaling level l decreases monotonically during the search if the corresponding noise standard deviation d_l decreases monotonically, which is a natural assumption. Thus, the proposed method does not calculate the cost $C_{l,n}^{(k)}$ for levels higher than the one used in the previous iteration.

The detailed description of SA-CNE and the corresponding lung segmentation results can be found in Chapter 5 of the dissertation and have been published in [P1]. The stochastic optimization methods based on dataset sampling and image downscaling, as well as the related theoretical results, on which the presented method relies, were published in [P4] and [P11], respectively.

References

- [1] D. West, P. Mangiameli, R. Rampal, and V. West, “Ensemble strategies for a medical diagnostic decision support system: A breast cancer diagnosis application,” *European Journal of Operational Research*, vol. 162, no. 2, pp. 532–551, 2005.
- [2] 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.
- [3] A. Teramoto, H. Fujita, O. Yamamuro, and T. Tamaki, “Automated detection of pulmonary nodules in PET/CT images: Ensemble false-positive reduction using a convolutional neural network technique,” *Medical Physics*, vol. 43, no. 6, pp. 2821–2827, 2016.
- [4] B. Harangi, “Skin lesion classification with ensembles of deep convolutional neural networks,” *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 86, pp. 25–32, 2018.
- [5] J. Kang and J. Gwak, “Ensemble of instance segmentation models for polyp segmentation in colonoscopy images,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 26440–26447, 2019.
- [6] L. I. Kuncheva, *Combining Pattern Classifiers: Methods and Algorithms*. Wiley Publishing, 2014.
- [7] G. Brown, J. Wyatt, R. Harris, and X. Yao, “Diversity creation methods: a survey and categorisation,” *Information Fusion*, vol. 6, no. 1, pp. 5–20, 2005.

- [8] M. Mohandes, M. Deriche, and S. O. Aliyu, “Classifiers combination techniques: A comprehensive review,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19626–19639, 2018.
- [9] T. G. Dietterich, “Ensemble methods in machine learning,” in *Multiple Classifier Systems*, (Berlin, Heidelberg), pp. 1–15, Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [10] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, “Optimization by simulated annealing,” *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983.
- [11] S. Mirjalili, *Evolutionary Algorithms and Neural Networks*. Springer International Publishing, 2019.
- [12] R. Y. Rubinstein and D. P. Kroese, *The Cross-Entropy Method*. Springer New York, 2004.
- [13] C. C. Aggarwal, *Neural Networks and Deep Learning*. Springer International Publishing, 2018.
- [14] S. B. Gelfand and S. K. Mitter, “Simulated annealing with noisy or imprecise energy measurements,” *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 62, no. 1, pp. 49–62, 1989.
- [15] W. J. Gutjahr and G. C. Pflug, “Simulated annealing for noisy cost functions,” *Journal of Global Optimization*, vol. 8, no. 1, pp. 1–13, 1996.

List of Publications

Journal Articles in English

- [P1] **J. Tóth**, H. Tomán, A. Hajdu, *Using Noisy Evaluation to Accelerate Parameter Optimization with Simulated Annealing*, Computers and Electrical Engineering, 2022. (*submitted*) (SJR: Q1, IF: 4.152)
- [P2] X. Huang, S. Zhou, **J. Tóth**, A. Hajdu, *Cuproptosis-related gene index: a predictor for pancreatic cancer prognosis, immunotherapy efficacy, and chemosensitivity*, Frontiers in Immunology, vol. 13, 978865, 2022. (*accepted*) (SJR: Q1, IF: 8.786) doi:10.3389/fimmu.2022.978865
- [P3] G. Bogacsovics, **J. Tóth**, A. Hajdu, B. Harangi, *Enhancing CNNs Through the Use of Hand-crafted Features in Automated Fundus Image Classification*, Biomedical Signal Processing and Control, vol. 76, 103685, 2022. (SJR: Q1, IF: 5.076) doi:10.1016/j.bspc.2022.103685
- [P4] **J. Tóth**, H. Tomán, A. Hajdu, *Efficient Sampling-based Energy Function Evaluation for Ensemble Optimization Using Simulated Annealing*, Pattern Recognition, vol. 107, 107510, 2020. (SJR: D1, IF: 7.740) doi:10.1016/j.patcog.2020.107510
- [P5] P. Porwal *et al.* (**J. Tóth**, Á. Baran, B. Harangi, A. Hajdu), *IDRiD: Diabetic Retinopathy – Segmentation and Grading Challenge*, Medical Image Analysis, vol. 59, 101561, 2020. (SJR: D1, IF: 8.545) doi:10.1016/j.media.2019.101561

