

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**DIGITÁLIS KÉPFELDOLGOZÁSI
MŰVELETEK A DISZKRÉT WAVELET
TRANSZFORMÁLT TARTOMÁNYÁBAN**

ALFÖLDI ATTILA

Budapest

2001

1 BEVEZETÉS

A digitális jel- és képfeldolgozásban [1] az utóbbi években teret nyertek a diszkrét wavelet transzformáción (DWT) alapuló feldolgozási módszerek. A diszkrét wavelet transzformáció elmélete [2], a digitális jelfeldolgozás nézőpontjából, a gyakorlatban már korábban is alkalmazott multifelbontású (multiresolution) képfeldolgozási és 3D számítógépes grafikai módszerek (Gauss és Laplace piramisok, subband coding, MIP mapping) közös elméleti megalapozásának tekinthető. Ezen korábbi eljárások alkalmazási területe felöleli a képtömörítési, képszűrési, alakfelismerési és számítógépes grafikai alkalmazásokat.

A wavelet transzformáció elméletének sokféle elméleti megközelítési módja létezik. Jelen értekezésben a wavelet elméletet elsősorban a jelfeldolgozási vonatkozásai és ezek hatékony gyakorlati alkalmazásainak szempontjából vizsgáltam.

1.1 DWT alapú képtömörítési eljárások

A DWT egyik legfontosabb és legintenzívebben kutatott alkalmazási területe a digitális álló- és mozgóképek veszteséges tömörítése [3][4]. Ezen eljárásokkal előállított tömörített adatokból az eredeti képnek csak egy közelítése állítható elő, de e veszteség árán a tömörített adatok helyigénye az eredetinek mindössze 1-10%-a lehet.

A különböző elméleteken alapuló veszteséges tömörítési eljárások két alapvető eszköze a tömörítés megvalósítására: 1) a képekben jelenlévő (különböző fajtájú) redundancia eltüntetése, 2) a képet érzékelő emberi látórendszer speciális tulajdonságainak kihasználása.

A DWT alkalmazásának előnye a korábbi (pl. a DCT-n alapuló JPEG, MPEG) képtömörítési eljárásokhoz képest az, hogy az általa megvalósított spektrális dekompozíció jól illeszthető az emberi látórendszer tulajdonságaihoz. Ezt és a DWT

hatékony dekorrelációs jellemzőit felhasználva hatékony képtömörítési eljárásokat alkothatunk. Ezen feladatokra ma már több elfogadott tömörítési szabvány ill. szabványtervezet is létezik (JPEG-2000[15], WSQ[6], EZW [8], CREW[5]), így a DWT eljárással tömörített képformátum a közeli jövőben elterjedt digitális képábrázolási formává válhat.

A DWT-vel ábrázolt képábrázolási formátumok terjedésével fontossá válhatnak az ilyen típusú adatokat kezelő eljárások hatékony megvalósítási formái. A DWT és az inverz DWT (IDWT) hatékony megvalósítása mellett hasznosak lehetnek a DWT tartományban adott adatok egyéb közvetlen feldolgozását (pl. lineáris szűrését, interpolálását) megvalósító, jelen értekezésben javasolt eljárások.

1.2 Képfeldolgozási alpműveletek a DWT tartományban

Az értekezésben a 2D szeparábilis DWT együtthatók skalár kvantálásán alapuló veszteséges tömörítési eljárásokkal adott digitális képek számításilag hatékony dekódolásának és feldolgozásának új lehetőségeit mutatom be. Míg az áttekintett szakirodalomban megtalálhatók a jelenleg leginkább elterjedt, diszkrét koszinusz transzformáción (DCT) alapuló képtömörítési eljárással (JPEG) tömörített képek hatékony feldolgozási eljárásai, a DWT-n alapuló eljárások esetén ez a terület kevésbé vizsgált illetve elsősorban csak a képek nemlineáris zajszűrésére korlátozódik [9][10].

