Brigita Sziová

Wavelet alapú modellezési megoldások orvosi-informatikai és fizikai környezetben

doktori tézisek

témavezetők:
Dr. Nagy Szilvia
Széchenyi István Egyetem
Dr. Pipek János
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése
Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola
2019.

1. Bevezetés

Az első wavelet Haar Alfréd [12] nevéhez fűződik, méghozzá az 1910-ben ortogonális függvényrendszerek elméletéről szóló cikkében jelent meg, bár nem volt a cikkben megnevezve, mint wavelet. A név maga, a wavelet, sokkal később alakult ki egy francia szóból, a kis hullámokból (ondolette): az úttörők a franciák voltak. A wavelet alapú jelelemzés számos előfutára különálló diszciplínákban létezett, mint például a Gábor-transzformáció [10], a rövid idejű és ablakolt Fourier-transzformáció, a Calderon-formula [2], a Littlewood-Paley-elmélet [9], a Klauder és Skägerstam [14] koherens állapot elmélete és a Morelet fix alakú hullámocskái.

Mivel a wavelet rendszerek nem feltétlenül alkotnak bázisfüggvény-rendszert, hanem keretfüggvény-rendszert alkotnak (ami azt jelenti, hogy bár a tér bármely függvénye a keretekkel kifejthető, a kifejtés azonban nem lesz egyértelmű, mert a keretek nem ortogonálisak egymásra). Sokáig nem keltett nagy érdeklődést a waveletanalízis, mert azt hitték nem lehet ortonormált bázisfüggvényrendszert készíteni waveletekkel. Meyer készített egy ortonormált waveletrendszert, ezáltal megcáfolta ezt a feltételezést, és felkeltette az emberek érdeklődését eziránt a terület iránt.

Hasonlóan a Fourier-analízis - Fourier-sor dualitáshoz, létezik folytonos és diszkrét wavelet-transzformáció is. A diszkrét transzformáció elméletét Stéphane Mallat [16] alapozta meg, aki rendkívül hasznosnak találta a waveletek használatát a képfeldogozás során, mivel lokálisan finomabb felbontással tudta kezelni a részletgazdagabb területeket, míg a simább részeket alacsonyabb felbontáson lehetett hagyni. Mallatnak ezt az elméletét multirezolúciós analízisnek (MRA) nevezzük és nagyban hasonlít a Laplace-féle piramis transzformációra.

A waveletek történelmének egy másik nagy alakja Daubechies. Daubechies munkájában ([6], [7], [8], összefoglalva [5]), ismerteti a különböző folytonossági tulajdonságú kompakt tartójú, ortonormált waveletcsaládok létrehozásáról szóló módszert.(A kompakt tartójúság azt jelenti, hogy a függvény egy adott intervallumon a tartóján kívül nulla, nem nulla értékeket csak a tartóján belül vehet fel.)

A wavelet analízis ma már matematikailag alaposan alátámasztott elmélet. Az

első alkalmazási területe a jelfeldolgozás volt. Az első MRA alapú képfeldolgozó program az FBI ujjlenyomat adatbázisánál volt használatos, napjainkban azonban már számos más képszűrő algoritmus áll rendelkezésre, pl. JPEG2000.

A matematikusok kifejlesztettek wavelet-alapú differenciálegyenlet-megoldó módszereket is. A waveleteket használják elektronszerkezetek számítására is.

Az elektronszerkezet-számítás egy külön ága a sűrűségfunkcionál-elmélet, ahol a hullámfüggvények helyett az elektronsűrűség funkcionáljaként írják fel a (különböző) fizikai mennyiségeket. A sűrűség funkcionál számítások waveletek segítségével is végrehajthatók. Goedecker és Ivanov [11] megoldották a Poisson-egyenletet, Cho és munkatársai dolgoztak ki eljárást a hidrogénszerű atomok Schrödinger-egyenletének [3] megoldására. Arias és munkatársai kifejlesztették a sűrűségfunkcionál-elmélet Kohn-Sham-egyenleteinek [15] MRA-alapú megoldó módszerét [1], majd teszteltek különböző rendszereken.

