

ACADEMIA DE STUDII ECONOMICE DIN BUCUREȘTI
Școala doctorală Informatică Economică



TEZĂ DE DOCTORAT

Prezentată și susținută public de către autor:
ALEXANDRU-DANIEL M. STAN

Titlul tezei de doctorat:
**TEHNICI DE INSPIRAȚIE BIOLOGICĂ ÎN PROCESAREA
IMAGINILOR**

Conducător de doctorat:
Prof. univ. dr. Cătălina-Lucia Cocianu

Comisia de susținere a tezei de doctorat:

<u>Prof. univ. dr. Claudiu Herțeliu</u> (președinte)	-	Academia de Studii Economice din București
<u>Prof. univ. dr. Gabriela Mircea</u> (referent)	-	Universitatea de Vest din Timișoara
<u>Prof. univ. dr. Mihaela Muntean</u> (referent)	-	Universitatea de Vest din Timișoara
<u>Prof. univ. dr. Paul Pocatilu</u> (referent)	-	Academia de Studii Economice din București
<u>Prof. univ. dr. Cătălina-Lucia Cocianu</u> (conducător de doctorat)	-	Academia de Studii Economice din București

București, 2024

ACADEMIA DE STUDII ECONOMICE DIN BUCUREȘTI

Consiliul pentru Studii Universitare de Doctorat

Școala Doctorală

Informatică Economică

**TEHNICI DE INSPIRAȚIE BIOLOGICĂ ÎN PROCESAREA
IMAGINILOR**

Alexandru-Daniel STAN

Conducător de doctorat: Prof. univ. dr. Cătălina-Lucia Cocianu

București, 2024

CUPRINS

REZUMAT	ii
ABSTRACT.....	iii
MULȚUMIRI.....	iv
PARTEA I: STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII	1
CAPITOLUL 1: INTRODUCERE ȘI PREZENTARE GENERALĂ A TEZEI.....	1
1.1 MOTIVAȚIA CERCETĂRII	1
1.2 INTRODUCERE	2
1.3 PREZENTAREA PROBLEMEI ȘI PRINCIPALELE CONTRIBUȚII	7
1.4 OBIECTIVELE TEZEI	8
1.5 STRUCTURA TEZEI	10
CAPITOLUL 2: PRINCIPII TEORETICE ALE CALCULULUI DE INSPIRAȚIE BIOLOGICĂ	12
2.1 CALCULUL DE INSPIRAȚIE BIOLOGICĂ.....	12
2.2 ALGORITMI GENETICI	15
2.3 STRATEGII EVOLUTIVE	29
2.4 OPTIMIZAREA BAZATĂ PE INTELIGENȚA ROIULUI	40
2.4.1 OPTIMIZAREA BAZATĂ PE ROIUL DE PARTICULE	43
2.4.2 ALTE VARIANTE ALE ALGORITMULUI DE OPTIMIZARE BAZATĂ PE ROIUL DE PARTICULE.....	49
2.4.3 OPTIMIZAREA ACCELERATĂ BAZATĂ PE ROIUL DE PARTICULE	50
2.4.4 ALGORITMUL LICURICIULUI	52
2.5 REȚELE NEURONALE.....	57
CAPITOLUL 3: TEHNICI DE PROCESARE A IMAGINILOR. ELIMINAREA ZGOMOTULUI ȘI METODE DE REGISTRARE	66
3.1 ZGOMOTUL DIN CADRUL IMAGINILOR.....	66
3.2 TEHNICI DE FILTRARE PENTRU REDUCEREA ZGOMOTULUI.....	72
3.3 METODE AVANSATE DE REDUCERE A ZGOMOTULUI	78
3.4 REGISTRAREA IMAGINILOR.....	81
3.5 ELEMENTE TEORETICE ÎN REGISTRAREA IMAGINILOR.....	86
3.6 METODE PARAMETRICE ȘI NON-PARAMETRICE ÎN REGISTRAREA IMAGINILOR ..	96
PARTEA II: CONTRIBUȚII PERSONALE, METODOLOGIE DE CERCETARE ȘI REZULTATE EXPERIMENTALE.....	101
CAPITOLUL 4: ABORDĂRI BAZATE PE REȚELE NEURONALE PENTRU ELIMINAREA ZGOMOTULUI CORELAT.....	101
4.1 INTRODUCERE.....	101