Az értekezésben az inverz DWT-re valamint a képfeldolgozási műveletek egy - a zajszűrésnél szélesebb - körére; az eltolás-invariáns ill. eltolás-variáns lineáris FIR szűrésre, a FIR szűréseken alapuló éldetektálási eljárásokra és a képek újramintavételezésére mutatok be olyan új, számításilag hatékony eljárásokat, amelyek a DWT tartományban adott képből közvetlenül - tehát IDWT művelet alkalmazása nélkül - a kívánt módon feldolgozott képet adják eredményül. Az eljárások kidolgozásakor a hatékonyság javulását a műveletek elvégzéséhez

szükséges, egy képpontra átlagosan jutó szorzások és összeadások számának szempontjából vizsgáltam. Mivel a javasolt eljárások műveletigénye - eltérően a hagyományos eljárásokétól - függ a képtartalomtól is, a műveletigényeket néhány - a szakirodalomban általánosan használt - tesztképre vizsgáltam. A műveletigény mellett az egyes eljárások memóriaigényét is bemutattam, mivel a műveletigény csökkentése részben a memóriaigény növekedése árán valósítható meg.

2 AZ ÉRTEKEZÉS TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEI

A kidolgozott és az értekezésben bemutatandó hatékony számítási eljárások olyan veszteséges képtömörítési eljárások (JPEG-2000, CREW, WSQ) esetén alkalmazhatók, amelyek szürkeárnyaltos vagy színes digitális képek diszkrét wavelet transzformált tartományú együtthatóinak skaláris kvantálásán alapulnak. Az eljárások többsége a kvantált DWT együtthatók képreprezentációkból közvetlenül a kívánt módon feldolgozott képet adja eredményül úgy, hogy az eljárás számítási struktúrája nagyban hasonlít az IDWT számítási műveletére. Tehát a kidolgozott eljárások az IDWT eljárás szűrési művelete módosításának is felfoghatók, ahol az elvégzett módosítás a kívánt művelet szűrőinek függvénye. A módosított IDWT műveletigénye lényegesen (akár 50-70%-kal is) kisebb lehet, mint a hagyományos eljárásé. Ahol a hagyományos eljárás az IDWT együtthatókkal adott kép esetén először az IDWT-t majd ezután a képtartományban az adott képfeldolgozási műveletet végezzük el.

A kidolgozott eljárások köre az alábbi képfeldolgozási alpműveleteket jelenti:

- gyorsított IDWT
- 2D eltolás invariáns FIR szűrés
- 2D eltolás variáns FIR szűrés
- lineáris szűrőkön alapuló egyes éldetektálási eljárások
- egyes újramintavételezési eljárások

I.tézis: Az IDWT művelet hatékony megvalósítása

Kidolgoztam és a számítási igény szempontjából részletesen elemeztem két olyan új, számításilag hatékony IDWT eljárást ($fIDWT_1$ és $fIDWT_2$), amelyek alkalmazhatóságának alapja, hogy a képtömörítési eljárásokban szereplő IDWT-t speciális jellemzőjű adathalmazon - jellemző eloszlású, skaláris kvantálással veszteségesen ábrázolt DWT együtthatókon - hajtjuk végre.

A kialakított eljárások közös jellemzői, hogy

- i.) a javasolt IDWT eljárásokban a DWT reprezentáció legfelső felbontási szintjének kezelésekor eltérő módon kezeljük a lowpass ill. a highpass komponenseket. A eljárások (multiply-add típusú) számítási alapműveletei a jelenleg is használatos hardware eszközökön könnyen és hatékonyan implementálhatók.
- ii.) Az eljárások műveletigénye, veszteségmentesen ábrázolt DWT együtthatókon elvégezve, többszöröse a hagyományos eljárásokénál, de veszteségesen ábrázolt, szokásos tömörítési mértékű digitális képek esetén a műveletigény - a képtartalomtól és a tömörítés mértékétől függően - 25-40%-kal is kevesebb lehet a hagyományos eljárások közül a legkevesebb műveletet igénylő 'lifting scheme' [11] szerinti IDWT műveletétől. Ugyanakkor az eljárás memóriaigénye sem növekedik számottevően.
- iii.) A javasolt eljárásokkal elvégzett IDWT műveletigénye így gyakorlatilag azonos a JPEG standard képtömörítési eljárásban alkalmazott 8×8 méretű inverz DCT műveletigényével, ezáltal ahhoz hasonló hatékonysággal implementálható.