Hullámegyenlet típusú sajátérték differenciálegyenletek megoldására használtam a wavelet bázisrendszert, melyben a $\hat{D}$ differenciáloperátor mátrix reprezentációja $\left\langle \chi_j | \hat{D} | \chi_k \right\rangle$ belső szorzat alakú, aho χ_j a bázisfüggvény, indexe kompozit, tartalmazza a felbontási szintet, az eltolást és a bázisfüggvény típusát.

A waveletek [5] rendkívül sikeresek és hasznosak a képek tömörítésénél [4], [13], valamint a kép- és adatfeldolgozásban egyaránt. Képesek szűrni a különböző zajokat, finom részleteket, durva skálájú viselkedést vagy különböző mintákat. Ennek és az egyszerű felépítésnek köszönhetően rendelkezésre állnak különböző hardveres és szoftveres wavelet-transzformáló eljárások.

A wavelet-analízis során keletkezett képek az eredetihez képest más formában adják meg a kép információtartalmát. Wavelet-analízissel kiemelhetők a kép változásai, amely bizonyos típusú osztályozó rendszerek esetében fontosak lehetnek.
Ilyen képosztályozási feladat endoszkópos felvételeken vastagbél-polipok keresése.

2. Tézisek

1. Tézis A) A wavelet-alapú differenciálegyenlet-megoldó algoritmusok által általánosan használható differenciáloperátorokat diszkretizáló mátrixelemek kiszámolására vezettem le formulákat olyan rendszerekre, ahol differenciálás, polinommal való szorzás és lépcsősfüggvénnyel való szorzás együttesen szerepelnek a differenciáloperátorokban, elsőfokú polinom és elsőrendű deriválás esetén.

B) Wavelet-alapú adaptív, sajátérték-típusú differenciálegyenlet megoldó rutinhoz fejlesztettem ki javított második becslést az egywavelet-perturbáció-számításból kapott második becslés együtthatóinak csúszó átlagolási algoritmusában súlyozófaktorok optimalizálásával.
[S02], [S01], [S03]

2. Tézis Stabilizált Kóczy–Hirota-féle fuzzy szabályinterpoláción alapuló kétkimenetű osztályozó rendszert konstruáltam, melynek célja az, hogy egy kolonoszkópia felvétel egy szegmenséről megállapítsa, tartalmaz-e gömbölyded polipot, bemeneti változói pedig a képszegmenseknek és annak wavelet-transzformáltjainak pixel intenzitásátlaga, szórása, élsűrűsége, szerkezeti entrópiája és gradiense mindhárom színcsatornán.

A) Igazoltam, hogy wavelet-analízissel hatékonyan lehet növelni egy címkézett kimenetű fuzzy szabályinterpolációt használó osztályozó eljárás hatékonyságát kolonoszkópiai felvételek poliptartalom szerinti osztályozása esetén.

Megmutattam, hogy a wavelet-analízis során keletkezett képek az eredetihez képest olyan részleteket tartalmaznak, különösen a vegyes wavelet-skálázófüggvény és skálázófüggvény-wavelet-transzformáltak esetén, melyek segítenek a gömbölyded polipok és polipszegmensek megtalálásában, ha az antecedensek a képek átlag világosság értékei, ennek szórásai,

élsűrűségei, szerkezeti entrópiája és térbeli kitöltési aránya. [S06], [S07]

B) Megvizsgáltam azt, hogy a képek zajossága, elmosódottsága és éleinek élessége hogyan befolyásolja a fuzzy osztályozási rendszer eredményességét.

