

# RAPORT ȘTIINȚIFIC 2015-2017

PNII-RU-TE-2014-4-1130

## *Noi abordări ale automatelor celulare cu aplicații în segmentarea imaginilor medicale*

Obiectivele etapelor 2015, 2016 și 2017 au fost următoarele: (1) *Managementul proiectului*, (2) *Asigurarea prerechizitelor*, (3) *Dezvoltarea de tehnici bazate pe automate celulare cu topologii hiper-conectate*, (4) *Dezvoltarea de tehnici bazate pe automate celulare cu topologii rare*, (5) *Dezvoltarea de tehnici bazate pe automate celulare cu topologii ierarhice*, (6) *Diseminarea și exploatarea rezultatelor*.

Aceste obiective au fost realizate în totalitate, obținându-se astfel toate rezultatele propuse pentru etapele 2015, 2016 și 2017 (*plan de monitorizare, rapoarte de progres, sesiuni de transfer al cunoștințelor, sesiuni științifice, bază de date de imagini medicale, acces și cunoștințe despre Millipede, vizite la Universitatea din Oxford, vizite la Universitatea Babeș-Bolyai, noi tehnici de segmentare a imaginilor bazate pe automate celulare cu topologii hiper-conectate, noi tehnici hibride ce conțin elemente de automate celulare cu topologii hiper-conectate, noi tehnici de segmentare a imaginilor bazate pe automate celulare cu topologii rare, noi tehnici hibride ce conțin elemente de automate celulare cu topologii rare, noi tehnici de segmentare a imaginilor bazate pe automate celulare cu topologii ierarhice, noi tehnici hibride ce conțin elemente de automate celulare cu topologii ierarhice, pagină web proiect actualizată, minim un articol de tip review, publicații, comunicări sau postere, workshop, rapoarte publice, raport final, rapoarte de audit*). Aceste rezultate vor fi detaliate în secțiunile următoare ale acestui raport.

### **Obiectiv 1: Managementul proiectului**

**Activități:** *monitorizare, administrare și raportare, evaluare și control, audit.*

Activitatea de management a proiectului a avut în vedere următoarele: stabilirea și delegarea sarcinilor, coordonarea și controlul sarcinilor, monitorizarea proiectului, controlul resurselor financiare și comunicarea. Evaluarea a fost un proces derulat continuu, iar etapa s-a finalizat cu raportarea activității fiecărui membru al echipei. Managementul proiectului s-a derulat conform obiectivelor proiectului. La finalul anului 2016 a avut loc auditarea proiectului pentru anii 2015 și 2016, iar la finalul etapei 2017 a fost loc o nouă auditare. În urma acestor activități s-au întocmit rapoarte de audit. La finalul fiecărei etape s-a întocmit un raport științific, iar la finalul proiectului s-a întocmit un raport final.

**Rezultate:** *plan de monitorizare, rapoarte de progres, raport final, rapoarte publice, rapoarte de audit*

### **Obiectiv 2: Asigurarea prerechizitelor**

**Activități:** *investigarea conceptelor de bază ale automatelor celulare, investigarea tehnicilor de segmentare a imaginilor medicale, colectarea și înțelegerea datelor, setarea mediului de dezvoltare software.*

#### **A2.1 Investigarea conceptelor de bază ale Automatelor Celulare**

S-au investigat conceptele de bază ale Automatelor Celulare (AC) și principalele probleme abordate în acest context [And96, Chi10, Das94, Oli06, Fer01, Gog09, Jui98, Jui98a, Jui00, Koz92, Lan95, Mar98, Mit93, Mit96, Mit06, Mor01, Oli09, Pac88, Pag02, Tom02, Wol08, Wol86]. Conceptul de Automate Celulare a fost introdus de către Neumann și Ulam la începutul anilor 1950 [Neu66]. Automatele celulare sunt sisteme dinamice în care interacțiunile locale ale componentelor individuale evoluează în timp și duc la obținerea unui anumit comportament al întregii rețele. Un automat celular este format dintr-un șir de celule, fiecare celulă putând avea una dintr-un set finit de stări. Atât timpul cât și spațiul sunt discrete pentru automatele celulare, starea unei celule fiind determinată de starea sa și de starea celulelor din vecinătatea sa la momentul anterior.

O problemă dificilă în ceea ce privește automatele celulare este determinarea unei reguli de actualizare a celulelor care duce la obținerea unui anumit comportament global. Problema devine cu atât mai dificilă în cazul unui număr mai mare de dimensiuni sau de celule. Interesul arătat de cercetatori pentru automatele celulare ca și mașini capabile de calcul este datorat în mare parte acestei maniere „de jos în sus” de obținere a unui

comportament complex pornind de la interacțiuni locale ale componentelor individuale și simple (calcul emergent).

Am investigat diferite tipuri de automate celulare și metode existente în literatură pentru rezolvarea mai multor probleme atât dintr-o perspectivă "local spre global", cât și dintr-o perspectivă "global spre local". De asemenea, au fost investigate atât automate celulare bidimensionale cât și cele cu 3 dimensiuni.

## **A2.2 Investigarea tehnicilor de segmentare a imaginilor medicale**

S-a realizat investigarea tehnicilor de segmentare a imaginilor medicale existente în literatură [Arn13, Bea12, Bi13, Bie14, Chr12, Dar13, Diw13, Gao14, Gho11, Gol10, Gol14, Gol09, Gol08, Kau10, Nay13, Pri13, Ros10, Qad12, Raj13, Saf11, Sho13, Wan11, Won11, Yag14].

Problema segmentării a fost abordată din două perspective: identificarea a două etichete asociate pixelilor dintr-o imagine: eticheta pentru clasa de interes principal și eticheta pentru clasa corespunzătoare fundalului; identificarea mai multor etichete asociate pixelilor dintr-o imagine: etichete pentru clasele de interes și eticheta pentru clasa corespunzătoare fundalului. O modalitate de grupare a metodelor de segmentare este dată în [Hei09], și o altă posibilă clasificare în [Zha08].

Această activitate a continuat și în anul 2016 prin investigarea tehnicilor de procesare a imaginilor bazate pe automate celulare (cu focus pe tehnici de segmentare). În prelucrarea imaginilor sunt folosite de cele mai multe ori automatele celulare bidimensionale. Pixelii unei imagini reprezintă celule ale unui automat celular și acestea își modifică starea în funcție de stările pixelilor vecini. Automate celulare cu stări multiple permit procesarea imaginilor gri și color. Automatele celulare au fost folosite pentru probleme cum ar fi: transformări geometrice, reducerea zgomotului, detectarea unor proprietăți ale imaginilor sau detectarea marginilor obiectelor de interes din imagini. Și problema segmentării imaginilor a fost abordată cu tehnici bazate pe automate celulare, dar într-o mică măsură.

Cea mai simplă utilizare a AC pentru procesarea imaginilor e dată de aplicarea unor reguli specifice cum ar fi: reguli totalistice [Chr12, Diw13, Qad12], reguli ale majorității [Won11] sau reguli liniare [Moh13, Nay14a]. O altă categorie de AC aplicate pentru procesarea imaginilor este dată de AC bazate pe semințe (seeds) – pixeli adnotați de către utilizator înainte de rularea algoritmului. Una dintre cele mai populare tehnici din această categorie pentru segmentarea imaginilor este algoritmul GrowCut [Vez05]. În [Kau10] autorii arată că GrowCut nu este diferit de algoritmul Ford-Bellman care calculează cele mai scurte drumuri de la o celulă la alta într-un automat celular. O versiune nesupervizată a algoritmului GrowCut este propusă în [Gho11]. O altă versiune care îmbunătățește abilitatea algoritmului de a detecta corect marginile este propusă în [Bea12]. Alte variante apar de asemenea în [Liu12, Ham12]. În [Raj13] autorii propun o îmbunătățire a acestui algoritm prin automatizarea procesului de adnotare a semințelor. În [Bi13] zgomotul din imagine este redus înainte de aplicarea algoritmului, crescându-i astfel performanța.

