

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Irena Galić

**POSTUPAK KOMPRESIJE MIRNE SLIKE
PRIMJENOM PARCIJALNIH DIFERENCIJALNIH
JEDNADŽBI**

Doktorska disertacija

Osijek, 2011.

Doktorska disertacija izrađena je u Zavodu za računalno i programsko inženjerstvo Elektrotehničkog fakulteta, Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Mentor: prof. dr. sc. Branka Zovko-Cihlar

Doktorska disertacija ima 154 stranice.

Disertacija br.: 16

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. prof. dr. sc. Snježana Rimac-Drlje Elektrotehnički fakultet Osijek
2. prof. dr. sc. Branka Zovko-Cihlar FER Zagreb
3. prof. dr. sc. Goran Martinović Elektrotehnički fakultet Osijek

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. prof. dr. sc. Snježana Rimac-Drlje Elektrotehnički fakultet Osijek
2. prof. dr. sc. Branka Zovko-Cihlar FER Zagreb
3. prof. dr. sc. Goran Martinović, Elektrotehnički fakultet Osijek
4. doc. dr. sc. Alfonzo Baumbartner Elektrotehnički fakultet Osijek

Datum obrane disertacije: 24. 06. 2011.

Ovaj rad posvećujem mojim roditeljima.

Ovom prilikom posebno bih se zahvalila mojoj mentorici prof. dr. sc. Branki Zovko-Cihlar na svesrdnoj pomoći pruženoj tijekom izrade ove disertacije i vremenu koje mi je posvetila.

Posebno bih zahvalila prof. dr. sc. Snježani Rimac-Drlje na korisnim savjetima i pomoći oko novijih metoda računanja objektivne ocjene kvalitete slike.

Sadržaj

Uvod	1
1 Kompresija	4
1.1 Huffmanovo kodiranje	7
1.2 Diskretna kosinusna transformacija	10
1.3 Diskretna wavelet transformacija	14
2 Kompresija mirne televizijske slike	21
2.1 Standard JPEG	21
2.2 Standard JPEG 2000	27
3 Trokutno kodiranje pomoću binarnog stabla	32
3.1 Linearna interpolacija	32
3.2 Stvaranje raspršenih točaka interpolacije	33
3.3 Kodiranje binarnog stabla	34
3.4 Dekodiranje binarnog stabla	36
3.5 Predobrada rekvantizacijom	37
3.6 Eksperimenti	37
4 Interpolacija parcijalnim diferencijalnim jednadžbama	45
4.1 Opći model	46
4.2 Homogena difuzija	48
4.3 Bilinearno ugađivanje	48
4.4 Trilinearno ugađivanje	49
4.5 Apsolutna monotona Lipschitzova ekstenzija	49
4.6 Nelinearna izotropna difuzija	49
4.7 Nelinearna anizotropna difuzija	50
4.8 Eksperimenti s interpolacijom	51
5 Kompresija parcijalnim diferencijalnim jednadžbama	55
5.1 Dekodiranje pomoću EED-a	56
5.2 Adaptivni parametar praga pogreške	57
5.3 Kodiranje pomoću EED-a	57

5.4	Pomak interpolacijskih vrijednosti	58
5.5	Naknadna obrada rekvantizacijom	59
6	Usporedba različitih metoda kompresije	61
6.1	Primjena anizotropne difuzije poboljšanja rubova u dekodiranju .	62
6.2	Primjena adaptivnog praga parametra po-grješke	63
6.3	Primjena anizotropne difuzije poboljšanja rubova u kodiranju . .	64
6.4	Primjena pomaka interpolacijskih vrijednosti	66
6.5	Usporedba naknadne obrade rekvantizacijom	67
6.6	Usporedba sa standardima JPEG i JPEG 2000	70
7	Mjerenje kvalitete dekodirane slike	75
7.1	Objektivno mjerenje kvalitete	76
7.2	Rezultati i analiza objektivnog mjerenja kvalitete	80
7.2.1	Standardna testna slika <i>trui</i>	80
7.2.2	Standardna testna slika <i>peppers</i>	89
7.2.3	Standardna testna slika <i>camera</i>	100
7.2.4	Standardna testna slika <i>lena</i>	110
7.3	Subjektivno mjerenje kvalitete	122
7.4	Rezultati subjektivnog mjerenja kvalitete	124
	Zaključak	131
	Sažetak	135
	Summary	136
	Literatura	137
	Popis kratica	146
	Popis slika	150
	Popis tablica	152
	Životopis	153

Uvod

Vid je sposobnost oka da raspoznaje objekte odjeljeno jedne od drugih u prostoru i absorbira informacije iz okoline. Sposobnost raspoznavanja ovisi o oštrocini vida, refrakciji i akomodaciji oka. Osnovna osobina oka je oštrocina vida. To je sposobnost razlikovanja sitnih detalja iz slike koja se stvara na mrežnici. Sto sitnije predmete može oko zapaziti, to je veća oštrocina vida. Prostorna i vremenska raspodjela svjetlosnih intenziteta preko oka pobuđuje određeni živčani sustav, na taj način viđeno završava u svijesti promatrača. Svaki doživljaj vida skupno je djelovanje svih jedinica vizualnog sustava. Vizualni sustav razmatra se u različitim područjima znanosti od biologije, fizike do psihologije jer doživljaj vida ovisi o veličini energije podražaja, prostornim i vremenskim odnosima unutar polja podražaja, području aktiviranja mrežnice, stanju vizualnog sustava promatrača i njegovih mentalnih kvaliteta.

Slike imaju izuzetno važnu ulogu u ljudskoj percepciji. Slike koje se obrađuju mogu imati različito porijeklo pa prema tome postoje različite vrste slika. U ovom radu analizira se crno-bijela mirna televizijska slika. Mirna slika jedna je statična slika, a razlikuje se od pokretne slike. Niz mirnih slika prikazanih dovoljno velikom brzinom može dati iluziju pokreta. Monokromatska ili crno-bijela slika nosi jedino informaciju intenziteta svjetline, gdje najmanju razinu svjetline ima crna, a najveću bijela boja. Pojam svjetlina nastoji što bolje opisati subjektivan doživljaj svjetline i predstavlja standardnu aproksimaciju odziva osjetila vida na svjetlost.

Digitalna obrada slike predstavlja skup metoda za obradu digitalne slike pomoću računala. Rezultat obrade slike u najvećem broju slučajeva nova je slika ili skup karakterističnih parametara slike. U digitalnoj obradi video signala provodi se kompresija i dekompresija televizijske slike. Analiza televizijske slike ovisi o tome vršimo li ju na izvornoj ili komprimiranoj slici. Ako se želi u prijenosu video signala odaslati manji broj digitalnih podataka koji čine televizijsku sliku uz zadržavanje iste kvalitete tada je potrebno provesti kompresiju televizijske slike. Istovremeno se smanjuje i potrebna širina frekvencijskog opsega što je zahtjev za uštedom potrebnog frekvencijskog opsega.

Prijenos velikih količina podataka predstavlja ozbiljan problem. U svim konvencionalnim digitalnim sustavima ograničeni su broj bitova po uzorku i brzina prijenosa. Brzina prijenosa je opet ograničavanje količine podataka koja se

može prenijeti u nekom vremenskom intervalu. Sličan se problem pojavljuje kod pohranjivanja podataka na nekom od memorijskih medija. Da bi prijenos i pohranjivanje slika bilo moguće, potrebno je komprimirati sliku. S obzirom na značaj i potrebu za kompresijom slike, potrebno je tom postupku posvetiti veliku pažnju. Za ostvarivanje što veće kompresije uz zadržavanje kvalitete televizijske slike primijenjuju se razni postupci koji su u ovom radu obrađeni.

Kompresija je važno područje u digitalnoj obradi slike gdje postoje standardne metode za mirnu i pokretnu sliku visokih performansi. Raznim ispitivanjima komprimirane slike i uspoređivanjem dobivenih rezultata s postojećim metodama, došlo se do zaključka da postojeće metode ne zadovoljavaju očekivanu kvalitetu. Iz tog razloga primjenjen je novi postupak kompresije pomoću diferencijalnih jednadžbi i uočeno je nakon niza eksperimenata da su se rezultati ispitivanja poboljšali, a što je predmet ove disertacije. Poboljšanje kvalitete postiglo se primjenom interpolacije vezane uz anizotropnu difuziju poboljšanja rubova. Iako je ova jednadžba anizotropne difuzije s difuzijskim tenzorom izvorno predložena za uklanjanje šuma iz slike, bit će pokazano da ona nadmašuje mnoge druge parcijalne diferencijalne jednadžbe kada je potrebno interpolirati vrlo mali broj raspršenih podataka.

U radu se obrađuju dominirajuće metode kompresije slike te je iznesen pregled trokutnog kodiranja pomoću binarnog stabla. Metoda triangulacije koristi se za uklanjanje manje značajnih elemenata slike iz slike. Preostale točke mogu se kodirati na kompaktan način koji odražava strukturu binarnog stabla u triangulaciji.

Nadalje se analiziraju interpolacijske tehnike koje se temelje na parcijalnim diferencijalnim jednadžbama i pokazano je kako interpolacija raspršenih podataka s anizotropnom difuzijom ima posebno dobre karakteristike.

Parcijalne diferencijalne jednadžbe nisu se do sada istraživale u kontekstu kompresije slike. U ovom radu uvodi se novi okvir za kompresiju slika koji koristi kvalitete interpolacije vezane uz difuziju poboljšanja rubova. Opisuje se kako se trokutno kodiranje pomoću binarnog stabla može kombinirati s interpolacijom koja se temelji na anizotropnoj difuziji. Metodom triangulacije stvara se porazdijeljena slika, a preostale točke služe kao raspršeni interpolacijski podatci za proces difuzije.

Izmjenama i dopunama trokutnog kodiranja pomoću binarnog stabla kao što su adaptacija praga pogreške, odabir točke na temelju difuzije te posebne strategije kvantizacije doprinosi se boljem rezultatu kompresije. Eksperimenti najviše ilustriraju korisnost svake od uvedenih modifikacija, gdje se pokazuje da svaka od uvedenih izmjena i dopuna vodi k poboljšanoj kvaliteti kompresije.

Eksperimenti pokazuju da za vrlo velik stupanj kompresije ovaj pristup koji se temelji na parcijalnim diferencijalnim jednadžbama ne samo da daje puno bolje rezultate od JPEG standarda koji je u širokoj primjeni, nego čak i visoko optimiziranog JPEG 2000 kodek. Provedeni su daljnji eksperimenti vezani uz kompresiju različitih standardnih slika.

Pri ocjeni kvalitete komprimirane slike koriste se objektivne i subjektivne metode ocjene. U radu su opisani objektivni i subjektivni postupci ispitivanja kvalitete komprimirane slike te su dani rezultati i rasprava o dobivenim rezultatima kompresije ispitivanih slika.

Ustanovljeno je da najbolje rezultate pri kompresiji slika daje metoda kompresije primjenom parcijalnih diferencijalnih jednadžbi za visok stupanj kompresije.

Poglavlje 1

Kompresija

Pri analizi slike primijenjuje se postupak da se crno-bijela slika razlaže u dvije komponente. Sadržaj slike sačinjavaju elementi slike (eng. *picture element* (*pixel*)) kod čega svaki element slike ima svoj određeni položaj i svoj vlastiti intenzitet razine svjetline. Prema tome pri ovoj analizi položaji elementa slike predstavljaju jedan podatak, a drugi podatak razina je svjetline. Na osnovi toga mirna slika je matematički definirana kao funkcija dvaju varijabli

$$f(x, y) : \Omega \rightarrow \mathbb{R},$$

u tom izrazu kodomena je skup realnih brojeva $\mathbb{R}$, a dvodimenzionalan skup Ω podskup skupa realnih brojeva ($\Omega \subset \mathbb{R}^2$) domena je slike. Prostorne koordinate slike x i y definirane su domenom. Amplituda od f definirana kodomenom, pridružena je paru koordinata (x, y) i naziva se razina svjetline slike u toj točki.

Mirna digitalna slika reprezentacija je mirne slike na konačnom skupu cjelobrojnih vrijednosti. Mirna digitalna slika ima konačan broj elemenata slike i može se predstaviti matricom čiji indeksi red i stupac označavaju položaj posmatrane točke u slici, a vrijednost elementa matrice predstavlja razinu svjetline te točke. Elementi slike pohranjeni su u memoriji računala kao raster slike tj. dvodimenzionalno polje cjelobrojnih vrijednosti.

Razmatra se mirna slika nad kojom je provedena digitalizacija u tri koraka, uzorkovanje, kvantiziranje i kodiranje. Razmatrana mirna slika uzorkovana je na konačan broj elemenata slike u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Pri pretvorbi analognog televizijskog signala u digitalni u postupku kvantizacije dobiva se dobar rezultat kad je provedena 8-bitna kvantizacija i razmatrana mirna slika ima $2^8 = 256$ različitih razina svjetline.

Osnovni cilj kompresije slike smanjiti je redundancije u podacima slike kako bi se slika učinkovito pohranila ili bi se omogućio prijenos multimedijских podataka unutar uređaja na daljinu. Pri prijenosu video slike u svrhu smanjenja korištenja frekvencijskog pojasa, provodi se kompresija kojom se smanjuje količina podataka uz zadržavanje sadržaja informacije. Kompresija slike

omogućuje komunikacije, multimedijски prijenos i multimedijски prijenos radiodifuzijom.

Dobro je poznato da nekomprimirana mirna slika zahtjeva velik memorijski prostor za pohranjivanje. Na primjer, jedna monokromatska ili crno-bijela slika ima 256 različitih razina svjetline. Ako se svaki elemenat slike predstavi s 8 bita, za sliku veličine 256 puta 256 elemenata slike potrebno je 524 288 bita. Ako govorimo o slici veličine 512 puta 512 elemenata slike tada je potrebno 2 097 152 bita, što je četiri puta više. Još veća količina podataka sreće se kod pokretne slike. Slikovne datoteke obično su velike, ali se količina podataka koja predstavlja sliku može smanjiti.

U osnovi kompresiju dijelimo na kompresiju bez gubitaka i na kompresiju s gubitcima. Kod kompresije bez gubitaka sve informacije su sačuvane i izvorna se slika može u potpunosti rekonstruirati, ali nije moguće postići značajno smanjenje broja bitova. Kod kompresije s gubitcima neke informacije su izgubljene i izvorna slika ne može se u potpunosti rekonstruirati, ali omogućuje velik stupanj kompresije uz pad kvalitete pa se u tom slučaju ne koristi veliki stupanj kompresije kako bi se zadržala prihvatljiva kvaliteta.

Različiti se postupci koriste za kompresiju slike uporabom najmanjeg mogućeg broja bita bez gubitka informacija: delta kompresija, kodiranje dužine niza (eng. *Run Length Coding*), Huffmanovo i aritmetičko kodiranje, Lempel-Ziv-Welch (LZW) kompresija, JPEG-LS...

Većina algoritama za kompresiju bez gubitaka imaju dvije različite faze. U prvoj fazi generira se statistički model za ulaznu sliku. Naziva se još i faza modeliranja. U drugom koraku ulazni se podatci preslikaju u nizove bitova na način da će pikseli označeni kao "vjerojatni" (npr. često se susreću) proizvesti kraću izlaznu vrijednost (output) nego "slabo vjerojatni" elementi slike. Entropijski koder koristi kodove pri čemu je duljina svake kodne riječi proporcionalna negativnom logaritmu njezine vjerojatnosti. Entropijski koder može se koristiti za mjerenje vjerojatnosti na slici.

Algoritmi za kompresiju bez gubitka podataka ne mogu jamčiti kompresiju za sve skupove ulaznih podataka. Drugim riječima, za svaki algoritam kompresije bez gubitka, postojat će skup ulaznih podataka koji ne postaje manji nakon što se obradi algoritmom. Kompresija bez gubitka manje je učinkovita od kompresije s gubitkom.

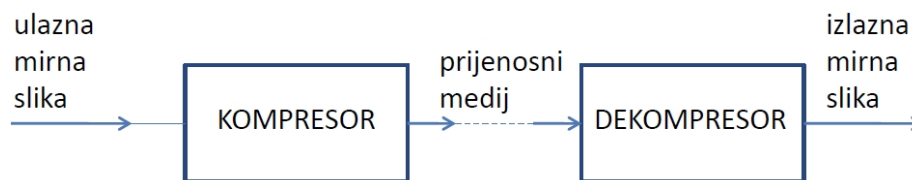
Neki od postupaka kompresije s gubitcima su transformacijsko kodiranje, vektorska kvantizacija, fraktalno kodiranje, spline aproksimacijske metode, aproksimacijske metode segmentacijom.

Pojam kompresije s gubitkom ne označava nasumične izgubljene piksele, već gubitak kvantitete kao što su manje bitne komponente. Parametri određuju za koju je informaciju dopušten gubitak. Većina tehnika za kompresiju s gubitkom mogu se prilagoditi na različite razine kvalitete, pri čemu se veća preciznost dobiva u zamjenu za manje učinkovitu kompresiju. Slike koje se koriste samo za vizualne svrhe često dopuštaju kompresiju s gubitkom i visoke postotke kompre-

sije koristeći ograničenja ljudskog vida. Ljudsko oko najčešće ne detektira široku lepezu izgubljenih informacija bez detaljnog promatranja slike.