Megállapítottam, hogy a Gauss-féle zajszűrés nem befolyásolja lényegesen a módszer eredményességét, a Wiener-féle élkiemeléssel egyesített zajszűrés pedig csak a zajos, rossz minőségű képek osztályozhatóságát javítja, de nem nagy mértékben.
[S05]

C) Megvizsgáltam a fuzzy szabályinterpolációt használó osztályozó módszer szabályainak átfedését egy-egy antecedens dimenzió mentén, és megállapítottam, hogy a legtöbb típusú polip képre a keletkezett szabályok nagyon jelentősen átfednek. Megállapítottam, hogy ha elhagyom az antecedens dimenziók azon harmadát, melyekhez tartozó tagsági függvények a legjobban átfednek, akkor a helyes osztályozás aránya a rossz minőségű képek esetén is 90% fölé emelkedik. [S10]

D) Megvizsgáltam az osztályozórendszerek teljesítőképességének változását RGB ill. HSV színcsatornák, illetve egy-egy antecedenstípus szisztematikus elhagyásával. Megállapítottam, hogy egy-egy színcsatorna vagy antecedenstípus elhagyása esetén a sok hibával rendelkező, rosszabb felbontású képek osztályozhatósága nem romlott észrevehetően, a jobb minőségű képeknél azonban osztályozás hatékonysága jelentősen csökken. Egyetlen színcsatorna meghagyása esetén azonban a rosszabb minőségű képek osztályozhatósága jelentősen megjavul, különösen a H színcsatorna esetén.
[S04], [S10]

3. Tézis Implementáltam a Hough-transzformációnak fuzzy verzióját, ahol az oda és a vissza transzformációnál is fuzzy tagsági függvényt használtam a világos képpontokhoz tartozó transzformált pontok meghatározásához. Fuzzy Hough-

transzformáció által meghatározott viszonyítási pontokon alapuló módszert javasoltam különböző mérésekből származó hónolt mintázatú mikrogeometriai felületek összeillesztésére. [S08], [S09]

3. Összegzés

Kutatásom során a wavelet-alapú modellezési megoldásokkal foglalkoztam orvosi-informatikai és fizikai környezetben. Kutatásom célja nem más volt, mint elsősorban olyan fizikai rendszerek modellezése, melyek igénylik a különböző felbontási szintek egyidejű használatát, mint például egy hullámvezetőben az elektromágneses hullámok terjedése, vagy egy atomon vagy molekulán belül az elektronok hullámfüggvényének leírása, vagy például egy városi környezetben a levegőben a szennyezőanyagok terjedése. A kutatás során olyan különleges differenciáloperátorok mátrix megfelelőinek gazdaságos és nagy precíziós számítására van szükség, melyek egy véges térrészbe vannak éles határokkal lokalizálva, és a deriváláson kívül polinommal való szorzásokat is tartalmaznak.

A sajátérték típusú differenciálegyenletek wavelet-alapú diszkretizálásakor a meglévő durvább felbontási szintű megoldásból, illetve annak egyelektron-permutáción alapuló finomításából egy újabb felbontási szintre való, gazdaságos finomítást vezettem be és optimalizáltam.
Megállapítottam, hogy a kapott eredmény csúszó-ablakos átlagolással való javításai a paraméterek széles értéktartományára jó eredményt adnak, azaz az együtthatók négyzetes eltérésben az ideális értékhez képest 10%-on belül vannak.

A wavelet-alapú differenciálegyenlet-megoldó algoritmusok által általánosan használható differenciáloperátorokat diszkretizáló mátrixelemek kiszámolására vezettem le formulákat olyan rendszerekre, ahol differenciálás, polinommal való szorzás és lépcsősfüggvénnyel való szorzás együttesen szerepelnek a differenciáloperátorokban, elsőfokú polinom és elsőrendű deriválás esetén. Másodfokú polinom és másodrendű deriválás esetén az általam levezetett formula alulhatározott egyenletrendszerhez vezetett.

Ezután a kolonoszkópiás felvételek wavelet-alapú feldolgozásával foglalkoztam.