4.2 PREPROCESAREA IMAGINILOR PRIN TEHNICI DE DECORELARE ȘI CONTRACȚIE	102
4.3 ARHITECTURA REȚELEI NEURONALE UTILIZATĂ PENTRU ELIMINAREA ZGOMOTULUI.....	105
4.4 REZULTATE EXPERIMENTALE PRIVIND EFICACITATEA METODEI PROPUSE	110
CAPITOLUL 5: NOI ABORDĂRI BAZATE PE CALCUL DE INSPIRAȚIE BIOLOGICĂ PENTRU REGISTRAREA IMAGINILOR	121
5.1 INTRODUCERE.....	121
5.2 METODOLOGII PROPUSE - TRANSFORMAREA RIGIDĂ	123
5.2.1 METODOLOGII BAZATE PE STRATEGII EVOLUTIVE	123
5.2.2 REZULTATE OBȚINUTE - ES.....	133
5.2.3 METODOLOGII BAZATE PE ALGORITMUL LICURICIULUI ȘI STRATEGII EVOLUTIVE	140
5.2.4 REZULTATE OBȚINUTE – FA.....	147
5.3 METODOLOGII PROPUSE - TRANSFORMAREA AFINĂ	154
5.3.1 METODOLOGII BAZATE PE STRATEGII EVOLUTIVE (ES).....	155
5.3.2 REZULTATE OBȚINUTE - ES.....	160
5.3.3 METODOLOGII BAZATE PE INTELIGENȚA ROIULUI	163
5.3.4 REZULTATE METODOLOGII BAZATE PE INTELIGENȚA ROIULUI	168
CAPITOLUL 6: CONCLUZII.....	179
BIBLIOGRAFIE	185
LISTA ABREVIERILOR	203
LISTA TABELELOR	205
LISTA FIGURILOR	207

CUVINTE CHEIE: calcul de inspirație biologică; procesare de imagini; eliminarea zgomotului; registrarea imaginilor; strategii evolutive; inteligența roiului (de grup); PSO; algoritmul licuriciului; APSO; algoritmi metaeuristici; algoritmi hibridi; algoritmi memetici; funcție de pierdere; funcție de adecvare (de calitate) ; tehnici de filtrare; algoritmi de instruire;

REZUMAT

Calculul de inspirație biologică reprezintă o abordare interdisciplinară care îmbină principii din procesele biologice cu tehnici avansate de calcul pentru a modela soluții eficiente și adaptabile la provocările din diferite domenii, de la securitatea bancară la procesarea imaginilor. Cele mai importante direcții de cercetare ale calculului de inspirație biologică includ calculul evolutiv, calculul neuronal și calculul nuanțat. Cele trei direcții ale calculului de inspirație biologică tind să se completeze reciproc și să se hibridizeze.

Procesarea imaginilor reprezintă un domeniu complex, vast și actual, cu aplicabilitate în multiple sectoare tehnologice, de la imagistica medicală și teledetecție până la supravegherea video. Acest domeniu este caracterizat printr-o serie de direcții esențiale de cercetare și dezvoltare care includ îmbunătățirea calității imaginii, segmentarea și recunoașterea formelor, compresia și analiza conținutului imaginilor.

Printre direcțiile fundamentale de cercetare și dezvoltare abordate în cadrul acestei teze de doctorat se numără îmbunătățirea calității imaginilor, prin eliminarea zgomotului și registrarea imaginilor.

Calitatea și claritatea datelor vizuale sunt esențiale în procesarea eficientă a imaginilor, iar prezența zgomotului poate compromite aceste atribute importante. De aceea, eliminarea zgomotului este o etapă preliminară importantă, esențială pentru pregătirea imaginilor pentru operațiuni ulterioare, precum registrarea. Zgomotul din cadrul imaginilor se manifestă ca perturbații sau variații ale intensității luminoase ale pixelilor care nu sunt prezente în scena originală, fiind introduse în timpul achiziției, procesării sau transmiterii imaginii. Acesta afectează negativ calitatea vizuală, estompând detaliile și diminuând precizia analizei vizuale. Eliminarea zgomotului din imagini este o etapă esențială de preprocesare, prin care este facilitată implementarea cu succes a prelucrărilor ulterioare.

Registrarea imaginilor reprezintă o tehnică fundamentală în procesarea și analiza imaginilor, fiind utilizată pentru alinierea a două sau mai multe fotografii digitale captate în condiții variate, cum ar fi la momente temporale diferite, de către senzori diferiți sau din unghiuri diferite. Registrarea își găsește utilitatea într-o gamă vastă de domenii care necesită analiza sau

interpretarea informației din mai multe imagini. Printre aceste domenii, putem enumera securitatea sistemelor, teledetecția, imagistica medicală, inteligența artificială, astronomie etc. Interacțiunea dintre eliminarea zgomotului și registrarea imaginilor devine un punct de interes major, deoarece succesul registrării depinde și de eficiența cu care zgomotul este redus în etapele anterioare.

