



UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” din BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ de ȘTIINȚE APLICATE
Nr. Decizie din

TEZĂ DE DOCTORAT

-REZUMAT-

HAOS DETERMINIST ȘI FRACTALI
ÎN MODELAREA REȚELELOR COMPLEXE

Doctorand: Ing. **Mihai-Virgil NICHITA**

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. dr. ing. Emil PETRESCU	de la	Universitatea „POLITEHNICA” din București
Conducător de doctorat	Prof. dr. fiz. Viorel-Puiu PĂUN	de la	Universitatea „POLITEHNICA” din București
Referent	Prof. dr. fiz. Maricel AGOP	de la	Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași
Referent	Conf. dr. fiz. Dan DIMITRIU	de la	Universitatea Tehnică „Alexandru Ioan Cuza” din Iași
Referent	Prof. dr. ing. Florin POP	de la	Universitatea „POLITEHNICA” din București

BUCUREȘTI 2020

Mulțumiri

Aflându-mă în ipostaza de a concretiza studiile de doctorat, am datorita de a mulțumi persoanelor care m-au sprijinit de-a lungul timpului.

În primul rând, doresc să le mulțumesc părinților mei, Lenuța și Nicolae NICHITA, care m-au susținut în toate activitățile de-a lungul vieții și care au avut grijă ca eu să beneficiaz de cele mai bune condiții de studiu.

În special, aș dori să-i mulțumesc domnului Prof. univ. dr. Viorel-Puiu PĂUN pentru încrederea acordată și pentru coordonarea de cel mai înalt nivel pe care mi-a oferit-o în timpul stagiului de doctorat. Am avut onoarea de a beneficia de sfaturile și cunoștințele unui profesionist desăvârșit și sub a cărui îndrumare, aproape părintească, am reușit realizarea contribuțiilor prezentate în această teză, promovarea acestora la nivel internațional și dobândirea unor calități personale.

În continuare, cu deosebit respect, doresc să mulțumesc membrilor comisiilor de îndrumare și de doctorat pentru disponibilitatea arătată, evaluarea lucrării și sfaturile constructive oferite.

Adresez alese mulțumiri stimabilului domn profesor Mihai DRĂGAN, un mentor al adolescenței mele, cu ajutorul căruia am sedimentat noțiunile de bază ale fizicii.

De asemenea, consider că o contribuție care merită pe deplin aprecierea mea este a doamnei Cpt. lect. univ. dr. ing. Angela DIGULESCU-POPESCU, din cadrul Academiei Tehnice Militare „Ferdinand I”, sub a cărui îndrumare am realizat proiectul de licență și cu ale cărei sfaturi am obținut titlul de inginer.

În plus, doresc să adresez mulțumiri întregului colectiv didactic al Academiei Tehnice Militare „Ferdinand I”, pentru profesionalismul cu care reușește an de an să formeze specialiști în domeniile Comunicații și Sisteme Electronice Militare pentru întregul Sistem de Apărare, Ordine Publică și Siguranță Națională, în special domnilor Col.(r) Prof. univ. dr. ing. Doru GOGA, Col. conf. univ. dr. ing. Petrică CIOTÎRNAE, Col. conf. univ. dr. ing. Florin POPESCU, Lt.col. conf. univ. dr. ing. Cristian MOLDER și Lt. col. conf. univ. dr. ing. Iulian RÎNCU, prin a căror implicare instituția pe care o administrează reușește să contribuie continuu la progresul societății științifice pe plan național și internațional.

Totodată, doresc să le mulțumesc domnilor Gabriel VASILE și Cornel IOANA, dar și doctoranzilor români din cadrul Gipsa-lab, din Grenoble, Franța, sub coordonarea cărora am desfășurat două stagii ERASMUS pe durata studiilor de licență, pentru însuflarea curiozității asupra domeniului prelucrării numerice a semnalelor și pentru oferirea posibilității de a trăi experiențe ce au contribuit la formarea mea personală și profesională.

Nu în ultimul rând țin să le mulțumesc colegilor de serviciu pentru înțelegere și încurajare, dar și pentru conferirea unui mediu propice dezvoltării profesionale de cel mai înalt nivel pentru un inginer IT&C.

Cuprins

Capitolul 1.

Introducere.....	4
1.1. Prezentarea domeniului tezei de doctorat	4
1.2. Scopul tezei de doctorat.....	4
1.3. Conținutul tezei de doctorat	5

Capitolul 2.

Teoria fractalilor	6
2.1. Fractalii și dimensiunea fractală	6
2.2. Sisteme de funcții iterate și atractori	6
2.3. Ipoteza directă și ipoteza inversă	8
2.4. Dimensiunea fractală.....	8
2.5. Dimensiunea Hausdorff.....	9
2.6. Dimensiunea fractală autosimilară	10
2.7. Algoritmul box-counting	11

Capitolul 3.

Analiza rețelelor complexe din corpul uman	12
3.1. Plămâni – anatomie și analiză fractală	13
3.1.1. Anatomia plămânilor	13
3.1.2. Analiza fractală a plămânilor	13
3.1.3. Optimizări aduse tehnicilor de analiză fractală computerizată	14
3.2. Creierul – anatomie și analiză fractală	15
3.2.1. Sistemul nervos central.....	16
3.2.2. Neuronii	16
3.2.3. Analiza fractală a neuronilor	16
3.2.4. Analiza fractală a microgliilor.....	17
3.2.5. Lacunaritatea.....	18
3.2.6. Măsurători ale lacunarității utilizând algoritmul box-counting.....	18
3.2.7. Forme ale algoritmului box-counting utilizate în analiza lacunarității.....	19
3.2.8. Aplicație dezvoltată pentru calcularea lacunarității.....	20
3.3. Ochiul – anatomie și analiză fractală.....	20
3.3.1. Anatomia ochiului.....	20
3.3.2. Afecțiuni ale ochiului	20
3.3.3. Analiza fractală a retinei	21

Capitolul 4.	
Algoritmi de segmentare a imaginilor în vederea identificării maladiilor	22
4.1. Algoritmul k-means.....	22
4.2. Algoritmul Fuzzy C-Means (FCM).....	23
4.3. Compararea celor doi algoritmi.....	24
4.4. Caracterizare complexă a tomografiilor craniene. Studiu de caz.....	25
Capitolul 5.	
Aplicații ale fractalilor în rețelele de telecomunicații moderne	26
5.1. Tehnologia 5G	27
5.2. Antene cu formă fractală	27
5.2.1. Curba lui Koch	28
5.2.2. Garnitura lui Sierpinski	29
5.3. Comparații ale antenelor cu formă fractală cu cele cu formă consacrată	29
5.3.1. Comparație între antena dipol consacrată și antene fractale descrise de curba lui Koch	29
5.3.2. Comparație între antena tip bow tie și antena fractală descrisă de garnitura lui Sierpinski.....	30
5.3.3. Antenă fractală descrisă de curba lui Koch închisă.....	31
Capitolul 6.	
Concluzii.....	32
6.1. Rezultate obținute.....	32
6.2. Contribuții originale.....	34
6.3. Lista lucrărilor originale	35
6.3.1. Articole științifice în publicații indexate ISI	35
6.3.2. Articole științifice în publicații indexate AIP.....	36
6.3.3. Articole științifice în publicații de tip Conference Proceedings.....	36
6.3.4. Articole științifice în curs de publicare	36
6.4. Perspective de dezvoltare ulterioară	36
Bibliografie.....	38

Capitolul 1.

Introducere

Evenimentele contemporane care aparent se prezintă a fi aleatoare pot fi caracterizate prin haos determinist utilizând sisteme de calcul performante ce utilizează algoritmi specifici.

Descoperirea formelor fractale , dar mai ales a variatelor moduri de aplicare a acestora în mai toate ramurile științei, a condus la obținerea unor rezultate așteptate cu mare interes de specialiștii fiecărui domeniu, care au fost privați de posibilitatea lucrului cu rezultate exacte, fără a fi nevoie de imaginarea unor cauze suplimentare.

1.1. Prezentarea domeniului tezei de doctorat

Domeniul studiat de această teză denotă actualitate și interes din partea societății științifice, fiind nevoie de o optimizare continuă solicitată de natura aflată mereu în schimbare și care oferă spre analiză noi fenomene în mai toate ramurile sale.

Pornind de la câteva studii care la început au părut că nu pot oferi răspunsurile căutate de cercetători, astăzi, ajutați de comunitatea IT&C, savanții pot explica fenomene și comportamente ale naturii în vederea combaterii sau speculării ei.

1.2. Scopul tezei de doctorat

Dat fiind faptul că domeniul aprofundat analizează fenomene complexe, scopul acestei lucrări este de a propune metode de procesare a datelor furnizate de diverse surse în vederea îmbunătățirii rezultatelor. Mai mult, valorificând cunoștințele de nișă se pot dezvolta noi soluții care să servească nevoile societății contemporane și care pot reprezenta un punct de pornire pentru sisteme complexe din viitor.

Disponibilitatea elementelor de procesare (hardware și software) a informației stocate în format digital este, cel puțin în ultima decadă, vastă și conferă soluții diversificate pentru a putea găsi răspunsuri întrebărilor care frământă specialiștii

angrenați în studiul haosului determinist.

Așadar, nu rămâne decât ca specialiștii IT&C să colaboreze strâns cu comunitatea oamenilor de știință în modelarea sistemelor complexe de procesare și analiză a haosului determinist pentru a obține noi perspective de abordare a mediului înconjurător și a efectelor acestuia.

1.3. Conținutul tezei de doctorat

Capitolul 1, capitol introductiv, justifică aplicarea noțiunilor dezvoltate de teoria haosului în modelarea sistemelor și rețelelor complexe cu care interacționăm în mod curent.

Cel de-al doilea capitol, conține noțiuni din literatura de specialitate în vederea explicării principiilor ce au stat la baza studiilor prezentate mai apoi în această lucrare.

Capitolul 3 conține un studiu amănunțit al modului în care elementele teoriei fractale pot fi aplicate în studierea mai multor sisteme vitale ale corpului uman, precum cel respirator, nervos sau vizual, cu scopul de a oferi diagnostice exacte sau monitorizări eficiente ale maladiilor.

Capitolul 4 prezintă o comparație a doi algoritmi de segmentare a imaginilor în vederea identificării maladiilor creierului uman. Posibilitatea integrării acestei soluții cu cele aflate deja în producție denotă faptul că deși pare o metodă complicată, este o metodă simplă, ingenioasă și fezabilă.

În Capitolul 5 se subliniază nevoia societății contemporane de a dispune de o nouă tehnologie de comunicații la distanță care să garanteze disponibilitatea instantanee a informației indiferent de cantitatea acesteia. Drept urmare, un pas înainte în implementarea unei tehnologii de acest gen este reprezentat de antenele utilizate. Este cunoscut faptul că antenele pot fi descrise de forme fractale. Numeroasele avantaje ale fractalilor conferă antenelor fractale proprietăți ce le califică să facă parte din rețele și sisteme de comunicații complexe, integrate și de încredere.

În ultimul capitol al acestei teze, Concluzii, se prezintă într-o formă succintă principiile, rezultatele și contribuțiile personale prezentate în celelalte capitole ale prezentei lucrări. De asemenea, secțiunea include lista lucrărilor științifice publicate de-a lungul stagiului de doctorat precum și perspectivele de dezvoltare ulterioară a domeniului studiat.

Cuvinte cheie: haos determinist, fractali, analiză fractală, box-counting, k-means, fuzzy c-means, lacunaritate, segmentarea imaginilor, antene fractale, 5G.

Capitolul 2.

Teoria fractalilor

2.1. Fractalii și dimensiunea fractală

Odată cu trecerea timpului, geometria clasică a început să prezinte o serie de dezavantaje ce implicau compromisuri legate de acuratețea consemnării realității. Domenii precum chimia, medicina sau matematica, dar și altele, au avut nevoie de o rezoluție mărită pentru a oferi cele mai bune rezultate.

Dimensiunile unui obiect caracterizează modul în care acesta se integrează în spațiu și modul în care poate fi măsurat.