O altă clasă de automate celulare aplicate pentru procesarea imaginilor este aceea în care sunt utilizați algoritmi pentru determinarea unor reguli optime ale AC. O metodă deterministă bazată pe o abordare Hill-Climbing a fost propusă în [Ros05]. Există de asemenea multe euristici bazate pe algoritmi genetici [Tor12, Pri13, Sla07, Sla15, Kaz11], Particle Swarm Optimization [Dje12] și programare genetică [Sat10, San14]. Un automat celular bazat pe mulțimi de nivel a fost propus în [Che07], și automate celulare continue în [Saf11, Saf11b].

În aceste etape ale implementării proiectului au fost de asemenea investigate metode de evaluare a algoritmilor de segmentare a imaginilor medicale existente în literatură. Dintre cele mai populare metrice de evaluare amintim: coeficientul Dice [Dice45], coeficientul Jaccard [Jac12], F-measure (dată de Precision și Recall), Fallout, rata de fals negative (FNR), Global Consistency Error [Martin01].

Un articol de tip review (survey) care prezintă atât tehnici de aplicare ale automatelor celulare în procesarea imaginilor (cu accent pe segmentarea imaginilor), cât și cele mai populare metrice de evaluare folosite în segmentarea imaginilor medicale a fost publicat de către membrii echipei proiectului în [Dio17a]. Acesta studiu a fost extins într-un articol aflat în curs de evaluare la un jurnal ISI [And17b].

## **A2.3 Colectarea și înțelegerea datelor**

S-a realizat colectarea de date pentru diferite tipuri de țesut: date abdominale precum și scanări ale coloanei vertebrale sau ale articulației genunchiului. Aceste imagini sunt date de scanări tomografice (CT). De asemenea,

grupul de cercetare de la Universitatea din Oxford a pus la dispoziția echipei de cercetare a acestui proiect datele pe care le deține pentru a putea testa tehnicile dezvoltate în acest proiect.

Această fază de pregătire va duce la aranjamentul datelor sub formă de laticice pentru procesarea acestora cu automate celulare. Laticicele vor fi mai întâi 2D, dar dimensionalitatea acestora va rămâne parametrizabilă în așa fel încât să poată fi procesate sub forma de volum 3D. Planul proiectului este de a concepe mai întâi algoritmi pentru structuri aranjate simplu, urmând ca aceștia să fie generalizați ulterior pentru structuri din ce în ce mai complexe.

#### A2.4 Setarea mediului de dezvoltare software

Grupul de cercetare de la Universitatea Babes-Bolyai a primit acces de utilizare a softului Millipede, împreună cu un manual de utilizare a acestuia. Grupul de cercetare de la Universitatea in Oxford a realizat reprogramarea codului sursă în așa fel încât acestea să poată procesa imagini din diferite modalități de scanare (RMN, tomograf, microCT), achiziționate la rezoluții diferite (512x512, 2000x2000, etc). Codul va oferi opțiunea ca imaginile să fie procesate sub forma unui singur volum 3D, sau individual, felie cu felie. Algoritmii vor fi concepuți în așa fel încât dimensionalitatea acestora (2D sau 3D) să fie parametrizabilă.

**Rezultate:** *sesiuni de transfer al cunoștințelor* (realizate săptămânal cu cercetătorul de la Oxford, atât prin intermediul Skype cât și față în față cu ocazia primei vizite a Irinei Voiculescu la UBB), *bază de date de imagini medicale, acces și cunoștințe despre Millipede, articole de tip review* [Dio17a, And17b], *vizită la Universitatea Babeș-Bolyai* (prima vizită a Irinei Voiculescu din februarie 2016), *sesiuni științifice* (organizate atât în interiorul grupului de cercetare de la Departamentul de Informatică UBB, cât și cu participare publică în cadrul celor două seminarii științifice susținute de către Irina Voiculescu la UBB în februarie, respectiv martie 2016).

### Obiectiv 3: Tehnici bazate pe automate celulare cu topologii hiper-conectate

**Activitati:** *investigarea topologiilor hiper-conectate pentru automate celulare, dezvoltarea de tehnici bazate pe topologii hiper-conectate, evaluarea și îmbunătățirea tehnicilor dezvoltate*

#### A3.1 Investigarea topologiilor hiper-conectate pentru automate celulare

În contextul segmentării imaginilor au fost investigate mai multe tipuri de topologii hiper-conectate date de tipurile de vecinătăți folosite la actualizarea stării curente. Deoarece în contextul prelucrării imaginilor cea mai naturală modalitate de reprezentare a acestora folosind automate celulare este bidimensională, au fost investigate următoarele tipuri de vecinătăți:

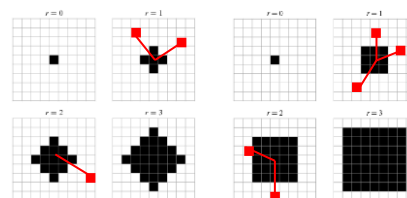
von Neumann	Moore
$N_{(x_0, y_0)}^v = \{(x, y) :  x - x_0  +  y - y_0  \leq r\}.$	$N_{(x_0, y_0)}^M = \{(x, y) :  x - x_0  \leq r,  y - y_0  \leq r\}.$

Mai sus apare definiția vecinătății unei celule  $(x_0, y_0)$  pentru o rază  $r$ . În analizele efectuate de către echipa proiectului, au fost investigate aceste tipuri de vecinătăți pentru o rază  $r=1$ , respectiv  $r=2$ . Acestea au fost analizate în contextul tehnicii de segmentare GrowCut, pentru a vedea rolul pe care topologia îl are pentru accelerarea procesului de căutare și obținerea unei performanțe crescute. Studiul a fost efectuat folosindu-se diferite tipuri de imagini – atât reale, cât și sintetice. S-au folosit cele mai utilizate metrice din literatura de specialitate cu scopul de a asigura o analiză relevantă ale cărei concluzii să avanseze cercetarea în domeniu. Concluziile studiului au fost că vecinătatea Neumann duce la blocarea căutării în optime locale, în timp ce cele mai bune rezultate sunt obținute atunci când topologia automatului celular are la bază o vecinătate de tip Moore. În ceea ce privește compararea vecinătăților standard cu variantele lor extinse, în mod contraintuitiv, variantele extinse nu reușesc să îmbunătățească performanța suficient de mult încât efortul computațional crescut să poată fi trecut cu vederea.

#### A3.2 Dezvoltarea de tehnici bazate pe topologii hiper-conectate

Analiza topologiilor de mai sus a dus la dezvoltarea de noi tehnici de von Neumann      Moore

segmentare bazate pe topologii hiper-conectate. Acestea pornesc de la o topologie de tip Moore sau von Neumann, dar o îmbogățesc prin considerarea în plus a unor vecini la distanță care dau naștere unei topologii de tip rețea. În figura din partea dreaptă a textului sunt ilustrate cu roșu exemple de noduri și arce nou adăugate la vecinătatea regulată Moore sau von Neumann de rază 1 și 2, obținându-se astfel mici rețele prin care informația se propagă de la o celulă la alta mult mai rapid și în același timp mult mai eficient.



În cadrul proiectului au fost investigate mai multe astfel de topologii de tip rețea ale vecinătăților, care au dus la dezvoltarea mai multor tehnici bazate pe topologii hiper-conectate.