Metode za kompresiju mirne slike s gubitcima uglavnom koriste kombinacije postupaka kompresije s gubitcima i bez gubitaka. Koderi koji ne daju gubitke kao što je Huffmanov kod, kodiranje duljine niza točaka ili aritmetičko kodiranje koriste se i kao korak u kodiranju kod kompresije slike s gubitkom. Neke od tehnika kompresije s gubitkom razvile su se u međunarodne standarde, kao što je JPEG. Standard koji je sve više zastupljen je JPEG 2000.

Na strani odašiljanja gdje se provodi kompresija, algoritam generira komprimirani sadržaj slike, a na strani prijema algoritam koji provodi dekompresiju, dobiva se dekodirana slika. Blok shema prikazana je na slici 1.1. *Kodek* je uređaj ili računalni program sposoban komprimirati i dekomprimirati sliku. Riječ kodek kombinacija je riječi *kompresor-dekompresor*.



Slika 1.1: Blok shema postupka komprimiranja i dekomprimiranja.

Cilj kompresije slike velik je stupanj kompresije s jedne strane i vrlo dobra ili izvrsna kvaliteta obnovljene slike s druge strane. Treba biti primjenjiva na gotovo sve vrste slika i imati dobru kompleksnost. Rezultat kompresije ovisi o karakteristikama slike koja se komprimira, kao i o željenoj kvaliteti slike.

Nekoliko se veličina obično koristi za izražavanje učinka kompresije kako bi se usporedila veličina komprimirane datoteke s veličinom nekomprimirane datoteke.

Omjer kompresije definiran je kao

$$\text{Omjer kompresije} = \frac{\text{broj bitova izvorne slike}}{\text{broj bitova komprimirane slike}}. \quad (1.1)$$

Vrijednosti veće od 1 označavaju kompresiju, a vrijednosti manje od 1 označavaju da je veličina komprimirane slike veća od veličine izvorne slike. Ako je omjer kompresije 40 ili 40:1 to znači da izvorna slika ima 40 bita za svaki bit komprimirane slike. Što je veći stupanj kompresije to je veći i omjer kompresije.

Drugi način za opisivanje stupnja kompresije uporaba je pojma *faktor kompresije*

$$\text{Faktor kompresije} = \frac{\text{broj bitova komprimirane slike}}{\text{broj bitova izvorne slike}}. \quad (1.2)$$

U ovom slučaju, vrijednost 0,02 znači da podatci o slici zauzimaju 2% njezine izvorne veličine nakon sažimanja 2%. Vrijednosti veće od 1 znače da je komprimirana slika veća od izvorne slike.

Parametar kompresije ili bit rate još jedan je način usporedbe odnosa između izvorne slike i komprimirane slike. Kraće ga označavamo s *bpp* (eng. *bits per pixel*).

$$\text{bit rate} = \frac{\text{broj bitova komprimirane slike}}{\text{broj elemenata nekomprimirane slike}}. \quad (1.3)$$

Bit rate od 0.2 bpp odgovara prosječnom broju bita potrebnih za kompresiju jednog elementa slike. U radu ćemo koristiti parametar kompresije kako bi opisali učinak kompresije, a parametar kompresije je veći što je stupanj kompresije manji.

Kako bi provjerili kvalitetu dekodirane slike potrebno je sliku pohraniti na računalo zbog uspoređivanja s izvornom slikom. Slike se u računalu spremaju i obrađuju u binarnom obliku, a način na koji će se podatci iz slike pretvoriti u binarni oblik naziva se format za pohranu slike. Postoji puno načina pretvorbe slike u binarne brojeve, zbog čega postoje različiti formati za pohranjivanje slike. Ako se želi uspoređivati kvalitetu dekodirane slike s izvornom slikom tada je bolje koristiti format koji koristi zapis slike bez kompresije. Korištena metoda za pohranjivanje monokromatskih slika koja koristi 8 bita po elementu slike za pohranjivanje razina svjetline je *pgm* (eng. *portable gray map*). Prednost ove metode izrazita je jednostavnost i mogućnost korištenja na svim operacijskim sustavima. Izvorne i dekodirane slike korištene u ovom radu bit će pohranjene u *pgm* formatu.

1.1 Huffmanovo kodiranje

Najpopularnija je tehnika za uklanjanje redundancije pri kodiranju Huffmanovo kodiranje. Huffmanovo kodiranje [47] prefiksno je kodiranje promjenjive duljine niza bez gubitka nazvano prema D. A. Huffmanu koji je smislio algoritam 1952. godine. Pojedinačni znakovi kodiraju se kodnim riječima ovisno o vjerojatnostima njihova pojavljivanja. Na taj način uklanja se statistička redundancija u nizu znakova. Algoritam je do danas doživio mnoge promjene. Prevladavajući po učestalosti korištenja kao sastavna komponenta kompresijskih algoritama kao što su to GZIP, JPEG, MP3 i mnogi drugi.

Huffmanovo kodiranje koristi jedinstvenu metodu za odabir reprezentacija sva-kog simbola iz čega nastaje algoritam bez prefiksa, što znači da nijedna kodna riječ nije prefiks druge. Zbog toga nije potreban separator između kodnih riječi. Temelji se na sljedećim dvama činjenicama. Simboli koji se najčešće pojavljuju mogu se dodijeliti kraćim kodnim riječima od simbola koji se rjeđe pojavljuju. Dva simbola koja se najrjeđe pojavljuju imat će kodne riječi iste duljine, s razlikom samo u najmanje značajnom bitu.

Huffmanovo kodiranje slike zasniva se na statističkim svojstvima slike. Digitalnu mirnu sliku $f(i, j)$ možemo prikazati matricom A s elementima $a_{i,j}$. Elementi matrice elementi su slike. Neka je skup $S = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k\}$ skup mogućih razina svjetline koji se mogu pojaviti u slici. Vjerojatnost da pojedini element slike $a_{i,j}$ poprimi diskretnu vrijednost $\alpha_k \in S$ funkcija je $P(a_{i,j})$. Funkcija gustoće vjerojatnosti diskretne slučajne varijable $a_{i,j}$ je

$$p_k = P(a_{i,j} = \alpha_k) := \frac{1}{nm} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} a_{i,j} \quad (1.4)$$

gdje m označava visinu slike, a n označava širinu slike. Vjerojatnost pojavljivanja diskretne vrijednosti α_k izražava se kao omjer elemenata slike koji poprimaju vrijednost α_k i ukupnog broja elemenata slike. Informacijski sadržaj definira se izrazom

$$I(\alpha_k) := \log_2 \frac{1}{P(\alpha_k)} = -\log_2 P(\alpha_k), \quad (1.5)$$

gdje je težina ili količina korisne informacije u bitovima, koju nosi odgovarajući element slike. To znači da svi elementi slike nisu jednako važni. Budući da vrijede sljedeće relacije

$$0 \leq P(\alpha_k) = p_k \leq 1, \quad (1.6)$$

$$\log_2 P(\alpha_k) \leq 0, \quad (1.7)$$

slijedi

$$-\log_2 P(\alpha_k) \geq 0 \quad (1.8)$$

Svojstvo je logaritamske funkcije da logaritam veće vjerojatnosti daje po apsolutnoj vrijednosti manji broj nego logaritam manje vjerojatnosti. Iz toga se zaključuje da elementi slike koji poprimaju diskretnu vrijednost veće vjerojatnosti sadrže manje korisne informacije. Takvi elementi slike mogu se grublje kvantizirati. Na tom načelu radi entropijsko kodiranje. Prosječna količina korisne informacije koju nose svi elementi slike naziva se entropija, a može se definirati kao

$$H(A) := \sum_{k=1}^S P(\alpha_k) I(\alpha_k) = - \sum_{k=1}^S P(\alpha_k) \log_2 P(\alpha_k). \quad (1.9)$$

Kada svi elementi slike imaju jednaku vrijednost α_k , tada prema (1.4) i (1.5) proizlazi

$$P(a_{i,j} = \alpha_k) = 1, \quad (1.10)$$

$$I(\alpha_k) = 0, \quad (1.11)$$

iz toga prema (1.9) slijedi da je

$$H_{max}(A) = \log_2 S, \quad (1.12)$$

gdje je $S = 2^n - 1$, tj. maksimalan broj uporabljenih kvantizacijskih razina. Kod postojanja maksimalne entropije, svaki element slike ima drugačiju diskretnu vrijednost, odnosno potrebno je najmanje n bitova za prikaz svih diskretnih vrijednosti. Statistička redukcija može se izraziti kao

$$R(A) := \log_2 S - H_{max}(A). \quad (1.13)$$

Prethodni izraz vodi do zaključka kako veća entropija znači manju redukciju.

Huffmanov je algoritam vrlo jednostavan i najlakše se opisuje kao takozvani pohlepni algoritam, tj. onaj algoritam koji u svakom koraku bira lokalno najbolje rješenje, u nadi da će tako iznaći globalni optimum.

Huffmanov algoritam generira kod u strukturi binarnog stabla minimalne prosječne duljine putanje iz popisa frekvencija pojavljivanja. Popis frekvencija pojavljivanja sastoji se od vjerojatnosti pojavljivanja razine svjetline u slici.

Na vrhu binarnog stabla nalazi se osnovni čvor koji se zove korijen. On se dijeli na maksimalno dva čvora koji se nazivaju djeca i svaki daljni čvor može imati maksimalno dvoje djece. Dubina stabla jednaka je maksimalnoj razini nekog čvora u stablu. Razina korijena je 1. Kod Huffmanovog kodiranja stablo se popunjava od djece. To znači da do završetka Huffmanovog algoritma nije moguće znati strukturu stabla.

Prvo je potrebno napraviti histogram slike koju je potrebno komprimirati. Svaka razina svjetline vezana je za frekvenciju pojavljivanja te vrijednosti u slici. Razine svjetline koje se pojavljuju najčešće imaju najviše frekvencije. Razine svjetline koje se pojavljuju najrjeđe imaju najniže frekvencije.

Počne se s onoliko stabala koliko ima razina svjetline koje je potrebno kodirati. Svako stablo sadrži jedan čvor s frekvencijom razine svjetline u listu. Na ovaj način stvara se početna "šuma" stabala s jednim čvorom.

Sljedeće se ponavlja sve dok ne ostane samo jedno stablo. Odaberu se dva stabla s najmanjim frekvencijama pojavljivanja. Spoji ih se u jedno stablo dodavanjem novog korijena s vjerojatnošću pojavljivanja jednakom zbroju frekvencija pojavljivanja prethodna dva stabla, pri čemu ta dva stabla postaju čvorovi (djeca) novog stabla. Nije bitno koji je lijevi ili desni čvor (dijete). Često se korijen niže frekvencije stavi lijevo.

Dodijele se vrijednosti jedan i nula svakom od parova horizontalnog stabla. Kako bi se dobio kod za svaku razinu svjetline, slijedi se putanja od korijena do svakog lista, zatim se očita niz nula i jedinica. Tim postupkom stvorena je tablica kodiranih sljedova bitova ili rječnik. Na taj se način svakoj vrijednosti razine svjetline pridjeljuje kôd zapisan u kodnoj tablici.

Dekoder mora znati kodnu tablicu radi ispravnog dekodiranja. Potrebno je rekonstruirati binarno stablo, zatim se ide od korijena stabla prema vrijednostima bitova iz kodiranog niza koji se dekodira dok se ne dođe do nekog znaka. Taj se postupak ponavlja dok se ne dođe do kraja kodiranog niza.

Za tipičnih 256 različitih razina svjetline, duljina koda pojedinog simbola ne prelazi 8 bita. Huffmanovo kodiranje moguće je jednostavno implementirati,

ali efikasnost ovisi o statističkoj prirodi slike. Huffman preslikava simbole fiksne duljine u kodove promjenjive duljine. Ovo je optimalno samo kad su vjerojatnosti simbola potencije broja 2. Huffmanovi kodovi optimalni su za zadanu raspodjelu vjerojatnosti izvora. Međutim, njihova prosječna duljina dulja je nego kod entropijskog kodiranja, unutar vrijednosti jednog bita.

1.2 Diskretna kosinusna transformacija

U radu *Théorie Analytique de la Chaleur* (Analitička teorija topline) 1822. godine francuski fizičar i matematičar Joseph Fourier koristio je prikaz funkcija na ograničenom intervalu u obliku trigonometrijskog reda. Fourier je pokazao da bilo koju periodičnu funkciju možemo prikazati beskonačnom sumom kompleksnih eksponencijalnih funkcija. To je bilo omogućilo nastanak najpoznatijeg i najčešće korištenog postupka transformacijskog kodiranja slike, kodiranje primjenom *diskretne kosinusne transformacije* (eng. *Discrete Cosine Transform (DCT)*). To je ortogonalna transformacija usko povezana s diskretnom Fourierovom transformacijom. Poznato je kako Fourierova transformacija rabi sinusne i kosinusne valne oblike za prikaz signala, kojeg prevodi iz prostorne u frekventijsku domenu. DCT koristi kosinusne funkcije nad diskretnim vrijednostima tretirajući ih kao diskretizirane dvodimenzionalne valne oblike. Za razliku od diskretne Fourierove transformacije, diskretna kosinusna transformacija dopušta računanje s realnim umjesto kompleksnim koeficijentima pa nema redundantnih kompleksno-konjugiranih parova. Diskretna Fourierova transformacija pretpostavlja periodične rubne uvjete, dok DCT pretpostavlja reflektirajuće rubne uvjete.

Efikasne implementacije moguće su slično kao i za brzu Fourierovu transformaciju. Glavna prednost DCT-a pred ostalim postupcima transformacijskog kodiranja nepromjenjiv je algoritam računanja. Jezgra transformacije jednaka je za sve blokove. Moguće je izvođenje u stvarnom vremenu, tj. komprimirani podatci nastaju brzinom ulaznih podataka.

Diskretna kosinusna transformacija jednodimenzionalnog diskretnog signala $f(m) = (f_0, \dots, f_{M-1})^T$

$$\tilde{f}(p) := \alpha(p) \sum_{m=0}^{M-1} f(m) \cos \frac{(2m+1)p\pi}{2M} \quad (1.14)$$

gdje je $\alpha(p)$ skalirajuća funkcija dana izrazom i $0 \leq p < M$

$$\alpha(p) := \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{M}} & \text{za } p = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{M}} & \text{inače} \end{cases} \quad (1.15)$$

Inverzna diskretna kosinusna transformacija (IDCT) jednodimenzionalnog diskretnog signala $\tilde{f} = (\tilde{f}_0, \dots, \tilde{f}_{M-1})^T$

$$\tilde{f}(m) := \sum_{p=0}^{M-1} \alpha(p) \tilde{f}(p) \cos \frac{(2m+1)p\pi}{2M} \quad (m = 0, \dots, M-1) \quad (1.16)$$

omogućuje vraćanje u prostornu domenu.

Ovo nije jedina definicija diskretne kosinusove transformacije, u literaturi se sreću još tri neznatno različite definicije. Za više dimenzije, DCT je definirana na takav način tako da može biti razdvojena na jednodimenzionalne DCT. To znači da se može provoditi zasebno za horizontalni i vertikalni smjer.

Općenito, DCT se primijenjuje na $M \times N$ blokovima slike, a rezultat su $M \times N$ blokovi DCT koeficijenata. Dvodimenzionalnu diskretnu kosinusnu transformaciju određuje

$$\tilde{f}(u, v) := \alpha(u)\alpha(v) \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(x, y) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{2M} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{2N} \quad (1.17)$$

gdje je $f(x, y)$ element slike na poziciji (i, j) , $\tilde{f}(u, v)$ DCT koeficijent na poziciji (u, v) za $0 \leq u < M$ i $0 \leq v < N$, a $\alpha(u)$, $\alpha(v)$ skalirajuće funkcije dane izrazom

$$\alpha(u) := \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{M}} & \text{za } u = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{M}} & \text{inače} \end{cases}, \quad (1.18)$$

$$\alpha(v) := \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}} & \text{za } v = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & \text{inače} \end{cases}. \quad (1.19)$$

Inverzna diskretna kosinusna transformacija vraća podatke iz frekvencijske u prostornu domenu. Inverzna transformacija slaže neki dvodimenzionalni valni oblik kombinirajući osnovne valne oblike onako kako je određeno DCT koeficijentima $\tilde{f}(u, v)$

$$f(x, y) := \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \alpha(u)\alpha(v) \tilde{f}(u, v) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{2M} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{2N} \quad (1.20)$$

gdje su $\alpha(u)$ i $\alpha(v)$ definirani kao u (1.16). Na ovaj se način iz DCT koeficijenata rekonstruira blok elemenata slike izvorne slike.

Svaki element bloka slike određen je koordinatama x i y i označen s $f(x, y)$, dok je dobiveni DCT koeficijent određen koordinatama u i v i označen s $\tilde{f}(u, v)$. Svaki DCT koeficijent predstavlja zastupljenost neke prostorne frekvencije u slici,

i dobiva se analiziranjem cijelog bloka slike (sumiranje po cijelom bloku). Koeficijent $\tilde{f}(u, v)_{00}$ ($u = 0, v = 0$) naziva se DC koeficijent i proporcionalan je srednjoj vrijednosti elemenata slike u bloku, a preostali koeficijenti nazivaju se AC koeficijenti. DC koeficijent sadrži najveći dio informacije o slici i najbitniji je za rekonstrukciju slike. AC koeficijenti sadržavaju informaciju o prostornim frekvencijama u bloku odnosno u slici. Ako se DCT koeficijenti prikažu kao blok u kojem je svaki koeficijent određen koordinatama u i v , tada se idući s lijeva na desno povećava vodoravna komponenta prostorne frekvencije, a od gore prema dolje okomita komponenta. Najviša frekvencija nalazi se u donjem desnom kutu bloka DCT koeficijenata. AC koeficijenti koji se nalaze u okolini DC koeficijenta odgovaraju nižim prostornim frekvencijama, a AC koeficijenti koji su smješteni prema donjem desnom uglu opisuju više prostorne frekvencije. AC koeficijenti nižih prostornih frekvencija nose više korisnih informacije nego oni viših frekvencija. Ukoliko u bloku sve vrijednosti imaju istu vrijednost, tada je DC koeficijent jedini različit od nule, a svi AC koeficijenti imaju vrijednost nula. U tom slučaju DC koeficijent nosi cijelu informaciju o slici.