Geometria Euclidiană a ajuns la o limită a performanței atunci când liniile sale drepte dimpreună cu suprafețele netede nu au putut caracteriza obiecte cu formă complicată, atipică. Din acest motiv Benoit Mandelbrot (1924 - 2010), matematicianul suedez de origine franceze, a definit geometria fractală prin publicarea lucrării de referință „Geometria fractală a naturii”. Acest nou concept are un potențial deosebit atunci când vine vorba de analizarea unor noi subiecte de către matematicieni sau de dezvoltarea unor noi medii virtuale de către programatori [1].

Un fractal presupune ca părți ale unui ansamblu să fie similre cu întregul. Mai mult, dacă fractalul se compune dintr-un număr finit de copii, fiecare având o scară proprie, ușor de modificat, atunci fractalul este denumit autosimilar. Este de subliniat faptul că o mare parte dintre formele naturale sunt autosimilare (ex: frunza de ferigă) [1]. Drept urmare, mai buna cunoaștere a mediului înconjurător și a proceselor pe care acesta le întreprinde impune o schimbare a tehnicilor de analiză a formelor și obiectelor și aprofundarea de noi metode prin care societatea să descopere răspunsuri ale fenomenelor care momentan par a fi enigme.

2.2. Sisteme de funcții iterate și atractori

Considerând (X, d) un spațiu simetric oarecare vom numi o transformare de forma:

$$f(x, y) = (a * x + b * y + e, c * x + d * y + f) \quad (2.1)$$

unde $x, y \in \mathbb{X}$ și $a, b, c, d, e, f \in \mathbb{R}$, o transformare afină în \mathbb{R}^2 [2][3].

Transformarea afină poate fi descrisă într-o formă matriceală după cum urmează:

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Modificările suferite de întreg pentru obținerea formei noi pot fi descrise cu ajutorul transformărilor proiective care sunt definite ca o serie de combinații de redimensionări, translații și rotații ale spațiului, dacă parametrii a, b, c, d, e și f ai transformării sunt definiți astfel:

- $a = r * \cos \alpha$,
- $b = -s * \sin \beta$,
- $c = r * \sin \alpha$,
- $d = s * \cos \beta$,
 - r – factorul de omotetie pe orizontală,
 - s – factorul de omotetie pe verticală,
 - α – unghiul de rotație față de Ox ,
 - β – unghiul de rotație față de Oy ,
- e – translația pe orizontală,
- f – translația pe verticală.

Prin urmare, oricărei forme fractale care prezintă autosimilaritate i se asociază o transformare afină ce definește schimbările aduse întregului în vederea obținerii componentei în speță.

Literatura de specialitate afirmă că formele fractale pot fi definite ca un set de transformări affine contractive din \mathbb{X} : $(f_i)_{i=1\dots n}$, intitulat Sistem de Funcții Iterate.

Transformarea contractivă desemnează o transformare f a unui spațiu metric (X, d) astfel încât $d(f(x)f(y)) < s * d(x, y)$ indiferent care ar fi punctele $x, y \in \mathbb{X}$, unde $s \in (0, 1)$ se numește factor de scară (sau factor de contracție).

Dacă printr-un sistem de funcții iterate $(f_i)_{i=1\dots n}$ trecem o imagine, prin metoda *feedback*, vom observa după fiecare iterație că imaginea rezultată este aceeași, numită atractorul Sistemului de Funcții Iterate (Teorema colajului). Trebuie subliniat faptul că atractorul nu este influențat de imaginea originală, ci numai de transformările realizate.

Acest concept a fost dezvoltat de Yuval Fisher, care a realizat un copiator atipic compus din mai multe lentile ce modifică dimensiunile unei fotografii originale, iar apoi suprapune mai multe copii ale acesteia. Acest dispozitiv funcționează în regim *feedback* și inițiază o procedură de inserție în sistem a imaginii obținute în urma unui ciclu de procesare.

2.3. Ipoteza directă și ipoteza inversă

Caracterizarea obiectelor fractale cu ajutorul oricărui set finit de transformări afine conduce la apariția a două ipoteze duale: cea directă și cea indirectă.

Ipoteza directă descrie crearea fractalului pornind de la parametrii definatorii ai setului de transformări afine. Această metodă stă la baza generării a numeroase tipuri de fractali consacrați, cum ar fi: frunza de ferigă a lui Barnsley, curba lui Koch, triunghiul lui Sierpinski ș.a. Procesul presupune următoarele etape:

- Se pleacă de la un punct oarecare (x, y) , iar după aplicarea uneia din transformările afine din set (aleasă aleator) punctului (x, y) , se obține un punct (x_1, y_1) .
- Se reia pasul al doilea, dar se declară (x_1, y_1) punct inițial.

Ipoteza inversă reprezintă procedura care constituie compresia fractală, fiind inițiată de Michael Barnsley. Acesta propus stocarea parametrilor în detrimentul imaginii. Avantajul este reprezentat de ocuparea unei zone de memorie mai mică, iar dezavantajul presupune determinarea parametrilor sistemului de funcții iterate, fapt ceva mai complicat.

2.4. Dimensiunea fractală

Un obiect poate fi perceput diferit în funcție de dimensiunea utilizată în timpul măsurării.

Dimensiunea topologică este strâns corelată cu caracteristici ale punctelor ce compun obiectul de analizat și afirmă că punctul are dimensiunea 0, linia sau curba sunt de dimensiune 1, suprafețele au dimensiunea 2, corpurile au dimensiunea 3 ș.a.m.d., neluând în considerare dimensiunea cu o unitate mai mare a spațiului în care elementele enumerate sunt scufundate. Astfel, dimensiunea topologică se limitează la transformări omomorfe. Așadar:

- $d_T = 0$, dacă obiectul de analizat nu este conectat (punct izolat).
- $d_T = k, k \geq 1$, dacă orice punct aparținând obiectului de analizat are o vecinătate $V(p)$ ale cărei margini au dimensiunea $d_T = k - 1$.

Luând ca exemplu punctele ce aparțin unei curbe înguste ($k = 2$), se deduce că acestea au vecinătăți sub forma unor segmente ce au ca margini două puncte de dimensiune $d_T = k - 1 = 1$ [1][2][3][4][5].

Prin urmare, constatăm că o curbă se scufundă într-un spațiu euclidian cu dimensiunea egală cu 3 chiar dacă aceasta are dimensiunea topologică 2.

Odată cu apariția noțiunii de geometrie fractală, caracterizarea unei forme prin prisma dimensiunilor topologice, exprimate printr-un număr întreg, s-a dovedit a fi insuficientă. Un exemplu care poate confirma aceste spuse este curba lui Koch. Această formă descrie un fenomen interesant având aria egală cu 0 și perimetrul infinit (după

fiecare iterație efectuată lungimea sa crește de $4/3$ ori). Astfel, din punct de vedere al geometriei Euclidiene, curba lui Koch este un obiect de magnitudine 1, cu perimetru infinit, dar nu se poate afirma că este și bidimensional pentru că aria sa este nulă [1].

Prin urmare, se introduce în discuție noțiunea de dimensiune fractală, a cărei valoare se exprimă printr-un număr rațional. În plus, însăși noțiunea de fractal este strâns legată de cea a dimensiunii fractale. O formă fractală este o figură a cărei dimensiune fractală este strict mai mare decât dimensiunea topologică [5].

2.5. Dimensiunea Hausdorff

Dependența scării utilizate face ca obiectele fractale să fie greu de măsurat în contextul geometriei clasice. Proprietățile lor fizice (lungime, suprafață, volum) depind de reprezentarea rezoluției.

În jurul anului 1914, matematicianul german, Felix Hausdorff, propune un nou concept de spații topologice, susținând că dimensiunea fractală este proporțională cu numărul minim de sfere, de rază dată, necesare pentru acoperirea obiectului măsurat [5]. Astăzi, pentru a facilita procesarea computerului, se folosesc cuburi sau suprafețe dreptunghiulare (eventual pătrate).

De exemplu, pentru a acoperi o curbă de lungime 1, sunt necesare $N(s) = \frac{1}{s}$ pătrate cu latura s . Pentru a acoperi o suprafață cu aria egală cu 1, sunt necesare $N(s) = \frac{1}{s^2}$ pătrate de latură s , iar pentru a acoperi un corp cu volumul egal cu 1, sunt necesare $N(s) = \frac{1}{s^3}$ pătrate de latură s . De obicei, se verifică relația:

$$N(s) \sim \frac{1}{s^D} \quad (2.3)$$

unde $N(s)$ reprezintă numărul de pătrate necesare, s definește latura unui pătrat, iar D reprezintă dimensiunea formei [5].

Dacă se logaritmează relația (2.3) se definește D ca:

$$D \sim \frac{\log N(s)}{\log \frac{1}{s}} \quad (2.4)$$

Astfel, dimensiunea Hausdorff, cunoscută și sub denumirea de dimensiunea Hausdorff-Besicovich, se definește după cum urmează:

*Fie $d, s \in \mathbb{R}$ și $N(s) = f(d) * s^d$ un set de funcții, astfel încât $N(s)$ să fie numărul de sfere de diametru s necesare pentru a acoperi mulțimea dată F . Atunci, constatăm că există o singură valoare $d = D_H$, denumită dimensiune Hausdorff a lui F , astfel ca [5]:*

$$d < D_H \Rightarrow N(s) \rightarrow \infty$$

$$d > D_H \Rightarrow N(s) \rightarrow 0 \quad (2.5)$$

Un obiect caracterizat prin dimensiunea Hausdorff beneficiază și de o măsură dată de relația:

$$N(s) * s^{D_H} \quad (2.6)$$

Conceptul de dimensiune Hausdorff este recunoscut ca fiind cea mai agreată definiție a dimensiunii fractale. Prezintă în schimb și dezavantajul de a fi anevoios de calculat. În mod uzual, dimensiunea fractală se estimează cu ajutorul dimensiunii autosimilare sau dimensiunii box-counting.

Fractalii au fost inițial definiți de Mandelbrot ca fiind forme cu detalii infinite la orice scară. Ulterior, matematicianul a reformulat definiția emițând noțiunea de autosimilaritate, susținând că fractalii sunt formele alcătuite din părți similare cu întregul. Mai apoi, a făcut o a doua reformulare prin care a afirmat că fractalii sunt formele care îndeplinesc condiția ca dimensiunea lor Hausdorff să fie strict mai mare decât dimensiunea topologică [5].

2.6. Dimensiunea fractală autosimilară

Este bine-cunoscut faptul ca similaritatea se regăsește printre trăsăturile fundamentale ale obiectelor fractale. Luând în considerare afirmația lui Mandelbrot prin care o linie de coastă se aseamănă cu o dreaptă de la depărtare, iar pe măsură ce distanța de observare față de ea scade, aceasta seamănă cu o linie frântă, constatăm că putem clasifica similaritatea în funcție de scară [1][2][3]:

- autosimilaritatea – fractalul este format din copiile sale la diferite scări de reprezentare. Cel mai adesea corespunde formelor fractale generate computerizat, având aplicabilitate în procesele de compresie fractală.
- similaritate sectorială – fractalul este compus din copii apropiate ca aspect. Atât fractalii artificiali, cât și cei naturali se pot încadra în această categorie.
- browniană – fractalul este divizat în fragmente aleatoare, cu detalii la fiecare scară. Dintre cele mai întâlnite forme fractale cu această proprietate amintim liniile de coastă și plasma.

Fractalii artificiali, utilizați din ce în ce mai mult în modelarea fenomenelor aparent aleatoare, reprezintă cea mai studiată categorie de fractali supusă studiilor de către geometria fractală datorită autosimilarității. Având ca punct de pornire scopul dimensiunii fractale, adică măsurarea nivelului de fragmentare al unui obiect, în ceea ce privește formele fractale autosimilare se poate supune reinterpretării următoarea relație [1]:

$$D_F = \frac{\log \text{număr copii autosimilare}}{\log \text{factor de contracție}} \quad (2.7)$$

Luând ca exemplu triunghiul lui Sierpinski, unde avem trei copii ale formei originale și o dimensiune topologică egală cu 2, constatăm că dimensiunea fractală, conform relației (2.7) va fi 1,5849. Prin urmare, dimensiunea autosimilare evaluează invarianța de scară a formei la transformări afine. În literatura de specialitate se regăsește și noțiunea de auto-afinitate, care indică o invarianță statistică de scară.

2.7. Algoritmul box-counting

Apariția computer-ului a condus la calcularea automatizată a dimensiunii fractale atunci când sunt analizate imagini reprezentate binar, memorate ca matrici de pixeli.