1. *Local connected network (LCN)* – celula curentă își actualizează starea în funcție de celulele dintr-o vecinătate de tip rețea formată din celulele din vecinătatea de tip Moore sau von Neumann, la care se adaugă celule exterioare dar aflate în imediata apropiere (nu mai departe de 2 straturi)
2. *Far connected network (FCN)* – celula curentă își actualizează starea în funcție de celulele dintr-o vecinătate de tip rețea formată din celulele din vecinătatea de tip Moore sau von Neumann, la care se adaugă celule exterioare care nu se află în imediata apropiere (mai departe de 2 straturi)
3. *Low connected network (DCN)* – numărul de celule exterioare este 1
4. *High connected network (DCN)* – numărul de celule exterioare este 3 sau 5

Aceste tipuri de vecinătăți și topologii aferente au dat naștere unor noi tehnici de segmentare a imaginilor bazate pe topologii hiper-conectate. Ceea ce se obține extinzând astfel tipul topologiei este un efect crescut de emergență, care este una dintre caracteristicile esențiale ale automatelor celulare (și ale rețelelor complexe în general). Acest lucru este în mod special evident în contextul algoritmului GrowCut care folosește automatele celulare doar ca și instrument de paralelizare, fără a profita de întregul fenomen de emergență care duce la obținerea unui comportament global semnificativ din punct de vedere semantic, bazat pe interacțiuni locale.

### A3.3 Evaluarea și îmbunătățirea tehnicilor dezvoltate

Tehnicile dezvoltate în cadrul activității anterioare au fost evaluate folosind unele dintre cele mai utilizate metrice din literatura de specialitate: coeficientul Dice, precizia, rata de adevărat negative (TNR), rata de adevărat pozitive (TPR), rata de fals pozitive (FPR), Global Consistency Error (GCE). Acestea au fost testate nu doar pe imagini medicale ci și pe imagini sintetice și pe alte imagini reale. Studiul făcut a facilitat îmbunătățirea acestor tehnici și obținerea unei variante care dă cele mai performante rezultate.

Rezultatele obținute cu acest tip de topologie sunt net superioare celor care au la bază o topologie clasică, algoritmul fiind capabil să identifice nu doar obiectul principal de interes din imagine, ci și obiectele de interes mai mic din imagine. Mai jos este dat un exemplu de segmentare a unei imagini medicale în care este evident faptul că topologia de tip rețea reușește să inducă și identificarea obiectelor (organelor/tumorilor) din imagine care ar putea părea, la o primă vedere, de interes scăzut, dar care sunt totuși esențiale pentru realizarea unui diagnostic corect. Același algoritm, bazat pe o topologie regulată de tip Moore sau Neumann, nu reușește să identifice toate aceste obiecte de interes.



Studiile realizate și tehnicile propuse au fost publicate de către membrii echipei proiectului în [And16a, And16b, San17], și într-un articol aflat în curs de evaluare la un jurnal ISI [And17a].

**Rezultate:** noi tehnici de segmentare a imaginilor bazate pe automate celulare cu topologii hiper-conectate, noi tehnici hibride ce conțin elemente de automate celulare cu topologii hiper-conectate, vizită la Universitatea din Oxford (vizita Ancăi Andreica în septembrie 2016), vizită la Universitatea Babeș-Bolyai (vizita Irinei Voiculescu în

martie 2016), *sesiuni științifice* (organizate în cadrul Departamentului de Informatică UBB cu membrii echipei proiectului și alți potențiali colaboratori care au fost invitați la aceste sesiuni, dar și pe Skype, cu participarea Irinei Voiculescu).

## Obiectiv 4: Tehnici bazate pe automate celulare cu topologii rare

**Activitati:** *investigarea topologiilor rare pentru automate celulare, dezvoltarea de tehnici bazate pe topologii rare, evaluarea și îmbunătățirea tehnicilor dezvoltate*

### A4.1 Investigarea topologiilor rare pentru automate celulare

Au fost investigate automate celulare bazate pe topologii rare. În acest context au fost identificate regulile liniare [Cho08] asupra cărora cercetătorii și-au îndreptat atenția datorită necesității de a reduce dimensiunea foarte mare a spațiului de căutare ( $2^{512}$  în cazul vecinătății Moore). Regulile lineare sunt acelea care pot și realizare doar cu operatorul XOR, reducând astfel spațiul de căutare la 512 reguli.

În același context au fost investigate automatele celulare ale căror celule pot avea stări multiple. S-au identificat astfel modele cum ar fi Potts [Pot52, Wu82], Greenberg–Hastings (GH) [Gre78], studiat și în [Fis93, Fis95]. Mai există și abordări cu 3 stări, cum ar fi [Bae14].

### A4.2 Dezvoltarea de tehnici bazate pe topologii rare

În scopul dezvoltării de tehnici bazate pe topologii rare, automatele celulare abordate au fost cele care pot avea stări multiple. S-a făcut astfel trecerea de la automatele celulare binare – cele mai des studiate în literatura de specialitate – la automatele celulare ale căror celule pot avea orice valoare de gri. Această abordare este mult mai naturală în contextul prelucrării imaginilor, ale căror pixeli rareori au doar valori de alb și negru.

S-au dezvoltat astfel câteva reguli noi de evoluare a automatelor celulare bazate pe topologii rare prin faptul că din vecinătatea unui pixel (notat cu  $M$ ) se iau în considerare doar pixeli:

- $C_1$  este vecinul cu cea mai apropiată nuanță de gri față de  $M$ , dar având o valoare mai mică;
- $C_2$  este vecinul cu cea mai apropiată nuanță de gri față de  $M$ , dar având o valoare mai mare;
- $D_1$  este vecinul cu cea mai depărtată nuanță de gri față de  $M$ , dar având o valoare mai mică;
- $D_2$  este vecinul cu cea mai depărtată nuanță de gri față de  $M$ , dar având o valoare mai mare.

Au fost propuse următoarele reguli de actualizare:

1. *Close Attraction Rule (CAR)* – celula curentă își schimbă starea la cea mai apropiată nuanță de gri ( $C_1$  sau  $C_2$ ) în funcție de anumite forțe de atracție exercitate de către celulele din vecinătatea rară ( $D_1$ ,  $D_2$ )
2. *Far Attraction Rule (FAR)* – spre deosebire de regula descrisă mai sus, celula curentă ia valori de la celulele mai îndepărtate, care reprezintă chiar polii de atracție ( $D_1$  sau  $D_2$ ), urmărind astfel un progres mai rapid
3. *Fine-Tuned Attraction Rule (FTAR)* – în această regulă de ține cont și de distanța între vecinii cei mai apropiați ( $C_1$  și  $C_2$ ) și vecinii cei mai depărtați ( $D_1$  și  $D_2$ ), parametrizând astfel regulile de mai sus

Aceste reguli de actualizare au dat naștere unor tehnici diferite bazate pe topologii rare, cu care s-au obținut rezultate promițătoare în segmentarea imaginilor.

Tehnicile bazate pe topologii rare au fost dezvoltate în continuare prin considerarea aglomerărilor geometrice (așa numitor componente conexe) de pixeli care nu numai că fac parte din aceeași categorie de pixeli învecinați (de exemplu cu valori de gri mai mici decât pixelul curent), dar au și toate valorile aflate la o distanță similară și sunt conectați între ei datorită unei proximități spațiale.

După identificarea tuturor componentelor conexe de vecini similari, s-a ales un reprezentant al fiecărei componente astfel:

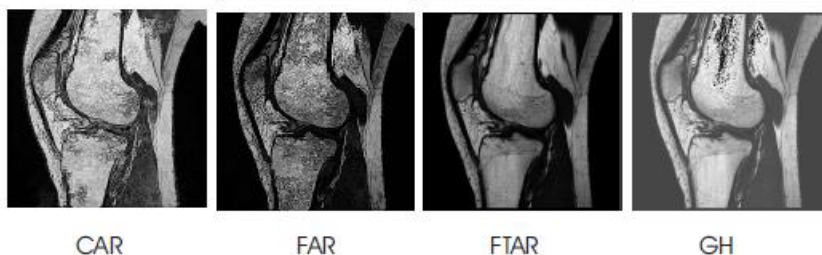
- Pixelul cu cea mai apropiată valoare de gri față de pixelul curent;
- Pixelul cu cea mai îndepărtată valoare de gri față de pixelul curent;
- Media valorilor de gri ale pixelilor.

