

Algoritmus popisovania obrazových textúr v priestore DWT

Kováč Ondrej · Informačné technológie

11.07.2016



V článku je podrobne rozpracovaný 9 kanálový analyzátor textúr pre ich popisovanie. Uvádzame jeho vnútornú stavbu a princíp jeho funkčnosti. Tento analyzátor obrazových textúr vychádza z analýzy a porovnania vlastností obrazových textúr v oblasti rozkladových koeficientov diskkrétnej waveletovej transformácie (DWT). Následne je experimentálne overená funkčnosť daného analyzátoru v úlohe klasifikácie a tiež jeho citlivosť na zmeny energie obrazových textúr v oblasti DWT. Tiež sú experimentálne overené jeho vlastnosti pri klasifikácii textúr štandardnej databázy po rotácii a škálovaní.

1. Úvod

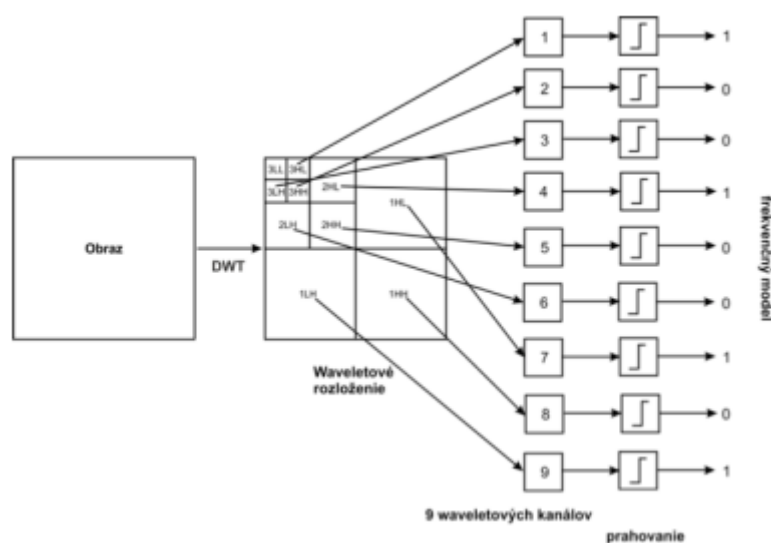
Analýza a popisovanie textúr [1] má praktické využitie v mnohých priemyselných odvetviach a oblastiach výskumu. V meteorológii sa používa pri analýze a spracovaní družicových snímok, ďalej má využitie pri kontrole kvality rôznych výrobkov, ako je kvalita ovocia, papiera alebo technických súčiastok. Veľké uplatnenie má aj v medicíne pri analýze ultrazvukových a rtg. snímok, ale aj pri zisťovaní zrakových ochorení. Medzi základné metódy popisovania textúr patria štatistické, geometrické modelovo orientované metódy a metódy založené na priestorovo-frekvenčnej analýze [2, 3, 4].

V tomto príspevku sa budeme zaoberať analýzou a popisovaním textúr v priestorovo-frekvenčnej oblasti. Pre tento účel bude podrobne popísaný algoritmus 9 kanálového analyzátoru (9KA), ktorý analýzu uskutočňuje na základe subpásiem diskkrétnej waveletovej transformácie (DWT) textúry [5, 6]. Pre účely vyhodnocovania účinnosti analyzátorov textúr sú textúry začleňované do databáz obrazových textúr [2]. V ďalšej časti príspevku sa budeme zaoberať vplyvom zmeny energie na citlivosť popisovaného analyzátoru. V závere je vyhodnotená účinnosť popisovania textúr na báze uvedeného analyzátoru so zmenenou mierkou či rotáciou oproti textúram zo štandardnej databázy (ŠD) [7].