Acoperirea imaginii de analizat cu pătrate de latură s conduce la:

$$D = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\log N(s)}{\log \frac{1}{s}} \quad (2.8)$$

Presupunând că această limită există, aceasta va fi denumită dimensiunea box-counting a formei analizate. Dat fiind faptul că acest tip de limită converge într-o manieră lentă, se impune utilizarea unei metode alternative.

Dat fiind faptul că $\log N(s) = D * \log \frac{1}{s}$ reprezintă ecuația de variabilă s a unei drepte de pantă D , se poate astfel realiza curba log-log, definită de punctele $(\log N(s), \log(\frac{1}{s}))$, urmând ca prin intermediul regresiei liniare să se deducă panta curbei, în speță dimensiunea fractală [1][2][3][6]:

$$D_f = \frac{n^2 \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i * \sum_{i=1}^n y_i}{n^2 \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (2.9)$$

unde $x_i = \log \frac{1}{s}$, iar $y_i = \log N(s)$ pentru diverse valori ale lui s .

Metoda box-counting are ca utilitate calcularea dimensiunii fractale luând în calcul variația mărimii obiectului în raport cu factorul de scară ales. Procedura presupune divizarea succesivă a imaginii în 4, 16, 64 ș.a.m.d. chenare egale și cuantizarea chenarelor care acoperă obiectul la fiecare iterație. Punctele de coordonate $(\log N(s), \log(\frac{1}{s}))$ vor fi dispuse aproximativ pe o dreaptă cu panta egală cu dimensiunea box-counting [1][2][3][6][7].

Capitolul 3.

Analiza rețelelor complexe din corpul uman

De-a lungul istoriei, părțile corpului uman au fost analizate prin mai multe tehnici fie pentru a confirma buna funcționare, fie ca urmare a unor simptome. Astăzi, pentru a oferi medicului specialist o viziune de ansamblu a structurii, funcționării, dar și a istoriei unui organ, sunt utilizate tehnici computerizate ce au implementați algoritmi specifici de realizare și prelucrare a imaginilor medicale.

Sistemele aflate în componența corpului uman (ex: sistemul nervos, sistemul circulator etc.) pot fi privite ca rețele și studiate cu ajutorul algoritmilor de analiză fractală. Astfel, istoricul maladiilor, dar și predicții privind evoluția acestora sunt mai ușor de realizat.

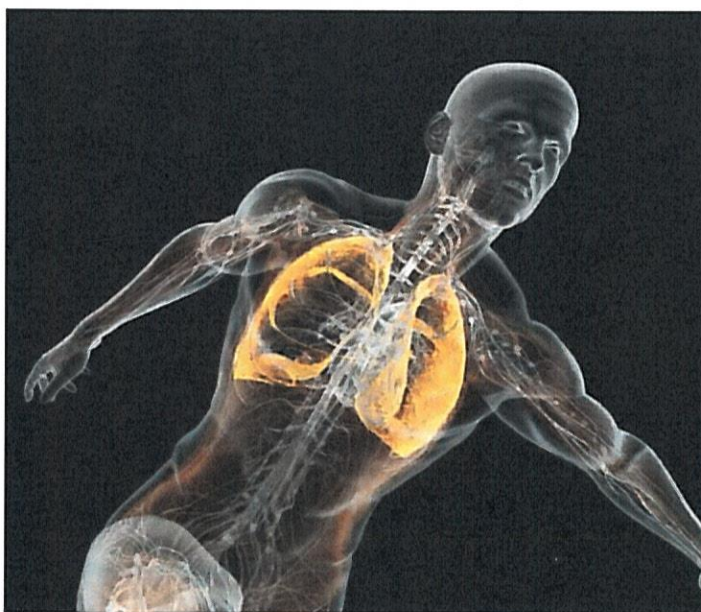


Figura 3. 1 Complexitatea corpului uman¹

¹ <https://listverse.com/2012/09/01/10-more-amazing-facts-about-our-bodies/>, site web accesat pe 12.08.2020, ora 14:51.

3.1. Plămâni – anatomie și analiză fractală

3.1.1. Anatomia plămânilor

Literatura de specialitate definește plămânul ca fiind un organ pereche, cu formă conică, protejat de pleura viscerală și situat în cavitatea toracică, în lateralele inimii [8].

Prin intermediul acestora organismul realizează schimbul de gaze între sistemul circulator și exteriorul corpului uman.

În funcție de vârsta individului, dar și de alți factori (fumat, poluare etc.) plămâni pot căpăta culori diferite astfel: brună la făt, roz la copil și cenușiu la adult.

Principalele elemente componente ale plămânilor sunt arborele bronșic, lobulii, ramificațiile vaselor pulmonare, alte elemente ale țesutului conjunctiv.

3.1.2. Analiza fractală a plămânilor

Pentru ca o radiografie să poată fi utilizată ca dată de intrare în procesul de analiză fractală se impune o filtrare premergătoare cu scopul de a elimina zgomotul introdus de echipamentul de captură a imaginii, dar și pentru a elimina textura plămânului care are o luminanță apropiată de cea a arterelor.

Pentru ca procesarea imaginii să fie una calitativă și ca binarizarea să nu introducă erori, este de dorit ca fundalul imaginii să fie uniform din punct de vedere al luminanței. Pentru a realiza acest procedeu, este necesară o ajustare a fundalului ca imagine separată și apoi o substrație a fundalului ca imagine separată [9].

Crearea imaginii ajustate a fundalului presupune ca toți pixelii ce reprezintă textura plămânilor să fie eliminați din imagine folosind o deschidere morfologică. Acest tip de operație are ca efect eliminarea obiectelor izolate sau care nu aparțin suprafețelor continue și care au ca potențial efect alterarea rezultatelor.

Odată extrase arterele din radiografie, rezultatul poate fi supus analizei fractale. În acest caz se poate aplica algoritmul box-counting pentru determinarea proprietăților fractale ale arterelor extrase.

Presupunând că există un set fractal C cu dimensiunea $D_F < D$, atunci numărul N de pătrate de latură R necesare pentru a acoperi întreg setul este dat de relația R^{D_F} . D_F este cunoscut în literatura de specialitate ca dimensiunea Minkowski – Bouligand, sau dimensiunea Kolmogorov, sau, mai simplu, dimensiunea box-counting.

Apelarea algoritmului de forma $[N R] = \text{boxcount}(C)$, unde C este o matrice cu D dimensiuni ($D = 1,2,3$), va conduce la determinarea numărului N de pătrate de latură R necesare acoperirii elementelor nenule ale setului analizat. Casetele utilizate au fost definite cu latura putere a lui 2 (de exemplu, $R = 1,2,4 \dots 2^P$, unde P reprezintă cel mai mic număr întreg astfel încât cea mai mare dimensiune din C este mai mică sau cel mult egală cu 2^P). Dacă lungimea lui C pe fiecare dimensiune este mai mică decât 2^P , C

este completat cu elemente nule până când dimensiunea sa atinge 2^P pe fiecare dimensiune. Astfel, vectorii returnați, N și R sunt de lungime $P + 1$. În cazul imaginilor RGB se recomandă la începutul aplicării procesului de analiză fractală o însumare a celor trei planuri RGB [10].

În urma procesului de filtrare a țesuturilor ce nu prezintă interes pot rezulta pixeli paraziți. Aceștia se pot elimina prin binarizarea imaginii specificând un prag peste care pixelii cu o luminanță mai mare decât acest prag vor deveni 1, iar ceilalți 0.

Suplimentar, funcția *boxcount* permite și specificarea unui parametru, *slope*, pentru afișarea graficului semi-log al pantei locale $D_F = -\frac{d \ln N}{d \ln R}$ ca funcție de R . Dacă D_F este constantă într-un interval R , atunci D_F este dimensiunea fractală a setului C .

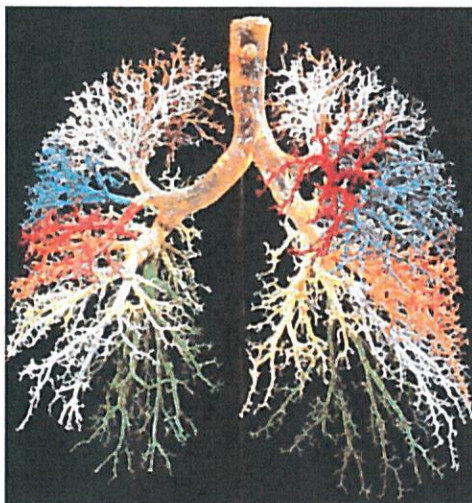


Figura 3. 2 Dispunerea fractală a elementelor din componența plămânului uman²

3.1.3. Optimizări aduse tehnicilor de analiză fractală computerizată

În urma aprofundării literaturii specifice analizei fractale, dar și studierii minuțioase a modului de funcționare al algoritmului box-counting, se constată că acesta se poate optimiza prin utilizarea unei casete de dimensiune variabilă cu scopul de a obține o dimensiune fractală cât mai apropiată de realitate. Astfel, pentru imaginile studiate în această secțiune, s-a reușit obținerea unei deviații standard mai mici prin utilizarea unui set de cinci măști cu dimensiune variabilă sub forma unei matrice cu cinci linii și două coloane. Mai exact, dimensiunile fiecărei măști (r_x și r_y) au fost $\{1,2\}$, $\{2,4\}$, $\{4,8\}$, $\{8,16\}$ și $\{16,32\}$ pixeli. Casetele au parcurs imaginea succesiv similar modului de funcționare al algoritmului box-counting classic.

Ca urmare a diferenței dintre lungimea și lățimea fiecărei măști, afișarea

² https://www.researchgate.net/figure/Resin-cast-of-human-lung-Complicated-dichotomously-branching-tree-of-conducting-airways_fig1_330666802, site web accesat pe 11.08.2020, ora 11:49.

rezultatelor s-a realizat într-un grafic 3D pentru ale cărei axe dispun $\log \frac{1}{r_x}$ pe axa x , $\log \frac{1}{r_y}$ pe axa y și $\log(n)$ pe axa z .

Determinarea dimensiunii fractale s-a efectuat printr-o ecuație de forma $z = f(x, y)$, unde $x = \log \frac{1}{r_x}$, $y = \log \frac{1}{r_y}$ și $f = \log n$, n fiind numărul de casete D -dimensionale de calibrul $\{r_x, r_y\}$ utilizate în acoperirea elementelor nenule ale imaginii binare.

Prin urmare, ecuația utilizată pentru algoritmul specific măștii pătratice, $f(x) = a + bx$, a fost ajustat astfel ca $f(x, y) = a + bx + cy$.

Utilizarea măștii pătratice presupune $x = y$, fapt care implică $f = a + (b + c)x$, rezultând la final $D = b + c$.

Mai mult, dacă:

$$b = \frac{\partial f}{\partial x} \text{ și } c = \frac{\partial f}{\partial y} \quad (3.1)$$

$$\text{rezultând } D = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} \quad (3.2)$$

Validarea optimizării algoritmului s-a realizat prin calcularea dimensiunii fractale pentru același set de date prin intermediul unui program dedicat, Harmonic and Fractal Image Analyzer Demo version 5.5.30.

Mai mult, optimizarea procesării imaginii poate fi făcută și în etapa filtrării țesutului nefolositor. Astfel, este de dorit un algoritm care înlătură cât mai mult din surplus pentru a facilita determinarea o dimensiune fractală cât mai precisă, dar și un coeficient al lacunarității.

Prin urmare, alte două radiografii pulmonare au fost supuse procesării pentru a evidenția importanța separării componentelor utile ale informației față de detaliile insignifiante.

Pentru versiunea în nuanțe de gri (grayscale) a celor două imagini studiate a fost definită o mască, cu ajutorul software-ului MATLAB R2017a, pentru a facilita separarea regiunii plămânilor de celelalte componente din radiografii. Rezultate decupării sunt fidele într-un procentaj destul de mare față de imaginea originală.

Mai apoi, după extragerea ariei de studiat, a fost realizată transformarea imaginii în versiune binară pentru a putea aplica algoritmul box-counting în formă clasică, dar și în varianta cu fereastră dreptunghiulară.