II.tézis: 2D eltolás invariáns FIR szűrési műveletek kvantált DWT képek esetén

Az $fIDWT_1$ és $fIDWT_2$ műveletekből kiindulva, olyan számítási eljárásokat dolgoztam ki és elemeztem a számítás- és memóriaigény szempontjából, amelyek

-
- i.) közvetlenül - tehát IDWT művelet nélkül - az $fIDWT_1$ és $fIDWT_2$ eljárások módosított formájának elvégzésével állítják elő a skalárisan kvantált DWT együtthatókkal ábrázolt kép előírt módon történő feldolgozásának eredményét, ahol a feldolgozás az egyik legalapvetőbb képfeldolgozási műveletet, a lineáris, eltolás-invariáns 2D FIR szűrés.
 - ii.) A lehetséges 2D FIR szűrők jellemzőitől függően különböző új eljárásokat dolgoztam ki. Így szeparábilis 2D FIR szűrők esetén a $filtIDWT_1$ és $filtIDWT_2$ eljárásokat, speciális (kevés szeparábilis tag összegére bontható) FIR szűrők esetén a $filtIDWT_3$ eljárást, és a (leggyakoribb) általános, nem szeparábilis 2D FIR szűrők esetén a $filtIDWT_4$ és $filtIDWT_5$ eljárásokat.
 - iii.) Mindegyik eljárás alkalmazásával jelentős mértékű műveletigény-csökkenés érhető el, amely függ a képtartalomtól, a szűrő impulzusválaszának méretétől és a tömörítés mértékétől is. A csökkenés mértéke a vizsgált tesztképekre, a szokásos (legalább 10 értékű) tömörítési arányok és jellemző (3x3 és 17x17 közötti) szűrőméretek esetén 10 és 70% közötti.

III.tézis: 2D eltolás variáns FIR szűrési műveletek kvantált DWT képek esetén

A 2D eltolás variáns szűrésnek azt az a esetét vizsgáltam, ahol a szűrőkészlet véges számú szűrőt tartalmaz és a szűrők a képtartalomtól függetlenek, a kép tartalmától csak a felhasználásuk előírt képtérbeli eloszlása (*filtermap*) függ. A variáns eset numerikus jellemzésére bevezettem a szűrőkészlet bonyolultsága (B) paramétert, amely a szűrők impulzusválaszainak méretéből és a *filtermap*-ből származtatható.

A lehetséges variáns 2D FIR szűrőkészleteket az invariáns esetben bevezetett csoportosításban vizsgáltam.

- i.) Az általános, 2D FIR szűrőkből álló variáns szűrőkészlet esetére kidolgozott eljárással elérhető számításigény-csökkenést a *filtermap* jellemzői, az IDWT aluláteresztő szűrője valamint a 2D FIR szűrők impulzusválaszának méretének

függvényében adtam meg. Ezen paraméterek jellemzőnek tekinthető értékei mellett a számításigény csökkenése elérte a 10-68% közötti értéket.

- ii.) A szeparábilis és a speciális, nem szeparábilis 2D FIR szűrőkből álló eltolás-variáns szűrőkészletek esetére kidolgozott - a képtartománybeli szűrésre alkalmazható - eljárással az invariáns esetben alkalmazható eljárást általánosítottam a variáns esetre. A javasolt eljárással 3×3 és 17×17 közötti méretű szűrőkből álló szűrőkészlet és egy adott konkrét alkalmazásban tipikusnak tekinthető $B=10-30\%$ esetén a számításigény-csökkenése eléri a 37-80% közötti értéket.