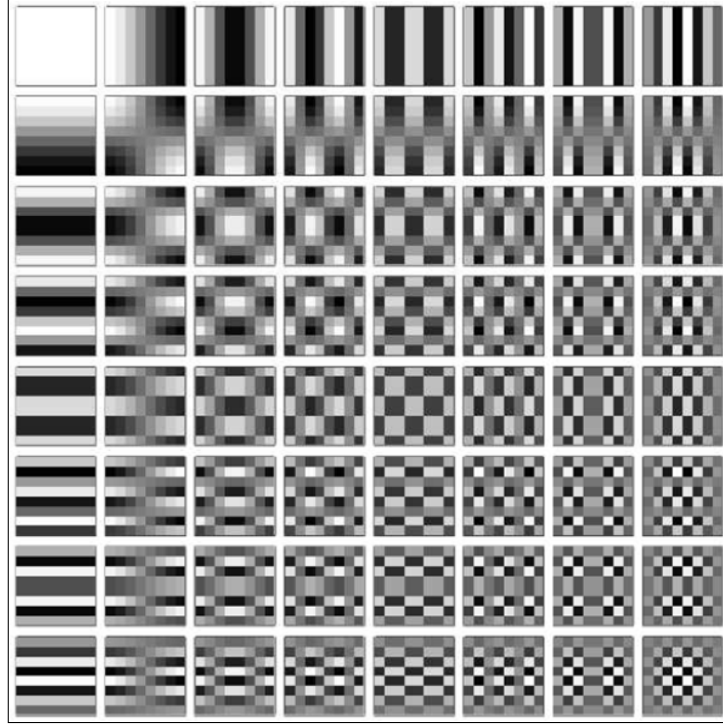
Uobičajena je veličina bloka koja se rabi u sustavima za kompresiju slike primjenom DCT-a $M = N = 8$. Manji blokovi ne omogućavaju djelotvorno uklanjanje redundancije, a veći blokovi zahtijevaju složeniji algoritam proračunavanja DCT koeficijenata. Ako se koristi blok 8×8 , potrebno je $8 \times 8 = 64$ operacija što za sva 64 DCT koeficijenta, odnosno jedan cijeli blok, daje ukupno 4096 operacija. Za monokromatsku sliku veličine 256×256 elemenata slike, podjelom slike u blokove veličine 8×8 nastaje 1024 bloka, prema tome ukupno 4 194 304 operacija. U slučaju da je blok 256×256 broj operacija bi bio 1025 puta veći. Mogući su blokovi 32×32 i 16×16 , a blok 8×8 daje zadovoljavajuće rezultate. Ako bi se slika podijelila u manje blokove, 4×4 ili 2×2 elemenata slike, tada DCT ne bi bila učinkovita u otklanjanju redundancije.

Za DCT transformaciju za blok 8×8 elemenata slike vrijedi jednadžba

$$\tilde{f}(u, v) := \alpha(u)\alpha(v) \sum_{m=0}^7 \sum_{n=0}^7 f(x, y) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{16} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{16}. \quad (1.21)$$

Svaki 8×8 blok elemenata slike može se u potpunosti prikazati linearnom kombinacijom 64 osnovna valna oblika. Osnovni valni oblici DCT transformacije za veličinu bloka 8×8 elemenata slike prikazani su na slici 1.2, pri čemu mjesto valnog oblika u slici odgovara mjestu koeficijenta u DCT bloku. Prvi red sadrži horizontalne frekvencije, prvi stupac vertikalne frekvencije, svi ostali valni oblici kombinacija su horizontalnih i vertikalnih frekvencija. Položaj odgovarajućeg valnog oblika u slici odgovara mjestu DCT koeficijenta u bloku. Valni oblik u gornjem lijevom kutu istosmjerna je vrijednost i predstavlja nultu prostornu frekvenciju.

Inverzna diskretna kosinusna transformacija za blok 8×8 elemenata slike tada



Slika 1.2: Osnovni valni oblici 8×8 DCT transformacije.

je

$$f(x, y) := \sum_{m=0}^7 \sum_{n=0}^7 \alpha(u) \alpha(v) \tilde{f}(u, v) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{16} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{16} \quad (1.22)$$

gdje su $\alpha(u)$ i $\alpha(v)$ definirani

$$\alpha(u), \alpha(v) := \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{4} & \text{za } u, v = 0 \\ \frac{1}{2} & \text{inače.} \end{cases} \quad (1.23)$$

Razina svakog elementa slike u bloku diskretna je vrijednost i predstavlja kvantiziranu amplitudu luminantnog signala u trenutku uzorkovanja.

Kod DCT-a i IDCT-a, jedini gubici koji se javljaju posljedica su izračunavanja kosinus funkcije jer je nemoguće u potpunosti točno izračunati vrijednost funkcije kosinus za bilo koji realan broj. Računa se aproksimacija pomoću Taylorovog reda

$$\cos x = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{x^{2n}}{2n!}. \quad (1.24)$$

Smatra se da je aproksimacija s nekoliko članova reda zadovoljavajuća da ljudsko oko ne vidi pogrešku u rekonstruiranoj slici.

Kod blokova iz realnih slika događa se pravilan pad amplituda DCT koeficijenata od nižih prema višim frekvencijama, što znači da se AC koeficijenti s većim amplitudama grupiraju oko gornjeg lijevog kuta DCT bloka. Veći AC koeficijent određuje veću energiju valnog oblika kojeg predstavlja, što znači da nosi i veći dio ukupne energije slike. Drugim riječima, samo mali broj koeficijenata nosi veći dio informacije o slici i predstavlja podatak s visokom entropijom. Upravo to pravilno raspoređivanje koeficijenata s visokom entropijom koji su odgovorni za vizualnu kvalitetu činjenica je koja omogućava uspješnu kompresiju slike. Zane-marujući koeficijente s malom vrijednošću, za koje vrijedi pravilo kod 'prirodnih' slika da su sve manji s porastom udaljenosti od DC koeficijenta, provodi se izdvajanje viših prostornih frekvencija slike, što se može nazvati i niskopropusnim filtriranjem. Bez obzira koji će se daljnji postupak kodiranja koristiti, može se na temelju broja zanemarenih DCT koeficijenata procijeniti postignuti stupanj kompresije. Transformira slikovne podatke u reprezentaciju koja je posebno korisna za kompresiju slika s gubitcima. Razvijeni su razni postupci kodiranja koji koriste DCT za uklanjanje prostorne redundancije između elemenata slike u slici. Standardni je postupak za kompresiju mirnih digitalnih slika koji se temelje na uporabi DCTa JPEG. Moguća je uporaba za kompresiju videosignala, a standard proizašao iz toga je MPEG.

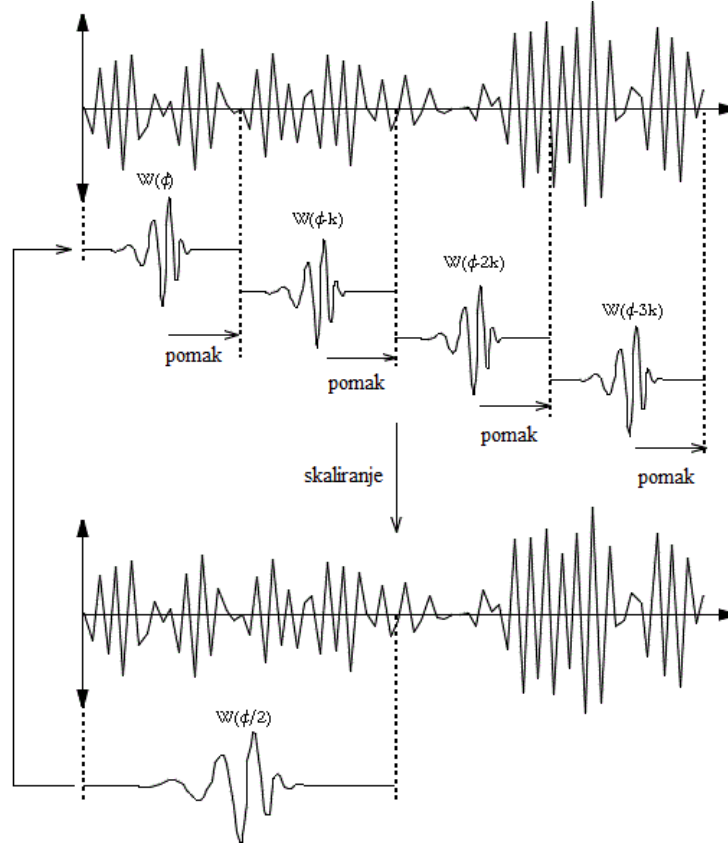
1.3 Diskretna wavelet transformacija

Početak wavelet teorije može se povezati s pojavom Fourierove transformacije i generalizacijom Fourierove tvrdnje na neperiodične i diskretne signale. Teorija wavelet transformacije započinje 1909. godine kada A. Haar [45] daje konstrukciju baznih funkcija sa svojstvom wavelet funkcija. Početci primjene waveleta u tehnici kodiranja, odnosno kompresije, počinju 1976. godine razvojem tehnike dekompozicije vremenski diskretnog signala [25]. Iste godine objavljen je sličan rad nazvan potpojasno kodiranje [24]. Početkom '80-ih Grossman i Morlet [41] konstruiraju funkcije s dobrom lokalizacijom u vremenskoj i frekvencijskoj domeni. Tehnika vrlo slična potpojasnom kodiranju piramidalno je kodiranje ili multirezolucijska analiza definirana 1983. [14]. Vezu između waveleta i harmonijske analize pokazuje Meyer [66] te konstruira prve netrivialne wavelete. Početkom '90-ih godina M. Antonini [3], R.A. De Vore [30] i A.S. Lewis [58] primijenjuju diskretnu wavelet transformaciju za kompresiju slike.

Waveleti su funkcije koje mogu imati bilo kakav oblik, ali su vremenski ograničene. Multirezolucijsko predstavljanje signala osnovno je načelo wavelet transformacije, koja za razliku od Fourierove transformacije, signal prikazuje istodobno u vremenskoj i frekvencijskoj domeni. Signal se promatra u vremenskim intervalima i za svaki takav interval proračunava se spektar. Kod waveleta se ne rabi pojam spektar, već je uveden termin skala. Skala je obrnuto proporcionalna frekvencijskom pojasu. Kad se dođe do kraja signala vremensko ograničavanje se

ponavlja s dužim ili kraćim intervalima. Kao rezultat dobije se niz vrijeme-skala funkcija sve s različitim rezolucijama.

Wavelet analiza signala vrlo je slična Fourierovoj analizi. Fourierovom analizom signal se predstavlja pomoću kosinusnih i sinusnih funkcija dok se kod waveleta prikazuje tzv. wavelet funkcijama. Sve wavelet funkcije generirane su iz iste funkcije, koja se zove osnovna ili mother wavelet funkcija, postupkom skaliranja i translacije koji je prikazan na slici 1.3.



Slika 1.3: Generiranje wavelet funkcije.

Općenito wavelet transformacija može biti kontinuirana (eng. *Continuous Wavelet Transform (CWT)*) i diskretna (eng. *Discrete Wavelet Transform (DWT)*).

Kontinuirana wavelet transformacija signala $f(t)$ definirana je prema izrazu

$$\gamma(s, \tau) := \int f(t) \psi_{s,\tau}^*(t) dt, \quad (1.25)$$

pri čemu s označava skalu, odnosno korak proširenja waveleta (mjera frekvencije), a τ translacijski parametar (mjera vremena). $\gamma(s, \tau)$ označava skalu, odnosno frekvencijski sastav signala $f(t)$ u određenom vremenskom intervalu $k\tau$, gdje je

$k \in \{0, 1, 2, \dots\}$ u skali. Familija wavelet funkcija $\psi_{s,x}(t)$ opisana je izrazom (1.25), pri čemu je $\psi(t)$ mother wavelet.

$$\psi_{s,x}(t) := \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right), \quad (1.26)$$

gdje je $\frac{1}{\sqrt{s}}$ normalizacijska konstanta koja osigurava da svi waveleti imaju istu energiju. Wavelet funkcije nisu precizno definirane već imaju proizvoljan oblik te su prilagodljive ovisno o uporabi, što je prednost u odnosu na sve ostale transformacije.

$$\int \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty, \quad (1.27)$$

pri čemu je $\psi(\omega)$ Fourierova transformacija. Prethodni izraz pokazuje da spektar waveleta nestaje oko frekvencije nula, tj. vrijedi

$$|\psi(\omega)|^2|_{\omega=0} = 0. \quad (1.28)$$

Iz ovog proizlazi da waveleti moraju imati spektar sličan spektru pojasno propusnog filtera. Ovaj je zaključak bitan za korisnu adaptaciju wavelet transformacije. Također vrijedi izraz

$$\int \psi(t) dt = 0 \quad (1.29)$$

iz kojeg se zaključuje da je prosječna vrijednost waveleta u vremenskoj domeni nula.

Kako bi wavelet transformaciju bilo moguće primjeniti na diskretni signal, potrebno je modificirati izraz (1.26). Uvodi se pojam diskretnih waveleta koji zapravo znače da se skaliranje i translacija provode u diskretnim koracima.

$$\psi_{s,x}(t) := \frac{1}{\sqrt{s_0^j}} \psi\left(\frac{t - k\tau_0 s_0^j}{s_0^j}\right) \quad (1.30)$$

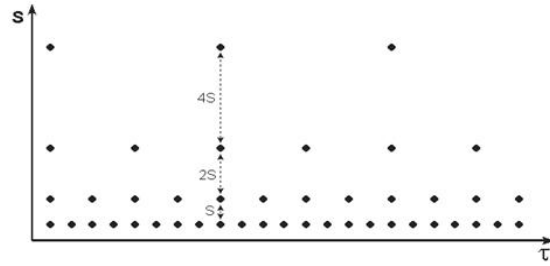
Iako se $\psi_{s,x}(t)$ zovu diskretni waveleti oni su i dalje kontinuirane funkcije. j i k su cijeli brojevi. s_0 je korak proširenja waveleta i obično je 2. τ_0 je faktor translacije i ovisi o koraku proširenja. Obično se uzima $\tau_0 = 1$. Izgled diskretnih waveleta prikazan je na slici 1.4.

Da bi diskretni waveleti bili ortonormalni mora vrijediti izraz

$$\int \psi_{j,k}(t) \psi_{m,n}^*(t) dt = \begin{cases} 1, \dots & j = m, k = n \\ 0, \dots & j \neq m, k \neq n, \end{cases} \quad (1.31)$$

Na taj se način neki signal može rekonstruirati iz ortogonalnih waveleta i wavelet transformacijskih koeficijenata prema izrazu

$$f(t) := \sum_{j,k} \gamma(j,k) \psi_{j,k}(t) \quad (1.32)$$

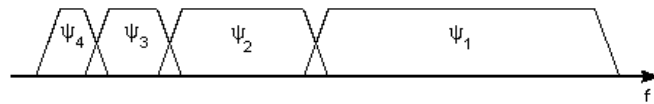


Slika 1.4: Diskretni waveleti u vrijeme-skala sustavu.

za inverznu wavelet transformaciju.

I s diskretnim waveletima potrebno je beskonačno mnogo operacija skaliranja i translacije što je neprihvatljivo za realnu primjenu. Naravno, moguće je prekinuti te operacije, ali tada pada kvaliteta transformacije u smislu gubitka najvažnijih informacija.

Broj translacija ograničen je trajanjem signala. Pitanje je koliko je skala, odnosno koliko razina, potrebno da bi se signal u cijelosti analizirao. Što je više skala to je više rezolucija moguće postići. Ako u vremenskoj domeni komprimiramo wavelete za faktor 2, to znači proširenje spektra waveleta za faktor 2. Na taj način može se pokriti cijeli spektar signala sa spektrom waveleta prema slici 1.5.

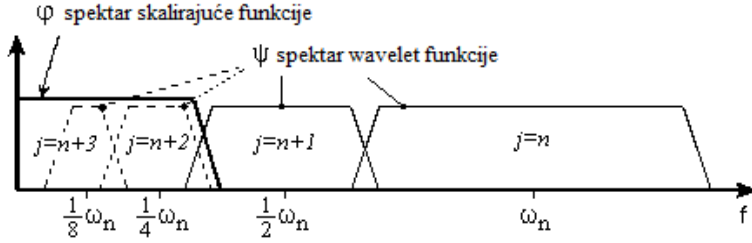


Slika 1.5: Spektar wavelet funkcija.