3.2. Creierul – anatomie și analiză fractală

Capacitățile computaționale ale creierului pot fi descrise ca având formă fractală datorită multiplelor legături dintre neuroni și microgii (celule de dimensiuni mici, cu ramificații bogate cu rol de protecție a neuronilor împotriva agenților patogeni și care

acumulează resturi celulare, având rol fagocitar) [11]. Acest tip de topologie celulară are, aparent, un aspect haotic, dar, totuși, prin intermediul posibilităților oferite de programele informatice moderne medicina poate evolua [7].

3.2.1. Sistemul nervos central

Organismul este înglobat în ambient prin intermediul a două sisteme, cel nervos și cel endocrin. Totodată, aceste sisteme conferă și menținerea cotelor normale ale structurii interne a organismului (homeostazia). Comunicarea dintre două celule ale sistemului nervos se realizează cu ajutorul semnalelor electrice, într-o manieră rapidă și caracteristică, implicând răspunsuri instantanee. În ceea ce privește sistemul endocrin, activitatea sistemului endocrin se realizează mai greu, cu ajutorul hormonilor, aceștia fiind componente chimice acumulatori de informație, conținuți de sânge sau de limfă.

Cele mai importante trei activități ale sistemului nervos sunt: integrarea, emiterea răspunsurilor optime și recepția. Mulțumită numărului mare de receptori (exteroreceptori – elemente ce captează informațiile din mediul exterior; proprioreceptori – elemente care acumulează informațiile transmise de mușchi, tendoane sau articulații; interoreceptori – elemente ce captează informațiile emise de viscere, denumiți și visceroreceptori), cele două ambiente sunt profilate, mai apoi, cu ajutorul căilor ascendente, pe scoarța cerebrală [11].

3.2.2. Neuronii

Impulsurile nervoase sunt de fapt semnale de factură electrochimică ce sunt produse și transmise cu ajutorul capacităților neuronilor. Aceste celule se deosebesc în mod radical de alte categorii de celule astfel:

- nu se pot divide (fiind celule amitotice)
- au capacitatea de a funcționa optim pe durata întregului ciclu de viață
- prezintă o rată metabolică mare (au nevoie în permanență de glucoză și oxigen, murind în circa trei minute dacă nu sunt alimentate astfel)

3.2.3. Analiza fractală a neuronilor

Dimensiunea fractală este una dintre cele mai bune metode recomandate pentru a defini rețeaua neuronală din punctul de vedere al arborelui dendritic. De asemenea, poate

oferi o cunoaștere solidă prin intermediul căreia putem să facem diferența între toate clasele de neuroni. Mai mult, dimensiunea fractală a fost folosită intens pentru a distinge dacă o persoană are o afecțiune patologică și oferă detalii importante cu privire la stadiul de dezvoltare al acesteia. Chiar dacă este posibil ca neuronii și legăturile acestora să fie clasificate prin intermediul dimensiunii fractale, nu este încă posibil să se stabilească relații clare între dimensiunea fractală și acțiunile neurofiziologice. Acest tip de relații rămân pentru moment în teorie [12][13].

Dacă sistemul nervos central ar fi analizat din punct de vedere tridimensional, s-ar observa că modul său de lucru are componente fractale. Se pare că arborii dendritici sunt principala metodă prin care este conectată topologia și o mare parte a literaturii din domeniu subliniază dimensiunea lor fractală.

Dimensiunea fractală utilizată pentru măsurarea spinelor modelate a fost dimensiunea box-counting (D_B) demonstrată a fi robustă și sensibilă la morfologia celulară neuronală și a altor celule, incluzând microglia [12].

3.2.4. Analiza fractală a microgliilor

Ca și în cazul neuronilor, de-a lungul timpului au fost publicate mai multe lucrări care descriu utilizarea analizei fractale în studiul și clasificarea morfologiei microgliilor în neuroanatomie, patologie și dezvoltare.

O diferență între cele două câmpuri ale analizei fractale a neuronilor și a microgliilor este aceea că dimensiunea fractală a microgliilor a fost mai clar corelată cu funcția. Folosind algoritmul box-counting, s-a arătat că, în principiu, microgliile dintr-un creier normal, sănătos sunt puternic ramificate cu o valoare relativ ridicată a D_B și ca răspuns la anumiți stimuli, cum ar fi stresul cronic, ele se pot hiper-ramifica până la o stare cu un D_B cât de cât mai mare, dar atunci când răspund la evenimente patologice complet nocive, cum ar fi traumatisme cerebrale, intră într-un ciclu de deramificare ce implică scăderea concomitentă a D_B , iar apoi se întorc printr-un ciclu de re-ramificație și creștere a D_B când își reiau activitatea normală.

O mare parte din literatura de specialitate cu privire la analiza fractală a microgliilor face referire la folosirea algoritmului box-counting bazat pe siluete binare sau contururi, un punct puternic fiind acela că această metodologie este robustă pentru toate tipurile morfologice generale, ramificate și neramificate, facilitând astfel comparațiile. Similar cu ceea ce a fost observat pentru neuroni, dimensiunea fractalului este de obicei corelată pozitiv cu mărirea dimensiunii spanului acoperit de o celulă, dar oferă în plus față de mărime și informații despre caracteristicile acestuia.

3.2.5. Lacunaritatea

În mod literal, cuvântul „lacună” provine din latinescul „lacuna” și descrie un gol sau o gaură în integritatea unui lucru.

Ultimele decenii au arătat un progres important în ceea ce înseamnă analiza fractală în medicină și una dintre cele mai noi noțiuni introduse este studiul lacunelor. Acest parametru oferă detalii despre uniformitatea unui obiect, o valoare scăzută a acesteia face ca obiectul să fie omogen, pe când o valoare ridicată implică eterogenitate. Indiferent de modul în care este implementat algoritmul box-counting, gradul de lacune va fi calculat începând de la distribuția de probabilitate a pixelilor, cunoscută și sub denumirea de distribuție de masă [7].

Numărul de pixeli per casetă va determina distribuția pixelilor în funcție de mărimea casetei sau de scara (ε), valoare care este invers proporțională cu dimensiunea casetei. Pentru o anumită valoare (ε), gradul de lacune va fi notat λ_ε , acesta fiind determinat pentru distribuția pixelilor ca un coeficient de variație pătrat, CV [7]:

$$\lambda_\varepsilon = (CV)^2 = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2 \quad (3.3)$$

unde σ reprezintă deviația standard și μ media pixelilor per casetă în funcție de valoarea ε .

3.2.6. Măsurători ale lacunarității utilizând algoritmul box-counting

Un aspect important ce trebuie luat în considerare în procesul de interpretarea lacunarității într-o analiză fractală este acela că dimensiunea fractală și lacunaritatea pot fi corelate. Smith, Lange și Marks (1996), de exemplu, au constatat că valorile pe care le-au calculat pentru lacunaritate au fost corelate negativ cu dimensiunea fractală a masei.

Dar relația dintre dimensiunea fractală și lacunaritate nu este simplă. Lacunaritatea prefactorială, de exemplu, depinde foarte mult de dimensiunea casetei utilizată de algoritmul box-counting și este în general redundantă cu dimensiunea fractală.

În plus, corelația dintre λ și dimensiunea fractală dată de algoritmul box-counting poate fi pozitivă sau negativă, în funcție de imaginile/modelele analizate. De exemplu, pentru o serie de grile de calibrare descrescătoare (adică, densitate în creștere), λ scade în principal pe măsura creșterii dimensiunii fractale a casetei, dar pentru o serie de contururi fractale tot mai complexe, a fost observată apariția unor grupuri de lacune de diferite dimensiuni, precum și creșterea parametrului λ [12].

Rezultatele generale sugerează că lacunaritatea și dimensiunea fractală pot fi corelate în unele cazuri, dar nu sunt neapărat redundante. Într-adevăr, studiile arată că uneori modele care nu pot fi diferențiate prin dimensiunile lor fractale se disting prin

lacunaritatea lor sau invers.

3.2.7. Forme ale algoritmului box-counting utilizate în analiza lacunarității

Metoda tonurilor de gri

Există unele diferențe în ceea ce privește aplicarea algoritmului box-counting asupra imaginilor binare și aplicarea sa asupra imaginilor în tonuri de gri. Detaliul N , din ecuația dimensiunii fractale, măsurat în cazul analizei de tip box-counting a unei imagini ce conține tonuri de gri, nu depinde nici de numărul, nici de concentrarea pixelilor, ci de intensitatea lor. Acest lucru se datorează faptului că restricția care limitează valorile pixelului fie în fundal, fie în prim-planul imaginii binare nu se aplică imaginilor cu tonuri de gri; mai degrabă, valorile pixelilor acoperind un interval [13][15].

Analiza fractală descrisă până acum, aici, este uneori numită analiză monofractală, pentru a putea fi deosebită de analiza multifractală, care identifică modele caracterizate mai bine printr-un spectru de D_F decât printr-un singur D_F . Procesul de analiză multifractală este analog cu aplicarea filtrelor de deformare (filtre warp) unei imagini pentru a exagera caracteristicile care altfel ar putea fi neobservate. Mono- și non-fractalii sunt puțin sau nu afectați de distorsiuni, dar multifractalii sunt afectați în moduri caracteristice ce sunt folosite pentru a le distinge de mono- și non-fractali [12].

Filtrele warp sunt un set de exponenți arbitrari notați în mod obișnuit cu simbolul Q . În software-ul de analiză fractală, mulțimea Q este ceva ce utilizatorul manipulează de obicei dintr-un set implicit presetat. O dimensiune generalizată (D_Q) este determinată pentru fiecare Q , pe baza dimensiunii de masă (D_M). N din formula dimensiunii fractale pentru D_M este media distribuției de probabilitate a tuturor maselor pentru o mărime, reflectând astfel densitatea imaginii. Pentru D_Q , fiecare masă este distorsionată prin ridicarea la Q , atunci va rezulta că N_Q este media pentru această distribuție distorsionată a densității pentru o anumită mărime. Graficele sunt generate pe baza acestor date, având caracteristici previzibile care disting între scalarea non, mono și multifractală și cuantifică, de asemenea, caracteristicile multifractale [12].

Subscanarea

O altă metodă pe care cineva care interpretează un rezultat al analizei fractale trebuie să o înțeleagă este analiza prin subscanare, folosită pentru a investiga variația în spațiu. Subscanarea analizează mai multe domenii independente care se pot sau nu se pot suprapune într-o singură imagine. Analizele de tip subscanare și multifractale evidențiază variații pe un singur set de informații; dar analiza multifractală investighează un model ca întreg pe când subscanarea investighează zone locale pe o singură imagine independent

de alte zone și apoi prezintă rezultatele astfel încât variația locală a D_B poate fi comparată și evaluată [29].

3.2.8. Aplicație dezvoltată pentru calcularea lacunarității

Pentru a calcula lacunaritatea unei imagini binare a fost dezvoltat în mediul MATLAB R2017a un software care presupune parcurgerea imaginii de interes cu o fereastră glisantă a cărei dimensiune se dublează până când este atinsă dimensiunea maximă a imaginii de interes.

Programul începe prin deschiderea unei ferestre cu ajutorul căreia se poate selecta imaginea de interes prin introducerea denumirii acesteia și a formatului în care este stocată pe computer. Mai apoi, utilizând funcția *size* sunt extrase dimensiunile imaginii de interes pentru a defini limitele de iterație ale programului.

În timpul fiecărei iterații fereastra parcurge imaginea pixel cu pixel și contorizează numărul de pixeli de valoare 1 din interiorul său (variabila notată cu „one_pixel” în program), precum și pătratul acestui contor (variabila notată cu „one_pixel2” în program).

3.3. Ochiul – anatomie și analiză fractală

3.3.1. Anatomia ochiului

Ochiul reprezintă organul corpului uman responsabil de vedere, cel mai semnificativ simț al omului, acesta recepționând zilnic, pe suprafața retinei, o foarte mare capacitate de informație necesară desfășurării vieții. Dată fiind complexitatea structurii acestuia, mai mult de două milioane de componente, ochiul se situează pe locul doi în topul celor mai complexe organe, după creier.