IV.tézis: Éldetektálási műveletek DWT képek esetén

Megvizsgáltam az eltolás-invariáns szűrésekre kialakított műveletek éldetektálási [12] alkalmazását DWT tartományban adott képek esetére. A kialakított eljárásokkal

- i.) az általánosított Prewitt (boxcar) éldetektáló operátor kiszámításának műveletigény-csökkenése a vizsgált tesztképek, és jellemzőnek mondható tömörítési arányok és szűrőméretek esetén 8-50% mértékű.
- ii.) Az elemzett eljárással megvalósítható *Marr-Hildreth* operátor esetén a műveletigény csökkenése 5-49% mértékű.
- iii.) A *csonkolt piramis* éldetektálási operátor esetén a csökkenés 5-70% mértékű.

V.tézis: Újramintavételezési műveletek DWT képek esetén

Fontos képfeldolgozási alapl művelet a digitális képek újramintavételezése [1]. Ha egy képnek adottak az N_i és $2N_i$ méretű változatai, akkor - a szakirodalom alapján - egy közbülső, tetszőleges $M \times M$ méretű képpé ($N_i < M < 2N_i$) történő újramintavételezést többféleképpen végezhetjük el. A Fourier transzformációs eljárás - a $2N_i$ méretű kép kicsinyítésével - pontos eredményt ad, de nagyon nagy a memória- és számításigénye. A bilineáris eljárás kis memória- és számításigényű, de

- mivel önmagában csak nagyításra használható - elvégzésekor nem tudjuk figyelembe venni a $2N_i$ méretű képből az N_i méretűhöz képest megjelenő új részleteket, így - az egyes nagyfrekvenciájú komponensek hiányában - csak közelítő eredményt kaphatunk.

Erre a feladatra egy olyan számításilag hatékony, közelítő eljárást alakítottam ki, amely

- i.) egy lehetséges kompromisszumot jelent az említett két eljárás között, mivel a bilineáris eljárásénál némileg nagyobb memória- és számításigénnyel, annál lényegesen jobb - a Fourier alapú eljáráshoz közeli - közelítést kapunk
- ii.) Az eljárással különböző M interpolált képméretekre ($256 < M \leq 512$) és tömörítési arányokra (4-20) a vizsgált tesztképek esetén a hagyományos, bilineáris eljáráshoz képest 0,8-4,5 dB képminőség-javulást érhetünk el, míg az eljárás műveletigénye legfeljebb 25%-kal nagyobb a bilineárisénál és a memóriaigény növekedése is elhanyagolható a tipikus képméretekhez képest.

3 AZ EREDMÉNYEK ALKALMAZÁSA

Az értekezésben javasolt eljárások mindegyikének alkalmazhatóságát a szakirodalomban az eljárások tesztelésére általánosan alkalmazott, szürkeárnyalatos digitális képekre végeztem el. Az értekezésben szereplő valamennyi kidolgozott eljárás működését, számítógépes szimulációval ellenőriztem.

Az IDWT gyors elvégzésére kidolgozott eljárásokat [17] a közelmúltban nemzetközi képtömörítési szabvánnyá vált, a DWT együtthatók skalár kvantálásán alapuló JPEG-2000 referencia dekóderében [14] is megvalósítottam [16].

A számításilag hatékony IDWT eljárások ($fIDWT_1$ és $fIDWT_2$) kialakítása egy kriminalisztikai ujjnyomataazonosító rendszer (Integrated Automated Fingerprint Identification System - IAFIS), a KFKI-ban kifejlesztett RECOderm Ujj- és Tenyérynymat-azonosító rendszer létrehozását eredményező projekthez kötődik. A megvalósított rendszer, amely Magyarországon több helyen is alkalmazásba lett

véve, a WSQ eljárást alkalmazza a digitális képek tárolására. A nagy adatmennyiségek és számításgigények miatt e rendszerben célszerű volt a képek IDWT művelete során az $fIDWT_1$ és $fIDWT_2$ eljárások alkalmazása. A teljes rendszert kifejlesztő team tagjaként 1996-ban az NJSZT-től megosztott Kalmár díjat kaptam [19].