- [P6] **J. Tóth**, R. Tornai, I. Labancz, A. Hajdu, *Efficient Visualization for an Ensemble-based System*, Acta Polytechnica Hungarica, vol. 16, no. 2, pp. 59-75, 2019.
(SJR: Q2, IF: 1.219) doi:10.12700/APH.16.2.2019.2.4
- [P7] B. Antal, M. K. G. S. Tavares, L. Kovács, B. Harangi, I. Lázár, B. Nagy, Gy. Kovács, J. Szakács, **J. Tóth**, T. Pető, A. Csutak, A. Hajdu, *Data Analysis Applied to Diabetic Retinopathy Screening: Performance Evaluation*, Annales Mathematicae et Informaticae, vol. 49, pp. 3-9, 2018.
(SJR: Q3) doi:10.33039/ami.2018.10.002
- [P8] R. Besenczi, **J. Tóth**, A. Hajdu, *A Review on Automatic Analysis Techniques for Color Fundus Photographs*, Computational and Structural Biotechnology Journal, vol. 14, pp. 371-384, 2016.
(SJR: Q1) doi:10.1016/j.csbj.2016.10.001

Journal Articles in Hungarian

- [P9] G. Bogacsovics, A. Hajdu, B. Harangi, I. Lakatos, R. Lakatos, M. Szabó, A. Tiba, **J. Tóth**, *Napelemfarmok Magyarország területén történő elhelyezését segítő döntéstámogató rendszer fejlesztése*, Közigazgatás-tudomány, vol. 1, no. 2, pp. 134-145, 2021. doi:10.54200/kt.v1i2.23
- [P10] G. Bogacsovics, A. Hajdu, B. Harangi, I. Lakatos, R. Lakatos, M. Szabó, A. Tiba, **J. Tóth**, Á. Tarcsi, *Adatelemzési folyamat és keretrendszer a közigazgatás számára*, Közigazgatás-tudomány, vol. 1, no. 2, pp. 146-158, 2021. doi:10.54200/kt.v1i2.24

Conference Papers

- [P11] **J. Tóth**, T. P. Kapusi, B. Harangi, H. Tomán, A. Hajdu, *Accelerating the Optimization of a Segmentation Ensemble using Image Pyramids*, 11th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA 2019), Dubrovnik, Croatia, 23-25 September 2019, pp. 43-48. doi:10.1109/ISPA.2019.8868860
- [P12] B. Harangi, **J. Tóth**, G. Bogacsovics, D. Kupás, L. Kovács, A. Hajdu, *Cell Detection on Digitized Pap Smear Images using Ensemble of Conventional Image Processing and Deep Learning Techniques*, 11th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA 2019), Dubrovnik, Croatia, 23-25 September 2019, pp. 38-42. doi:10.1109/ISPA.2019.8868683
- [P13] B. Harangi, **J. Tóth**, Á. Baran, A. Hajdu, *Automatic Screening of Fundus Images Using a Combination of Convolutional Neural Network and Hand-Crafted Features*, 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2019), Berlin, Germany, 23-27 July 2019, pp. 2699-2702. doi:10.1109/EMBC.2019.8857073
- [P14] B. Harangi, **J. Tóth**, A. Hajdu, *Fusion of Deep Convolutional Neural Networks for Microaneurysm Detection in Color Fundus Images*, 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2018), Honolulu, HI, USA, 17-21 July 2018, pp. 3705-3708. doi:10.1109/EMBC.2018.8513035