2. 9-kanálový analyzátor pre popisovanie obrazových textúr v priestore DWT

9-kanálový analyzátor je založený na princípe využitia všetkých 9 waveletových subpásiem. Z uvedeného vyplýva, že pre činnosť tohto analyzátoru je potrebné vstupnú textúru rozložiť do troch úrovní DWT [8]. Každé subpásmo okrem subpásma aproximačných koeficientov - 3LL, ktoré sa pri analýze textúr nepoužíva, zodpovedá

jednému kanálu 9KA. Z nich sú následne po interpolácii a prahovaní vytvorené frekvenčné modely. 9KA analyzátor je znázornený na Obr. 1.



Obr. 1 Princíp činnosti 9-kanálového analyzátoru

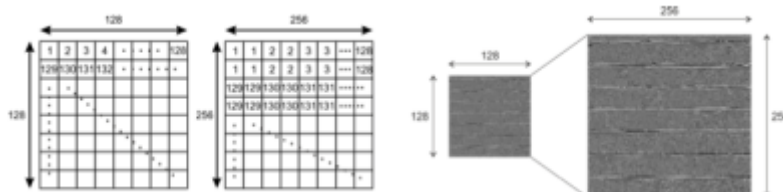
Na vstup 9KA je privedená textúra v oblasti rozkladových koeficientov DWT transformovaná po 3. úroveň. Jednotlivé subobrazy je nutné rozšíriť interpolovať na rovnakú veľkosť preto, aby bolo možné vytvoriť jednotlivé frekvenčné vzory. Spôsob interpolácie subpásiem ilustruje Obr. 2 a Obr. 3, kde čísla (1,2,3...) reprezentujú jednotlivé spektrálne koeficienty subpásiem získaných DWT. Na obrázkoch je príklad interpolácie vstupnej textúry s rozmerom 512×512 obrazových prvkov. Ako je z Obr. 2 a Obr. 3 zrejmé, interpolácia je dosiahnutá jednoduchým N násobným zopakovaním hodnoty prvku v horizontálnom ako aj vo vertikálnom smere. Násobnosť je daná pomerom požadovaného rozmeru a rozmeru subobrazu pred interpoláciou. To možno zapísať pomocou vzťahu (1) pre horizontálny a (2) pre vertikálny smer.

$$N_h = \frac{N_{int}}{N_{sub}} \quad (1)$$

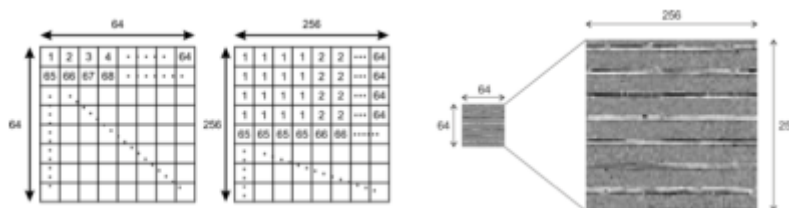
$$N_v = \frac{M_{int}}{M_{sub}} \quad (2)$$

kde N_h a N_v je násobnosť opakovania spektrálneho koeficientu, N_{sub} a N_{int} je počet riadkov subobrazu a požadovaný počet riadkov interpolovaného obrazu. Analogicky pre vertikálny rozmer je M počet stĺpcov.

Po transformácii na druhej úrovni DWT vznikli tri detailové subpásma (2HL , 2HH , 2LH) s veľkosťou 128×128, ich interpoláciu na 256×256 znázorňuje Obr. 2. Taktiež na tretej úrovni vznikli tri subpásma (3HL , 3HH , 3LH) s veľkosťou 64×64, ktorých interpolácia na 256×256 je zobrazená na Obr. 3. Subpásma prvej úrovne (1HL , 1HH , 1LH) nie je potrebné interpolovať pretože majú požadovanú veľkosť 256×256.