Regulile de mai sus au fost apoi adaptate prin calculul distanțelor dintre pixelul curent și reprezentanții componentelor conexe, spre deosebire de prima abordare în care se calculau distanțele între pixelul curent și toți pixelii din vecinătate. Actualizarea celulei curente se face astfel cu valoarea reprezentantului unei componente conexe din vecinătate, conform regulilor propuse.

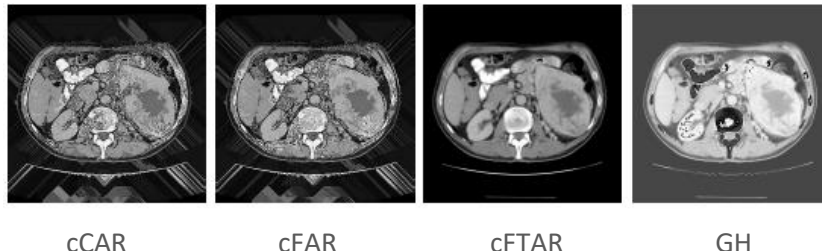
#### A4.3 Evaluarea și îmbunătățirea tehnicilor dezvoltate

Tehnicile dezvoltate în cadrul activității anterioare au fost evaluate folosind unele dintre cele mai utilizate metrice din literatura de specialitate: coeficientul Dice, precizia, rata de adevărat negative (TNR), rata de adevărat pozitive (TPR), rata de fals pozitive (FPR), Global Consistency Error (GCE). Acestea au fost testate nu doar pe imagini medicale ci și pe imagini sintetice (cu și fără zgomot) și pe alte imagini reale. Studiul făcut a facilitat îmbunătățirea acestor tehnici și obținerea unei variante care dă cele mai performante rezultate.

Figura de mai jos (o imagine cu articulația genunchiului) redă rezultatele obținute de către tehnicile dezvoltate pe baza celor trei reguli propuse inițial, alături de rezultatele obținute de una dintre cele mai competitive tehnici pentru automatele celulare cu mai multe stări (GH).



Regulile de actualizare a stării celulelor care iau în considerare reprezentanții componentelor conexe s-au dovedit a fi mult mai performante din punct de vedere al măsurilor de calitate folosite pentru evaluarea lor. În figura de mai jos pot fi văzute rezultatele unei rulări a celor trei reguli adaptate pe componente conexe în cazul unei imagini transversale a corpului, unde sunt vizibile mai multe organe interne.



O analiză a tehnicilor propuse, a rezultatelor obținute și a modalităților de îmbunătățire a acestora a fost publicată de către membrii echipei proiectului în [Dio16, Dio17b].

**Rezultate:** noi tehnici de segmentare a imaginilor bazate pe automate celulare cu topologii rare, noi tehnici hibride ce conțin elemente de automate celulare cu topologii rare, vizită la Universitatea Babeș-Bolyai (vizita Irinei Voiculescu din octombrie 2016), sesiuni științifice (organizate în cadrul Departamentului de Informatică UBB cu membrii echipei proiectului și alți potențiali colaboratori care au fost invitați la aceste sesiuni, dar și pe Skype, cu participarea Irinei Voiculescu).

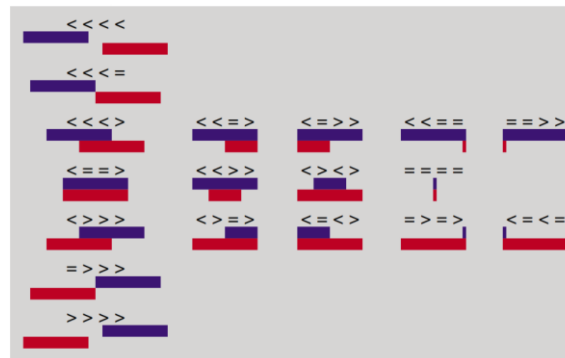
### Obiectiv 5: Tehnici bazate pe automate celulare cu topologii ierarhice

**Activitati:** investigarea topologiilor ierarhice pentru automate celulare, dezvoltarea de tehnici bazate pe topologii ierarhice, evaluarea și îmbunătățirea tehnicilor dezvoltate

#### A5.1 Investigarea topologiilor ierarhice pentru automate celulare

Datorită faptului ca în automatele celulare folosite pentru analiza imaginilor stările celulelor trebuie să ia valori multiple, cercetarea făcută de echipa proiectului a mers în direcția investigării topologiilor ierarhice care să permită apartenența unei celule la un set de valori, în loc de o singură valoare. S-a studiat astfel aritmetica

intervalelor [Chi98] și modalitatea în care acestea pot fi folosite ca și stări ale celulelor unui automat celular. Deoarece regulile de actualizare se bazează pe compararea valorilor celulelor, s-au folosit următoarele relații de ordine pentru intervale [Chi98]:



Aceste relații de ordine între intervale stau la baza dezvoltării de tehnici bazate pe topologii ierarhice prezentate în cadrul următoarei activități.

### A5.2 Dezvoltarea de tehnici bazate pe topologii ierarhice

Au fost dezvoltate tehnici bazate pe topologii ierarhice date de intervale, ceea ce reprezintă o nouă și foarte promițătoare paradigmă în domeniul automatelor celulare în general, și a aplicării lor pentru segmentarea imaginilor, în particular.

Intervalele pot fi utilizate convenabil pentru clasificarea pixelilor dintr-o imagine în regiuni semantice semnificative. În loc de valori scalare pentru nuanțe de gri, fiecare pixel dintr-o imagine poate fi reprezentat ca o gamă de valori în tonuri de gri în intervalul [0, 255]. Un automat celular poate fi rulat peste setul de pixeli folosind o regulă care necesită la fiecare iterație ca un pixel să utilizeze informațiile din vecinătatea sa Moore (3x3 sau 5x5). Se compară apoi intervalul său cu intervalele celulelor din vecinătate și decide cum să-și schimbe intervalul astfel încât fie să se apropie, fie să se distanțeze de intervalele din vecinătatea sa.

Pentru a compara intervale, folosim operatorii obișnuiți. De exemplu, pe baza celor 18 relații semnificative din figura anterioară, putem regrupa comparațiile în felul următor:

```

<[ ]   <<<<; <<<=; <<<>; <<=>; <=>>; <=>=; ==>>
=[ ]   <==>; <<>>; <><>; =====
>[ ]   <>>>; <>=>; <=<>; =>=>; <=<=; =>>>; >>>>
    
```

Intervalul  $M$  aferent pixelului curent într-un iterație este ajustat conform regulii de actualizare în următoarea iterație. Regula de actualizare folosește următoarele valori:

- $C_S$ , intervalul cel mai apropiat de valoare față de  $M$  unde  $C_S <[ ] M$
- $C_G$ , intervalul cel mai apropiat de valoare față de  $M$  unde  $C_G >[ ] M$
- $F_S$ , intervalul cel mai îndepărtat în valoare de la  $M$  unde  $F_S <[ ] M$
- $F_G$ , intervalul cel mai îndepărtat în valoare față de  $M$  unde  $F_G >[ ] M$

Pentru a măsura cât de departe sunt două intervale unul față de celălalt, folosim distanța Hausdorff. Au fost investigate mai multe reguli de actualizare, una dintre cele mai simple fiind aceea în care noul capăt stâng al intervalului  $M$  devine cea mai mică valoare dintre capătul stâng inițial și capătul drept al celui mai apropiat vecin cu o valoare mai mică decât a sa (similar pentru capătul drept al intervalului). Alte modalități de comparare și de actualizare au fost de asemenea investigate.