A kifejlesztett eljárások kiterjeszthetők a - jelenleg még kevésbé általános - magasabb dimenziójú, pl. 3D diszkrét wavelet transzformálttal adott adatokra [13] is. Ez megnyitja az utat a kifejlesztett eljárások orvosi alkalmazásokban (medical imaging) való alkalmazása felé.

4 A TÉMA ALAPVETŐ IRODALMA

- [1] William K. Pratt, "Digital Image Processing", John Wiley & Sons, Inc.1995

- [2] Stephane G. Mallat, "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence", Vol. 11, No. 7, July 1989

- [3] A. S. Lewis, G. Knowles, "Image Compression Using the 2-D Wavelet Transform", IEEE Transactions on Image Processing, April 1992

- [4] Marc Antonini, Michel Barlaud, Pierre Mathieu, Ingrid Daubechies, "Image Coding Using Wavelet Transform", IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 1, No. 2, April 1992

- [5] M. Boliek, A. Zahdi, "CREW Lossless/Lossy Image Compression", Contribution to ISO/IEC JTC 1.29.12

- [6] "WSQ Gray-scale Fingerprint Image Compression Specification", IAFIS-IC-0110v2, February 16, 1993

- [7] Rob Koenen, "Overview of the MPEG-4 Version 1 Standard", International Organisation for Standardisation, February 1998

- [8] Jerome M. Shapiro, "Embedded Image Coding Using Zerotrees of Wavelet Coefficients", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 41, No. 12, December 1993

- [9] J.E. Odegard, "Image enhancement by nonlinear wavelet processing", Rice University, Houston, 1995., preprint
- [10] Yansun Xu, John B. Weaver, Dennis M. Healy, and Jian Lu, "Wavelet Transform Domain Filters: A Spatially Selective Noise Filtration Technique", IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 3, No. 6, November 1994
- [11] Ingrid Daubechies, Wim Sweldens, "Factoring Wavelet Transforms into Lifting Steps", preprint, September 1996
- [12] D. Marr, E. Hildreth, "Theory of Edge Detection", Proc. Roy. Soc. London, B207, 1980
- [13] A. Baskurt, F. Peyrin, H. Benoit-Cattin, R. Goutte, "Coding of 3D Medical Images Using 3D Wavelet Decomposition", Proc. International Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing 1993 (ICASSP '93), pp. 562-565
- [14] JPEG 2000 Jasper Reference Software: <http://www.jpeg.org>
- [15] JPEG 2000 Part I Final Committee Draft Version 1.0, ISO/IEC JTC1/SC29 WG1

5 AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK

- [16] A. Alföldi: "Accelerating IDWT in the JPEG 2000 and WSQ image compression methods", SHARC International DSP Conference 2001, Northeastern University, Boston, USA

- [17] A. Alföldi: "An efficient decompression of scalar quantized wavelet compressed images", Irish Machine Vision & Image Processing Conference, IMVIP 2001, National University of Ireland, Maynooth, Ireland
- [18] A. Alföldi, A. Bak, R. Gál, T. Szabad, "Compression and processing of Still Images Using Wavelet Transformation", Conference of PhD Students in Computer Science, Szeged, 1998
- [19] NIIF Networkshop '96 Debrecen
- [20] Computationally efficient FIR filtering in the Discrete Wavelet Transform Domain, IWISP95, 2nd International Workshop on Image and Signal Processing, Budapest, November 1995
- [21] A. Alföldi, K. Csefalvay: "FIR Filtering in the 1D and 2D Discrete Wavelet Domain", Czech-Polish-Hungarian Workshop on Network Theory and Applications, Göd, 1994.