Obr. 2 Interpolácia subpásiem druhej úrovne DWT



Obr. 3 Interpolácia subpásiem tretej úrovne DWT

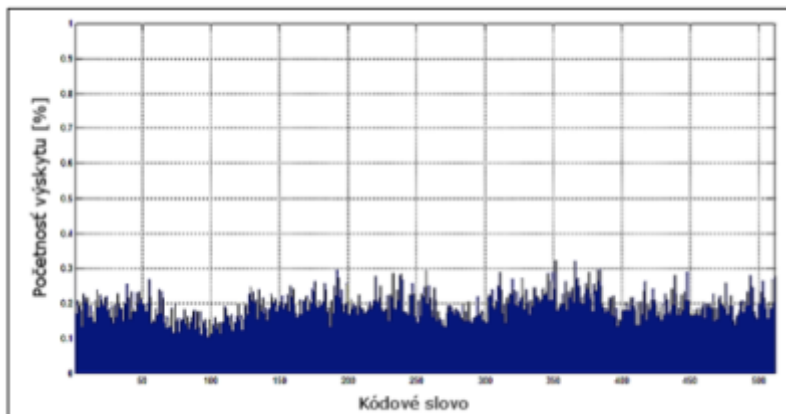
Po interpolácii subpásiem je potrebné určiť prahové hodnoty. Ideálne prahové hodnoty sú také, ak polovica spektrálnych koeficientov padne pod a polovica nad prahovú hodnotu. Takto zvolené prahové hodnoty maximalizujú informáciu obsiahnutú v textúre v rámci binárnej reprezentácie [9]. V Tab. 1 sú uvedené určené prahové hodnoty pre tri textúry zo štandardnej databázy [2].

Tab. 1 Optimálne prahové hodnoty pre 9KA pre tri textúry

Textúra štandardnej databázy	Optimálna hodnota prahu pre daný kanál 9-kanálového analyzátora								
	1K	2K	3K	4K	5K	6K	7K	8K	9K
T_1	0,357	0,124	-1,237	-0,196	-0,031	-0,074	-0,128	0,025	0,017
T_2	1,994	0,060	1,135	-0,372	-0,019	0,068	-0,307	0,020	-0,077
1.1.01	3,720	2,096	1,425	1,179	0,749	-0,303	1,068	0,269	0,454
μ	2,024	0,760	0,441	0,204	0,233	-0,103	0,211	0,104	0,131
μ_c	0,445								

Z Tab. 1 je možné usúdiť, že celková stredná hodnota μ_c je blízka hodnote 0. Výnimkou je len stredná hodnota μ pre prvý kanál kedy táto hodnota je rovná približne 2. Z uvedených štatistických vlastností textúr a s ohľadom na rozsah hodnôt, ktoré spektrálne koeficienty v jednotlivých kanáloch nadobúdajú vyplýva, že pre jednoduché zovšeobecnenie danej metódy je pre všetky textúry možné zvoliť nulovú prahovú hodnotu. Po určení prahovej hodnoty je možné priradiť jednotlivým spektrálnym koeficientom hodnotu 0 alebo 1. V danom prípade kedy prahová hodnota 0, je záporným hodnotám pridelená hodnota 0 a kladným 1. Takýmto spôsobom sú získané výsledné frekvenčné modely.

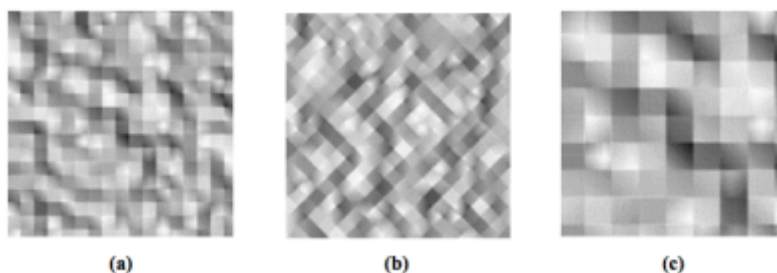
Počet možných frekvenčných modelov pre 9KA je $2^9=512$ a počet opakovaní jednotlivých frekvenčných modelov závisí od veľkosti subpásiem po interpolácii. Napríklad, pri vstupnej textúre s rozmerom 512×512 obrazových prvkov je po transformácii nutné všetky subpásma interpolovať na veľkosť 256×256 bodov, v takomto prípade je počet výskytu frekvenčných modelov $256 \times 256=65536$. Výstupom z 9KA je histogram, ktorý udáva početnosť výskytu jednotlivých frekvenčných vzorov. Takéto zobrazenie umožňuje porovnávať textúry s rozdielnym rozlíšením. Keďže výskyt jednotlivých frekvenčných vzorov nepresiahol pri textúrach s rozmerom 512×512 hodnotu 1%, tak je vo výslednom histograme na zvislej osi zobrazená len časť od 0% po 1%. Všetky kódové slová nezávislej premennej osi možných frekvenčných vzorov sú pre jednoduchosť uvedené v desiatkovej sústave. Na Obr. 4 je pre ilustráciu zobrazený výstup 9KA pre textúru s označením 1.1.01.