Stabilizált Kóczy–Hirota-féle fuzzy szabályinterpoláción alapuló kétkimenetű osztályozó rendszert építettem, melynek célja az, hogy egy kolonoszkópia felvétel egy szegmenséről megállapítsa, tartalmaz-e gömbölyded polipot, bemeneti változói

pedig a képszegmenseknek, illetve annak wavelet-transzformáltjainak pixelintenzitás-átlaga, -szórása, élsűrűsége, szerkezeti entrópiája és gradiense mindhárom színcsatornán.

Munkám során igazoltam, hogy wavelet-analízissel hatékonyan lehet növelni egy címkézett kimenetű fuzzy szabályinterpolációt használó osztályozó eljárás hatékonyságát kolonoszkópiai felvételek poliptartalom szerinti osztályozása esetén.

Majd megmutattam, hogy a wavelet-analízis során keletkezett képek az eredetihez képest olyan részleteket tartalmaznak, különösen a vegyes wavelet-skálázófüggvény és skálázófüggvény-wavelet-transzformáltak esetén, melyek segítenek a gömbölyded polipok és polipszegmensek megtalálásában, ha az antecedensek a képek átlagos világosságértékei, ennek szórásai, élsűrűségei és szerkezeti entrópiái.

Ezt követően megvizsgáltam, hogy a képek zajossága, elmosódottsága és éleinek élessége hogyan befolyásolja a fuzzy osztályozási rendszer eredményességét. A Gauss-féle zajszűrés nem befolyásolja lényegesen a módszer eredményességét, a Wiener-féle élkiemeléssel egyesített zajszűrés pedig csak a zajos, rossz minőségű képek osztályozhatóságát javítja, de nem nagy mértékben. ÍEzután a fuzzy szabályinterpolációt használó osztályozó módszer szabályainak átfedését vizsgáltam egy-egy antecedens dimenzió mentén, és arra jutottam, hogy a legtöbb típusú polip képre a keletkezett szabályok nagyon jelentősen átfednek. Majd megvizsgáltam az osztályozórendszerek teljesítőképességének romlását egy-egy színcsatorna, illetve antecedens típus szisztematikus elhagyásával. Ezek a sok hibával rendelkező, rosszabb felbontású képek esetén nem rontották észrevehetően az osztályozás minőségét, a jobb minőségű képeknél azonban az elhagyott antecedens dimenziók számának növekedésével az osztályozás hatékonysága jelentősen csökken.

Végezetül pedig implementáltam a Hough-transzformációnak fuzzy verzióját, ahol az oda és a vissza transzformációnál is fuzzy tagsági függvényt használtam a világos képpontokhoz tartozó transzformált pontok meghatározásához. Fuzzy Hough-transzformáció által meghatározott viszonyítási pontokon alapuló módszert javasoltam különböző mérésekből származó hónolt mintázatú mikrogeometriai felületek összeillesztésére.

Hivatkozások

[1] T. A. Arias, *Multiresolution analysis of electronic structure: semi-cardinal and wavelet bases, Reviews of Modern Physics*, 71, 267, 1999.DOI:https://doi.org/10.1103/RevModPhys.71.267

[2] A. P. Calderón, *Intermediate Spaces and interpolation, the complex method*, Studia Math, 24, pp. 113-190, 1964.

[3] K. Cho, T. A. Arias, J. D. Johannopoulos and P. K. Lam, *Wavelets in electronic structure calculations*, Phys. Rev. Lett., 71, pp. 1808-1811, 1993.

[4] Ch. Christopoulos, A. Skodras, T. Ebrahimi, *The JPEG2000 Still Image Coding System: An Overview*, IEEE Trans. Consumer Electronics, Vol. 46, pp. 1103-1127 (2000). DOI:10.1109/30.920468

[5] I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*, CBMS-NSF regional conference series in applied mathematics 61, SIAM, Philadelphia, 1992.

[6] I. Daubechies, *Wavelets*, CBMS-NSF Series in Appl. Math., Siam Publ., Philadelphia, 1992.