No to nije posve točno. Spektar waveleta nula je prema izrazu (1.28) što znači da niske frekvencije koje su i najbitnije ne možemo prikazati spektrom waveleta. Stoga za prikaz spektra nižih frekvencija uvodimo još jednu wavelet funkciju koja se zove skalirajuća funkcija. Skalirajuću funkciju $\varphi(t)$ uveo je S.G. Mallat, a može se promatrati kao običan signal s niskofrekvencijskim spektrom, a koji možemo prikazati kao dekompoziciju wavelet funkcija prema izrazu

$$\varphi(t) := \sum_{j,k} \gamma(j,k) \psi_{j,k}(t). \quad (1.33)$$

Skalirajuća funkcija zapravo nadomješta beskonačan broj wavelet funkcija koje se približavaju nuli, ali nikad ne dođu do nule (vidi sliku 1.6).



Slika 1.6: Spektar skalirajuće i wavelet funkcije.

Za skalirajuću funkciju $\varphi(t)$ vrijedi

$$\int \varphi(t) dt = 1, \quad (1.34)$$

iz čega slijedi da skalirajuća funkcija ima u vremenskoj domeni prosječnu vrijednost 1, za razliku od wavelet funkcije koja ima prosječnu vrijednost nula. Wavelet funkcije predstavljaju visokopropusni filter, a skalirajuća funkcija predstavlja niskopropusni filter. Više takvih funkcija tvori tzv. filtarsku banku. Wavelet transformaciju možemo zamisliti kao prolaz signala kroz niz niskopropusnih i niz visokopropusnih filtara. Ovakav je postupak istovjetan postupku potpojasnog kodiranja i prikazan je na slici 1.7. Wavelet transformacija je oblikovana kako bi dala dobru vremensku rezoluciju i lošu frekvencijsku rezoluciju na visokom frekvencijama, i dobru frekvencijsku rezoluciju i lošu vremensku rezoluciju na niskim frekvencijama.

Frekvencijski pojas dijeli se rekurzivno na dva jednaka dijela pomoću oktavnih digitalnih filtara. Niskopropusni filter na izlazu daje grubu aproksimaciju signala, a visokopropusni filter daje detalje u signalu. Ovakav način koristi se u JPEG 2000 normi. Zbrojimo li spektar skalirajuće funkcije i spektar waveleta na skali $j+1$ nastat će nova skalirajuća funkcija sa spektrom dvostruko širim od spektra prethodne skalirajuće funkcije, odnosno većom rezolucijom. To se može prikazati izrazom

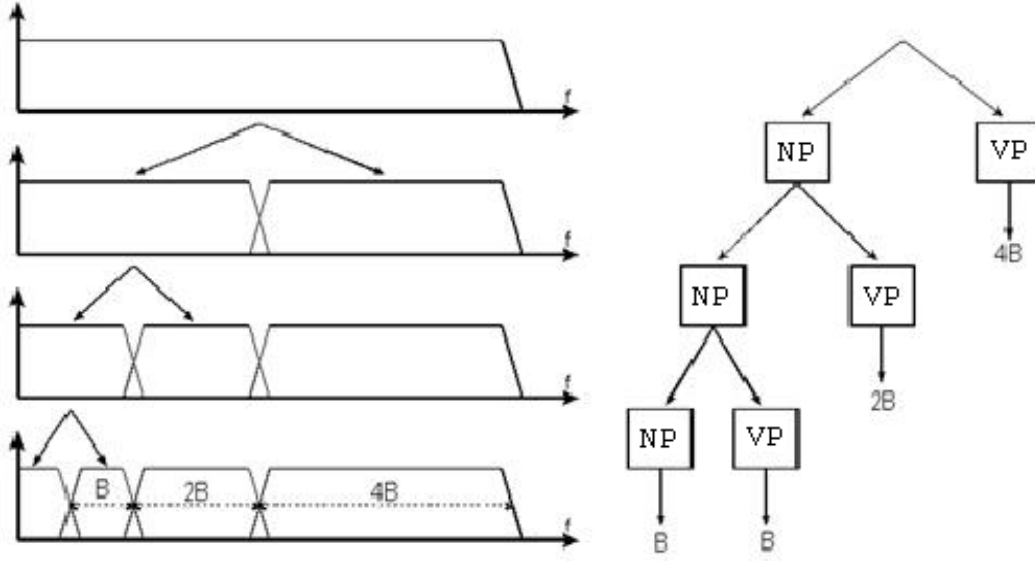
$$\varphi(2^j t) := \sum_k h_{j+1}(k) \varphi(2^{j+1} t - k). \quad (1.35)$$

Budući da prva skalirajuća funkcija zamjenjuje niz wavelet funkcija, vrijedi izraz

$$\psi(2^j t) := \sum_k g_{j+1}(k) \varphi(2^{j+1} t - k). \quad (1.36)$$

Signal $f(t)$ se stoga prikazuje kao

$$f(t) := \sum_k \lambda_{j-1}(k) \varphi(2^{j-1} t - k) + \sum_k \gamma h_{j-1}(k) \psi(2^{j-1} t - k). \quad (1.37)$$



Slika 1.7: Potpojasno kodiranje

Ako su skalirajuća funkcija $\varphi_{j,k}(t)$ i wavelet funkcija $\psi_{j,k}(t)$ ortonormalne, tada se diskretni wavelet koeficijenti mogu proračunati kao konvolucija diskretnog signala s wavelet i skalirajućim funkcijama. Niskofrekvencijski DWT koeficijenti nastaju konvolucijom signala i skalirajućih funkcija prema izrazu

$$\lambda_{j-1}(k) := \langle f(t), \varphi_{j,k}(t) \rangle = \sum_m h(m - 2k) \lambda_j(m), \quad (1.38)$$

a DWT koeficijenti koji opisuju detalje (visoke frekvencije) na j -oj skali, dobiveni su konvolucijom signala i wavelet funkcija prema izrazu

$$\gamma_{j-1}(k) := \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = \sum_m g(m - 2k) \gamma_j(m). \quad (1.39)$$

Može se zaključiti da se koeficijenti na nekoj skali mogu izračunati na temelju koeficijenata prethodne skale. $h(k)$ težinski je faktor koji odgovara obilježju niskopropusnog digitalnog skalirajućeg filtra, a $g(k)$ predstavlja digitalni visokopropusni wavelet filtar. U izrazima (1.38) i (1.39) uz faktor k stoji broj 2. On označava faktor poduzorkovanja. Nakon što filtri podijele signal na dva potpojas, nad svakim potpojasom moguće je provesti poduzorkovanje. To je moguće jer svaki frekvencijski potpojas koji nastane na izlazu iz filtra ima dvostruko manju širinu pa je po Shannonovom teoremu moguće smanjiti frekvenciju uzorkovanja za dva. To ima za posljedicu da svaki drugi uzorak signala $f(t)$ ide u konvoluciju sa skalirajućom i wavelet funkcijom. Drugim riječima, poduzorkovanjem se odbacuje pola uzoraka u dotičnom potpojasu. Teorijski, posljednji skalirajući

potpojas može obuhvaćati samo jedan uzorak. Tada se postigne i najveća moguća razina dekompozicije signala.

Najjednostavniji je oblik dvodimenzionalne wavelet transformacije separabilna 2D DWT, kod koje se 1D DWT prvo primjeni na sve retke, a zatim na sve stupce.

Prednosti su DWT vrlo efikasne realizacije. Moguće je oblikovanje funkcije razlaganja i rekonstrukcije konačnog trajanja, što je vrlo prikladno za sažet opis signala promjenjivih svojstava. Nedostatak DWT-a pojava je rasipanja wavelet koeficijenata oko mjesta diskontinuiteta (eng. *ringing*) jer wavelet koeficijenti osciliraju pozitivno i negativno oko singulariteta, što otežava detekciju tog singulariteta pa i modeliranje signala. Ako se signal pomakne u vremenu, uzorci wavelet koeficijenata promijenit će se pa kažemo da je DWT ovisna o pomaku. Problem je i preklapanje spektra jer se wavelet koeficijenti računaju iterativnim vremenski diskretnim operacijama s neidealnim visoko i niskopropusnim filtrima. U 2D ili više dimenzija uspješno se detektiraju okomiti ili vodoravni rubovi, ali zbog manjka usmjerenosti (realnih) funkcija razlaganja problem nastaje kod rubova pod nekim kutom, gdje dolazi do efekta šahovske ploče.

Poglavlje 2

Kompresija mirne televizijske slike

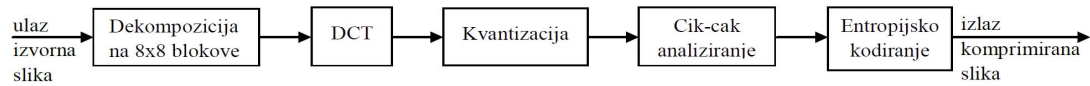
Trenutnim metodama za kompresiju slike dominiraju koncepti koji uključuju diskretnu kosinusnu transformaciju (kao što je široko primijenjeni JPEG standard [72]) ili diskretnu wavelet transformaciju (u JPEG 2000 [83])

2.1 Standard JPEG

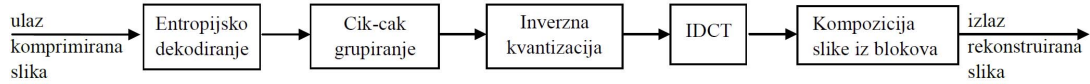
Međunarodna organizacija za standarde (eng. *International Standards Organisation (ISO)*) i Međunarodna elektrotehnička komisija (eng. *International Electrotechnical Commission (IEC)*) formirali su 1982. Radnu skupinu 8 (Working Group 8 (WG8)) "Kodirani prikaz slikovnih i tonskih informacija" (eng. *Coded Representation of Picture and Audio Information*), a 1986. u sklopu WG8 ustanovljena je stručna skupina *JPEG* (eng. *Joint Photographers Experts Group*) s ciljem ustrojavanja standardnih postupaka za kompresiju mirnih digitalnih slika. Odabran je jedinstveni postupak kodiranja mirnih slika i usvojen je međunarodni standard IS 10918 "Digitalna kompresija i kodiranje mirnih slika" (eng. *International Standard 10918 "Digital Compression and Coding of Continuous Tone Still Images"*) 1992. godine, tzv. JPEG standard [50].

JPEG standard sastoji se od dvaju dijelova. Prvi dio opisuje i specifikira različite kodeke za različite načine rada te mogućnosti promjene formata. Drugi dio opisuje testove za utvrđivanje koja se implementacija koda i dekodera podudara sa specifikacijama prvog dijela "Zahtjevi i smjernice".

Četiri su načina rada JPEG standarda: sekvencijsko kodiranje, progresivno kodiranje, kodiranje bez gubitaka i hijerarhijsko kodiranje. Sekvencijsko kodiranje osnovni je način rada koji se temelji na DCT transformaciji na blokovima 8×8 gdje se svaki dio slike kodira u jednom prolazu s lijeva na desno te odozgo prema dolje. Progresivno kodiranje također se temelji na DCT transformaciji na blokovima 8×8 . Kodira slike u više prolaza kako bi se brzo dobila gruba



Slika 2.1: Blok shema JPEG koder



Slika 2.2: Blok shema JPEG dekodera.

dekodirana slika kada je vrijeme prijenosa dugačko. Kodiranje bez gubitaka jamči stvarnu reprodukciju gdje su dekodirana i izvorna slika jednaki, ali postiže male stupnjeve kompresije najviše do 4:1. Koristi se kad je kvaliteta bitnija od brzine prijenosa. Postupak kodiranja bez gubitka ne temelji se na DCT-u te je omogućen kako bi se ispunile potrebe aplikacija koje zahtijevaju točnu obnovu svake vrijednosti uzorka izvorne slike. Hijerarhijsko kodiranje u višestrukim rezolucijama kodira sliku tako da je sliku najniže rezolucije moguće rekonstruirati bez dekodiranja slike u njezinoj najvećoj rezoluciji.

Najšire korišten način kompresije u JPEG normi sekvencijsko je kodiranje i to ćemo kodiranje detaljnije objasniti. Opća blok shema sekvencijskog kodiranja i dekodiranja prikazana je na slikama 2.1 i 2.2.

Nad cjelobrojnim vrijednostima slike bez predznaka vrši se pomak iz intervala $[0, 2^{p-1}]$ na cjelobrojne vrijednosti s predznakom iz intervala $[-2^{p-1}, 2^{p-1} - 1]$. Slika koja ulazi u koder dekomponira se u ulazne blokove 8×8 kako bi transformacija bila što brža i efikasnija. Mogući su blokovi 32×32 i 16×16 , a blok 8×8 smatrao se najpovoljnijim za DCT u vrijeme donošenja standarda. Vrijeme računanja DCT transformacije raste s porastom veličine bloka jer za proračun svakog transformacijskog koeficijenta potreban je prolaz kroz cijeli blok. Svaki blok veličine 8×8 sadrži 64 elemenata slike.

Nakon podijele slike u blokove slijedi primjena dvodimenzionalne diskretne kosinusne transformacije objašnjene u podpoglavlju 1.2. Kao rezultat DCT-a nastaje matrica kojoj elementi nisu više amplitude elemenata slike nego vrijednosti transformacijskih koeficijenata s koordinatama u, v . Slika je transformirana iz prostorne u frekvencijsku domenu. DCT vrši frekvencijsku analizu nad diskretnim valnim oblicima slike. Na osnovu promjena diskretnih vrijednosti u slici transformacija prepoznaje koje prostorne frekvencije slika generira i prikladno ih grupira.

DCT koeficijenti, $\tilde{f}(u, v)$, sadržavaju informaciju o frekvencijskom sastavu slike. DC koeficijent koji se nalazi u lijevom gornjem uglu transformacijske matrice jednak je osmerostruko srednjoj vrijednosti svih DCT koeficijenata. DC koeficijent sadrži najveći dio informacije o slici i najbitniji je za rekonstruk-

ciju slike. AC koeficijenti sadržavaju informaciju o prostornim frekvencijama u bloku, odnosno u slici. DCT transformacija na temelju frekvencijske analize nad elementima bloka provodi preraspodjelu energije koju nosi pojedini element u bloku. Najveći dio energije sadržan je u DC koeficijentu te niskofrekvencijskim AC koeficijentima koji ga okružuju. AC koeficijenti nižih prostornih frekvencija nose više korisne informacije nego oni viših frekvencija. Ovakav način koncentracije energije u skladu je sa svojstvom ljudskog vizualnog sustava. DCT visoke frekvencije prikazuje, po apsolutnoj vrijednosti, malim brojevima koje se onda kodiraju s manjom točnošću.

Za tipične blokove slika veličine 8×8 , većina prostornih frekvencija skoro je nula ili nula i ne treba se dekodirati. Nakon provedene transformacije primjenjuje se kvantiziranje svih 64 DCT koeficijenata pomoću tablica kvantiziranja. Kvantizacijska tablica kvadratna je matrica dimenzije 8×8 čiji elementi nazivaju se kvantizatori. To su unaprijed točno definirane cjelobrojne vrijednosti od 1 do 255 koje određuju korak kvantiziranja odgovarajućeg DCT koeficijenta. Vrijednosti kvantizatora određene su u skladu sa svojstvima ljudskog vizualnog sustava. Svrha kvantiziranja postizanje je kompresije odbacivanjem informacija koje nisu vizualno značajne. Kvantiziranje je postupak koji unosi nepreciznost i stoga je glavni izvor gubitaka informacije u koderima temeljenim na primjeni DCT. Uklanja se određen broj visokofrekvencijskih koeficijenata, a preostali se kvantiziraju s manjom točnošću. Taj postupak prilagođen je ljudskom vizualnom sustavu jer ljudsko oko ne vidi visoke prostorne frekvencije pa ih ne treba prenositi dalje.

Kvantizacija DCT koeficijenata središnji je korak u redukciji podataka. Svrha kvantizacije postići je dodatnu kompresiju predstavljanjem DCT koeficijenata uz točno onoliku točnost kolika je potrebna za postizanje željene kvalitete slike. Kvantizacija reducira amplitudu koeficijenata koji pridonose malo ili ništa kvalitete slike, tako da se povećava broj koeficijenata s vrijednošću nula. Kvantiziranje je definirano kao dijeljenje svakog DCT koeficijenta $\tilde{f}(u, v)$ s odgovarajućim koeficijentom kvantiziranja $q(u, v)$. Rezultat se zaokružuje na najbližu cjelobrojnu vrijednost

$$s(u, v) = \text{Cjelobrojno dijeljenje} \left(\frac{\tilde{f}(u, v)}{q(u, v)} \right) \quad (2.1)$$

gdje je $s(u, v)$ kvantizirana vrijednost DCT koeficijenta. Mijenjajući parametre kvantizacije utječe se na kvalitetu komprimirane slike.

Ako se želi postići kompresija slike bez vidljivih pogriješaka, koeficijent kvantiziranja treba odabrati uzimajući u obzir percepcijski prag odgovarajućeg osnovnog DCT valnog oblika. To znači da DCT koeficijenti, koji odgovaraju frekvencijskoj komponenti koju ljudsko oko neće vidjeti, trebaju u postupku kvantiziranja biti izjednačeni s nulom. Percepcijski pragovi ovise o svojstvima izvorne slike te o primjeni.