Explorarea calculului de inspirație biologică în procesarea imaginilor marchează un avans major în domeniul tehnologiei. Prin imitarea eficienței sistemelor biologice, această abordare oferă soluții adaptabile și puternice în procesarea imaginilor, depășind obstacolele metodelor tradiționale. Printre aspectele cheie ale calculului de inspirație biologică în procesarea imaginilor putem enumera: rețelele neuronale, algoritmi genetici, strategiile evolutive, inteligența colectivă. Abordările bazate pe calculul de inspirație biologică, ancorate în dinamica sistemelor biologice s-au dovedit a fi deosebit de competente în gestionarea complexității imaginilor.

Integrarea calculului de inspirație biologică în îmbunătățirea calității imaginilor prin eliminarea zgomotului și registrarea imaginilor are implicații profunde în multiple discipline. În imagistica medicală, poate îmbunătăți acuratețea diagnosticului; în teledetecție, sporește analiza schimbărilor de mediu; în securitate, consolidează capacitățile de autentificare și autorizare. Aceste evoluții nu doar că împing limitele a ceea ce este realizabil în procesarea imaginilor, dar și subliniază potențialul abordărilor de inspirație biologică de a revoluționa tehnologia prin imitarea eficienței și adaptabilității sistemelor naturale.

În această lucrare au fost explorate două probleme cheie în procesarea imaginilor prin aplicarea algoritmilor de inspirație biologică, oferind contribuții semnificative în teoria și aplicarea acestora în scenarii reale.

Prima problemă abordată este reprezentată de eliminarea zgomotului gaussian corelat din imagini, integrând tehnici de decorelare și contracție în arhitecturi avansate de rețele neuronale. Comparativ cu alte metode descrise în literatura de specialitate, experimental a fost stabilit că soluția propusă este mai eficientă conform principalelor măsuri de evaluare a calității, consolidând aplicabilitatea acesteia în contexte variate de procesare a imaginilor. Experimentele efectuate au confirmat utilitatea metodologiei propuse în contextul procesării imaginilor, oferind o alternativă eficientă pentru eliminarea zgomotului gaussian corelat.

A doua problemă explorată în cadrul acestei teze este cea a registrării imaginilor, aplicată în contextul autentificării semnăturilor digitale în cadrul sistemelor de securitate bancare. Metodologiile dezvoltate s-au bazat pe algoritmi evolutivi, dar și pe algoritmi ce au la bază inteligența roiurilor, utilizând atât variante standard, cât și variante îmbunătățite ale acestora. În plus, au fost propuse și implementate abordări hibride și memetice, cu scopul de a spori performanța și calitatea rezultatelor obținute.

Prima metodologie propusă în cazul transformării rigide (§5.1.1) și pentru perturbarea afină (§5.2.1) explorează utilizarea strategiilor evolutive și impactul diferitelor combinații de operatori de recombinare și selecție. Metodologia utilizează raportul de informație mutuală ca măsură de similaritate (funcție fitness). Rezultatele au fost evaluate utilizând atât metrici calitative cât și metrici cantitative, general acceptate în literatură. Cele mai bune rezultate au fost obținute în urma utilizării mecanismului de selecție ($\mu + \lambda$) în combinație cu schemele de recombinare hibride convexe propuse atât pentru partea soluției cât și pentru partea parametrilor. De asemenea, rezultatele obținute utilizând metoda propusă au depășit din punct de vedere al performanțelor metodologiile deregistrare clasice.

Următoarele tehnici deregistrare propuse au la bază strategia evolutivă ES (recombinare hibridă convexă, $(\mu + \lambda)$) împreună cu algoritmul de căutare locală ES-2M (strategie evolutivă cu doi membri) (§5.1.1). În cadrul implementării hibride, algoritmul ES generează o soluție care este ulterior optimizată prin ES-2M. În varianta secundă, algoritmul ES-2M este integrat direct în cadrul ES, formând un algoritm memetic. Procesul începe cu utilizarea ES-2M pentru îmbunătățirea locală a unei fracțiuni reduse din populația inițială, pregătind astfel terenul pentru ES. Ulterior, la finalul fiecărei iterații și înainte de selectarea noii generații, dacă individul cel mai performant din populația curentă nu depășește calitatea celui mai bun individ precedent, o nouă fracție mică din populație este optimizată local cu ajutorul ES-2M. Raportul de informație mutuală este utilizat atât ca indicator de similaritate, cât și ca funcție de fitness. Din punct de vedere al acurateței, cele mai bune rezultate s-au obținut prin utilizarea algoritmului memetic. În schimb din punct de vedere al performanței, cele mai bune rezultate au fost obținute în urma utilizării algoritmului hibrid. În ambele cazuri rezultatele obținute au fost mai bune comparativ cu registrarea PAT și algoritmi deregistrare bazați doar pe strategiile evolutive.