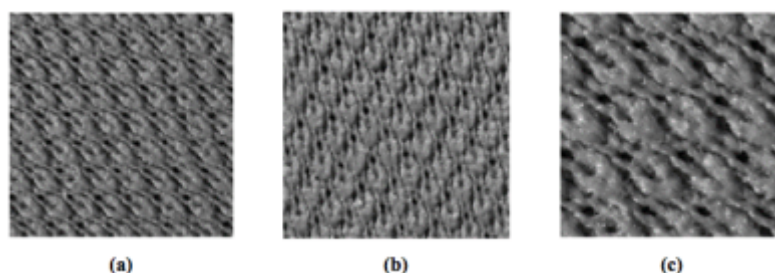
Obr. 4 Histogram výstupu 9KA pre textúru s označením 1.1.01

3. Citlivosť analyzátoru s ohľadom na zmenu energie a rotáciu textúry

V nasledujúcej kapitole bude sledovaný vplyv zmeny energie a rotácie textúry na citlivosť 9KA. Analyzované budú dve textúry štandardnej databázy s označením T_1 a T_2. Na Obr. 5(a) je uvedená textúra T_1, ktorá je na Obr. 5(b) rotovaná o 45° a na Obr. 5(c) je škálovaná o 200%. Analogicky je na Obr. 6(a-c) zobrazená textúra T_2.



Obr. 5 Textúra T_1 (a) rotovaná o 45° (b) a škálovaná o 200% (c)



Obr. 6 Textúra T_2 (a) rotovaná o 45° (b) a škálovaná o 200% (c)

3.1. Zmena energie textúr

Ako je dobre známe pri waveletovej transformácii dochádza ku kompresii energie. Táto skutočnosť je potvrdená aj v Tab. 2, kde je vyobrazená celková energia textúry T_1 v obrazovom, aj v transformovanom priestore a taktiež energia v jednotlivých subpásmach. Energia textúry je daná ako suma kvadrátov obrazových prvkov textúry a energia po DWT ako suma kvadrátov jednotlivých rozkladových koeficientov. Toto je možné zapísať takto

$$E = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x(i, j)^2 \quad (3)$$

kde E je hodnota energie, $x(i,j)$ je hodnota obrazového prvku resp. rozkladového koeficienta, N a M je počet riadkov a stĺpcov textúry. Celková energia obrazu zvykne v obrazoch rádovo nadobúdať hodnoty 1×10^9 , preto v Tab. 2 budú hodnoty energie normované hodnotou 1×10^6 .

Tab. 2 Energetická zmena vplyvom rotácie, škálovania a transformácie textúry T_1

Celková	Energia	Obr. priestor	Úroveň	Modifikácia		
				Bez modifikácie	Rotácia o 45°	Škálovanie o 200%
V sub-písmach	DWT	-	-	2060.476	2043.920	2094.097
		1.	1.	1177.299	1167.488	1196.605
		2.	2.	673.030	667.215	683.715
	LL	3.	3.	386.364	383.033	391.283
		1.	1.	1173.132	1163.832	1194.038
		2.	2.	663.398	658.261	677.154
	LH	3.	3.	370.611	367.920	380.039
		1.	1.	2.187	1.415	1.352
		2.	2.	2.899	2.045	2.149
HL	3.	3.	3.202	2.418	2.522	
	1.	1.	1.919	1.600	1.212	
	2.	2.	2.531	2.293	1.827	
HH	3.	3.	2.887	2.765	2.138	
	1.	1.	0.061	0.642	0.004	
	2.	2.	0.034	0.960	0.019	
3.	3.	0.033	0.975	0.022		