Kvantizacijske tablice za luminantne i krominantne komponente koje se rabe

16	11	10	16	24	40	51	61
12	12	14	19	26	58	60	55
14	13	16	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	130	99

a

17	18	24	47	99	99	99	99
18	21	26	66	99	99	99	99
24	26	56	99	99	99	99	99
47	66	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

b

Slika 2.3: Tablice kvantiziranja za **(a)** luminantne blokove i **(b)** krominantne blokove.

u JPEG normi, prikazane su na slici 2.3. Koeficijenti u gornjem lijevom dijelu tablice kvantiziranja, a odgovaraju nižim frekvencijama, manji su od koeficijenata u preostalom dijelu tablice. Koeficijenti dolje desno koji odgovaraju višim frekvencijama najveći su. Pomoću većih koeficijenata kvantiziranja smanjuju se već ionako mali DCT koeficijenti u visokofrekvencijskom području. Na taj način velika je većina koeficijenata u visokofrekvencijskom području poprimila vrijednost nula. Koliko će DCT koeficijenata biti zaokruženo na nulu, ovisi o sadržaju pojedinog bloka i o izboru kvantizacijske tablice i time se može regulirati stupanj kompresije. Postupkom kvantizacije smanjio se broj potrebnih bitova za prikaz DCT koeficijenata, što dodatno olakšava daljnje kodiranje.

Nakon kvantiziranja, DC koeficijenti uzastopnih blokova obrađuju se odvojeno od AC koeficijenata. DC koeficijenti obično su jako korelirani pa se kodira samo razlika između DC koeficijenata susjednih blokova. Ovakvo je kodiranje učinkovito jer DC koeficijent nosi većinu energije slike.

Nad AC koeficijentima provodi se cik-cak analiziranje, Slika 2.4, koje omogućava pretvorbu dvodimenzijanskog bloka podataka u jednodimenzijanski niz. Cik-cak analiziranje olakšava daljnje entropijsko kodiranje smještanjem niskofrekvencijskih komponenata (koje općenito imaju veće vrijednosti) ispred visokofrekvencijskih. U dobivenom nizu AC koeficijenata više frekvencije slijede jedna iza druge što je povoljno za daljnje kodiranje jer su njihove vrijednosti nule. Prvi element u svakom bloku uvijek je kvantizirani DC koeficijent, slijede kvantizirani AC koeficijenti različiti od nule, a zatim niz kvantiziranih AC koeficijenata jednakih nuli.

Nakon provedenog transformacijskog kodiranja i cik-cak analiziranja svih blokova slike dobije se onoliko jednodimenzijanskih vektora koliko ima blokova u slici.

Na kraju dolazi do kodiranja entropije. Ovim postupkom postiže se dodatna kompresija bez gubitaka. Kodiraju se kvantizirani DCT koeficijenati prema njihovim statističkim značajkama. Moguće je koristiti jedan od dvaju postupaka entropijskog kodiranja, Huffmanovo kodiranje i aritmetičko kodiranje. Ako se koristi Huffmanovo kodiranje, koder mora imati Huffmanove kodne tablice koje moraju biti unaprijed definirane i poznate i na mjestu kodiranja i na mjestu

dekodiranja. Mogu se koristiti standardne tablice za određenu primjenu, ili tablice izračunate za danu sliku, tj. one izračunate iz statističkih podataka slike prije entropijskog kodiranja. Aritmetičko kodiranje ne koristi tablice kao ulazni parametar u koder, već se prilagođava statistici slike u tijeku kodiranja. Aritmetičko kodiranje daje uglavnom 5-10% bolju kompresiju od Huffmanovog, ali je zbog kompleksnosti nepovoljnije. Huffmanov je algoritam besplatan dok je za korištenje aritmetičkog algoritma potrebno otkupiti licencu. Niz podataka koji se entropijski kodira više ne predstavlja zasebno vrijednosti DCT koeficijenata već niz binarnih znamenki, koje među sobom nisu više odijeljene.

Omogućuje stupanj kompresije do 24:1 bez vidljivog gubitka kvalitete. Dolazi do nekoliko vrsta degradacije rekonstruirane slike u odnosu na izvornu sliku. Zbog eliminacije visokofrekventnih DCT koeficijenata dolazi do gubitka detalja. Posljedica grube kvantizacije očituje se pojavom zrnaste strukture na površinama relativno jednolike osvjetljenosti. Pri većim stupnjevima kompresije podjela slike na blokove i uklanjanje previše visokofrekvencijskih koeficijenata izaziva pojavu vidljivih granica između blokova na rekonstruiranoj slici na koju je oko veoma osjetljivo.

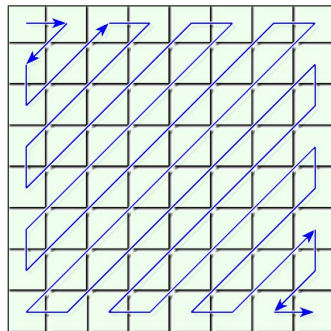
Dekodiranje se vrši obrnutim redoslijedom. Entropijski dekodek rekonstruira kvantizirane DCT koeficijente. Potrebno je izvršiti inverzni postupak kvantizaciji, tj. kvantizirani DCT koeficijent množi se s odgovarajućim koeficijentom kvantiziranja

$$\tilde{f}(u, v) = s(u, v)q(u, v). \quad (2.2)$$

Zatim IDCT transformacija iz 64 DCT koeficijenta rekonstruira izvorni blok 8×8 .

Ako bi se DCT i IDCT izračunala u beskonačnoj točnosti i postupak kompresije provodio bez kvantizacije, rekonstruirani 8×8 blok bio bi jednak izvornom bloku.

Kodiranje slike u boji, za razliku od monokromatske slike, prije prethodno objašnjenog sekvencijalnog kodiranja, mora, izvršiti transformaciju iz RGB modela boja u YC_bC_r model. YC_bC_r predodžba je boja koja odvaja osvjetljenost



Slika 2.4: Cik-cak analiziranje.

Y od kromatskih kanala Cb i Cr. Ova transformacija ne daje gubitke. Prema preporuci ITU-T BT. 601 pretvorba je opisana izrazima

$$E_Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B \quad (2.3)$$

$$E_CR = 0.5R - 0.42G - 0.08B \quad (2.4)$$

$$E_CB = -0.17R - 0.33G + 0.5B. \quad (2.5)$$

Nakon toga vrši se poduzorkovanje kroma kanala kojim se smanjuje određena količina informacije boje, koja ovisi o sustavu poduzorkovanja. Poduzorkovanje je moguće provesti zbog toga što je ljudski vizualni sustav tolerantniji na prostorne nepreciznosti kroma kanala Cb i Cr nego luma kanala Y. Poduzorkovanje kroma kanala Cb i Cr faktorom 2 u svakom smjeru ishoduje kompresijom s gubicima dobre kvalitete. Ostali koraci su kao i za monokromatsku sliku uz razliku što se primijenjuju za sve YCbCr kanale.

Za progresivni DCT model, blokovi veličine 8×8 također se obično kodiraju istim redoslijedom, ali višestrukim čitanjima kroz sliku. Memorijski međuspremnik koeficijenta veličine slike dodaje se između kvantizatora i entropijskog kodera. Svaki blok transformira se DCT transformacijom unaprijed i kvantizira. Kvantizirani DCT koeficijenti prvo se pohranjuju u međuspremnik. U svakom od višestrukih čitanja, kvantizirani DCT koeficijenti djelomično se kodiraju spektralnom selekcijom ili sukcesivnom aproksimacijom. Kod spektralne selekcije, kvantizirani DCT koeficijenti dijele se u višestruke spektralne pojase prema cik-cak redoslijedu. Najprije se pošalje DC komponenta i nekoliko prvih AC komponenti, potom se šalju ostale AC komponente. Kod sukcesivne aproksimacije, zadani broj najvažnijih bitova kvantiziranih koeficijenata kodira se tijekom prvog čitanja, zatim se u narednim čitanjima kodiraju manje značajni bitovi. Svakim sljedećim čitanjem poboljšava se točnost koeficijenata za jedan bit dok se ne postigne puna točnost. U praksi se šalju izrazito kvantizirani koeficijenti i onda razlika tako kvantiziranih koeficijenata i koeficijenata s finijim korakom kvantizacije.

U hijerarhijskom modu koristi se piramidalni pristup računanju DCT koeficijenata na višerezolucijski način. Slika se prostorno poduzorkuje u piramidu s više slojeva i kodira kao niz okvira pri više rezolucija. Inačicama nižih rezolucija može se pristupiti bez prethodne dekompresije slike pri punoj rezoluciji. Ovi okviri daju referentne komponente rekonstrukcije koje su obično potrebne za predikciju u sljedećim okvirima. Osim za prvi okvir date komponente, diferencijalni okviri kodiraju razliku između izvornih komponenti referentno rekonstruiranih komponenti. Kodiranje razlika može se vršiti isključivo putem procesa na osnovi DCT transformacije, i to isključivo procesa bez gubitka, ili procesa na osnovi DCT transformacije sa završnim procesom bez gubitka za svaku komponentu. Poduzorkovanje i naduzorkovanje može se koristiti za dobivanje piramide prostornih rezolucija. Druga je mogućnost da se hijerarhijski mod koristi za poboljšanje kvalitete rekonstruiranih komponenti pri određenoj prostornoj rezoluciji. Dobar je za gledanje slika na zaslonima s malom rezolucijom.

JPEG nudi izvrstan omjer stupnja kompresije i izobličenja pri srednjim i malim stupnjevima kompresije slike, ali pri velikim stupnjevima kompresije slike ispod 0.25 bpp, izobličenje postaje neprihvatljivo. Postoji nedostatak otpornosti na pogreške bita u komprimiranoj slici. JPEG je optimiziran za prirodne slike te nema dobar učinak u području računalno stvorenih slika. Pokazuje slab učinak i u složenim dokumentima koji se sastoje od teksta i slike.

2.2 Standard JPEG 2000

Unutar već opisane JPEG grupe još od 1997. razvija se nova norma za kompresiju mirnih slika *JPEG 2000*. Oblikovan je kao nasljednik JPEG-a i nije ekstenzija JPEG-a. U prosincu 2000. godine JPEG 2000 Part 1 (Dio1) usvojen je kao međunarodna norma za kompresiju mirnih slika. Službeni naziv norme je ISO/IEC IS 15444-1:2000. Preporuka ITU-T BT. T.800 također sadrži novi JPEG 2000 standard. U daljnjem tekstu pod JPEG 2000 misli se na JPEG 2000 - Dio 1, osim ako nije drugačije navedeno.

Struktura JPEG 2000 norme predstavljena je u [23], radi se o dobrom istraživanju usporedbi učinka i složenosti između postojećih normi. Znanstvena pozadina na kojoj se JPEG 2000 temelji izložena je u [83].

Uglavnom se zasniva na *diskretnoj wavelet transformaciji (DWT)* umjesto DCT transformacije. Daje bolju kvalitetu od JPEG formata pri visokim stupnjevima kompresija te ima dodatne mogućnosti (meta-podatci, progresivni prijenos slike). Najuočljivija je prednost eliminacija vidljivosti kontura blokova na slici u odnosu na JPEG standard. JPEG 2000 konstruira se u svrhu ispunjavanja zahtjeva raznih aplikacija, npr. Internet, faksimil u boji, ispis, skeniranje, digitalna fotografija, daljinsko istraživanje, mobilne aplikacije, medicinske slike, digitalne knjižnice itd. Dosad se nije često koristio zbog manjka besplatnog softvera za kodiranje.

JPEG 2000 temelji se na diskretnoj wavelet transformaciji, skalarnoj kvantizaciji, kontekstnom modeliranju, adaptivnom aritmetičkom kodiranju i postkompresijskoj alokaciji brzine bita (eng. *post-compression rate allocation*). Glavna svrha wavelet analize dobivanje je različitih aproksimacija slike pri različitim razinama rezolucije. Učinkovitost je kompresije poboljšana zahvaljujući dobrom sažimanju energije i mogućnosti dekomprimiranja slike na većoj skali DWT.

Unutar jedinstvenog okvira kodiranja postoji učinkovita kompresija s i bez gubitka. Kompresija bez gubitka osigurava se tijekom progresivnog dekodiranja. Posljedica DWT transformacije prednosti su progresivnog prijenosa po kvaliteti, rezoluciji, komponentama, ili po prostornoj lokalizaciji. Moguće je rekonstruirati slike iz različitih dekompozicija i točnost elemenata slike, prema želji i potrebi, za različite ciljeve. JPEG 2000 nudi vrlo dobar učinak pri velikim stupnjevima kompresije slike (npr., ispod 0.25 bpp za vrlo detaljne crno-bijele slike).

U odnosu na JPEG postoji robusnost na prisutnost pogrešaka bita. JPEG

2000 posjeduje iznimno fleksibilnu strukturu tijeka bitova. Dijelovi kodnog tijeka mogu biti važniji od drugih pri određivanju kvalitete dekodirane slike. Područja interesa uvode se za dijelove slike koji su važniji i stoga zahtijevaju bolju kvalitetu i manju distorziju nego ostatak slike. Pravilna konstrukcija kodiranog tijeka podataka može pomoći sustavima za ispravljanje pogrešaka pri izbjegavanju katastrofalnih propusta u dekodiranju.

EBCOT kodiranje [20] daje umetnuti tijek podataka čime se omogućuje sukcesivno izoštravanje rekonstruirane slike sve dok se ne postigne puna kvaliteta s time da je moguće u svakom trenutku prekinuti prijam bitova, a da se slika još može rekonstruirati. Takav način kodiranja omogućuje progresivan prijenos i PSNR skalabilnost.

JPEG 2000 omogućuje veliku fleksibilnost u organizaciji tijeka podataka omogućujući slučajan pristup, ROI kodiranje, skalabilnost. To je omogućeno velikim brojem različitih struktura koje se javljaju u tijeku kodiranja. Slika se dijeli u blokove, rezolucijske razine, potpojaseve, kodirajuće blokove. Na taj je način moguće pristupiti različitim dijelovima slike (putem blokova), različitom frekvencijskom sadržaju slike (kroz potpojaseve), prikazati sliku na različitim rezolucijama (kroz rezolucijske razine), pristupiti prostorno-frekvencijski najmanjem dijelu slike (putem neovisnih kodirajućih blokova). Za oblikovanje tijeka podataka JPEG 2000 omogućuje još tri strukture; slojeve kvalitete (eng. *quality layers*), paketne particije (eng. *packet partition or precinct*) i pakete (eng. *packet*). Paketne su particije također prostorno-frekvencijske strukture. JPEG 2000 oblikuje tijek podataka slažući komprimirani tijek podataka iz kodirajućih blokova u pakete i slojeve kvalitete.

Kodiranje područja od interesa (eng. *region of interest coding (ROI)*) rabi se kod primjena gdje je dio sadržaja slike važniji od ostalog. Najjednostavniji je primjer slika s objektom i pozadinom iza objekta. Obično pozadina nije toliko važna, već je važan objekt. ROI kodiranje ima zadatak da u postupku kodiranja izdvoji objekt i označi ga važnim te ga kodira višom kvalitetom ili bez gubitka kvalitete (ako se koristi reverzibilna transformacija). ROI kodiranje provodi se u sklopu kvantizacije i kodiranja bitovnih ravnina. Koeficijenti koji opisuju područje od interesa zovu se ROI koeficijenti, a preostali se zovu pozadinski (eng. *background*) koeficijenti.

Skalirajuća metoda temelji se na pomicanju bitova (eng. *upsampling*) kvantiziranih koeficijenata tako da oni dođu u bitovne ravnine više važnosti. Moguće je i bitove pozadinskih koeficijenata pomicati prema manjim bitovnim ravninama (eng. *downsampling*). Bitovi vezani uz ROI područje moraju biti smješteni u pripadnoj bitovnoj ravnini prije pozadinskih bitova. Na taj se način prilikom rekonstrukcije slike prvo rekonstruira ROI područje. Ukoliko je komprimirani tijek podataka prekinut na nekoj bitovnoj ravnini, ROI područje će biti kvalitetnije prikazano od ostatka slike.

Standard se sastoji od pet osnovnih koraka koji se vrše uzastopno u algoritmu: predobrada, podjela u blokove, transformacija, kvantizacija, kodiranje.

Predobrada je potrebna za slike s više komponentata. Za slike u boji postoji transformacija višestrukih komponenti boje koja transformira slike iz prostora RGB boja u drugi prostor boja. Dva su moguća izbora: ireverzibilna transformacija boje (ICT) koja koristi prostor boja YCbCr i reverzibilna transformacija boje (RCT) koja koristi modificirani prostor boja YUV. Transformacija boje je opcionalna i nakon transformacije krominantnih komponentata nastali signali se zasebno kodiraju u odvojenim JPEG 2000 koderima. Ukoliko se koristi ireverzibilni sustav komponente ne trebaju imati jednak broj bita po elementu slike te mogu biti s predznakom (eng. *signed*) i bez predznaka (eng. *unsigned*). Reverzibilni sustav ima zahtjev da broj bita svake komponente rekonstruirane slike mora biti jednak broju bita odgovarajuće komponente izvorne slike.

Izvorna se slika rastavlja u pravokutne nepreklapajuće blokove (eng. *tiles*). Sliku je potrebno podijeliti u blokove jer u nekim slučajevima slika može biti prevelika u odnosu na količinu slobodne memorije koda. Za razliku od JPEG-a, kod kojeg se slika rastavlja u blokove veličine 8×8 , u JPEG 2000 standardu veličina blokova nije zadana. Blokovi se komprimiraju neovisno, kao da se radi o potpuno odvojenim slikama. Svi blokovi imaju točno iste dimenzije, osim možda onih na desnoj i nižoj granici slike.