- [P15] **J. Tóth**, L. Bartha, T. Szabó, I. Lázár, B. Harangi, A. Hajdu, *An Online Application for Storing, Analyzing, and Sharing Dermatological Data*, IEEE 6th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2015), Győr, Hungary, 19-21 October 2015, pp. 339-342. doi:10.1109/CogInfoCom.2015.7390615
- [P16] **J. Tóth**, H. Tomán, A. Hajdu, *Improving the Performance of an Ensemble-based Exudate Detection System Using Stochastic Parameter Optimization*, 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2015), Milan, Italy, 25-29 August 2015, pp. 5243-5246. doi:10.1109/EMBC.2015.7319574
- [P17] **J. Tóth**, L. Kovács, B. Harangi, Cs. Kiss, A. Mohácsi, Z. Orosz, A. Hajdu, *An Online Benchmark System for Image Processing Algorithms*, IEEE 5th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2014), Vietri sul Mare, Italy, 5-7 November 2014, pp. 377-382. doi:10.1109/CogInfoCom.2014.7020482
- [P18] **J. Tóth**, L. Szakács, A. Hajdu, *Finding the Optimal Parameter Setting for an Ensemble-based Lesion Detector*, IEEE 21st International Conference on Image Processing (ICIP 2014), Paris, France, 27-30 October 2014, pp. 3532-3536. doi:10.1109/ICIP.2014.7025717
- [P19] **J. Tóth**, I. Papp, R. Tornai, I. Labancz, E. Hajduné Pocsai, A. Hajdu, *Cognitive Visualization for the Design of Complex Systems*, IEEE 4th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2013), Budapest, Hungary, 2-5 December 2013, pp. 363-368. doi:10.1109/CogInfoCom.2013.6719272

- [P20] Cs. Lámfalusi, D. Girus, K. Kruppa, **J. Tóth**, E. Hajduné Pocsai, R. Kunkli, A. Hajdu, L. B. Bálint, *Extending the Visualization Capabilities of a Genome Browser*, IEEE 4th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2013), Budapest, Hungary, 2-5 December 2013, pp. 419-422. doi:10.1109/CogInfoCom.2013.6719283
- [P21] A. Hajdu, **J. Tóth**, Z. Pistár, B. Domokos, Zs. Török, *An Ensemble-based Collaborative Framework to Support Customized User Needs*, IEEE 3rd International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2012), Kosice, Slovakia, 2-5 December 2012, pp. 285-290. doi:10.1109/CogInfoCom.2012.6421995

Conference Abstracts

- [P22] A. Hajdu, B. Harangi, **J. Tóth**, M. Pap, *Combining Convolutional Neural Networks and Hand-Crafted Features in Medical Image Classification Tasks*, 20th European Conference on Mathematics for Industry, Budapest, Hungary, 18-22 June 2018, p. 299.
- [P23] **J. Tóth**, L. Kovács, B. Harangi, Cs. Kiss, A. Mohácsi, Z. Orosz, A. Hajdu, *An Online System for Algorithm Benchmarking*, IEEE 5th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2014), Vietri sul Mare, Italy, 5-7 November 2014, pp. 383. doi:10.1109/CogInfoCom.2014.7020483
- [P24] Cs. Lámfalusi, D. Girus, K. Kruppa, **J. Tóth**, E. Hajduné Pocsai, R. Kunkli, A. Hajdu, L. B. Bálint, *Adding a Scalable Visualization Technique to the UCSC Genome*

Browser, IEEE 4th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2013), Budapest, Hungary, 2-5 December 2013, pp. 943.



Registry number: DEENK/384/2022.PL
Subject: PhD Publication List

Candidate: János Tóth
Doctoral School: Doctoral School of Informatics
MTMT ID: 10056957

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in international journals (2)

1. **Tóth, J.**, Tomán, H., Hajdu, A.: Efficient sampling-based energy function evaluation for ensemble optimization using simulated annealing.
Pattern Recognit. 107, 1-12, 2020. ISSN: 0031-3203.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.patcog.2020.107510>
IF: 7.74
2. Besenczi, R., **Tóth, J.**, Hajdu, A.: A review on automatic analysis techniques for color fundus photographs.
Comput. Struct. Biotechnol. J. 14, 371-384, 2016. ISSN: 2001-0370.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csbj.2016.10.001>

Foreign language conference proceedings (4)

3. **Tóth, J.**, Kapusi, T. P., Harangi, B., Tomán, H., Hajdu, A.: Accelerating the Optimization of a Segmentation Ensemble using Image Pyramids.
In: 11th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA 2019).
Eds.: S. Lončarić, R. Bregović, M. Carli, M. Subašić, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Piscataway, NJ, USA, 43-48, 2019. ISBN: 9781728131405
4. Harangi, B., **Tóth, J.**, Hajdu, A.: Fusion of deep convolutional neural networks for microaneurysm detection in color fundus images.
In: 2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) / Gregg Suaning, Olaf Dossel, IEEE, Hawaii, USA, 3705-3708, 2018.
ISBN: 9781538636466
5. **Tóth, J.**, Tomán, H., Hajdu, A.: Improving the Performance of an Ensemble-Based Exudate Detection System using Stochastic Parameter Optimization.
In: 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Eds.: Sergio Cerutti, Paolo Bonato, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Seattle (WA), USA, 5243-5246, 2015.