Z Tab. 2 je možné vidieť, že celková energia v obrazovom, tak isto aj v transformovanom priestore pre rotovanú, ale aj škálovanú textúru sa líši od energie pôvodnej textúry. Táto skutočnosť je spôsobená vplyvom zmeny okrajov pri rotovaní a škálovaní. Ďalej je v Tab. 2 viditeľné, že celková energia po transformácii sa oproti celkovej energii textúry v obrazovom priestore znižuje s každou úrovňou transformácie. Koeficient, o ktorý sa celková energia zmení s každou ďalšou úrovňou transformácie, je 0,57 pre Textúru T_1. Pre textúru T_2 nebudeme uvádzať energetické hodnoty nakoľko závery sú rovnaké ako pre textúru T_1.

3.2. Citlivosť 9KA na zmenu energie

Citlivosť analyzátoru na zmenu energie pri rotácii a škálovaní textúr v jednotlivých kanáloch bola overená na textúrach T_1 a T_2. Energie v jednotlivých kanáloch sú počítané už po rozšírení subpásom na rovnakú veľkosť. Výsledky pre obe textúry sú uvedené v Tab. 3. Podobne ako v Tab. 2 sú hodnoty v Tab.3 normované hodnotou 1×10^6 .

Tab. 3 Energetická zmena vplyvom rotácie, škálovania a transformácie textúry T_1 a T_2

K.	Textúra T_1					Textúra T_2				
	Rot. o 45°	Škál. o 200%	Zmena po rot.	Zmena po škál.		Rot. o 45°	Škál. o 200%	Zmena po rot.	Zmena po škál.	
1.	46,19	44,24	34,21	-1,95	-11,98	49,85	166,47	34,85	116,63	-14,99
2.	0,52	15,60	0,35	15,08	-0,17	86,96	29,97	24,01	-56,99	-62,96
3.	51,23	38,69	40,34	-12,54	-10,89	76,22	35,23	45,63	-40,99	-30,59
4.	10,12	9,17	7,31	-0,95	-2,82	14,11	37,47	7,76	23,36	-6,35
5.	0,14	3,84	0,07	3,70	-0,06	14,47	7,95	3,84	-6,52	-10,64
6.	11,60	8,18	8,60	-3,42	-3,00	18,07	9,46	10,46	-8,61	-7,61
7.	1,92	1,60	1,21	-0,32	-0,71	4,80	6,30	1,03	1,50	-3,78
8.	0,06	0,64	0,00	0,58	-0,06	5,32	2,64	0,42	-2,68	-4,90
9.	2,19	1,42	1,35	-0,77	-0,84	5,61	2,84	1,73	-2,77	-3,88
μ	-	-	-	-0,07	-3,39	-	-	-	2,55	-16,19

V prípade 9KA je na základe Tab. 3 možné usúdiť, že u rotovanej textúry T_1 nastala najväčšia zmena v kanáloch 2, 5 a 8, kde sa energia výrazne zväčšila, v ostatných kanáloch došlo k poklesu energie. Pri rotovanej textúre T_2 je v Tab. 3 tiež možné pozorovať nárast energie, v kanáloch 1, 4, 7 a v ostatných sa energia opäť oproti pôvodnej textúre zmenšila. V prípade škálovaných textúr T_1 a T_2 je v Tab. 3 vidieť,

že voči energii pôvodnej textúry sa energia vo všetkých pásmach zmenšila, najvýraznejší pokles nastal v oboch prípadoch v 8. kanále. V tab.3 je tiež uvedená priemerná zmena energie μ .