Diskretna wavelet transformacija primjenjuje se neovisno na svim blokovima sve do kraja kodiranja. Postupak DWT-a provodi se jednodimenzionalnim DWT po redcima bloka, zatim stupcima bloka. Blok se razlaže u različite razine dekompozicije. Na svakoj razini nalaze se 3 potpojas. Svaki potpojas sadrži DWT koeficijente koji opisuju frekvencijske karakteristike lokalnih područja (ali ne preko čitave komponente-bloka) na blokovskoj komponenti.

U praksi se ne koriste skalirajuće i wavelet funkcije već diskretni skalirajući i wavelet koeficijenti koji opisuju skalirajuće i wavelet digitalne filtre. Filtri koji se koriste u JPEG 2000 normi su tzv. FIR filtri (eng. *finite impulse response*) tj. filtri s konačnim impulsnim odzivom. Koeficijenti FIR filtara biortogonalni su i za razliku od ortogonalnih mogu biti simetrični i ne moraju biti iste dužine. Postoje dvije različite wavelet transformacije: reverzibilna i ireverzibilna. Reverzibilna transformacija pogodna je za kodiranje bez gubitaka, nelinearna je i radi s cjelobrojnim vrijednostima koeficijenata. Ireverzibilna transformacija rabi Daubechies filtre s realnim dekompozicijskim koeficijentima.

Povećanjem broja dekompozicija raste transformacijski dobitak, odnosno efikasnost kodiranja, ali se on brzo asimptotski približava konstantnoj vrijednosti. Već kod pete razine dekompozicije postiže stalnu vrijednost i daljnja dekompozicija smanjuje efikasnost kodiranja. JPEG 2000 omogućuje maksimalno 32 razine dekompozicije. Povećavanjem dubine dekompozicije pada rezolucija odnosno slika je sve grublje aproksimirana. Dekompozicijski i rekonstrukcijski filtri imaju isti odziv odnosno koeficijente, ali u obrnutom redoslijedu.

Nakon transformacije, koeficijenti se kvantiziraju. Kvantizacija koeficijenata operacija je koja daje gubitke, osim ako korisnik ne želi kompresiju bez gubitka u kojem slučaju je korak kvantizacije 1. Zahvaljujući reverzibilnoj wavelet trans-

formaciji, kvantizacija uz zadovoljenje određenih uvjeta može ne unositi gubitke.

Kodiranje. Entropijski koder kodira DWT koeficijente u odnosu na bit plane te vrši aritmetičko kodiranje. Kodiranje se može izvršiti tako da se određena područja od interesa kodiraju uz veću kvalitetu nego pozadina. Usto, markeri se dodaju u bitovni tijek u svrhu otpornosti na pogreške. Ne provodi se skalarna kvantizaciju kao zaseban korak već kao dio EBCOT kodiranja (eng. *Embedded Block Coding with Optimal Truncation*). JPEG 2000 - Dio 1 primjenjuje uniformnu skalarnu kvantizaciju s konstantnom širinom mrtve zone (eng. *dead-zone*) i konstantnom širinom koraka kvantizacije. Na svaki DWT koeficijent (x) primjenjuje se skalarna funkcija $g(x)$ i dobiva se cjelobrojna vrijednost prema izrazu

$$g(x) := \text{sign}(x) \left\lfloor \frac{|x|}{\Delta} \right\rfloor \quad (2.6)$$

gdje je $\text{sign}(x)$ predznak koeficijenta x , Δ predstavlja korak kvantizacije, a $\lfloor x \rfloor$ označava najveći cijeli broj koji nije veći od x . Wavelet koeficijenti koji se nalaze unutar intervala $[-\Delta, \Delta]$ kvantiziraju se na vrijednost nulu. Zato se taj interval zove mrtva zona. Širina mrtve zone je 2Δ , a širina ostalih intervala je Δ . Veličina koraka kvantizacije računa se prema sljedećem izrazu

$$\Delta_b := 2^{R_b - \epsilon_b} \left(1 + \frac{\mu_b}{2^{11}} \right) \quad (2.7)$$

gdje je R_b dinamički opseg wavelet koeficijenata ovisan o broju bitova izvornog bloka i vrsti wavelet transformacije. μ_b je mantisa, a ϵ_b je eksponent. Ako je $\mu_b = 0$ i $R_b = \epsilon_b$ korak kvantizacije je 1, a širina mrtve zone je dva.

Na kraju se podatci upisuju u završni kodirani tijek podataka. Kodirani tijek podataka sastavljen je od niza oznaka (eng. *markers*) i paketa. Oznake služe za obilježavanje važnih informacija neophodnih za ispravno dekodiranje. Kodirani tijek podataka sastoji se od glavnog zaglavlja, zaglavlja za blokove slike, informacijskog dijela za blokove slike i glavnog dijela. Glavno zaglavlje na početku opisuje izvornu sliku te različite načine rastavljanja i kodiranja koji se koriste za lociranje, izvlačenje, dekodiranje i obnavljanje slike uz željenu rezoluciju, točnost, područje od interesa i druge značajke. Opcionalni format datoteke opisuje značenje slike i njezinih komponenti u kontekstu primjene. Još jednom, dekodirani čini obrnuto od koda.

Odabir odgovarajuće komprimirane domene zapravo ovisi o primjeni. Kvaliteta slike u JPEG 2000 formatu, pri datom stupnjavu kompresije, ponajviše ovisi o postupku alokacije provedenom na strani koda. Takav postupak važi za entropijski kodirane indekse kvantizacije i favorizira skupine indeksa kvantizacije tj., kodne blokove nudeći u zamjenu najbolji omjer stupnjeva kompresije i izobličenja. Međutim, ovo ne mora odgovarati najzanimljivijem dijelu slike, iz točke gledišta promatrača.

Standard pruža načine za definiranje područja interesa koja postaju najvažnija tijekom postupka kodiranja kako bi iskazivali bolju kvalitetu od ostatka slike,

odnosno pozadine u bilo kojem trenutku dekodiranja. Ova značajka primjenjuje se u kvantiziranoj wavelet domeni ili na razini bitovnog tijrka, ali njezini parametri općenito nisu dovoljno eksplicitni za standardnog krajnjeg korisnika te samo pružaju mogućnost grubog upravljanja kvalitetom dekodiranog područja interesa.

JPEG 2000, kao i klasični JPEG standard, ima dva glavna nedostatka: nije translacijski invarijantan i ne modificira šum slike na koherentan način (wavelet outliers - odstupanja). Kvaliteta JPEG 2000 opada kod sažimanja slika s niskom dubinom boja, kao što su grafičke slike. Kodirani podatci koji sadrže jedan ili par slojeva kvalitete već pokazuju manjak kvalitete ili skalabilnosti dekompozicija. Ovaj problem predstavlja znatno ograničenje s obzirom na uporabu u kompresiji bez gubitaka kod binarnih slika. Na vrlo visokim stupnjevima kompresije postaje vidljiva kontura blokova u rekonstruiranoj slici. Još jedan problem JPEG 2000 jest da je izrazito računski intenzivan što nije dobro za digitalne kamere s ograničenom moći obrade.

Poglavlje 3

Trokutno kodiranje pomoću binarnog stabla

Istražit ćemo metodu koja omogućava koristan prikaz slike s raspršenim podacima. U svrhu kompresije nije dovoljna dobra kvaliteta interpolacije ako je rezultirajući skup slika u obliku podataka preskup za kodiranje. Ovaj zahtjev vodi do sheme za kompresiju i dekompresiju slike koja se oslanja na adaptivno prorjeđivanje slikovnih podataka pomoću triangulacije iz *trokutnog kodiranja pomoću binarnog stabla* (eng. *b-tree triangular coding (BTTC)*). U ovom poglavlju dan je pregled alata za stvaranje korisnog prikaza vrlo malog broja točaka.

Razmatrano je trokutno kodiranje pomoću binarnog stabla autora Distasi et al. [31], budući da je relativno jednostavno i omogućuje učinkovito kodiranje vrlo malog broja podataka. On služi kao početna točka za novu metodu kompresije.

3.1 Linearna interpolacija

Osnovna zamisao interpolacije konstrukcija je novih podataka unutar poznatih podataka. Konstruira se funkcija koja mora točno prolaziti danim podacima. Postoji veliki broj metoda interpolacije koje mogu biti podijeljene prema interpolacijskoj funkciji na linearne i nelinearne metode. Linearna interpolacija ima prednost zbog brzine i jednostavnosti implementacije funkcije interpoliranja uz dobivanje zadovoljavajuće kvalitete.

Pretpostavimo kako je T trokut s vrhovima $V_1 = (i_1, j_1)$, $V_2 = (i_2, j_2)$, $V_3 = (i_3, j_3)$ neka su $s_1 = f(i_1, j_1)$, $s_2 = f(i_2, j_2)$, $s_3 = f(i_3, j_3)$ pripadne razine svjetline. Nepoznate razine svjetline unutar trokuta aproksimiramo funkcijom

$$u(i, j) = s_1 + \alpha(s_2 - s_1) + \beta(s_3 - s_1) \quad (3.1)$$

gdje su α i β težinski koeficijenti definirani sljedećim relacijama

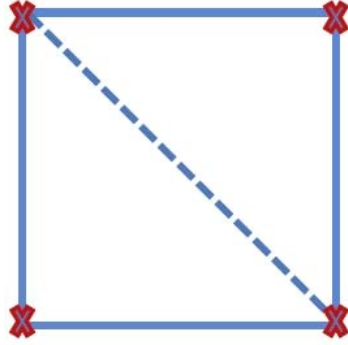
$$\alpha = \frac{(i - i_1)(j_3 - j_1) - (j - j_1)(i_3 - i_1)}{(i_2 - i_1)(j_3 - j_1) - (j_2 - j_1)(i_3 - i_1)} \quad (3.2)$$

$$\beta = \frac{(i_2 - i_1)(j_3 - j_1) - (j_2 - j_1)(i - i_1)}{(i_2 - i_1)(j_3 - j_1) - (j_2 - j_1)(i_3 - i_1)}. \quad (3.3)$$

3.2 Stvaranje raspršenih točaka interpolacije

Kod trokutnog kodiranja B-stabla slika se razlaže u određeni broj trokutnih područja tako da se ona unutar svakog područja može u zadovoljavajućoj kvaliteti obnoviti interpolacijom vrhova. U ovom slučaju sva su područja jednakokračni pravokutni trokuti. Zatim se razlaganje u trokute pohranjuje u strukturi binarnog stabla.

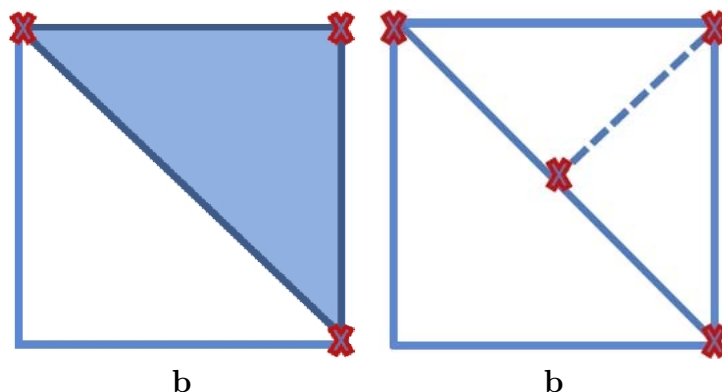
Kako bismo opisali postupak kompresije, pretpostavimo da imamo sliku $f = (v_{i,j})$ veličine $(2^m + 1) \times (2^m + 1)$. Manje slike treba na prikladan način ispuniti do te veličine. U početku se slika pomoću jedne od svojih dijagonala podijeli u dva trokuta. Četiri kuta slike $(1, 1)$, $(1, 2^m + 1)$, $(2^m + 1, 1)$ i $(2^m + 1, 2^m + 1)$ vrhovi su tih dvaju trokuta. Ilustracija na slici 3.1.



Slika 3.1: Početni korak BTTC metode.

Kako bi se usavršila ova početna konfiguracija, aproksimacija $(u_{i,j})$ slike $(f_{i,j})$ računa se korištenjem samo razina svjetline vrhova i interpolacijom preostalih dijelova slike. Ilustracija na slici 3.2.

Razmatran je najjednostavniji postupak interpolacije, tj. linearna interpolacija unutar svakog trokuta. Ako pogreška $e_{i,j} := |u_{i,j} - f_{i,j}|$ zadovoljava $e_{i,j} \leq \varepsilon$ za sve elemente slike (i, j) , s danim parametrom praga pogreške $\varepsilon > 0$, prikaz pomoću trokuta smatra se dovoljno finim. U suprotnom, za svaki element slike (i, j) za koji vrijedi $e_{i,j} > \varepsilon$ trokut koji sadrži (i, j) dijeli se u dva slična trokuta spuštanjem visine na njegovu hipotenuzu. Središte hipotenuze stoga postaje dodatni vrh u prikazu. Ponovnim izračunavanjem grješaka aproksimacije unutar



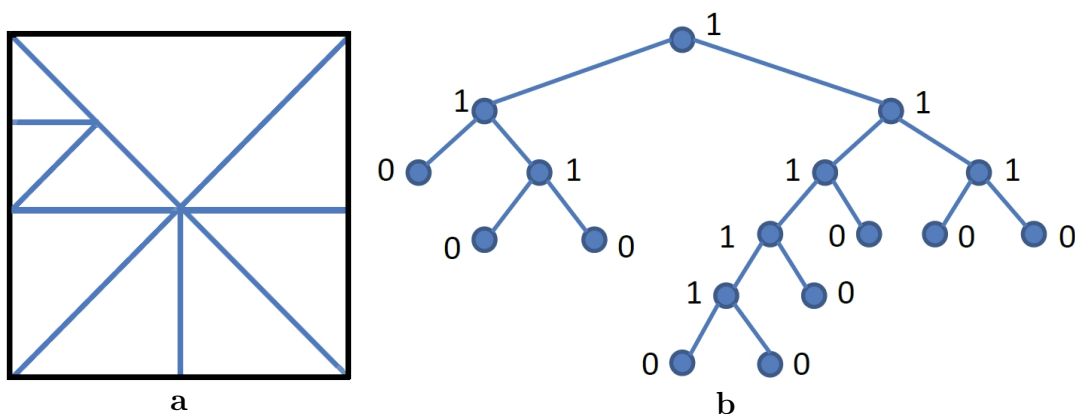
Slika 3.2: Korak odlučivanja o dijeljenju. (a) Rekonstrukcija unutrašnjost trokuta linearnom interpolacijom. (b) Dijeljenje nezadovoljavajuće rekonstruiranih trokuta.

novih manjih trokuta utvrđuje se treba li te trokute ponovno razdijeliti, itd. Budući da je pogreška aproksimacije u vrhovima jednaka nuli, trokuti s katetama duljine 1 dalje se ne dijele, što jamči završetak rekurzivnog dijeljenja. Nadalje, vrhovi tijekom postupka imaju cjelobrojne koordinate. Maska vrhova veličinom jednaka slici generira se tijekom triangulacije kako bi se označilo koji su elementi slike vrhovi.

Jedna točka za koju je potrebno dodatno promišljanje rukovanje je elementima slike koji su smješteni na stranicama trokuta tijekom postupka dijeljenja. Ako se u takvom elementu slike krši granica pogreške, za našu je metodu kompresije i dekompresije dovoljno podijeliti jedan od dvaju susjednih trokuta. Time se omogućava značajno smanjenje broja trokuta budući da se u područjima s finim detaljima pojavljuje veliki broj malih trokuta, a položaj puno elemenata slike tada je na stranicama.

3.3 Kodiranje binarnog stabla

Kako bi se učinkovito pohranila triangulacija, primjećujemo da hijerarhijsko dijeljenje trokuta dovodi do strukture binarnog stabla. Svaki trokut koji nastane tijekom postupka dijeljenja prikazuje se pomoću čvora dok listovi odgovaraju onim trokutima koji se dalje ne dijele. Kada se trokut dijeli, njegova dva podtrokuta postaju djeca tog čvora. Za pohranu strukture stabla radi se obilazak stabla te se pohranjuje jedan bit po čvoru: 1 za čvor koji ima djecu i 0 za list. Jednako je moguć preorder ili level-order obilazak. Primijetimo da je maska vrhova potpuno određena strukturom stabla. Dodatni prostor za pohranu stabla prema se globalnim mjerenjem najmanje i najveće dubine stabla. Odgovarajući bitovi čuvaju se samo za čvorove na međurazinama. Ilustracija na slici 3.3.



Slika 3.3: (a) Rastav slike na trokutna područja, (b) pripadno binarno stablo.

Za kodiranje razina svjetline u svim vrhovima prvo izvršimo cik-cak obilazak prorjeđene slike koja je stvorena pomoću strukture binarnog stabla i pohranimo ju u niz razina svjetline. Zatim se taj niz komprimira primjenom Huffmanovog kodiranja [47], prefiksnog koda promjenjive duljine bez gubitka koji pridružuje kraće kodove učestalijim znakovima. Njegova struktura koda prikazuje se također pomoću binarnog stabla.