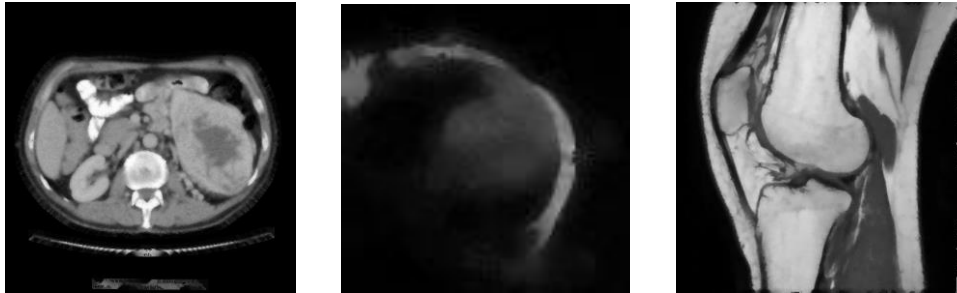
S-a analizat de asemenea modalitatea în care calculul evolutiv ar putea fi folosit pentru obținerea de reguli bazate pe topologii ierarhice pentru automate celulare. În acest scop au fost investigați algoritmi evolutivi cu mai multe obiective ca metode de selecție și de clasificare, efectuându-se o comparație sistematică a combinațiilor de obiective de clasificare cunoscute pentru a studia efectul lor în rezolvarea unor probleme specifice de învățare.



### A5.3 Evaluarea și îmbunătățirea tehnicilor dezvoltate

Tehnicile dezvoltate în cadrul activității anterioare au fost evaluate folosind unele dintre cele mai utilizate metrice din literatura de specialitate: coeficientul Dice, precizia, rata de adevărat negative (TNR), rata de adevărat pozitive (TPR), rata de fals pozitive (FPR), Global Consistency Error (GCE). Acestea au fost testate nu doar pe imagini medicale ci și pe imagini sintetice și pe alte imagini reale. Studiul făcut a facilitat îmbunătățirea acestor tehnici și obținerea unei variante care dă cele mai performante rezultate.

În figura de mai jos pot fi văzute rezultatele rulării unui automat celular bazat pe intervale pe mai multe tipuri de imagini medicale:



Rezultatele obținute în cadrul acestei activități au fost publicate de către membrii echipei proiectului în [Voi17]. Rezultatele obținute cu acest tip de topologie sunt extrem de promițătoare și deschid drumul spre o nouă paradigmă de calcul, cu aplicații în diverse domenii, nu doar medical. Într-adevăr, orice astfel de regulă limitează intervalul de gri al fiecărui pixel la un set de valori întregi discrete. În cazul generic nu ar exista o astfel de cerință generală: este ușor să se aibă în vedere un model prin care gama de gri poate deveni un adevărat interval cu valori continue. Un astfel de model va fi investigat în cadrul proiectelor noastre viitoare.

Analiza empirică a rezultatelor experimentale obținute în cazul algoritmilor evolutivi cu mai multe obiective a fost validată printr-o metodă de comparație statistică. Rezultatele sunt ilustrate pe o colecție de imagini medicale, dar cu accent pe performanța tehnicilor evolutive din punct de vedere al unor măsuri de evaluare cunoscute. Rezultatele astfel obținute au fost prezentate într-un articol aflat în curs de evaluare [Dio17c].

**Rezultate:** noi tehnici de segmentare a imaginilor bazate pe automate celulare cu topologii ierarhice, noi tehnici hibride ce conțin elemente de automate celulare cu topologii ierarhice, vizită la Universitatea Babeș-Bolyai (vizita Irinei Voiculescu în iulie 2017), sesiuni științifice (organizate în cadrul Departamentului de Informatică UBB cu membrii echipei proiectului și alți potențiali colaboratori care au fost invitați la aceste sesiuni, dar și pe Skype, cu participarea Irinei Voiculescu).

### Obiectiv 6: Diseminarea și exploatarea rezultatelor

**Activități:** crearea și întreținerea paginii web a proiectului, publicarea în jurnale științifice și comunicarea la conferințe, organizare workshop, publicare rapoarte.

În anul 2015 a fost creată pagina web a proiectului (<http://www.cs.ubbcluj.ro/te1130/>). Această pagină web a fost actualizată pe parcursul anilor 2016 și 2017 și conține rezumatul proiectului, rapoartele aferente celor trei etape, componența echipei proiectului și lista colaboratorilor, lista actualizată a publicațiilor rezultate din proiect și evenimentele publice organizate în cadrul proiectului.

**Rezultate:** pagină web proiect actualizată, publicații, comunicări la conferințe, workshop, rapoarte publice.

#### Publicații:

- Anca Andreica, Laura Dioșan, Andreea Șandor, Investigation of Cellular Automata Neighbourhoods in Image Segmentation, Proceedings of European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2016), International Workshop on Combinations of Intelligent Methods and Applications (CIMA 2016), Hague, Netherlands, pp. 1-8 (2016) – conferință BDI, de categoria A conform clasificării CORE 2014.



- Anca Andreica, Laura Dioșan, Andreea Șandor, Exploring Various Neighborhoods in Cellular Automata for Image Segmentation, Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP 2016), Cluj-Napoca, Romania, pp. 249-255 (2016) – *conferință ISI*.
- Laura Dioșan, Anca Andreica, Irina Voiculescu, Parameterized Cellular Automata in Image Segmentation, Proceedings of International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC 2016), Timisoara, Romania, pp. 199-205 (2016) - *conferință ISI*.
- Laura Dioșan, Anca Andreica, Alina Enescu, The Use of Simple Cellular Automata in Image Processing, Studia Universitatis Babeș-Bolyai Series Informatica, LXII (1) pp. 5-14 (2017) – *jurnal BDI*.
- Laura Dioșan, Anca Andreica, Imre Boros, Irina Voiculescu, Avenues for the Use of Multi-State Cellular Automata, Proceedings of EvoStar 2017, Lecture Notes in Computer Science, vol. 10199, pp. 282-296 (2017) - *conferință BDI*.
- Andreea Șandor, Laura Dioșan, Anca Andreica, Hybrid topology in GrowCut algorithm, Proceedings of ECAL 2017, Late-breaking abstracts, pp. 19-22 (2017) - *conferință BDI*.
- Irina Voiculescu, Imre Boroș, Nicolae Popovici, Laura Dioșan, Anca Andreica, Interval-state cellular automata and their applications to image segmentation, Proceedings of SWIM-SMART 2017, accepted (2017)
- Anca Andreica, Laura Dioșan, Andreea Sandor, Butterfly Effect in GrowCut Cellular Automaton, submitted for review to International Journal of Systems Science (2017) – *jurnal ISI*.
- Laura Dioșan, Anca Andreica, Irina Voiculescu, On the use of multi-objective evolution of classifiers for breast cancer detection, submitted for review to Applied Soft Computing (2017) – *jurnal ISI*.
- Anca Andreica, Laura Dioșan, Andreea Șandor, Alina Enescu, A Survey of using Cellular Automata in image processing, submitted for review to Journal of Visual Communication and Image Representation (2017) – *jurnal ISI*.