4. Účinnosť 9KA

Pri overovaní možnosti aplikácie 9KA boli vykonané nasledujúce experimenty. Bola testovaná schopnosť analyzátora priradiť najpodobnejšiu textúru štandardnej databázy k vstupnej popisovanej textúre. Ďalej ako bola vstupná textúra škálovaná z verzie textúry ŠD. V poslednom experimente je na vstup 9KA privedená škálovaná textúra ŠD. Účinnosť 9KA bude vyhodnocovaná pomocou strednej kvadratickej chyby (MSE), ktorá je daná vzťahom (4).

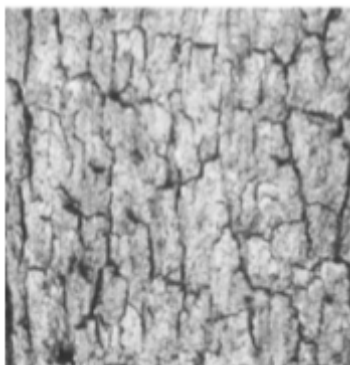
$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \tilde{x}_i)^2 \quad (4)$$

kde x_i je početnosť výskytu i-tého frekvenčného modelu zo vstupnej textúry, \tilde{x}_i je početnosť výskytu i-tého frekvenčného modelu štandardnej textúry, N je počet rôznych možných frekvenčných modelov (pre 9KA $N = 512$). Je zrejmé, že textúra ŠD s najmenšou hodnotou MSE bude označená ako textúra, ktorá najlepšie zodpovedá charakteru vstupnej textúry. Na Obr. 7 je zobrazená textúra, ktorá bude analyzovaná pomocou 9KA. Ide o textúru kôry stromu. Táto textúra nie je súčasťou ŠD. Cieľom experimentu je zistiť aké budú stredné kvadratické chyby histogramov výstupu 9KA a či MSE textúr kôry bude mať nižšiu hodnotu ako MSE ostatných textúr.



Obr. 7 Analyzovaná textúra

V Tab. 4 sú uvedené názvy textúr ŠD a hodnoty MSE medzi histogramom výstupu 9KA týchto textúr a vstupnej textúry. Hrubým písmom sú zvýraznené bunky ktoré zodpovedajú textúram kôry a tabuľka je zoradená podľa hodnoty MSE. Z Tab. 4 je zrejmé, že najnižšia hodnota MSE zodpovedá textúre s označením 1.3.02, ktorá je zobrazená na Obr. 8. Ostatné textúry kôry majú hodnotu MSE vyššiu ako niektoré ostatné textúry.



Obr. 8 Textúra 1.3.02

Tab. 4 MSE histogramov textúr zo ŠD počítaná voči histogramu vstupnej textúry pre 9KA