Naš cjelokupni kodirani format slike tada glasi:

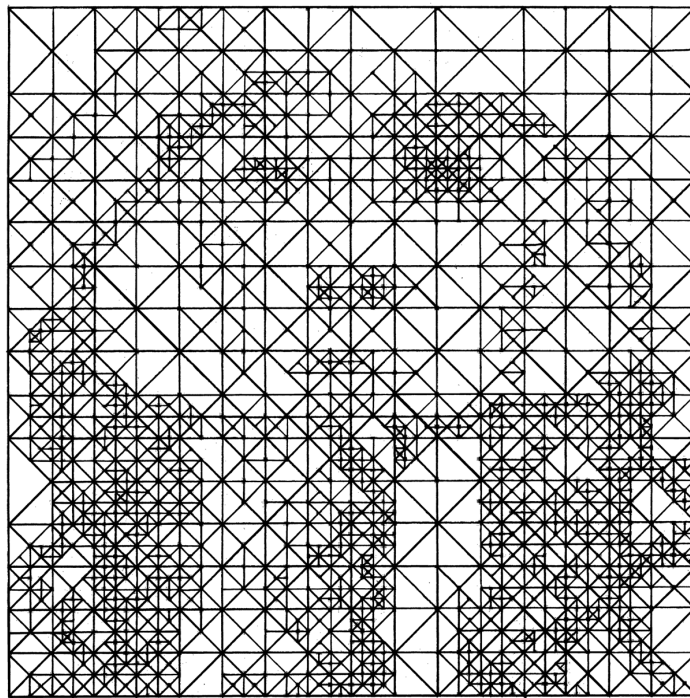
- veličina slike (4 bajta),
- najmanja i najveća dubina binarnog stabla (zajedno 2 bajta),
- niz binarnih znakova koji kodira strukturu binarnog stabla (1 bit za svaki čvor između najmanje i najveće dubine, dopunjen nulama do sljedeće granice bajta),
- prva razina svjetline u nizu vrijednosti razina svjetline (1 bajt),
- najmanja i najveća dubina Huffmanovog binarnog stabla (2 bajta),
- niz binarnih znakova za Huffmanovo binarno stablo (1 bit za svaki čvor između najmanje i najveće dubine, nadopunjen nulama do sljedeće granice bajta),
- Huffmanov rječnik (manje od 256 bajtova),
- niz razina svjetline kodiran Huffmanovim kodom.

Također, razmatrali smo aritmetičko kodiranje [76] kao alternativu Huffmanovom kodiranju koje se bolje prilagođava distribuciji sivih tonova. Međutim, u našim eksperimentima na ovaj način nije postignuta bolja kompresija niza razina svjetline. Za veličine slike koje smo ovdje koristili, smanjenje duljine samog kodiranog niza kompenzirano je povećanjem veličine rječnika kodiranja.

3.4 Dekodiranje binarnog stabla

Dekompresija se odvija u dvama koracima. U prvom koraku maska vrhova obnavlja se iz prikaza binarnog stabla, a pohranjene razine svjetline smještene su na prikladne položaje elemenata slike kako bi mogle dati prorjeđenu sliku. Kako bi se obnovila maska vrhova, stablo se generira prema istom redoslijedu kako je i pohranjeno. Uz generirajuće čvorove, u masci vrhova izračunavaju se i obilježavaju položaji vrhova. Drugi korak sastoji se od interpolacije slike, gdje maska vrhova postaje maska interpolacije. Na slici 3.4 prikazano je razlaganje izvorne slike *trui* na trokutna područja za kompresiju od 0.2 bita po elementu slike. U BTTC shemi autora Distasi et al. [31], sa svakim trokutom koristi se linearna interpolacija.

U nastavku ćemo kompletnu tehniku kodiranja i dekodiranja autora Distasi et al. označiti s **BTTC(L)-L**. Ovo nazivlje obilježava metodu kodiranja B-stabla gdje je inkorporirana linearna interpolacija i koja se dekodira pomoću linearne interpolacije.



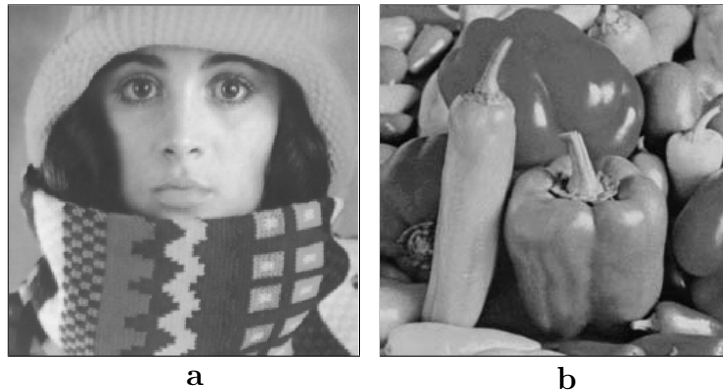
Slika 3.4: Triangulacija domene za *trui* na 0.2 bita po elementu slike.

3.5 Predobrada rekvantizacijom

Kako bi se dalje poboljšalo BTTC, uveli smo modifikaciju koja se nije koristila u izvornom članku autora Distasi et al. [31]: Predobradili smo sliku pomoću koraka rekvantizacije (s gubitkom) koji je smanjio broj razina svjetline s 256 na 64. U ovom slučaju rekvantizacija je postupak preslikavanja konačnog intervala razina svjetline u jednu kvantiziranu razinu svjetline. Kako se time skraćuju i kodovi razina svjetline, omogućeno je zadržavanje više elemenata slike interpolacije za dani stupanj kompresije. Dobitak vezan uz kvalitetu obnavljanja veći je od gubitka koji je izazvan većom pogreškom kvantizacije. Metodu s predobradom rekvantizacijom na 64 razine svjetline, koju slijedi trokutno kodiranje pomoću binarnog stabla, gdje je inkorporirana linearna interpolacija, i koja se dekodira pomoću linearne interpolacije, u nastavku ćemo označiti s **Q64+BTTC(L)-L**.

3.6 Eksperimenti

Istražimo učinke trokutnog kodiranja pomoću binarnog stabla. Odabrane su nekomprimirane standardne testne slike *trui* i *peppers* u *pgm* formatu, prikazane na slici 3.5. Slike su veličine 257×257 elemenata slike, a odabrane su zbog svojih obilježja. Testna slika *trui*, slika 3.5 (a) sadrži mješavinu detalja, jednolikih ploha, sjenčanja i ljudsko lice što je dobro za provjeru kvalitete kompresije. Uobičajena testna slika *peppers*, slika 3.5 (b) zanimljiva je jer većina su elemenata slike u nekoj okolini slični i nema velike razlike u intenzitetu svjetline.

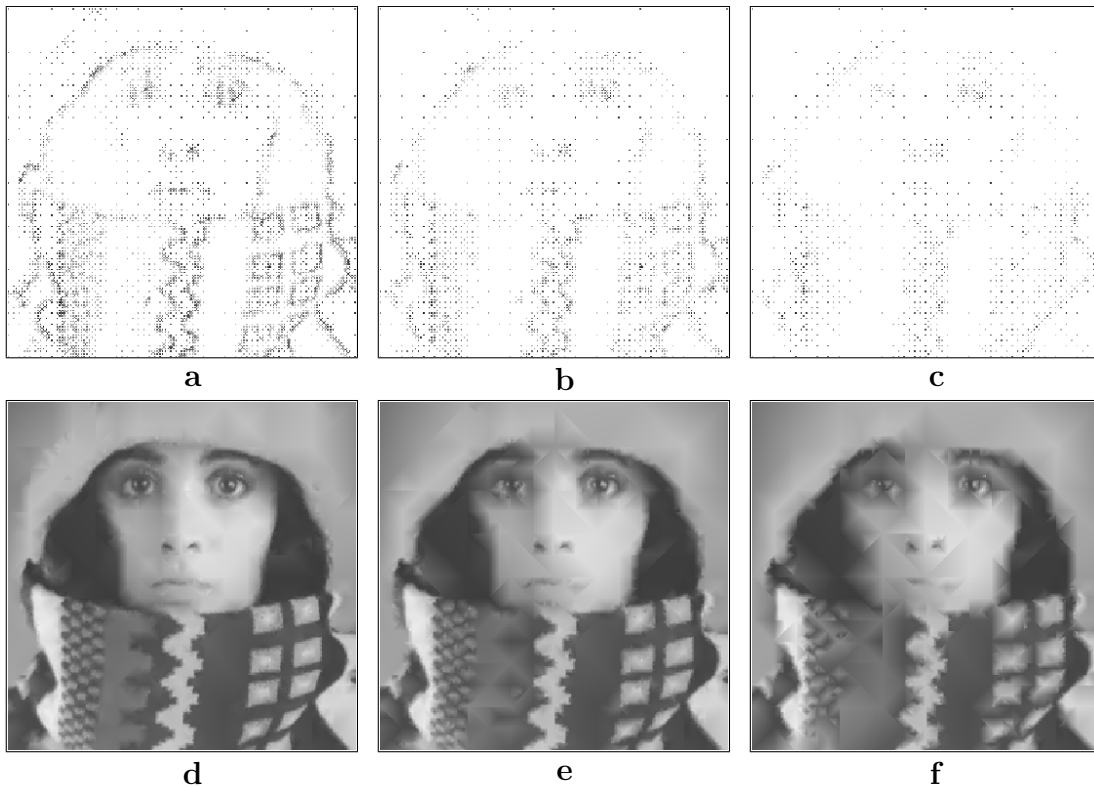


Slika 3.5: Testne slike, 257×257 piksela. (a) *trui*. (b) *peppers*.

Uspoređuje se BTTC-L i Q64+BTTC-L metoda za različite kompresije. U tu svrhu, odabran je parametar praga pogreške ε tako da se postigne stupanj kompresije od 0.8, 0.4 i 0.2 bita po elementu slike (bpp). U usporedbi sa standardnim kodiranjem koje koristi 1 bajt po elementu slike, ovo se svodi na omjere kompresije od 10:1, 20:1 i 40:1. Nakon kompresije, slike su rekonstruirane i pohranjene

u *pgm* formatu kako bi i vizualna i objektivna usporedba kvalitete bila moguća.

Slika 3.6 pokazuju verzije testne slike *trui* komprimirane pomoću BTTC(L) metode. U prvom redu, s lijeva na desno, prikazano je adaptivno prorjeđivanje *trui*, koristeći BTTC(L) s kompresijom 0.8 bpp, 0.4 bpp, 0.2 bpp. Prikazani su kodirani elementi slike s njihovim odgovarajućim razinama svjetline. Za postizanje kompresije od 0.8 bpp korišten je parametar praga pogreške $\varepsilon = 16.7$, na taj način preostalo je 4896 elemenata slike koji su kodirani i prikazani na slici 3.6 (a). Najviše elemenata slike sačuvano je na rubovima i očima. Za 0.4 bpp parametar praga pogreške je $\varepsilon = 28.5$, a preostalo je 2383 elemenata slike. Na slici 3.6 (b) još uvijek je moguće nazrijeti osnovne konture onoga što slika prikazuje. Korištenjem $\varepsilon = 42.3$ ostvarena je kompresija 0.2 bpp i samo 1207 od 66049 elemenata slike je kodirano. Slika 3.6 (c) prikazuje preostale elemente slike. Na tako velikom stupnju kompresije izgubljene su i osnovne konture, a bez izvorne slike ne može se ni naslutiti što prikazuje slika.

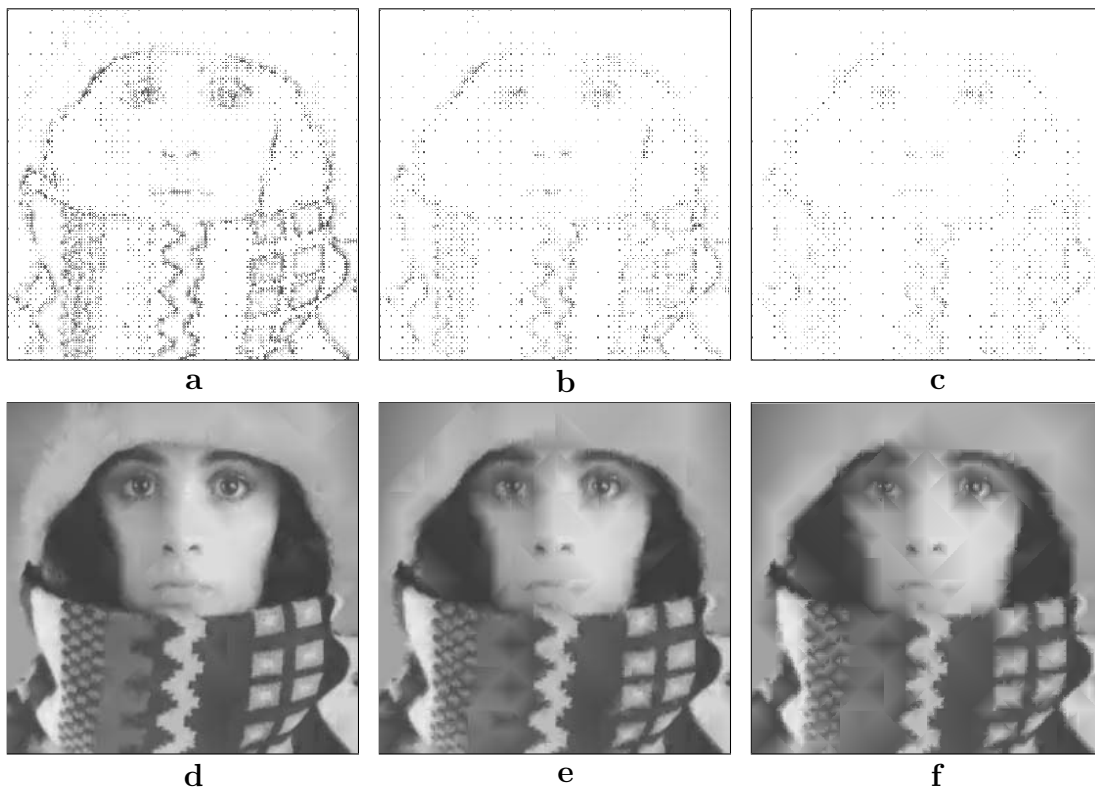


Slika 3.6: **Prvi red, s lijeva na desno:** Adaptivno prorjeđivanje *trui*, koristeći BTTC(L)-L s kompresijom (a) 0.8 bpp, (b) 0.4 bpp, (c) 0.2 bpp. **Drugi red, s lijeva na desno:** Odgovarajuća interpolacija pomoću linearne interpolacije.

Slika 3.6 (d) prikazuje sliku rekonstruiranu pomoću linearne interpolacije iz adaptivno prorjeđene slike na 0.8 bpp. Uočljiva je degradacija u odnosu na

izvornu sliku, izgubljeni su fini detalji, a cijela slika djeluje zamućeno. Slika rekonstruirana linearnom interpolacijom iz adaptivno prorjeđene slike na 0.4 bpp nalazi se u slici 3.6 (e). Slika je izrazito pogoršana, a struktura podjele na trokute postaje vidljiva. Kapa je potpuno stopljena s pozadinom. Strukture na licu, kao što su usta, djelomično su nestale. Slika 3.6 (f) prikazuje sliku rekonstruiranu pomoću linearne interpolacije iz adaptivno prorjeđene slike na 0.2 bpp. Većina je detalja izgubljena, svi dijelovi slike nisu prepoznatljivi. Dijelovi lica, kao što su usta, potpuno su nestali, a oči i nos izgubili su svoju strukturu. Triangulacija je dominantna, a slika ostavlja mutan i nejasan dojam, što ukazuje na nezadovoljavajuću kvalitetu.