[7] I. Daubechies, *Orthonormal bases of compactly supported wavelets*, Communications on Pure and Applied Mathematics, 41, 909, 1988.

[8] I. Daubechies, *The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis*, IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 36, pp. 961-1005, Sept. 1990.

[9] M. Frazier, B. Jawerth, and G. Weiss, *Littlewood-Paley theory and the study of function spaces*, CBMS Regional Conference Series in Mathematics, 79, (American Mathematical Society, Providence, RI, 1991.)

[10] D. Gábor,*Theory of Communication*, Journal of IEE, London, vol. 93, pp.429-457, 1946

[11] S. Goedecker, O. Ivanov, *Linear scaling solution of the Coulomb problem using wavelets* Solid State Commun., Vol. 105, p. 665-669 (1998).

[12] A. Haar, Zur Theorie der orthogonalen Funktionensysteme (On the theory of orthogonal function systems, in German), Math. Ann., Vol. 69, 1910, pp. 331-371

[13] A. Kiely, M. Klimesh, *The ICER Progressive Wavelet Image Compressor*, IPN Progress Report 42-155, November 15, 2003. http://ipnpr.jpl.nasa.gov/tmo/progress report/42-155/155J.pdf

[14] J. R. Klauder and B. S. Skägerstam, *Coherent states*, (World Scientific, Singapore, 1985).

[15] W. Kohn and L. J. Sham, *Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects*, Phys. Rev. 140, A1133 (1965).

[16] S. Mallat, *Multiresolution approximations and wavelet orthonormal bases of* $L^2(R)$,Trans. Amer. Math. Soc. 315, pp. 69-87, (1989).

Az értekezésben hivatkozott saját publikációk

[S01] Sziová, Brigita; Nagy, Szilvia; Pipek, János Optimization of the Prediction of Second Refined Wavelet Coefficients in Electron Structure Calculation In: The Congress on Information Technology, Computational and Experimental Physics (CITCEP 2015) (2015) Paper: IT III/1 , 4 p.

[S02] B. Sziová, Sz. Nagy, J. Pipek 'Optimization of the prediction of second refined wavelet coefficients in electron structure calculations', Open Physics, 14 (1), pp. 643-650., 2016.

[S03] B. Sziová, S. Nagy, A. Féher and J. Pipek, 'Multiresolution modeling of cavity resonators in microwave systems,' 2016 13th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), Lisbon, 2016, pp. 1-4. doi: 10.1109/SMACD.2016.7520651

[S04] Sz. Nagy, B. Sziová, L. T. Kóczy 'The effect of image feature qualifiers on fuzzy colorectal polyp detection schemes using KH interpolation – towards hierarchical fuzzy classification of coloscopic still images' In: Fernando, Gomide (szerk.) IEEE World Congress on Computational Intelligence: IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE) Rio de Janeiro, Brasil: IEEE, (2018) pp. 1046-1052. , 7 p.

[S05] Szilvia Nagy, Brigita Sziova, Laszlo T. Koczy 'The effect of wavelet analyis on entropy based fuzzy classification of colonoscopy images', 7th World Conference of Soft Computing ,29th - 31st May, 2018. WConSC, Baku Kibővített verzió megjelenés alatt Springer Studies in Fuzziness and Soft Computing sorozatban, Shahnaz Shahbazova, Janus Kacprzyk, Valentina Emilia Balas, Vladik Kreinovich

[S06] Szilvia NAGY, Brigita Sziová, and Laszlo T. KOCZY 'The Effect of Wavelet Analysis on Entropy Based Fuzzy Classification of Colonoscopy Images' The 5th International Workshop on Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics (IWACIII 2017), Nov. 2-5, 2017, Beijing, China

[S07] F. Lilik, L. Solecki, B. Sziová, L. T. Kóczy and Sz. Nagy 'On wavelet based enhancing possibilities of fuzzy classification of measurement results' 3rd Conference on Information Technology, Systems Research and Computational Physics, 2-5 July 2018, Cracow, Poland , p.138
Kibővített verzió megjelenés alatt az Information Technology, Systems Research, and Computational Physics, P. Kulczycki, J. Kacprzyk, L.T. Kóczy, R. Mesiar, R. Wisniewski, Springer, Cham, 2019, szerkesztett kötetben.