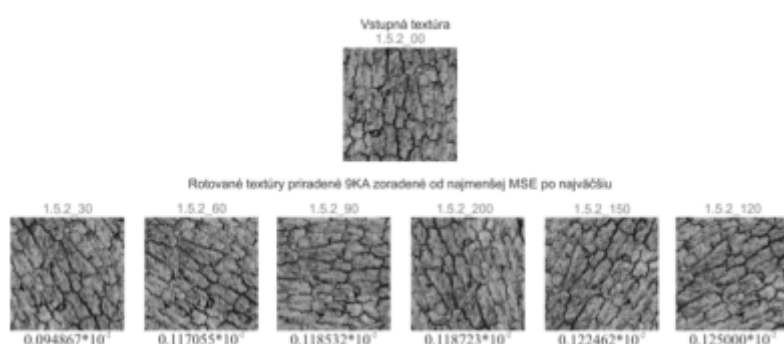
Textúra	MSE $\times 10^{-2}$	Textúra	MSE $\times 10^{-2}$	Textúra	MSE $\times 10^{-2}$
1.3.02	0,098	1.3.08	0,1433	1.3.10	0,1902
1.4.06	0,111	1.2.06	0,1451	1.1.01	0,1955
1.1.05	0,112	1.3.04	0,1483	1.4.16	0,1992
1.2.05	0,115	T_1	0,1491	1.3.05	0,2106
1.4.18	0,118	1.3.09	0,1530	1.1.09	0,2132
1.3.07	0,119	1.1.11	0,1544	1.4.02	0,2144
1.4.04	0,123	1.4.03	0,1546	1.4.05	0,2165
1.2.09	0,125	1.1.08	0,1554	1.4.09	0,2211
1.2.08	0,129	1.3.11	0,1605	1.4.07	0,2421
1.4.13	0,132	1.2.01	0,1625	1.4.08	0,2529
1.3.01	0,132	1.4.11	0,1629	1.1.10	0,2538
1.2.07	0,134	1.2.12	0,1637	1.2.10	0,2743
1.2.11	0,135	1.4.12	0,1641	T_2	0,2894
1.4.17	0,135	1.2.02	0,1664	1.2.04	0,5004
1.4.01	0,138	1.1.12	0,1695	1.1.04	0,5337
1.1.07	0,139	1.4.15	0,1733	1.2.03	0,5973
1.4.10	0,140	1.1.06	0,1765	1.1.03	0,6051
1.1.02	0,141	1.3.06	0,1790	1.4.14	1,8910
1.3.12	0,1429	1.3.03	0,1815		

V ďalšom experimente bola ŠD rozšírená o textúru tejto databázy (1.5.2_00), ktorá je podrobená rotácii a takému škálovaniu, ktoré zabezpečí to, že rotovaná textúra bude zväčšená tak, aby s rozmerom identickým ako pred škálovaním neobsahovala nedefinované miesta. Časti textúry, ktoré po škálovaní presahujú stanovený rozmer budú orezané. Rotácia textúry bola prevedená o 30°, 60°, 90°, 120°, 150° a 200°. Podobne ako v predchádzajúcom experimente aj v tomto účinnosť bude vyhodnotená na základe hodnoty MSE. V Tab. 5 sú hodnoty MSE zoradené a hrubým písmom sú zvýraznené textúry rozšírenej ŠD zodpovedajúce textúram kôry. Z Tab. 5 je zrejmé, že 9KA identifikoval všetky rotované textúry s MSE výrazne nižším ako pre ostatné textúry.

Tab. 5 MSE histogramov textúr z rozšírenej ŠD počítaná voči histogramu vstupnej textúry 1.5.02_00 pre 9KA

Textúra	MSE $\times 10^{-2}$	Textúra	MSE $\times 10^{-2}$	Textúra	MSE $\times 10^{-2}$
1.5.2_30	0,095	1.2.08	0,367	T_1	0,436
1.5.2_60	0,117	1.3.03	0,373	1.3.10	0,437
1.5.2_90	0,119	1.4.10	0,379	1.4.02	0,442
1.5.2_200	0,119	1.4.18	0,381	1.3.09	0,444
1.5.2_150	0,122	1.4.17	0,381	1.1.06	0,447
1.5.2_120	0,125	1.4.05	0,385	1.3.05	0,452
1.1.02	0,289	1.3.08	0,394	1.1.09	0,452
1.1.01	0,313	1.4.16	0,397	1.3.04	0,468
1.3.02	0,317	1.4.12	0,397	1.4.03	0,474
1.4.15	0,321	1.3.12	0,406	1.1.10	0,481
1.2.01	0,325	1.2.06	0,411	1.4.09	0,482
1.4.11	0,332	1.2.12	0,411	1.2.10	0,494
1.2.02	0,333	1.4.04	0,414	1.4.08	0,504
1.2.07	0,344	1.1.12	0,416	1.4.07	0,554
1.3.07	0,351	1.2.09	0,417	T_2	0,602
1.4.13	0,352	1.4.06	0,417	1.2.04	0,694
1.2.05	0,352	1.1.11	0,418	1.1.03	0,695
1.1.05	0,353	1.4.01	0,418	1.2.03	0,700
1.1.08	0,354	1.3.06	0,429	1.1.04	0,713
1.1.07	0,356	1.2.11	0,429	1.4.14	2,256
1.3.01	0,356	1.3.11	0,434		

Na Obr. 9 je zobrazená vstupná textúra a jej rotácie s príslušnou hodnotou MSE.