3.3.2. Afecțiuni ale ochiului

Unul din cele mai importante elemente ale globului ocular care merită protejate este retina. Printre stările patologice în care se poate afla aceasta regăsim [33]:

- Degenerescența maculară conformă vârstei – se manifestă de regulă în rândul persoanelor aflate la senectute, fiind cea mai des întâlnită maladie maculară și prezintă două forme:

- Umedă (exudativă)
- Uscată (atrofică)
- Membrane epi-retiniene – stadii ale primei afecțiuni menționate care în faze avansate deteriorează sever macula (gaura maculară).
- Distrofii retiniene centrale.
- Maculopatii inflamatorii de tipurile:
 - Contagioase (toxoplasma, toxocara)
 - Necontagioase (corioretinopatia seroasă centrală) – întâlnită în rândul tinerilor.

3.3.3. Analiza fractală a retinei

Disponerea aparatului sanguin din globul ocular pare a fi de tip fractal, fapt care oferă posibilitatea de a introduce noi metode de identificare a maladiilor sistemului vizual.

Cu ajutorul algoritmilor consacrați, precum *box-counting*, se poate determina dacă sistemul responsabil de irigarea ochiului este dimensionat corespunzător pentru ca individul să beneficieze de o vedere de calitate.

Prin studierea gradului de lacunaritate al fundului de ochi este posibilă semnalizarea apariției sau monitorizarea evoluției unei maladii.

Algoritmii de segmentare a imaginilor pot avea un potențial ridicat în identificarea apariției unor afecțiuni precum dezlipirea de retină, retinopatia pigmentară etc.

Pentru acest studiu au fost alese trei imagini care conțin reprezentări ale fundului de ochi afectat sau nu de diverse boli specifice.

Etaplele analizei acestor imagini sunt similare pentru fiecare caz și constau în:

1. Încărcarea unei imagini de interes în program.
2. Transformarea imaginii alese în tonuri de gri.
3. Filtrarea zgomutului conținut.
4. Creerea unei măști pentru a elimina conținutul suplimentar.
5. Extragerea părților de interes în vederea aplicării algoritmilor specifici analizei fractale.
6. Retușarea imaginii rezultate prin eliminarea pixelilor paraziți.
7. Binarizarea imaginii.
8. Aplicarea algoritmilor de interes.
9. Interpretarea rezultatelor

Capitolul 4.

Algoritmi de segmentare a imaginilor în vederea identificării maladiilor

Datorită tehnicilor de prelucrare a imaginilor care devin din ce în ce mai performante, putem astăzi să identificăm maladii precum accidentul vascular cerebral sau Alzheimer prin utilizarea unor tehnici precum segmentarea k-means sau Fuzzy c-means (FCM). Astfel, aceste metode realizează gruparea pixelilor de același tip în clustere care, în urma procesării furnizează o imagine în care se poate identifica cu ușurință zonele în care afecțiunile au loc.

Așadar, atât timp cât unele elemente componente ale creierului, precum rețeaua de vase sanguine sau rețeaua neuronală, prezintă o dispunere fractală, putem cu ușurință să le analizăm structura cu scopul de a oferi predicții sau tratamente cât mai corecte pacienților în cauză.

4.1. Algoritmul k-means

Luând în considerare un spațiu cu mai multe dimensiuni, putem defini un număr de grupuri (*cluster*) prin care să asociem puncte cu caracteristici similare.

Definirea ipotezei în care distanțele dintre punctele unei mulțimi au valori eligibile formării unui cluster, depinde de o metodă adaptată de măsură a acestora. Astfel, fie $D(x,y)$ o măsură a distanței prin care putem defini următoarele cazuri [35]:

- $D(x,y) = 0$. Spațierea unui punct față de el însuși este 0.
- $D(x,y) = D(y,x)$. Această egalitate implică simetria.
- $D(x,y) \leq D(x,z) + D(z,y)$. Inegalitatea triunghiului.

În majoritatea cazurilor punctele sunt definite într-un spațiu de k dimensiuni, distanța dintre două puncte $x = [x_1, x_2, \dots, x_k]$ și $y = [y_1, y_2, \dots, y_k]$ fiind dată de una dintre formulele următoare [35]:

- Norma L_2 (distanța comună): $\sqrt{\sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^2}$

(4.1)

- Norma L_1 (distanța Manhattan): $\sum_{i=1}^k |x_i - y_i|$

(4.2)

- Norma L_∞ : $\max_{i=1}^k |x_i - y_i|$.

(4.3)

Atunci când definierea unui spațiu euclidian nu este posibilă, gruparea punctelor devine o chestiune delicată.

Algoritmul k-means păstrează informația în memoria centrală, definind un număr de k centroizi și asociază punctele celor mai apropiați centroizi ai acestora. Un centroid poate migra odată cu asignarea punctelor.

Spre deosebire de clustering-ul de tip ierarhic, k-means acționează pe observații reale, nu pe fiecare pereche de observații, devenind astfel mai potrivit pentru prelucrarea cantităților semnificative de date.

Într-un cluster obținut cu funcția k-means se regăsesc centroidul (calculat utilizând metode diferite pentru fiecare valoare a distanței acceptate) și obiectele membre, aflate la o distanță minimizată pe cât posibil de algoritm. De asemenea, numărul de iterații al algoritmului poate fi controlat de către utilizator [36].

4.2. Algoritmul Fuzzy C-Means (FCM)

Tehnica Fuzzy C-Means este una dintre cele mai populare metode de segmentare a imaginilor. Prezentând o implementare ușoară, acest procedeu poate furniza rezultate dezirabile dacă resursele hardware ale sistemului pe care rulează sunt generoase. Pentru seturi de date 2D, timpul de execuție, memoria necesară și calitatea rezultatelor nu necesită valori foarte mari. În schimb, pentru seturile 3D, se recomandă resurse semnificative pentru a putea realiza o implementare eficientă.

Eficiența computațională este obținută utilizând histograma intensităților imaginii în timpul procesului de clustering în loc de datele brute ale imaginii.

Elementele algoritmului FCM sunt:

- un set de n obiecte $X = \{x_1, x_2 \dots x_n\}$, în care x_i este un punct cu d dimensiuni
- o matrice de partiționare $W = w_{i,j} \in [0,1]$, $i = 1 \dots n$ și $j = 1 \dots k$, în care fiecare element $w_{i,j}$ reprezintă o pondere care dă gradul de apartenență al obiectului i la clusterul C_j .

Restricțiile algoritmului sunt date de următoarele afirmații:

- fiecare pondere pentru un punct x_i trebuie să fie 1.

$$\sum_{j=1}^k w_{i,j} = 1 \quad (4.4)$$

- fiecare cluster C_j conține, pentru o pondere nenulă, cel puțin un punct, dar pentru o pondere 1 nu va conține toate punctele.

$$0 < \sum_{i=1}^n w_{i,j} < n \quad (4.5)$$

Procesul computațional prin care se calculează centrozii unui cluster C_j este reglementat, din punct de vedere matematic, de următoarea relație:

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^n w_{i,j}^p x_i}{\sum_{i=1}^n w_{i,j}^p} \quad (4.6)$$

Se notifică faptul că ecuația (4.6) este o expresie nuanțată a unei relații ce definește un centroid utilizând algoritmul k-means. Diferența este dată de faptul că punctele sunt luate în considerare în totalitate, iar contribuția lor este ponderată de coeficientul de apartenență.

Procesul de actualizare se realizează prin diminuarea sumei erorilor medii astfel:

$$w_{ij} = \frac{(1/\text{dist}(x_i, c_j)^2)^{\frac{1}{p-1}}}{\sum_{q=1}^k (1/\text{dist}(x_i, c_q)^2)^{\frac{1}{q-1}}} \quad (4.7)$$

4.3. Compararea celor doi algoritmi

Teoria de specialitate caracterizează algoritmul FCM ca fiind similar cu metoda k-means, denumindu-l *Soft K-Means*.

În principiu, funcțiile sunt identice, unica deosebire fiind utilizarea unei valori care definește gradul de apartenență al unui punct la fiecare dintre clusterurile utilizate. Acest coeficient este în strânsă legătură cu un exponent, denumit de „rigiditate”, ce are rolul de a lua în considerare conexiunile mai puternice dintre puncte. Este de subliniat faptul că atunci când valoarea rigidității tinde spre infinit, vectorul determinat devine o matrice binară, rezultând o identitate între algoritmi FCM și k-means.

Astfel, matematic vorbind, observăm în definițiile funcțiilor ce caracterizează cele două metode o similaritate în ceea ce privește minimizarea sumei erorii medii (SEM):

- k-means:

$$SEM = \sum_{j=1}^k \sum_{x \in C_j} \text{dist}(c_j, x)^2 \quad (4.8)$$

- FCM:

$$SEM = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n w_{i,j}^p \text{dist}(x_i, c_j)^2 \quad (4.9)$$

unde p reprezintă un indice care caracterizează influența ponderii, $p \in (1, \infty)$.

Din punct de vedere al performanței computaționale, tehnica FCM trebuie să realizeze k multiplicări pentru fiecare punct și pentru fiecare dimensiune, acțiuni ce îl fac mai încet față de metoda k -means. Pe de altă parte, dacă trebuie analizat un cluster în care punctele sunt dispersate de-a lungul unei anumite dimensiuni sau două, se recomandă utilizarea FCM în detrimentul k -means.

4.4. Caracterizare complexă a tomografiilor craniene. Studiu de caz

Realizarea acestui studiu de caz a implicat analiza a două tomografii craniene ce prezintă două dintre cele mai întâlnite afecțiuni ale creierului uman.

Pornind de la aceste imagini, au fost aplicate tehnici de prelucrare a imaginilor în vederea calculării dimensiunii fractale, lacunarității și gradului de apartenență la grup cu scopul de a identifica și analiza zonele afectate ale organului.

O observație semnificativă ce se cere a fi făcută afirmă că dimensiunea fractală determinată cu ajutorul algoritmului box-counting este puternic influențată de limitările aduse de achiziția imaginilor digitale. Distribuția pixelilor depinde de modul în care imaginea a fost realizată. Din teoria fractală este știut faptul că nivelul detaliilor ar rămâne neschimbat infinit pentru un fractal autentic.

Programul începe prin deschiderea unei ferestre prin intermediul căreia se navighează pe hard disk până la imaginea ce se dorește a fi analizată (se recomandă selectarea).

După încărcarea în program, peste imaginea dorită utilizatorul definește o mască folosindu-se de mouse. Această mască descrie aria pentru care se va calcula dimensiunea fractală și lacunaritatea.

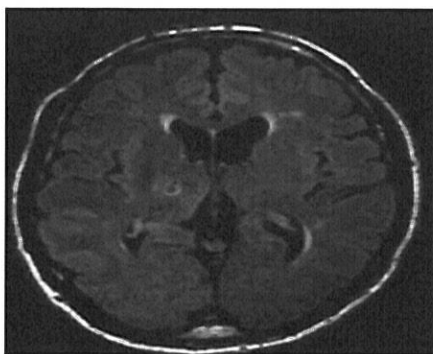


Figura 4. 1 Hiperintensități ale substanței albe în contribuțiile vasculare la deficiența cognitivă și demență³

³ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352873719300046>. Site web accesat pe 02.06.2020, la ora 14:34.

Capitolul 5.

Aplicații ale fractalilor în rețelele de telecomunicații moderne

Fie că vorbim despre accesul la informații despre divertisment sau informații personale, link-urile către surse de informații nu au voie, din punctul de vedere al clientului, să aibă întârzieri sau să se afle în imposibilitatea de a fi accesate. În acest moment, fiecare dintre noi are un terminal de comunicații inteligente prin care accesează aplicații pentru a ne facilita activitățile zilnice.

Mediul IT&C a început în urmă cu ceva timp să dezvolte programe pentru majoritatea acțiunilor pe care o persoană le poate întreprinde zilnic. Astfel, s-a născut posibilitatea paralelizării activităților. Mai mult, aplicațiile de „social media” s-au dezvoltat impresionant în ultimul deceniu datorită faptului că le-au permis oamenilor să fie interconectați și să împărtășească reciproc diverse informații. Studiile de profil au arătat că un utilizator al tehnologiei 4G efectuează un trafic de informații dublu comparativ cu un utilizator al altui tip de comunicare [38].

Datorită faptului că operatorii de telefonie mobilă au dezvoltat infrastructuri care permit dezvoltarea bruscă a mediului IT&C, astăzi clienții manifestă o nevoie tot mai mare de rețele mai dense, trafic de mare capacitate, mobilitate ridicată, acoperire omniprezentă, latență scăzută, număr mare de dispozitive afiliate și consum de energie scăzut.