6. **Tóth, J.**, Szakács, L., Hajdu, A.: Finding the optimal parameter setting for an ensemble-based lesion detector.
Proc. Int. Conf. Image Proc. 3532-3536, 2014. ISSN: 1522-4880.

List of other publications

Hungarian scientific articles in Hungarian journals (2)

7. Bogacsovics, G., Hajdu, A., Harangi, B., Lakatos, I., Lakatos, R., Szabó, M., Tiba, A., **Tóth, J.**, Tarcsi, Á.: Adatelemzési folyamat és keretrendszer a közigazgatás számára.
Közigazgatástudomány. 1 (2), 146-158, 2021. ISSN: 2786-1910.
DOI: <http://dx.doi.org/10.54200/kt.v1i2.24>
8. Bogacsovics, G., Hajdu, A., Harangi, B., Lakatos, I., Lakatos, R., Szabó, M., Tiba, A., **Tóth, J.**: Napelemfarmok Magyarország területén történő elhelyezését segítő döntéstámogató rendszer fejlesztése.
Közigazgatástudomány. 1 (2), 134-145, 2021. ISSN: 2786-1910.
DOI: <http://dx.doi.org/10.54200/kt.v1i2.23>

Foreign language scientific articles in Hungarian journals (2)

9. **Tóth, J.**, Tornai, R., Labancz, I., Hajdu, A.: Efficient Visualization for an Ensemble-based System.
Acta Polytech. Hung. 16 (2), 59-75, 2019. ISSN: 1785-8860.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12700/APH.16.2.2019.2.4>
IF: 1.219
10. Antal, B., Tavares, M. K. G. S., Kovács, L., Harangi, B., Lázár, I., Nagy, B., Kovács, G., Szakács, J., **Tóth, J.**, Pető, T., Csutak, A., Hajdu, A.: Data analysis applied to diabetic retinopathy screening: performance evaluation.
Ann. Math. Inform. 49, 3-9, 2018. ISSN: 1787-5021.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33039/ami.2018.10.002>

Foreign language scientific articles in international journals (3)

11. Huang, X., Zhou, S., **Tóth, J.**, Hajdu, A.: Cuproptosis-related gene index: a predictor for pancreatic cancer prognosis, immunotherapy efficacy, and chemosensitivity.
Front. Immunol. Epub, 1-31, 2022. EISSN: 1664-3224.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fimmu.2022.978865>
IF: 8.786 (2021)





12. Bogacsovics, G., **Tóth, J.**, Hajdu, A., Harangi, B.: Enhancing CNNs through the use of hand-crafted features in automated fundus image classification.
Biomed. Signal Process. Control. 76, 1-10, 2022. ISSN: 1746-8094.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bspc.2022.103685>
IF: 5.076 (2021)
13. Porwal, P., Pachade, S., Kokare, M., Deshmukh, G., Son, J., Bae, W., Liu, L., Wang, J., Liu, X., Gao, L., Wu, T., Xiao, J., Wang, F., Yin, B., Wang, Y., Danala, G., He, L., Choi, Y. H., Lee, Y. C., Jung, S. H., Li, Z., Sui, X., Wu, J., Li, X., Zhou, T., **Tóth, J.**, Baran, Á., Kori, A., Chennamsetty, S. S., Safwan, M., Alex, V., Lyu, X., Cheng, L., Chu, Q., Li, P., Ji, X., Zhang, S., Shen, Y., Dai, L., Saha, O., Sathish, R., Melo, T., Araújo, T., Harangi, B., Sheng, B., Fang, R., Sheet, D., Hajdu, A., Zheng, Y., Mendonça, A. M., Zhang, S., Campilho, A., Zheng, B., Shen, D., Giancardo, L., Quellec, G., Mériaudeau, F.: IDRiD: Diabetic Retinopathy: segmentation and grading challenge.
Med. Image Anal. 59, 1-26, 2020. ISSN: 1361-8415.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.media.2019.101561>
IF: 8.545

Hungarian conference proceedings (1)

14. Ayoub, A., Hajdu, A., Nagy, Á., Szakács, J., **Tóth, J.**: Automatikus pigmenthálózat-detektálás dermatoszkópos képeken.
In: *Képfeldolgozók és Alakfelismerők 9. országos konferenciája*. Szerk.: Czúni László, NJSZT-KÉPAF, Bakonybél, 439-449, 2013.