Obr. 9 Textúra 1.5.02_00 a jej rotácie s uvedenou hodnotou MSE

5. Záver

V tomto článku bol rozpracovaný algoritmus popisovania textúr pomocou 9KA, ktorý textúry analyzuje na základe rozkladových koeficientov DWT. Tento analyzátor bol podrobne uvedený a na základe experimentov boli vyhodnotene niektoré jeho vlastnosti. Pri zisťovaní citlivosti analyzátoru na zmenu energie v jednotlivých kanáloch bolo zistené, že energia sa pri rotácii textúr v niektorých pásmach zväčšila, v iných zmenšila. Pri škálovaní textúr sa energia vo všetkých kanáloch 9KA a to v prípade T_1 aj T_2 zmenšila. Pri experimentoch so správnym priradením textúry zo ŠD k vstupnej textúre 9KA priradil správne najpodobnejšiu textúru. Pri správnom priradení rotovaných textúr zo ŠD k vstupnej textúre 9KA správne identifikoval vstupnú textúru vo všetkých uhloch rotácie.

Ako je z výsledkov vidieť, vždy sa pri analýze vyskytlo niekoľko rušivých textúr, väčšinou to boli textúry s jemnou štruktúrou, ako piesok, tráva, atď. Je to spôsobené tým, že textúry majú nerovnomerné rozloženie kódových slov. Túto nepresnosť by mohlo odstrániť porovnávanie textúr po blokoch. Táto metóda by bola založená na princípe postupného vyberania rovnako veľkých blokov zo vstupnej aj porovnáwanej textúry. Ďalej je potrebné zhodnotiť či vyhodnocovanie na základe MSE je dostatočné. Lepšie výsledky by mohli byť docielené aplikovaním výpočtu korelácie.

Literatúra

1. M. Tuceryan a A. K. Jain, „Texture Analysis,“ rev. The Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision (2nd Edition), by C. H. Chen, L. F. Pau,, World Scientific Publishing Co., 1998, pp. 207-248.
2. O. Kováč, J. Mihalík a P. Čajko, „Obrazové textúry a ich popisovanie,“ Posterus, zv. 9, 1. vyd.3, pp. 1-8, 2016.
3. G. Gimel, „Texture Analysis and Synthesis using a Generic Markov-Gibbs Image Model,“ 2006. [Online]. Available: <https://www.cs.auckland.ac.nz/~georgy/research/texture/thesis-html/thesis.html>. [Cit. 5 7 2006].
4. R. M. Haralick, K. Shanmugam a I. Dinstein, „Textural features for image classification,“ IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 610 - 621, 1973.
5. M. Kociolek, A. Materka, M. Strzelecki a P. Szczypinski, „Discrete Wavelet Transform - Derived Features for Digital Image Texture Analysis,“ rev. Proc. of International Conference on Signal and Electronic Systems, Lody, 2001.
6. S. Arivazhagan a L. Genesan, „Texture classification using wavelet transform,“ Pattern Recognition Letters, zv. 24, 1. vyd.9-10, p. 1513-1521, 2003.
7. P. Brodatz, Textures: a photographic album for artists and designers, Mineola, New York: DOVER PUBLICATIONS, INC., 1966.
8. J. Mihalík a O. Kováč, Číslicové spracovanie textúr ľudskej hlavy, Košice: TU, 2014.
9. H. Siegl, Quantification of Posterior Capsule Opacification after Cataract Surgery, Graz: Graz University of Technology, 2000.

Spoluautormi článku sú Ján Mihalík a Patrik Čajko, Laboratórium číslicového spracovania obrazov a videokomunikácií, Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach.