Au fost propuse și metodologii deregistrare care au la bază algoritmul licuriciului (§5.1.3, §5.2.3). În prima metodă au fost propuse două reguli de actualizare a poziției licuricilor, care consideră nu doar calitatea atractorului, dar și valorile din intervalul variabilelor. În cadrul celei de-a doua metode, au fost dezvoltate două noi abordări deregistrare care integrează algoritmul licuriciului și strategiile evolutive. NMI este utilizat ca metrică de similaritate și funcție de fitness. Algoritmi propuși au fost testați în comparație cu alți algoritmi standard, inclusiv registrarea PAT, obținând rezultate pozitive. Din punct de vedere al acurateței, cele mai bune rezultate au fost obținute prin utilizarea algoritmului licuriciului. Din punct de vedere al performanței, cele mai bune rezultate au fost obținute în urma utilizării algoritmului hibrid. Rezultatele evidențiază capacitatea superioară a metodelor hibride și memetice de a se adapta eficient la înregistrarea imaginilor binare, atingând o acuratețe aproape perfectă, cu valori de aproape 100%. Algoritmi

dezvoltați se remarcă prin eficiența lor notabilă, manifestată prin timpii de rulare considerabil reduși.

O variantă simplificată a algoritmului licuriciului, denumită optimizarea accelerată a roiului de particule (APSO), este utilizată pentru registrarea imaginilor binare. Pentru a spori eficiența algoritmului au fost propuse reguli noi de actualizare, dar și metode noi de auto-adaptare a parametrilor. De asemenea, au fost propuse și variante hibride care au la bază ES și APSO (§5.2.3). Ca metrică de similaritate se utilizează raportul de informație mutuală (MIR). Din punct de vedere al acurateței, cele mai bune rezultate au fost obținute prin utilizarea algoritmului licuriciului. Cu toate acestea, timpul de execuție a fost unul mare în comparație cu algoritmi hibridi propuși. Din acest punct de vedere, algoritmul ES-APSO oferă rezultate bune într-un timp de execuție mic. De asemenea, varianta auto-adaptivă a APSO depășește în unele situații ambele variante ale APSO fără auto-adaptare. Toate rezultatele metodologiilor propuse sunt semnificativ superioare celor obținute utilizând algoritmul One Plus One.

Prin propunerea unor metodologii robuste care au la bază algoritmi de inspirație biologică pentru registrarea imaginilor deformată de transformările rigide și afină, lucrarea contribuie semnificativ la îmbunătățirea securității prin identificarea automată a semnăturilor clienților. Algoritmi propuși au arătat o rată ridicată de succes conform metricilor de calitative și cantitative și au validat integrarea lor în sistemele informatice ale organizațiilor, precum băncile, care procesează zilnic un număr mare de semnături. Aceste tehnici au demonstrat capacitatea de a îmbunătăți acuratețea și eficiența în procesele de autentificare și verificare, ceea ce este vital în prevenirea fraudelor și asigurarea unui nivel înalt de securitate. Prin utilizarea acestor metodologii se pot registra nu numai semnături digitale, ci și alte tipuri de imagini, facilitând implementări în diverse domenii.

Pentru viitor, această teză deschide calea spre explorarea continuă a algoritmilor de inspirație biologică în scenarii noi și inovatoare. Cu potențialul de a modela și îmbunătăți sisteme în domenii precum navigația autonomă, supravegherea inteligentă și chiar gestionarea resurselor naturale prin teledetecție, cercetarea în acest domeniu este esențială. Integrarea acestor sisteme avansate de procesare a imaginilor va continua să îmbunătățească interacțiunile umane cu tehnologia, conducând la dezvoltări care vor modela viitorul interacțiunilor digitale.

Continuarea cercetării și dezvoltării în această direcție promise nu doar îmbunătățiri tehnologice semnificative, dar și o mai bună înțelegere și aplicare a principiilor biologice în inginerie și informatică, deschizând noi orizonturi pentru inovație și progres în era digitală. Această teză contribuie astfel semnificativ la domeniul de cercetare, oferind o bază solidă pentru

inovații viitoare și pentru dezvoltarea continuă a aplicațiilor de inspirație biologică în tehnologia informației și în alte sectoare critice ale societății.