Astfel, pentru a optimiza costurile de producție, proiectarea unei antene fractală care să poată fi utilizată pentru comunicații în diferite benzi de frecvență pare să fie o soluție fezabilă.

Forme geometrice fractale pot defini cu ușurință antene sau rețele de antene care facilitează comunicarea pe mai multe intervale de frecvență, dacă sunt dimensionate corect.

5.1. Tehnologia 5G

Inginerii se străduiesc în fiecare zi pentru a dezvolta soluții adecvate pentru comunicații rapide care să satisfacă nevoia societății de trafic de date. Astăzi, numărul de servicii solicitate de diferite tipuri de aplicații este incredibil de mare și acest lucru se întâmplă doar pentru a rula un program care ne face viața mai ușoară.

O facilitate ce se dorește a fi implementată de tehnologia 5G ar fi modelarea fasciculelor antenelor, metodă care ar trebui să depindă și de echipamentul utilizatorului final. Evident, costul pentru infrastructura 5G ar crește din cauza numărului uriaș de dispozitive conectate, fapt care contravine generațiilor actuale de comunicații, deoarece astăzi rețelele folosesc puteri mici de emisie pentru a funcționa.

Dintr-o dată, conceptul „massive MIMO” a devenit o soluție de rezervă pentru a crește lățimea de bandă, dar nu pentru o lungă perioadă de timp, din cauza probabilității mari de apariție a interferenței. Deci, este necesar un design bun al antenei pentru a evita acest fenomen.

Latențele de ordinul microsecundelor reprezintă o provocare majoră pentru 5G. Această facilitate a apărut din graba în care se află societatea în acest moment. Unele procesoare contemporane oferă posibilități pentru atingerea acestui obiectiv, dar legile fizicii sunt cele care limitează transferurile. Deci, expeditorul și receptorul ar trebui să fie suficient de aproape pentru a realiza acest procedeu, iar topologia ar trebui să includă un număr mare de dispozitive hardware.

Pentru România, în ceea ce privește lățimile de bandă utilizate, se recomandă câteva intervale astfel:

- 452.5 - 457.5 MHz
- 462.5 - 467.5 MHz
- 753 - 758 MHz
- 788 – 791 MHz

Utilizarea fiecărui interval de frecvență implică apariția unor comportamente specifice în ceea ce privește propagarea undelor electromagnetice. Unele dintre cele mai importante fenomene de studiat sunt reflectarea, dispersia, difracția sau penetrarea diferitelor materiale [38].

5.2. Antene cu formă fractală

Pentru a maximiza lungimea antenei, se sugerează utilizarea antenelor fractale, obiecte care utilizează proprietatea de auto-similaritate a fractalilor pentru o funcționare optimă în mai multe intervale de frecvență.

Conform unui document public redactat de ANCOM⁴ (pagina 49), comunicațiile PPDR ar folosi câteva lățimi de bandă pentru link-uri specifice. Deci, sistemele destinate PPDR ar putea folosi o singură antenă pentru toate lățimile de bandă necesare. Aceasta ar putea reprezenta posibilitatea de a dezvolta un sistem auto-reconfigurabil.

Relația care descrie puterea radiată pentru o antenă cu mai multe elemente este următoarea [40]:

$$E \cdot E^* \sim \left(\sum_{n=1}^N A_n e^{i\phi_n} \right) \cdot \left(\sum_{m=1}^N A_m e^{i\phi_m} \right)^* = \sum_{n,m} (A_n A_m^*) e^{i(\phi_n - \phi_m)} \quad (5.1)$$

O diferență majoră între antenele cu dispunere matriceală și antena fractală este că ordinul antenelor clasice le face să fie rezonante de-a lungul unei lățimi de bandă și forma fractalului (dată de elementele fractalului) face ca antena în formă fractală să fie rezonantă de-a lungul mai multor lățimi de bandă (iterația 0 poate fi privită ca o antenă clasică și începând cu o nouă iterație se poate obține o nouă lățime de bandă).

5.2.1. Curba lui Koch

Acest fractal este numit după Helge von Koch, matematicianul suedez care a dezvoltat acest concept în 1904. Proiectarea constă în alegerea unei linii drepte de lungime L și împărțirea acesteia în trei segmente egale. Apoi, segmentul din mijloc este înlocuit cu două segmente egale pentru a forma un triunghi echilateral. Apoi, cu fiecare iterație, fiecare segment va suferi același proces.

Conform relațiilor (2.3), (2.4) și (2.5) dimensiunea fractală a curbei lui Koch este egală cu 1,26 datorită celor patru elemente componente ale sale.

$$D = \frac{\log 4}{\log \frac{4}{3}} = 1,26 \quad (5.2)$$

Lungimea efectivă a noii forme este calculată prin înmulțirea dimensiunii segmentului inițial cu $\left(\frac{4}{3}\right)^n$, unde n este numărul de iterații.

Similar acestei forme, se poate dezvolta și fractalul cunoscut sub numele de „fulgul de zăpadă al lui Koch”, contur ce are la bază triunghiul echilateral. Astfel, toate noile triunghiuri rezultate vor suferi același proces.

⁴ https://www.ancom.ro/uploads/links_files/Strategia_5G_pentru_Romania.pdf, site web accesat pe 14.03.2020, ora 20:44.

5.2.2. Garnitura lui Sierpinski

Această formă fractală este realizată artificial și a fost dezvoltată de Waclaw Sierpinski. Procesul începe cu un triunghi echilateral din care se elimină triunghiuri egale cu o pătrime din triunghiul original.

Dimensiunea fractală a garniturii lui Sierpinski este egală cu:

$$D = \frac{\log 3}{\log 2} = 1,585 \quad (5.3)$$

5.3. Comparații ale antenelor cu formă fractală cu cele cu formă consacrată

Așa cum am menționat anterior, mai multe aplicații pot fi dezvoltate pe baza antenelor cu formă fractală datorită dimensiunii lor compacte (această formă poate fi foarte bine amplasată într-un dispozitiv personal cu multe tipuri de comunicații), dar și a rezonanței multibandă. Aplicații precum radare, telefoane mobile personale, cele de pe ramurile UWB sau dispozitivele destinate domeniului PPDR în tehnologie 5G pot beneficia de un astfel de element care poate avea ca punct de plecare orice antenă dedicată (log-periodic, monopol, dipol, patch etc.).

Prin aplicarea unor tehnici precum penetrarea sau îndoirea unei forme consacrate se poate constata o îmbunătățire a parametrilor antenei, ca și cum aceasta ar conține circuite suplimentare formate din rezistori și condensatori [40]. Mai mult, utilizarea acestei metode implică și o scădere a costurilor.

Din colecția fractalilor eligibili pentru a descrie suprafața unei antene, au fost alese două forme: curba lui Koch și garnitura lui Sierpinski.

5.3.1. Comparație între antena dipol consacrată și antene fractale descrise de curba lui Koch

Presupunând că un dispozitiv ar trebui să deservească mai multor aplicații, este incomod ca antena să fie schimbată de fiecare dată. Așadar, proiectarea unei antene adecvate pentru a acoperi toate lățimile de bandă este cea mai potrivită opțiune.

Din acest punct de vedere, s-a proiectat o antenă dipol în mediul MATLAB R2018b. Lățimea dipolului corespunde diametrului unui dipol cilindric echivalent și alimentat în centru.

Apoi, pornind de la antena dipol rezultată, s-au efectuat două iterații pentru a genera antena fractală descrisă de curba lui Koch.

Conform rezultatelor proiectării și simulărilor, obiectivele au fost atinse.

5.3.2. Comparație între antena tip bow tie și antena fractală descrisă de garnitura lui Sierpinski

Antenele descrise de forme fractale sunt de asemenea potrivite pentru utilizarea în gama de frecvențe SHF (optime pentru comunicațiile mobile). Pentru acest studiu a fost realizată o comparație între antena tip bow tie și antena descrisă de fractalul garnitura lui Sierpinski, iar ca benzi de interes au fost alese cea de 1800 MHz și 2100 MHz.

Antena bow tie utilizează două triunghiuri drept conductori, dispuși precum un papion. Aceasta poate semăna cu antenele log periodice, dar nu sunt considerate tocmai log periodice, deși unii specialiști din branșă consideră că antena bow tie este o versiune mai simplă a antenei periodice tip „tooth”.

Dintre avantajele antenei bow tie se pot menționa:

- Utilizarea triunghiurilor face ca banda utilizată să fie mai mare.
- Utilizarea unghiului de 60° permite conectarea mai multor tipuri de surse de semnal.
- Formă rezistentă la condițiile meteo.
- Greutate mai mică decât un dipol obișnuit.
- Potrivită pentru comunicațiile TV de bandă largă.

Ca dezavantaj prezentat se poate aminti că antenele biconice, printre care și antena bow tie au o eficiență de transmisie slabă la capătul inferior al benzii lor de frecvență. Prin urmare, o antenă log periodică este de dorit. Suplimentar, nu se recomandă utilizarea antenei bow tie în cazul aplicațiilor destinate detecțiilor radio.

Antenele de comparat, descrise de fractalul garnitura lui Sierpinski cu una și două iterații, își propun rezonarea la 1,8 GHz și 2,1 GHz.

Analizând rezultatele obținute în urma simulărilor efectuate în mediul MATLAB R2020a, se poate observa că antenele cu formă fractală conferă posibilitatea funcționării în gamele de frecvență dorite.

5.3.3. Antenă fractală descrisă de curba lui Koch închisă

În acest subcapitol sunt incluse rezultatele obținute și aflate în curs de publicare în articolul “5G Fractal Antennas Design Based on the Koch Snowflake”, autori: Mihai-Virgil Nichita, Maria-Alexandra Păun, Vladimir-Alexandru Păun and Viorel-Puiu Păun [42].

Un alt tip de formă fractală ce poate descrie o antenă este curba lui Koch închisă. Aceasta se prezintă ca trei fractali de forma curba lui Koch dispuși într-un triunghi echilateral și are o dimensiune fractală egală cu 1,2618 datorită celor patru copii ale întregului, egale cu o treime din dimensiunea euclidiană inițială a obiectului original.

Fie un set de n iterații după executarea căruia considerăm următorii parametri L_n (lungimea unei laturi), N_n (numărul de laturi), l_n (lungimea perimetrului) și A_n (aria descrisă de curba Koch închisă) cu următoarele valori [42]:

$$L_n = \left(\frac{1}{3}\right)^n = 3^{-n} \quad (5.4)$$

$$N_n = 3 \cdot 4^n \quad (5.5)$$

$$l_n = N_n L_n = 3 \cdot \left(\frac{3}{4}\right)^n \quad (5.6)$$

$$A_n = A_{n-1} + \left(\frac{1}{3}\right) \left(\frac{4}{9}\right)^{n-1} A_0 \quad (5.7)$$

unde A_0 reprezintă aria triunghiului inițial ($n = 0$).

Producerea curbei Koch închise se poate realiza utilizând Transformarea IFS luând în considerare următoarele relații [42]:

$$V[A] = \bigcup_{n=1}^7 v_n(A) \quad (5.8)$$

$$v_i(x, y) = \begin{bmatrix} a_{1i} & a_{2i} \\ a_{3i} & a_{4i} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{5i} \\ a_{6i} \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

Dimensiunea de capacitate a fractalului rezultat, sinonimă cu dimensiunea fractală, este dată de relația [42]:

$$d_{cap} = - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln N_n}{\ln L_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln 3 + n \ln 4}{n \ln 3} = \frac{2 \ln 2}{\ln 3} = 1,261859550 \quad (5.10)$$

Fractalul Koch's Snowflake poate fi proiectat fie ca o suprafață, fie ca un contur închis. Ambele forme au ca iterație 0 triunghiul echilateral.

Un posibil dezavantaj al conturului închis este reprezentat de cuplajul magnetic ce poate apărea între segmentele ce alcătuiesc forma. Mai mult, odată cu efectuarea iterațiilor, grosimea conductorului (a fractalului în speță) trebuie diminuată pentru ca segmentele noi apărute să nu se suprapună.

Capitolul 6.

Concluzii

Această secțiune cuprinde subiectele esențiale ale prezentei tezei și oferă un rezumat al obiectivelor atinse, precum și al aportului personal adus. Mai mult, sunt specificate lucrările științifice publicate de-a lungul stagiului doctoral și posibilitățile de dezvoltare ulterioară a acestui studiu.