[S08] Sz. Nagy, B. Sziová, L. Solecki and L. T. Kóczy 'Background subtraction and detection of outliers in two-dimensional measured data' 53rd INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON INFORMATION, COMMUNICATION AND ENERGY SYSTEMS AND TECHNOLOGIES (ICEST 2018) Sozopol, Bulgaria, June 28-30, 2018, pp. 127-130.

Kibővített verzió megjelenés alatt az International Journal of Reasoning-based Intelligent Systems folyóiratnál.

[S09] Sz. Nagy, B. Sziová, L. Solecki, B. Sarkadi-Nagy and L. T. Kóczy 'Applying fuzzy Hough transform for identifying honed microgeometrical surfaces' 10th European Symposium on Computational Intelligence and Mathematics October 7th - 10th, 2018, Riga, Latvia

[S10] Szi B., Dr. Lilik F., Dimenziószám csökkentése kolonoszkópos felvételek fuzzy osztályozásában, A XXIX. Számítástechnika és Oktatás Konferencia, Temesvár, 2019 (megjelenés alatt)

Egyéb publikációk:

[E01] A Tormási, B Szi, P Földesi, D Zibriczky, L T Kóczy Possible Applications of Fuzzy Relational Calculus for Some General Problems of Recommender Systems pp. 232-242. In: L T, Kóczy; J, Medina; M E, Cornejo-Pinero; J, Kacprzyk; V, Lineiro-Barea; E, Ramírez-Poussa (szerk.) 7th European Symposium on Computational Intelligence and Mathematics (ESCIM 2015) Cádiz, Spanyolország: Universidad de Cádiz, (2015)

[E02] Szi B, Csapó Á An Outline of Some Human Factors Contributing to Mathability Research In: Institute, of Electrical and Electronics Engineers (szerk.) 5th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications: CogInfoCom 2014: Proceedings Piscataway (NJ), Amerikai Egyesült Államok: IEEE, (2014) pp. 583-586. Paper: 7020411 , 4 p. DOI SZTAKI WoS Scopus Nyilvános idézők összesen: 5 Független: 5 Függő: 0

[E03] Sziová, B., Tormási, A., Földesi, P., Kóczy, L. (2018). A survey of the applications of fuzzy methods in recommender systems. In Studies in Fuzziness

and Soft Computing (pp. 483-495). (Studies in Fuzziness and Soft Computing; Vol. 361). Springer Verlag.
Eredeti szűkebb verzió a 6th World Conference of Soft Computing , May, 2016. WConSC, Berkeley konferencián.

[E04] B. Sziová, Sz. Nagy, J. Pipek 'Wavelet-alapú modellezési rendszerek hatékonyságának növelése' Új Nemzeti Kiválóság Program 2017/2018 Tanulmánykötet. Győr, 2018, pp.209-224, ISSN 2630-8134

[E05] Sz. Nagy, F. Lilik, B. Sziová, M. Kovács, L. T. Kóczy 'On the applicability of fuzzy rule interpolation and wavelet analysis in colorectal image segment classification' Springer 2019 (megjelenés alatt)

[E06] Brigita Sziová 'Orvosi képek fuzzy osztályozása waveletek és entrópia segítségével' Új Nemzeti Kiválóság Program 2018/2019 Tanulmánykötet. Győr, 2019, pp.181-196, ISSN 2630-8134

[E07] Nagy Szilvia, Sziová Brigita, Pipek János On Structural Entropy and Spatial Filling Factor Analysis of Colonoscopy Pictures ENTROPY 21: 3 p. 256 , 31 p. (2019), doi:https://doi.org/10.3390/e21030256