#### **Participări la conferințe:**

- Conferința Diaspora în Cercetarea Științifică și Învățământul Superior din România, Timișoara, România, 25-28 aprilie 2016 – *participare Anca Andreica*
- Conferința Aspecte multidimensionale ale performanței diagnostice în asistența medicală spitalicească, Cluj-Napoca, România, 21-22 mai 2016 – *participare invited speaker Anca Andreica*
- European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2016), Hague, Netherlands, 29 august – 2 septembrie 2016 – *participare cu lucrare Anca Andreica*
- IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP 2016), Cluj-Napoca, România, 8-10 septembrie 2016 – *participare cu lucrare Laura Dioșan, Andreea Șandor*
- International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC 2016), Timișoara, România, 24-27 septembrie 2016 – *participare cu lucrare Laura Dioșan, Anca Andreica, Irina Voiculescu*
- EvoStar 2017, Amsterdam, Olanda, 19-21 aprilie 2017 - *participare cu lucrare Anca Andreica*
- 10th Summer Workshop on Interval Methods, and 3rd International Symposium on Set Membership - Applications, Reliability and Theory (SWIM-SMART 2017), Manchester, UK, 14-16 iunie 2017 – *participare cu lucrare Irina Voiculescu*
- 8th Iberian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis (ibPRIA 2017), 20-23 iunie 2017 – *participare Anca Andreica*
- 14th European Conference on Artificial Life (ECAL 2017), 4-8 septembrie 2017 – *participare cu poster*

#### **Participări la școli de vară:**

- International Summer School on Evolutionary Computing in Optimization and Data Mining (ECODAM 2017), 19-22 iunie 2017 – *participare Imre Boroș*
- International Summer School on Deep Learning, 17-21 iulie 2017 – *participare Andreea Șandor, Imre Boroș, Alina Enescu*

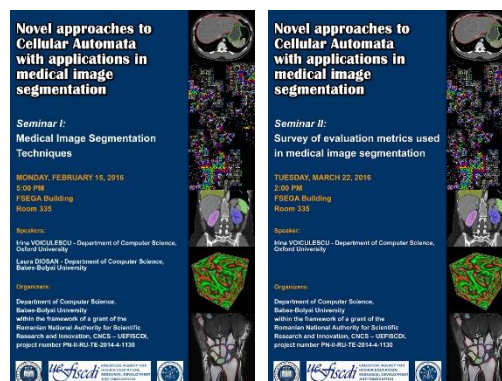
#### **Stagii de cercetare:**

- Februarie 2016, Irina Voiculescu la Universitatea Babeș-Bolyai
- Martie 2016, Irina Voiculescu la Universitatea Babeș-Bolyai
- Septembrie 2016, Anca Andreica la Universitatea din Oxford

- Octombrie 2016, Irina Voiculescu la Universitatea Babeş-Bolyai
- Iunie 2017, Anca Andreica la Universitatea din Lisabona
- Iulie 2017, Irina Voiculescu la Universitatea Babeş-Bolyai

#### Seminarii publice organizate:

- 15 februarie 2016, 17:00, sala 335 (clădirea FSEGA), Irina Voiculescu (Universitatea Oxford) și Laura Dioșan (Universitatea Babeş-Bolyai): Novel Approaches to Cellular Automata with Applications in Medical Image Segmentation (Seminar I: Medical Image Segmentation Techniques)
- 22 martie 2016, 14:00, sala 335 (clădirea FSEGA), Irina Voiculescu (Universitatea Oxford): Novel Approaches to Cellular Automata with Applications in Medical Image Segmentation (Seminar II: Survey of evaluation metrics used in medical image segmentation)



#### Workshop:

- 8 mai 2017, 10:00-18:00, sala C335 (clădirea FSEGA), Workshop on the use of Cellular Automata in Image Segmentation

#### Colaborări:

Dincolo de o colaborare foarte bună între toți cei 6 membri ai echipei proiectului, colaborarea s-a extins și către alți cercetători în domeniu care au adus valoare acestui proiect. Echipa de colaboratori a ajuns astfel la un număr de 8, acest lucru reflectându-se în publicații comune și în pregătirea unei propuneri de proiect H2020. Astfel, echipa care lucrează pe tema proiectului s-a extins cu următorii:

- Prof. dr. Nicolae Popovici de la Departamentul de Matematică UBB – colaborare pe tema automatelor celulare bazate pe intervale și aritmetica intervalelor
- Varduhi Yeghiazaryan, doctorand la Departamentul de Informatică al Universității din Oxford – colaborare pe tema metodelor de *region growing* bazate pe automate celulare

Ca urmare a rezultatelor obținute, s-a început o colaborare pe teme conexe proiectului și cu următorii:

- Lect. dr. Balint Zoltan de la Departamentul de Fizic UBB
- Prof. dr. Sfrângeu Silviu de la Spitalul Județean de Urgență Cluj-Napoca
- Marinescu Alexandru, doctorand la Departamentul de Informatică UBB

#### Direcții de cercetare viitoare:

Rezultatele obținute în etapele 2015, 2016 și 2017 asigură toate premisele pentru continuarea cu succes a cercetării în acest domeniu. Se va continua astfel investigarea noii paradigme în care automatele celulare pot avea stări de tip interval, acestea introducând o mai mare finețe în schimbarea stării celulelor de la o iterație la alta. Vor fi de asemenea investigate tehnici evolutive pentru obținerea de noi reguli cu performanță competitivă. Pornind de la rezultatele obținute, echipa proiectului împreună cu alți colaboratori pregătește scrierea unei propuneri de proiect H2020 pe tema tehnicilor de inteligență artificială aplicate în domeniul medical.

Director proiect

Prof. dr. Anca Andreica

## Bibliografie:

- [And96] Andre, D., F. H. Bennett, III, and John R. Koza. Discovery by genetic programming of a cellular automata rule that is better than any known rule for the majority classification problem. In Proceedings of the First Annual Conference on Genetic Programming, GECCO '96, pages 3–11, Cambridge, MA, USA, MIT Press (1996)
- [And16a] Anca Andreica, Laura Diosan, Andreea Sandor, Investigation of Cellular Automata Neighbourhoods in Image Segmentation, Proceedings of European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2016), International Workshop on Combinations of Intelligent Methods and Applications (CIMA 2016), Hague, Netherlands, pp. 1-8 (2016)
- [And16b] Anca Andreica, Laura Diosan, Andreea Sandor, Exploring Various Neighborhoods in Cellular Automata for Image Segmentation, Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP 2016), Cluj-Napoca, Romania, pp. 249-255 (2016)
- [And17a] Anca Andreica, Laura Diosan, Andreea Sandor, Butterfly Effect in GrowCut Cellular Automaton, submitted for review to International Journal of Systems Science (2017)
- [And17b] Anca Andreica, Laura Diosan, Andreea Sandor, Alina Enescu, A Survey of using Cellular Automata in image processing, submitted for review to Journal of Visual Communication and Image Representation (2017)
- [Arn13] Arndt, O.J., Scheuermann, B., Rosenhahn, B., "RegionCut" - Interactive Multi-Label Segmentation Utilizing Cellular Automaton, IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV), pp. 309-316 (2013)
- [Bae14] Baetens, J.M., Baets, B.D.: Towards a comprehensive understanding of multi-state cellular automata. In Was, J., Sirakoulis, G.C., Bandini, S., eds.: ACRI. Volume 8751 of Lecture Notes in Computer Science., Springer (2014) 16–24
- [Bea12] Beasley, R.A., Semiautonomous Medical Image Segmentation Using Seeded Cellular Automaton Plus Edge Detector, ISRN Signal Processing, Volume 2012 (2012)
- [Bi13] Bi, L., Kim, J., Wen, L., Kumar, A., Fulham, M., Feng, D.D., Cellular automata and anisotropic diffusion filter based interactive tumor segmentation for positron emission tomography, Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. (2013)
- [Bie14] Biediger, D., Collet, C., Armspach, J.P., Multiple sclerosis lesion detection with local multimodal Markovian analysis and cellular automata 'GrowCut', Journal of Computational Surgery, vol. 1, issue 3 (2014)
- [Che07] Chen, Y., Yan, Z., and Chu, Y. (2007). Cellular automata based level set method for image segmentation. In Complex Medical Engineering, 2007. CME 2007. IEEE/ICME International Conference on, pages 171-174.
- [Chi98] Chiriac, D., William Walster, G., Interval Arithmetic Specification. Technical Report 1998.
- [Chi10] Chira, C., A. Gog, R. Lung, D. Iclanzan, Complex Systems and Cellular Automata Models in the Study of Complexity, Studia Informatica series, Vol. LV, No. 4, pp. 33-49 (2010)
- [Cho08] Choudhury, P. P., Nayak, B. K., Sahoo, S., and Rath, S. P. (2008). Theory and applications of two-dimensional, null-boundary, nine-neighborhood, cellular automata linear rules. CoRR, abs/0804.2346.
- [Chr12] Christiyana, C.C., Rajamani, V., Devi, U.A., Ultra Sound Kidney Image Retrieval using Time Efficient One Dimensional GLCM Texture Feature. IJCA Special Issue on Advanced Computing and Communication Technologies for HPC Applications ACCTHPCA(4):12-17 (2012)
- [Dar13] Darathi, R.F.J., Archana, K.S., Image Segmentation and Classification of Mri Brain Tumors Based On Cellular Automata and Neural Network, International Journal of Computational Engineering Research, 3 (3), pp. 323-327 (2013)
- [Das94] Das, R., M. Mitchell, J. P. Crutchfield, A genetic algorithm discovers particle-based computation in cellular automata, Parallel Problem Solving from Nature Conference (PPSN-III). Springer-Verlag, pp. 344-353 (1994)
- [Dic45] Dice, L. R. (1945). Measures of the amount of ecologic association between species. Ecology, 26(3):297–302.
- [Dio16] Laura Diosan, Anca Andreica, Irina Voiculescu, Parameterized Cellular Automata in Image Segmentation, Proceedings of International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC 2016), Timisoara, Romania, pp. 199-205 (2016)
- [Dio17a] Laura Diosan, Anca Andreica, Alina Enescu, The Use of Simple Cellular Automata in Image Processing, Studia Universitatis Babeş-Bolyai Series Informatica, LXII (1) pp. 5-14 (2017)
- [Dio17b] Laura Diosan, Anca Andreica, Imre Boros, Irina Voiculescu, Avenues for the Use of Multi-State Cellular Automata, Proceedings of EvoStar 2017, Lecture Notes in Computer Science, vol. 10199, pp. 282-296 (2017)
- [Dio17c] Laura Diosan, Anca Andreica, Irina Voiculescu, On the use of multi-objective evolution of classifiers for breast cancer detection, submitted for review to Applied Soft Computing (2017)
- [Diw13] Diwakar, M., Patel, P.K., Gupta, K., Cellular automata based edge-detection for brain tumor, Advances in Computing, International Conference on Communications and Informatics (ICACCI), pp. 53- 59 (2013)
- [Dje12] Djemame, S. and Batouche, M. (2012). Combining cellular automata and particle swarm optimization for edge detection. (14/):16-22.
- [Fer01] Ferreira, C., Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems, Complex Systems, 13, pp. 87-129 (2001)
- [Fis93] Fisch, R., Gravner, J., Griffeath, D.: Metastability in the greenberg-hastings model. Ann. Appl. Probab. 3(4) (1993) 935–967
- [Fis95] Fisch, R., Gravner, J.: One-dimensional deterministic greenberg–hastings models. Complex Systems 9 (1995) 329–348