6.1. Rezultate obținute

Valorificând teoriile conținute de literatura de specialitate, am obținut o serie rezultate importante în domeniul imagisticii medicale și proiectării antenelor pentru rețele și sisteme complexe de comunicații.

În Capitolul 2 al lucrării de față am prezentat o serie de informații cu rol introductiv în teoria haosului și fractalilor.

În prima secțiune am descris pe larg nevoia abordării conceptului de fractal prin prisma avantajelor pe care aceste forme le oferă.

Următoarele două secțiuni prezintă modelul matematic de realizare al formelor fractale având la bază noțiuni consacrate ale domeniului.

Capitolul prezintă de asemenea aspecte ale noțiunilor de dimensiune fractală, dimensiune fractală autosimilară și dimensiune Hausdorff pentru a completa lista termenilor de interes ai subiectului.

Totodată, am prezentat scopul și modul de funcționare al algoritmului cu cea mai mare notorietate în procesul de calcul a dimensiunii fractale, box-counting.

În Capitolul 3, am supus procesului de analiză fractală mai multe sisteme vitale ale corpului uman (respirator, nervos și vizual).

Am pornit de premisa că structura unor părți componente ale acestor sisteme sunt dispuse sub formă fractală, iar pentru o caracterizare completă, clasică geometrie euclidiană nu prezintă eligibilitate.

Am ales ca primul organ analizat să fie plămânul al cărui sistem de artere și vase de sânge poate fi considerat ca fiind fractal. Astfel, am aplicat unor radiografii pulmonare obișnuite o serie de procedee în vederea îmbunătățirii conturilor formelor conținute cu scopul de a extrage doar elementele de interes din aceasta, în speță artere și vase de sânge.

Pentru început am reușit uniformizarea luminanței fundalului. Apoi, am crescut contrastul într-un interval prestabilit, urmând ca prin binarizarea imaginii rezultate restul țesuturilor, precum plămânul sau părți ale scheletului, să fie filtrate pentru a nu altera rezultatele. După extagerea elementelor dorite, am aplicat algoritmul box-counting în forma clasică (utilizând masca pătratică), dar și într-o formă ajustată (utilizând masca rectangulară) pentru a determina dimensiunea fractală. În urma comparației rezultatelor furnizate de cele două variante ale algoritmului box-counting, dar și comparării cu datele furnizate de software-ul Harmonic and Fractal Image Analyzer Demo version 5.5.30 în vederea validării, a reieșit că varianta propusă de această teză (aceea a utilizării măștii rectangularare) conduce la diminuarea deviației standard.

Mai mult, am propus îmbunătățiri și asupra modului în care poate fi realizată filtrarea țesuturilor nefolositoare prin definirea unor măști neregulate care se suprapun manual doar pe zonele de interes. Astfel, se elimină riscul analizării unor zone nedorite sau filtrarea unor țesuturi utile.

Cel de-al doilea organ analizat a fost creierul, pentru care am realizat și o scurtă descriere în prima parte a secțiunii.

Am continuat apoi cu prezentarea procesului de analiză fractală a unora dintre cele mai importante celule din componența acestui organ.

De asemenea, tot în acest capitol, am subliniat și importanța termenului lacunaritate, util în studiul maladiilor creierului, printr-o descriere teoretică, dar și rezultate practice. Desigur, am dezbătut și metodele de măsurare a lacunarității și analizei fractale a lacunarității.

Ultimul organ supus analizei, a fost ochiul. După o scurtă descriere a structurii sale și a maladiilor specifice, am prezentat modul în care se poate analiza fractal retina.

Supunând câteva imagini ce conțin reprezentări ale afecțiunilor retinei tehnicilor de prelucrare de imagini aplicate plămânului și creierului, am reușit să obțin rezultate care să ajute specialiștii din domeniul oftalmologic în procesul de decizie asupra medicației sau intervențiilor chirurgicale.

Capitolul 4 prezintă comparația a doi algoritmi destinați segmentării imaginilor, tehnică utilă în determinarea prezenței unor forme în imaginea procesată.

Prima parte a secțiunii descrie scopul utilizării acestor algoritmi în procesul de analiză a imaginilor medicale și continuă cu două secțiuni descriptive ale algoritmilor împreună cu rezultatele furnizate de fiecare în urma procesării a două tomografii obișnuite.

Mai mult, în acest capitol se expune și o concluzie a comparării celor doi algoritmi în funcție de necesități și puterea de calcul deținută.

Capitolul se încheie cu un studiu de caz amănunțit ce prezintă o caracterizare complexă a tomografiilor craniene.

Capitolul 5 expune nevoia dezvoltării rețelelor de comunicații contemporane în contextul deservirii unui număr tot mai mare de utilizatori care solicită să beneficieze de cantități impresionante de informație instant.

Am descris în prima parte a secțiunii conceptele comunicațiilor 5G, tehnologie care își propune să revoluționeze actualele topologii prin echipamente demne să suporte

un număr mai mare de abonați și care sunt dispuse să gestioneze rate de transfer revoluționare.

A doua secțiune a capitolului prezintă conceptul de antenă fractală și câteva exemple consacrate ale acestora.

Am realizat o comparație a anetelor cu formă consacrată cu cele cu formă fractală pentru a sublinia avantajul utilizării celor din urmă în mai multe benzi de interes cu scopul de a evita cuplarea mai multor elemente radiante unui echipament ce poate utiliza mai multe tehnologii de comunicații. Validarea conceptului este prezentată în figurile grafice din cadrul capitolului.

Pentru simulările și procesările din cadrul acestei lucrări au fost utilizate mai multe versiuni ale mediului MATLAB, acest mediu de programare fiind recunoscut pentru calitatea analizelor iterative și fidelitatea simulărilor realizate printr-un limbaj de programare specializat în lucrul cu matrici. Numărul mare de funcții și algoritmi implementați fac posibilă procesarea oricăror date, fie că sunt provenite din unitatea de calcul pe care se execută programul, fie din exteriorul acesteia. MATLAB include și o suită de utilitare specializate, unul dintre ele, Antenna Toolbox, fiind utilizat pentru proiectarea și măsurarea antenelor.

6.2. Contribuții originale

Contribuțiile originale sunt expuse succint în ordinea apariției de-a lungul capitolelor prezentei teze astfel:

1. Am aplicat într-o manieră profesionistă filtre specifice prelucrării de imagine cu scopul de a optimiza procesul de analiză fractală prin eliminarea unor posibile surse de alterare a rezultatelor [A1][A2][B1] [C1].
2. Pornind de la premisa că unele elemente componente ale corpului uman sunt dispuse sub forma unui fractal, am reușit să transform datele furnizate de un computer tomograf obișnuit în date de intrare pentru algoritmul box-counting din dorința de a optimiza procesul de decizie în cazul apariției unei afecțiuni a organului în cauză [A1][A2][B1] [C1].
3. Am oferit o nouă perspectivă a analizei fractale prin implementarea algoritmului box-counting cu mască rectangulară în mediul MATLAB cu scopul de a reduce deviația standard [A1][A2][B1] [C1].
4. Am elaborat studii complexe de calitate a sistemelor complexe din componența corpului uman prin dezvoltarea de programe software ce au analizat fractal și lacunar radiografiile pulmonare, tomografiile craniene și reprezentări grafice ale retinei [A1][A2][B1] [C1].
5. Am identificat posibilitatea aplicării algoritmului box-counting, atât standard cât și optimizat, doar zonelor de interes din imagine prin definirea manuală a

- unor măști de selecție. Astfel se evită analizarea unor zone nefolositoare ce ar putea conduce la alterarea rezultatelor [B1].
6. Am reușit dezvoltarea în mediul MATLAB a unor programe bazate pe algoritmi k-means și Fuzzy C-Means cu scopul de a identifica prin intermediul tehnicilor de cluster-izare efecte ale maladiei Alzheimer sau sechele ale accidentului vascular cerebral [A3].
 7. Mai mult, am realizat o comparație a celor doi algoritmi de clustering în funcție de viteza de lucru, puterea de calcul disponibilă a utilizatorului și dispunerea punctelor de analizat [A3].
 8. Luând în considerare viitoarea tehnologie de comunicații, 5G, dar și specificațiile ANCOM pentru benzile destinate acesteia, am proiectat și simulat o antenă cu formă fractală ce poate deservi toate gamele de frecvență propuse de instituția statului român. Forma fractală ce a descris conturul antenei fost curba lui Koch.
 9. De asemenea, am proiectat și simulat o antenă cu formă fractală pornind de la o teorie privind fractalul curba lui Koch ce are ca iterație 0 triunghiul echilateral [D1].
 10. Mai mult, am proiectat și simulat o antenă fractală tip garnitura lui Sierpinski utilă integrării comunicațiilor ce se desfășoară în banda 1800 – 2400 MHz.

6.3. Lista lucrărilor originale

Activitatea științifică desfășurată pe parcursul stagiului meu doctoral a fost publicată într-o serie de cinci articole unde sunt autor principal.

6.3.1. Articole științifice în publicații indexate ISI

[A1] M-V Nichita, V-P Păun, *Fractal analysis in complex arterial network of pulmonary X-rays images*, University POLITEHNICA of Bucharest Scientific Bulletin, Series A, Vol. 80, Iss. 2, 2018, ISSN 1223-7027, pp. 325- 339.

[A2] M-V Nichita, M-A Păun, V-A Păun, V-P Păun, *Fractal Analysis of Brain Glial Cells. Fractal Dimension and Lacunarity*, University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin, Series A-Applied Mathematics and Physics, Vol. 81, no. 1, pp. 273-284, 2019.

[A3] M-V Nichita, M-A Păun, V-A Păun, V-P Păun, *Image Clustering Algorithms to Identify Complicated Cerebral Diseases. Description and Comparison*, IEEE Access, DOI 0.1109/ACCESS.2020. 2992937.

6.3.2. Articole științifice în publicații indexate AIP

[B1] M-V Nichita, M-A Păun, V-A Păun, V-P Păun, *Pulmonary X-Ray Images. A Fractal Analysis*, TIM 19 Physics Conference, Timișoara, 2019, DOI: 10.1063/5.0001033.

6.3.3. Articole științifice în publicații de tip Conference Proceedings

[C1] M-V Nichita, V-P Păun, *Pulmonary arterial network. A fractal analysis of xrays images*, Proceedings of the 12th Conference of the Society of Physicists of Macedonia, pp. 54-57, September 27th - 30th, Ohrid, Macedonia, ISBN 978-608-4711-08-7.

6.3.4. Articole științifice în curs de publicare

[D1] M-V Nichita, M-A Păun, V-A Păun, V-P Păun, *5G Fractal Antennas Design Based on the Koch Snowflake*.

6.4. Perspective de dezvoltare ulterioară

Subiectele abordate în cadrul acestei teze prezintă actualitate dat fiind faptul că au ca punct de plecare dorința societății contemporane de a evolua prin simplificarea vieții cotidiene.

Eliminarea rutinei sau automatizarea unor procese devin condiții standard ale indivizilor deceniului curent.

Specialiștii IT&C beneficiază de cunoștințe ce pot duce societatea la un nivel superior al evoluției și au astfel datoria de a furniza soluții revoluționare atât hardware cât și software prin intermediul cărora oamenii să se poată concentra mai mult pe progres, personal sau profesional, decât pe rutină.

Astfel, dintre perspectivele de dezvoltare ulterioară a prezentei teze se poate menționa posibilitatea integrării software-urilor dezvoltate pentru analiza fractală și lacunară și clustering a elementelor componente ale corpului uman în sisteme specializate de imagistică medicală cu scopul de a furniza informații complete medicilor.

Mai mult, un alt beneficiu ce se poate aduce computerelor tomograf este realizarea unui sistem de captură a imaginilor medicale capabil să ofere date de intrare „pure”, fără zgomot introdus de diverși factori specifici, algoritmilor descriși în această lucrare.

În plus, un alt beneficiu demn de luat în calcul al analizei fractale a elementelor componente ale corpului uman poate fi reprezentat de sistemele informatice ce folosesc autentificarea biometrică cu mai mulți factori (ex: analiza retinei). Pe lângă cailitățile consacrate, dimensiunea fractală a unei părți din componența corpului uman poate confirma identitatea unei persoane.