Foreign language conference proceedings (8)

15. Harangi, B., **Tóth, J.**, Baran, Á., Hajdu, A.: Automatic screening of fundus images using a combination of convolutional neural network and hand-crafted features.
In: *41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. Ed.: Riccardo Barbieri, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Piscataway, NJ, USA, 2699-2702, 2019. ISBN: 9781538613122
16. Harangi, B., **Tóth, J.**, Bogacsovics, G., Kupás, D., Kovács, L., Hajdu, A.: Cell detection on digitized Pap smear images using ensemble of conventional image processing and deep learning techniques.
In: *11th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA 2019)*. Eds.: S. Lončarić, R. Bregović, M. Carli, M. Subašić, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Piscataway, NJ, USA, 38-42, 2019. ISBN: 9781728131405
17. **Tóth, J.**, Bartha, L., Szabó, T., Lázár, I., Harangi, B., Hajdu, A.: An online application for storing, analyzing, and sharing dermatological data.
In: *6th IEEE Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2015 : Proceedings*, October 19-21, 2015, Széchenyi István University Győr, Hungary, IEEE, Danvers, 339-342, 2015. ISBN: 9781467381284





18. **Tóth, J.**, Kovács, L., Harangi, B., Kiss, C., Mohácsi, A. I., Orosz, Z., Hajdu, A.: An Online Benchmark System for Image Processing Algorithms.
In: 5th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications. Ed.: Baranyi Péter, CogInfoCom, Vietri sul Mare, Italy, 377-385, 2014. ISBN: 9781479972807
19. Lámfalusi, C., Girus, D., Kruppa, K. T., **Tóth, J.**, Hajduné Pocsai, E., Kunkli, R., Hajdu, A., Bálint, B. L.: Adding a scalable visualization technique to the UCSC genome browser.
In: 4th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2013 : Proceedings, December 2-5, 2013 Budapest, Hungary. Ed.: Péter Baranyi, IEEE, Danvers, 943-944, 2013. ISBN: 9781479915439
20. **Tóth, J.**, Papp, I., Tornai, R., Labancz, I., Hajduné Pocsai, E., Hajdu, A.: Cognitive visualization for the design of complex systems.
In: 4th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2013 : Proceedings, December 2-5, 2013 Budapest, Hungary. Ed.: Péter Baranyi, IEEE, Danvers, 419-422, 2013. ISBN: 9781479915439
21. Lámfalusi, C., Girus, D., Kruppa, K. T., **Tóth, J.**, Hajduné Pocsai, E., Kunkli, R., Hajdu, A., Bálint, B. L.: Extending the visualization capabilities of a genome browser.
In: 4th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2013 : Proceedings, December 2-5, 2013 Budapest, Hungary. Ed.: Péter Baranyi, IEEE, Danvers, 419-422, 2013. ISBN: 97814799115439
22. Hajdu, A., **Tóth, J.**, Pistár, Z., Domokos, B., Török, Z.: An ensemble-based collaborative framework to support customized user needs.
In: 3rd IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications, CogInfoCom 2012 : Proceedings, December 2-5, 2012 Košice, Slovakia. Ed.: Péter Baranyi, IEEE, Danvers, 285-290, 2012. ISBN: 9781467351874

Foreign language abstracts (2)

23. Hajdu, A., Harangi, B., **Tóth, J.**, Pap, M., Baran, Á.: Combining Convolutional Neural Networks and Hand-Crafted Features in Medical Image Classification Tasks.
In: 20th European Conference on Mathematics for Industry : Book of Abstracts. Ed.: Bodó Á., Fekete I., Izsák F., Maros G., Simon L. P, Bolyai János Matematikai Társulat, Budapest, 299, 2018.





24. **Tóth, J.**, Kovács, L., Harangi, B., Kiss, C., Mohácsi, A. I., Orosz, Z., Hajdu, A.: An Online System for Algorithm Benchmarking.

In: 5th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications. Ed.: Baranyi Péter, CogInfoCom, Vietri sul Mare, Italy, 383, 2014. ISBN: 9781479972807

Total IF of journals (all publications): 31,366

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 7,74

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

09 August, 2022