- [Gao14] Gao, Y., Yang, J., The Application of Cellular Automaton in Medical Semiautomatic Segmentation, Chapter 9 in Cellular Automata in Image Processing and Geometry Emergence, Complexity and Computation Volume 10, pp 163-182 (2014)
- [Gho11] Ghosh, P., Antani, S.K., Long, L.R., Thoma, G.R., Unsupervised Grow-Cut: Cellular Automata-Based Medical Image Segmentation, Proceedings of the 2011 IEEE First International Conference on Healthcare Informatics, Imaging and Systems Biology (HISB '11). IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, pp. 40-47 (2011)
- [Gog09] Gog, A., C. Chira, Cellular Automata Rule Detection Using Circular Asynchronous Evolutionary Search, HAIS 2009, LNCS 5572, pp. 261-268 (2009)
- [Gol08] Golodetz, S., Voiculescu, I., Cameron, S., Region Analysis of Abdominal CT Scans using Image Partition Forests, In Proceedings of the 5th international conference on Soft computing as transdisciplinary science and technology (CSTST), pp. 432-437 (2008)
- [Gol09] Golodetz, S., Voiculescu, I., Cameron, S., Automatic Spine Identification in Abdominal CT Slices using Image Partition Forests, Proceedings of 6th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA), pp. 117-122 (2009)
- [Gol10] Golodetz, S.M., Zipping and Unzipping: The Use of Image Partition Forests in the Analysis of Abdominal CT Scans, DPhil Thesis, University of Oxford (2010)
- [Gol14] Golodetz, S.M., Nicholls, C., Voiculescu, I.D., Cameron, S.A., Two Tree-Based Methods for the Waterfall, Pattern Recognition, vol. 47, issue 10, pp. 3276-3292 (2014)
- [Gre78] Greenberg, J.M., Hastings, S.P.: Spatial patterns for discrete models of diffusion in excitable media. *SIAM Journal on Applied Mathematics* 34 (1978) 515–523
- [Ham12] Hamamci, A., Kucuk, N., Karaman, K., Engin, K., and Unal, G. B. (2012). Tumor-cut: Segmentation of brain tumors on contrast enhanced MR images for radiosurgery applications. *IEEE Trans. Med. Imaging*, 31(3):790-804.
- [Hei09] Heimann, T. [et al.] Comparison and Evaluation of Methods for Liver Segmentation From CT Datasets, *IEEE Trans. Medical Imaging*, 8 (28), pp. 1251-1265 (2009)
- [Jac12] Jaccard, P. (1912). The distribution of the flora in the alpine zone.1. *New Phytologist*, 11(2):37– 50
- [Jui00] Juille, H., J.B. Pollack, Coevolutionary learning and the design of complex systems, *Advances in Complex Systems*, 2:4, pp. 371-394 (2000)
- [Jui98] Juille, H., J.B. Pollack, Coevolving the ideal trainer: Application to the discovery of cellular automata rules, In John R. Koza, Wolfgang Banzhaf, Kumar Chellapilla, Kalyanmoy Deb, Marco Dorigo, David B. Fogel, Max H. Garzon, David E. Goldberg, Hitoshi Iba, and Rick Riolo, editors, *Genetic Programming 1998: Proceedings of the Third Annual Conference*, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, USA, Morgan Kaufmann, pp. 519-527 (1998)
- [Jui98a] Juille, H., J. B. Pollack, Coevolutionary learning: a case study, *Proc. 15th International Conf. on Machine Learning*, Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, pp. 251-259 (1998)
- [Kau10] Kauffmann, C., Piché, N., Seeded ND medical image segmentation by cellular automaton on GPU, *Int. J. Comput. Assisted Radiol. Surg.* 5 (3), pp. 251–262 (2010)
- [Kaz11] Kazar, O. and Slatnia, S. (2011). Evolutionary cellular automata for image segmentation and noise filtering using genetic algorithms. *Journal of Applied Computer Science & Mathematics*, 11(5):33-40.
- [Koz92] Koza, J.R., *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, MIT Press (1992).
- [Lan95] Land, M., R. K. Belew, No perfect two-state cellular automata for density classification exists, *Physical Review Letters*, 74:25, pp. 5148-5150 (1995)
- [Liu12] Liu, Y., Cheng, H. D., Huang, J., Zhang, Y., and Tang, X. (2012). An effective approach of lesion segmentation within the breast ultrasound image based on the cellular automata principle. *J. Digital Imaging*, 25(5):580-590.
- [Mar98] Mariano, A.S., G. M. B. de Oliveira, Evolving one-dimensional radius-2 cellular automata rules for the synchronization task, *AUTOMATA-2008 Theory and Applications of Cellular Automata*, Luniver Press, pp. 514-526 (1998)
- [Mar01] Martin, D. R., Fowlkes, C. C., Tal, D., and Malik, J. (2001). A database of human segmented natural images and its application to evaluating segmentation algorithms and measuring ecological statistics. In *ICCV*, pages II: 416–423.
- [Mit06] Mitchell, M., M. D. Thomure, N. L. Williams, The role of space in the Success of Coevolutionary Learning, *Proceedings of ALIFE X - The Tenth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems* (2006).
- [Mit93] Mitchell, M., P.T. Hraber, J.P. Crutchfield, Revisiting the edge of chaos: Evolving cellular automata to perform computations, *Complex Systems*, 7, pp. 89-130 (1993)
- [Mit96] Mitchell, M., J.P. Crutchfield, R. Das, Evolving cellular automata with genetic algorithms: A review of recent work, In *Proceedings of the First International Conference on Evolutionary Computation and Its Applications (EvCA'96)*. Russian Academy of Sciences (1996).
- [Moh13] Mohammed, J. and Nayak, D. R. (2013). An efficient edge detection technique by two dimensional rectangular cellular automata. *CoRR*, abs/1312.6370.
- [Mor01] Morales, F.J., J. P. Crutchfield, M. Mitchell, Evolving two-dimensional cellular automata to perform density classification: a report on work in progress, *Parallel Comput.*, 27, pp. 571-585 (2001)