În completare, utilizând rezultatele de încredere furnizate de algoritmi specializați de analiză fractală sau clustering se pot descrie noi clasificări ale maladiilor sau ale stagiilor de evoluție ale acestora, reducând astfel lista simptomelor neconcludente.

De asemenea, în ceea ce privește comunicațiile, trebuie să fim conștienți că acest domeniu este într-o continuă evoluție sincronizată cu nevoile indivizilor și care tinde să conceapă obiective care vor presupune eforturi din partea comunității științifice.

Drept urmare, dobândirea cunoștințelor actuale de către specialiștii domeniului IT&C în vederea dezvoltării de noi soluții reprezintă o condiție care dacă nu este satisfăcută va implica stagnarea progresului societății.

Astfel, fie că noi generații de comunicații vor lua naștere, fie că tehnologiile deja existente vor fi integrate în sisteme hibride cu scopul de a evita eventuale congestii de trafic generate de numărul mare de abonați, sunt necesare noi abordări în domeniul proiectării antenelor.

Prin urmare, proiectarea corespunzătoare a tehnologiilor emergente constituie o sarcină ce impune profesionalism și viziune pentru conceperea sistemelor adecvate.

Referitor la antenele cu formă fractală, acestea pot beneficia de îmbunătățiri prin proiectarea de noi forme fractale care să descrie antene specifice aplicației în cauză satisfăcând condițiile de lucru prin valorificarea celor mai importante avantaje ale acestei tehnici de realizare a antenelor, dispunere compactă, rezonanță în mai multe benzi de interes sau capacitatea implementării tehnicii de modelare a fasciculelor datorită proprietății de recursivitate a fractalilor.

Complexitatea simulatoarelor de elemente radiante coroborată cu puterea de procesare a unităților de calcul actuale simplifică etapele de testare și facilitează proiectarea particularităților antenelor care deservesc scopuri de nișă.

Totodată, o direcție de studiu poate fi conceperea unor module de tip RFIC, DSP și SDR performante, componente ale echipamentelor de emisie și recepție, pentru a putea procesa astfel de benzi de frecvență. De asemenea, și echipamentele auxiliare, precum amplificatoarele, preamplificatoarele, convertoarele sau filtrele reprezintă subsisteme ce ar trebui optimizate pentru a face față noilor provocări.

Așadar, teza de față are la bază studii dintre cel mai solide din ramura haosului determinist și fractalilor și prin contribuțiile prezentate pe larg în capitolele anterioare, dar și în articolele pe care le-am publicat de-a lungul stagiului de doctorat, conferă o gamă largă de perspective de dezvoltare ulterioară cu aplicabilitate în mai multe domenii ale științelor exacte, dar nu numai, precum IT&C, electronică, matematică etc.

Bibliografie

- [1] Mihai-Virgil Nichita, Viorel-Puiu Păun , *Fractal analysis in complex arterial network of pulmonary X-rays images*, University POLITEHNICA of Bucharest Scientific Bulletin, Series A, Vol. 80, Iss. 2,2018, ISSN 1223-7027, pp. 325- 339
- [2] M. Agop, V.-P. Păun,*On the New Perspectives of Fractal Theory. Fundaments and Applications*, Editura ACADEMIEI ROMÂNE, ISBN 978-973-27-2745-4, București 2017 (200 pag.)
- [3] P. Postolache, Z. Borsos, V. A. Păun, V. P. Păun, *New Way in Fractal Analysis of Pulmonary Medical Images*, University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin-Series A-Applied Mathematics and Physics, vol. **80**, no.1, 2018, pp. 313-322
- [4] B. Mandelbrot, *Fractal geometry of nature*, Freeman, New York, 1983, pp. 25-57
- [5] C. A. Rogers, *Hausdorff Measures*, Cambridge University Press, Oxford, 1970
- [6] M.V. Nichita, M.A. Păun, V.A. Păun, and V.P. Păun, *Fractal Analysis of Brain Glial Cells. Fractal Dimension and Lacunarity*, University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin, Series A-Applied Mathematics and Physics, Vol. 81, no. 1, pp. 273-284, 2019
- [7] A. Karperien, H.F. Jelinek, N.T. Milošević, *Reviewing Lacunarity Analysis and Classification of Microglia in Neuroscience*, 8th European Conference on Mathematical and Theoretical Biology, 2011
- [8] Cezar Th. Niculescu, Radu Carmaciu, Bogdan Voiculescu, Carmen Salavastru, Cristian Nita, Catalina Ciornei, *Anatomia si fiziologia omului – Compendiu*, Editura Corint, 2009, ISBN: 9786068609072.
- [9]https://www.mathworks.com/help/images/image-enhancement-and-analysis.html?searchHighlight=analyze%20grayscale&s_tid=doc_srchtile, site web accesat pe 12.08.2020, ora 16:08.
- [10]https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/13063-boxcount?s_tid=srchtile, site accesat pe 14.08.2020, ora 09:30.
- [11] http://www.bio.unibuc.ro/pdf/licenta_2014/biologie/Anatomia_omului.pdf, site web accesat pe 17.11.2018, ora 15:31.
- [12] A. Karperien, H.F. Jelinek, *Box counting Fractal Analysis: A Primer for the Clinician*, https://www.researchgate.net/publication/305811680_Box-Counting_Fractal_Analysis_A_Primer_for_the_Clinician .
- [13] Bhattacharya J, Edwards J, Mamelak A, *Schuamn EM. Ongoing hippocampal neuronal activity in human: is it noise or correlated fractal process?* In: Losa GA, Merlini D, Nonnenmacher TF, Weibel ER, editors. *Fractals in biology and medicine. Mathematics and Biosciences in Interaction*. Birkhäuser Basel. https://doi.org/10.1007/3-7643-7412-8_9.
- [14] M.B. Djamgoz, M. Krasowska, O. Marti3noli, M. Sericano, S. Vallergera, ZJ. Grzywina, *Structurefunction correlation in transient amacrine cells of goldfi sh retina:*

- basic and multifractal analyses of dendritic trees in distinct synaptic layers*, Journal of Neuroscience, Res. 2001;66(6):1208–16.
- [15] D. Fetterhoff, I. Opris, S.L. Simpson, S.A. Deadwyler, R.E. Hampson, R.A. Kraft. *Multifractal analysis of information processing in hippocampal neural ensembles during working memory under $\Delta(9)$ -tetrahydrocannabinol administration*. Journal of Neuroscience Methods. 2015;244:136-53.
- [16] R.C. Gutierrez, J. Hung, Y. Zhang, A.C. Kertesz, F.J. Espina, M.A. Colicos, *Altered synchrony and connectivity in neuronal networks expressing an autism-related mutation of neuroligin 3*, Neuroscience. 2009;162(1):208–21.
- [17] P.C. Ivanov, Ma QDY, R.P. Bartsch, J.M. Hausdorff, L. Nunes Amaral, V. Schulte-Frohlinde, H.E. Stanley, M. Yoneyama, *Levels of complexity in scale-invariant neural signals*, Phys Rev E Stat Nonlinear Soft Matter Phys. 2009;79(4 Pt 1):041920.
- [18] J. Suckling, A.M. Wink, F.A. Bernard, A. Barnes, E. Bullmore, *Endogenous multifractal brain dynamics are modulated by age, cholinergic blockade and cognitive performance*. J Neurosci Methods. 2008;174(2):292–300.
- [19] Zorick T, Mandelkern MA, *Multifractal detrended fluctuation analysis of human EEG: preliminary investigation and comparison with the wavelet transform modulus maxima technique*. PLoS ONE. 2013;8(7):e68360.
- [20] Barreto GE, White RE, Xu L, Palm CJ, Giffard RG, *Effects of heat shock protein 72 (Hsp72) on evolution of astrocyte activation following stroke in the mouse*. Exp Neurol. 2012; 238(2):284–96.
- [21] D. Cornforth, H. Jelinek, *Automated classification of dementia subtypes from post-mortem cortex images*. In: Zhang S, Jarvis R, editors. AI 2005: advances in artificial intelligence, Lecture Notes in Computer Science, vol. 3809. Berlin: Springer; 2005. p.1285–8.
- [22] F.N. Doubal, T.J. MacGillivray, N. Patton, B. Dhillon, M.S. Dennis, J.M. Wardlaw, *Fractal analysis of retinal vessels suggests that a distinct vasculopathy causes lacunar stroke*. Neurology. 2010;74(14):1102–7.
- [23] D.J. Gould, T.J. Vadakkan, Poché, A. Ross, M.E. Dickinson, *Multifractal and lacunarity analysis of microvascular morphology and remodeling*. Microcirculation. 2011;18(2):136–51.
- [24] T. Stosić, B.D. Stosić, *Multifractal analysis of human retinal vessels*. IEEE Trans Med Imaging. 2006;25(8):1101–7.
- [25] S. Talu, *Multifractal geometry in analysis and processing of digital retinal photographs for early diagnosis of human diabetic macular edema*. Curr Eye Res. 2013;38(7):781–92.
- [26] A. Karperien, *FracLac for Image J*. Charles Sturt University. 2013.
- [27] E. Shigetomi, E.A. Bushong, M.D. Haustein, X. Tong, Jackson-Weaver O, Kracun S, Xu J, Sofroniew MV, Ellisman MH, Khakh BS. *Imaging calcium microdomains within entire astrocyte territories and endfeet with GCaMPs expressed using adeno-associated viruses*. J Gen Physiol. 2013; 141(5):633-47.
- [28] H.F. Jelinek, D.J. Cornforth, T. Roberts, G. Landini, P. Bourke, T. Bossomaier, *Image processing of finite size rat retinal ganglion cells using multifractal and local*

- connected fractal analysis*. In: Yu GIWaX (ed) AI 2004: advances in artificial intelligence. 17th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence, Cairns, Australia, 2005. Lecture Notes in Artificial Intelligence. Springer Verlag, p. 961–6.
- [29] H.F. Jelinek, E. Fernandez, *Neurons and fractals: how reliable and useful are calculations of fractal dimensions?* Journal of Neuroscience Methods. 1998;81(1–2):9–18.
- [30] <https://lensa.ro/blog/recomandari/ochiul-uman-si-vederea/> , site web accesat la data de 15.02.2020, ora 14:47.
- [31] <https://www.hoyavision.com/ro/de-ce-am-nevoie/pentru-purtatori-de-ochelari/intelegerea-vederii/cum-functioneaza-vederea/> , site web accesat la data de 15.02.2020, ora 14:47.
- [32] <https://anatomie.romedic.ro/fiziologia-vederii>, site web accesat la data de 15.02.2020, ora 14:49.
- [33] <https://www.clinicaoculus.ro/afectiuni/afectiuni-retiniene/afectiuni-retiniene-tipuri-clinice> site web accesat la data de 15.02.2020, ora 14:49.
- [34] J.Adamson, A. Beswick, S. Ebrahim, *Is stroke the most common cause of disability?* Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases, vol.13, no.4, pp.171-177, 2004.
- [35] <http://cifr.cs.pub.ro/ullman/cluster1-ro.pdf>, site web accesat pe 21.08.2020, ora 23:18.
- [36] https://www.mathworks.com/help/stats/k-means-clustering.html?s_tid=srchtitle, site web accesat pe 21.08.2020, ora 23:19
- [37] <https://www.mathworks.com/help/images/ref/imsegkmeans.html>, site web accesat pe 21.08.2020, ora 23:20
- [38] M. V. Nichita, P. Ciotirnae, R. L. Luca, and V. N. Petrescu, *5G propagation: Current solutions and future proposals*, Proc. 2006 12th IEEE Int. Symp. Electron. Telecommun., 2016, pp. 47–50.
- [39] <https://www.mathworks.com/help/antenna/fractal-antennas.html> , site web accesat pe 24.02.2020, ora 11:19.
- [40] Ahmed Kiani, Syed Takshed Karim, Serder Burak Solak, *Fractal Antennas*, McGill University, January 2007.
- [41] Ghriti Khanna, Narinder Sharma, *Fractal antenna geometries: A review*, International Journal of Computer Science , November 2016.
- [42] M-V Nichita, M-A Păun, V-A Păun, V-P Păun, *5G Fractal Antennas Design Based on the Koch Snowflake*.