- [Nay13] Nayak, D.R., Sahu, S.K., Mohammed, J., A Cellular Automata based Optimal Edge Detection Technique using Twenty-Five Neighborhood Model, *International Journal of Computer Applications*, vol. 84, issue 10, pp. 27-33 (2013)
- [Nay14a] Nayak, D. R., Patra, P. K., and Mahapatra, A. (2014a). A survey on two dimensional cellular automata and its application in image processing. *IJCA Proceedings on International Conference on Emergent Trends in Computing and Communication (ETCC-2014)*, ETCC(1):78-87.
- [Neu66] Neumann, J.V., *The Theory of Self-Reproducing Automata*. A. W. Burks (ed.) Univ. of Illinois Press, Urbana and London (1966)
- [Oli06] Oliveira P.P.B., J.C. Bortot, G. Oliveira, The best currently known class of dynamically equivalent cellular automata rules for density classification, *Neurocomputing*, 70:1-3, pp. 35-43 (2006)
- [Oli09] Oliveira, G.M.B., L.G.A. Martins, L.B. de Carvalho, E. Fynn, Some investigations about synchronization and density classification tasks in one-dimensional and two-dimensional cellular automata rule spaces, *Electron. Notes Theor. Comput. Sci.*, 252, pp. 121-142 (2009)
- [Pac88] Packard, N. H., *Adaptation toward the edge of chaos. Dynamic Patterns in Complex Systems*, World Scientific, pp. 293-301 (1988)
- [Pag02] Pagie, L., M. Mitchell, A comparison of evolutionary and coevolutionary search, *Int. J. Comput. Intell. Appl.*, 2:1, pp. 53-69 (2002)
- [Pri13] Priego, B., Souto, D., Bellas, F., Duro, R.J., Hyperspectral image segmentation through evolved cellular automata, *Pattern Recognition Letters*, Volume 34, Issue 14, pp. 1648-1658 (2013)
- [Pot52] Potts, R.B.: Some generalized order-disorder transformations. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 48(1) (1952) 106–109
- [Qad12] Qadir, F., Peer M.A., Khan, K.A., Efficient edge detection methods for diagnosis of lung cancer based on twodimensional cellular automata, *Advances in Applied Science Research*, 3 (4), pp. 2050-2058 (2012)
- [Raj13] RajKumar, R.S., Niranjana, G., Image Segmentation and Classification of MRI Brain Tumors Based on Cellular Automata and Neural Network, *International Journal Of Computational Engineering Research*, vol. 1, issue 1 (2013)
- [Ros05] Rosin, P. L. (2005). Training cellular automata for image processing. In *SCIA*, pages 195-204.
- [Ros10] Rosin, P.L., Image processing using 3-state cellular automata, *Computer Vision and Image Understanding*, Volume 114, Issue 7, pp. 790-802 (2010)
- [Saf11] Safia, D., Oussama, D., Chawki, B.M., Image segmentation using continuous cellular automata, *Programming and Systems (ISPS)*, 10th International Symposium on DOI: pp. 94 – 99 (2011)
- [Saf11b] Safia, D. and Chawki, B. (2011). Image segmentation using an emergent complex system: Cellular automata. In *Systems, Signal Processing and their Applications (WOSSPA)*, 2011 7th International Workshop on, pages 207-210.
- [San14] Sandeli, M. and Batouche, M. (2014). Multilevel thresholding for image segmentation based on parallel distributed optimization. In *SoCPaR*, pages 134-139. IEEE.
- [San17] Andreea Sandor, Laura Diosan, Anca Andreica, Hybrid topology in GrowCut algorithm, *Proceedings of ECAL 2017, Late-breaking abstracts*, pp. 19-22 (2017)
- [Sat10] Sato, S. and Kanoh, H. (2010). Evolutionary design of edge detector using rule-changing cellular automata. In *Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC)*, 2010 Second World Congress on, pages 60-65.
- [Sho13] Shotrya, P., Bhardwaj, S., Image Segmentation Using Cellular Automata: A Technical Survey, *International Journal Of Engineering And Computer Science*, vol. 2, issue 4, pp. 1268-1272 (2013)
- [Sla07] Slatnia, S., Batouche, M., and Melkemi, K. E. (2007). Evolutionary cellular automata based-approach for edge detection. In Masulli, F., Mitra, S., and Pasi, G., editors, *Applications of Fuzzy Sets Theory*, 7th International Workshop on Fuzzy Logic and Applications, WILF 2007, Camogli, Italy, July 7-10, 2007, *Proceedings*, volume 4578 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 404{411. Springer.
- [Sla15] Slatnia, S. and Kazar, O. (2015). Evolutionary cellular automata based-approach for region detection. <http://www.researchgate.net/publication/229050070>.
- [Tom02] Tomassini, M., M. Venzi, Evolution of Asynchronous Cellular Automata for the Density Task, *Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VII, Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin / Heidelberg, 2439, pp. 934-943 (2002)
- [Tor12] Torres, B. M. P., Souto, D., Bellas, F., and Duro, R. J. (2012). Unsupervised segmentation of hyperspectral images through evolved cellular automata. In Graa, M., Toro, C., Posada, J., Howlett, R. J., and Jain, L. C., editors, *KES*, volume 243 of *Frontiers in Arti\_cial Intelligence and Applications*, pages 2160-2169. IOS Press.
- [Vez05] Vezhnevets, V. and Konouchine, V. (2005). Growcut" - interactive multi-label N-D image segmentation by cellular automata. pages 1-7. Russian Academy of Sciences.
- [Voi17] Irina Voiculescu, Imre Boros, Nicolae Popovici, Laura Diosan, Anca Andreica, Interval-state cellular automata and their applications to image segmentation, *Proceedings of SWIM-SMART 2017*, accepted (2017)
- [Wan11] Wang, D., Kwok, N.M., Jia, X., Fang, G., A cellular automata approach for superpixel segmentation, *Proceedings of the 4th International Congress on Image and Signal Processing (CISP)*, pp. 1108–1112 (2011)
- [Wol08] Wolz, D., P.P.B. de Oliveira, Very effective evolutionary techniques for searching cellular automata rule spaces, *Journal of Cellular Automata* 3, pp. 289-312 (2008)
- [Wol86] Wolfram, S., editor, *Theory and Applications of Cellular Automata*, *Advanced series on complex systems*, vol. 1, World Scientific Publishing, P. O. Box 128, Farrer Road, Singapore 9128 (1986)

- [Won11] Wongthanavas S., Cellular Automata for Medical Image Processing, Chapter 19 in "Cellular Automata - Innovative Modelling for Science and Engineering", book edited by Alejandro Salcido, ISBN 978-953-307-172-5 (2011)
- [Wu82] Wu, F.Y.: The potts model. Rev. Mod. Phys. 54 (1982) 235–268
- [Yag14] Yeghiazaryan, V., Voiculescu, I., Experiments on the Use of Fast Marching for Feature Identification, Proceedings of the Oxford University Department of Computer Science Student Conference (2014)
- [Zha08] Zhang, H., J.E. Fritts and S.A. Goldman, A survey of image segmentation evaluation, Computer Vision and Image Understanding, Elsevier, 2 (110), pp. 260-280 (2008)