Slika 3.7 pokazuje inačice testne slike *trui* komprimirane pomoću Q64+BTTC(L)-L metode. Prikazani su i kodirani elementi slike s njihovim odgovarajućim razinama svjetline i ishod nakon interpolacije raspršenih podataka pomoću linearne interpolacije. Prvi red, s lijeva na desno, prikazuje adaptivno prorjeđivanje koristeći Q64+BTTC(L)-L s kompresijom 0.8 bpp, 0.4 bpp, 0.2 bpp. Za posti-



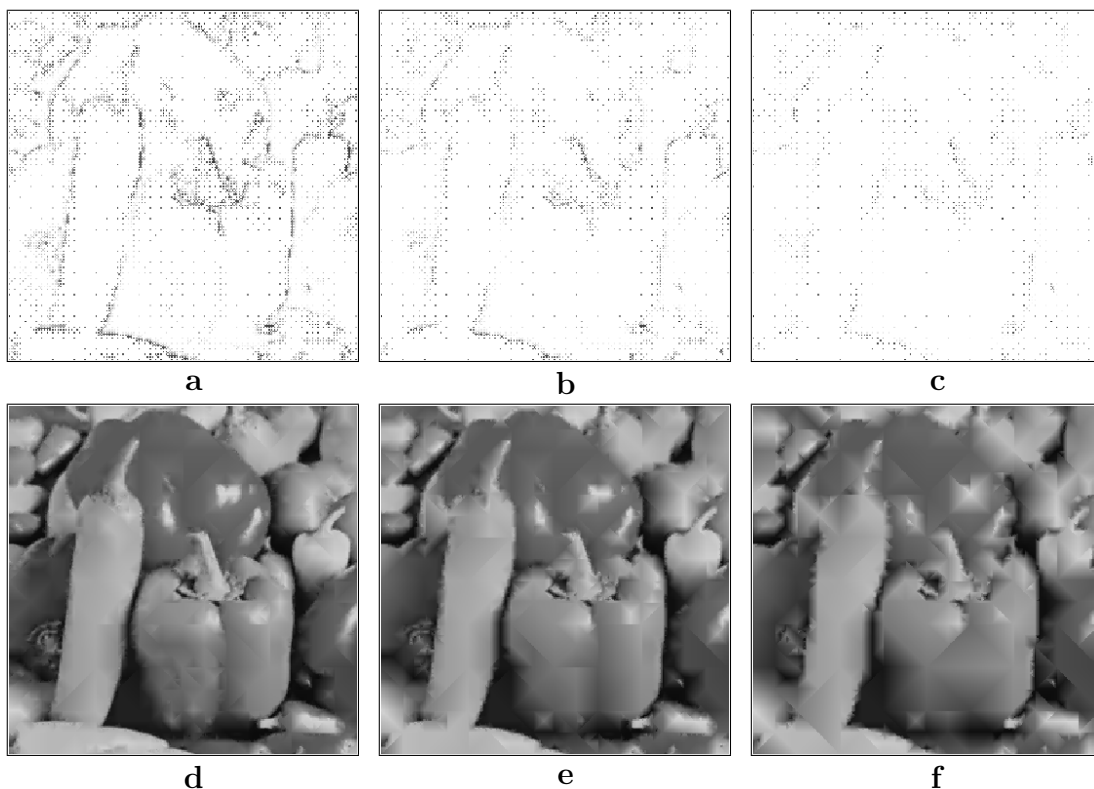
Slika 3.7: **Prvi red, s lijeva na desno:** Adaptivno prorjeđivanje koristeći Q64+BTTC(L)-L s kompresijom (a) 0.8 bpp, (b) 0.4 bpp, (c) 0.2 bpp. **Drugi red, s lijeva na desno:** Odgovarajuća interpolacija pomoću linearne interpolacije.

zanje kompresije od 0.8 bpp korišten je parametar praga pogriješke $\varepsilon = 13.5$, na taj način preostalo je 6636 elemenata slike koji su kodirani. U odnosu na BTTC(L) metodu pohranjeno je 1740 elemenata slike više. Još više elemenata slike sačuvano je na pojedinima dijelovima lica. Izraženiji je donji rub kape i pojedine strukture šala. Za 0.4 bpp parametar praga pogriješke $\varepsilon = 24$, a preostalo je 2931 elemenata slike. Pohranjeno je 548 elemenata slike više od BTTC(L) metode, porazdijeljena slika puno jasnije prikazuje osnovne strukture. Korištenjem $\varepsilon = 37.3$ postignuta je kompresija 0.2 bpp i samo je 1543 elementa slike kodirano. Pohranjeno je 336 elemenata slike više i pohranjeni elementi slike drugačije su raspoređeni, znatno bolje prikazuju obrasce važnijih dijelova slike.

Slika 3.7 (d) prikazuje sliku rekonstruiranu pomoću linearne interpolacije iz adaptivno prorjeđene slike na 0.8 bpp. Primjetan je gubitak finih detalja. Dijelovi kape stapaju se s pozadinom. U odnosu na BTTC(L) metodu rubovi su izraženiji, ali slika i dalje djeluje zamućeno. U drugom redu sredina je rekonstruirana slika pomoću linearne interpolacije iz adaptivno prorjeđene slike na 0.4 bpp. Kao i kod BTTC(L) metode struktura podjele na trokute postaje izražena. Kapa se samo nazire i gubi izvorni oblik. Deformiraju se osnovne strukture lica. Slika 3.7 (f) prikazuje sliku rekonstruiranu pomoću linearne interpolacije iz adaptivno prorjeđene slike na 0.2 bpp. Triangulacija je dominantna i u ovom slučaju, pojedini dijelovi slike bolje su očuvani. Većina je detalja izgubljena, a slika ostavlja mutan i nejasan dojam.

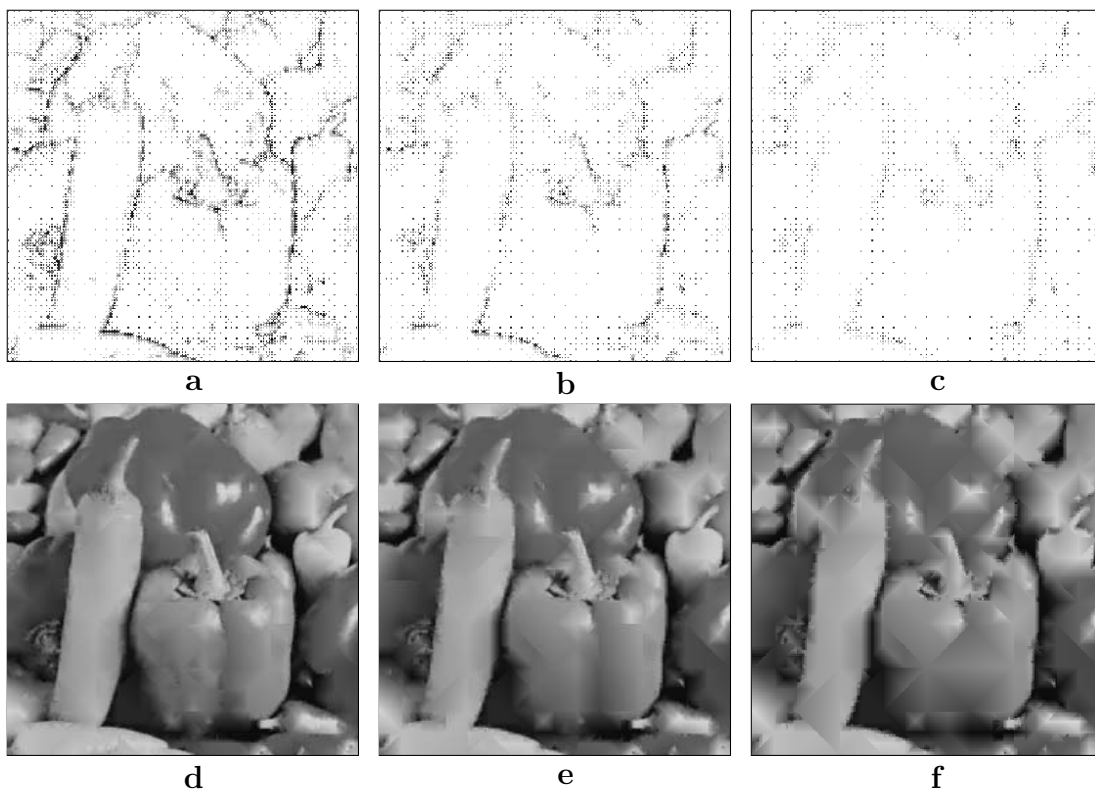
Slika 3.8 pokazuje inačice testne slike *peppers* komprimirane pomoću BTTC(L) metode. Prikazani su i kodirani elementi slike s njihovim odgovarajućim razinama svjetline i ishod nakon interpolacije raspršenih podataka pomoću linearne interpolacije. U prvom redu, s lijeva na desno, prikazano je adaptivno prorjeđivanje *peppers*, koristeći BTTC(L)-L s kompresijom 0.8 bpp, 0.4 bpp, 0.2 bpp tako da su prikazani kodirani elementi slike s njihovim odgovarajućim razinama svjetline. Za postizanje kompresije od 0.8 bpp korišten je parametar praga pogriješke $\varepsilon = 23.7$, na taj način preostalo je 4856 elemenata slike koji su kodirani. Najviše elemenata slike sačuvano je na rubovima. Za 0.4 bpp parametar praga pogriješke $\varepsilon = 37.3$, a preostalo je 2413 elemenata slike. Obrisi objekata u krupnom planu još uvijek se naziru. Korištenjem $\varepsilon = 56$ postignuta je kompresija 0.2 bpp i samo 1184 elementa slike je kodirano. Slika s porazdijeljenim podacima sadrži vrlo mali broj elemenata slike.

Slika 3.8 (d) prikazuje sliku rekonstruiranu pomoću linearne interpolacije iz adaptivno prorjeđene slike na 0.8 bpp. Detalji su sačuvani samo na globalnoj razini, dok su na lokalnoj razini izgubljeni. Na uniformnim dijelovima vidljiva je struktura trokuta. Na slici 3.8 (e) rekonstruirana je slika za kompresiju 0.4 bpp. Slika djeluje zamućeno i triangulacija postaje izraženija. Neki su objekti izgubili oblik do neprepoznatljivosti. Drugi red desno prikazuje sliku rekonstruiranu pomoću linearne interpolacije iz adaptivno prorjeđene slike na 0.2 bpp. Struktura podjele na trokute postaje dominantna do neprepoznatljivosti objekata na slici. Bez uvida u izvornu sliku nije moguće odrediti što slika prikazuje.



Slika 3.8: **Prvi red, s lijeva na desno:** Adaptivno prorjeđivanje *peppers*, koristeći BTTC(L)-L za stupanj kompresije **(a)** 0.8 bpp, **(b)** 0.4 bpp, **(c)** 0.2 bpp. **Drugi red, s lijeva na desno:** Odgovarajuća interpolacija pomoću linearne interpolacije.

Slika 3.9 pokazuje inačice standardne testne slike *peppers* komprimirane pomoću Q64+BTTC(L)-L metode. Prikazani su i kodirani elementi slike s njihovim odgovarajućim razinama svjetline i ishod nakon interpolacije raspršenih podataka pomoću linearne interpolacije. Prvi red, s lijeva na desno, prikazuje adaptivno prorjeđivanje koristeći Q64+BTTC(L)-L s kompresijom 0.8 bpp, 0.4 bpp, 0.2 bpp. Korištenjem parametra praga pogreške $\varepsilon = 19.5$ postignuta je kompresija od 0.8 bpp, na taj način preostalo je 6340 elemenata slike koji su kodirani. U odnosu na BTTC(L) metodu pohranjeno je 1484 elemenata slike više. Rubovi su još bolje očuvani. Za postizanje kompresije 0.4 bpp korišten je parametar praga pogreške $\varepsilon = 31.5$, a preostalo je 3222 elemenata slike što je 809 elemenata slike više. Usporedbom slika s porazdjelnim podacima izraženo je povećanje broj elemenata slike na rubovima. Za kompresiju od 0.2 bpp upotrebljen je $\varepsilon = 49.5$ i samo je 1516 elemenata slike kodirano. U odnosu na BTTC(L) metodu komprimirano je 332 elemenata slike više. Kao i za manje stupnjeve kompresije, povećanje broja elemenata slike najlakše je vidjeti na rubovima objekata i većim



Slika 3.9: **Prvi red, s lijeva na desno:** Adaptivno prorjeđivanje *peppers*, koristeći Q64+BTTC(L)-L za stupanj kompresije **(a)** 0.8 bpp, **(b)** 0.4 bpp, **(c)** 0.2 bpp. **Drugi red, s lijeva na desno:** Odgovarajuća interpolacija pomoću linearne interpolacije.

detaljima koje slika prikazuje.

Drugi red lijevo na slici 3.9 prikazuje sliku rekonstruiranu pomoću linearne interpolacije iz adaptivno prorjeđene slike na 0.8 bpp. Znatno veći broj elemenata slike u slici s porazdijeljenim podacima odrazio se na poboljšanu kvalitetu interpolacije, sačuvano je više detalja. Iako manje izražena trokutna struktura je vidljiva. U drugom redu sredina je rekonstruirana slika pomoću linearne interpolacije iz adaptivno prorjeđene slike na 0.4 bpp. Oni dijelovi slike kod kojih nema značajnih promjena razine svjetline izgubili su oblik ili se stopili s okolinom. Trokutna struktura posebno je izražena na dijelovima gdje se očekuje postupna promjena razine svjetline pa slika ostavlja dojam spljoštenosti. Drugi red lijevo prikazuje sliku rekonstruiranu pomoću linearne interpolacije iz adaptivno prorjeđene slike na 0.2 bpp. Unatoč porazdijeljenoj slici s više elemenata slike, rekonstruirana je slika nezadovoljavajuća. Pažljivim promatranjem i uspoređivanjem moguće je zamijetiti bolju rekonstrukciju dijelova slike, ali slika ostaje negledljiva.

Aritmetička sredina apsolutne vrijednosti pogreške (eng. *average absolute error (AAE)*) između dekodirane slike ($u_{i,j}$) i izvorne slike ($f_{i,j}$) je

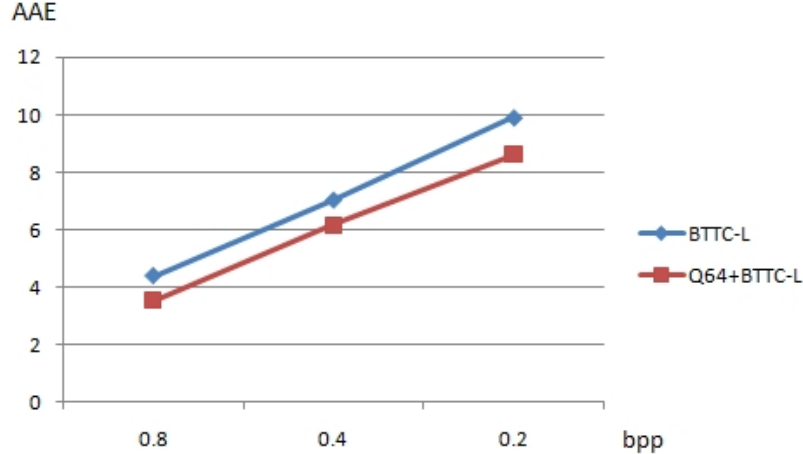
$$AAE(u, v) := \frac{1}{nm} \sum_{i,j} |u_{i,j} - f_{i,j}| \quad (3.4)$$

gdje m označava visinu slike, a n označava širinu slike.

Kvantitativna analiza pogrešaka prikazana je u tablici 3.1, gdje smo izračunali aritmetičku sredinu apsolutne vrijednosti pogreške dekodiranih slika u odnosu na izvornu sliku *trui* pri kompresijama 0.8, 0.4 i 0.2 bpp metodama BTTC(L) i Q64+BTTC(L)-L. Rezultati pokazuju bolju kvalitetu dekodiranih slika koje su komprimirane Q64+BTTC(L)-L metodom i potvrđuju vizualni dojam.

kompresija	0.8 bpp	0.4 bpp	0.2 bpp
BTTC(L)-L	4.39	7.04	9.92
Q64+BTTC(L)-L	3.55	6.17	8.63

Tablica 3.1: Usporedba aritmetičkih sredina apsolutne vrijednosti pogreške (AAE) za sliku *trui* i metode kompresija pri različitim stupnjevima kompresije.



Slika 3.10: Usporedba BTTC(L)-L i Q64+BTTC(L)-L za različite stupnjeve kompresije od 0.8 do 0.2 bpp za testnu sliku *trui*.

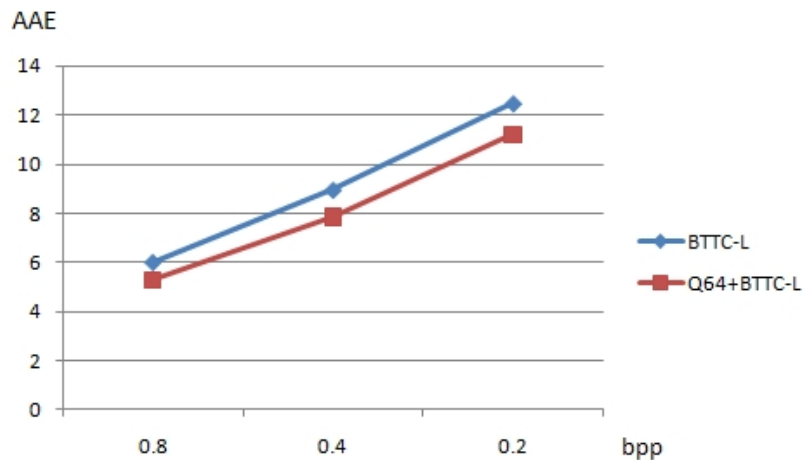
Na slici 3.10 grafički prikazujemo odnos između BTTC-L i Q64+BTTC-L metode kroz niz različitih kompresija. Kako raste kompresija, tako se gotovo linearno povećava pogreška u rekonstrukciji za obje metode. Evidentno je da je Q64+BTTC(L)-L kontinuirano bolja od BTTC(L)-L metode.

U tablici 3.2 nalaze se vrijednosti aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške dekodiranih slika u odnosu na izvornu sliku *peppers* pri kompresijama 0.8, 0.4 i 0.2 bpp metodama BTTC(L) i Q64+BTTC(L)-L. I u ovom slučaju rezultati analize pogrešaka potvrđuju vizualni dojam i pokazuju bolju kvalitetu dekodiranih slika koje su komprimirane Q64+BTTC(L)-L metodom.

kompresija	0.8 bpp	0.4 bpp	0.2 bpp
BTTC(L)-L	6.01	8.96	12.49
Q64+BTTC(L)-L	5.28	7.84	11.22

Tablica 3.2: Usporedba aritmetičkih sredina apsolutne vrijednosti pogreške (AAE) za sliku *peppers* i metode kompresija pri 0.2 bpp.

Na slici 3.11 prikazujemo odnos između BTTC-L i Q64+BTTC-L metode kroz niz različitih stupnjeva kompresije. Za najmanji stupanj kompresije 0.8 bpp, razlike su između svih metoda rubne. Pri većim stupnjevima kompresije, i BTTC-L i Q64+BTTC-L pokazuju umjereno povećanje pogreške u rekonstrukciji, ali Q64+BTTC-L kontinuirano je bolja od BTTC-L metode.



Slika 3.11: Usporedba BTTC-L i Q64+BTTC-L za niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 bpp do 0.2 bpp za testnu sliku *peppers*.

Poglavlje 4

Interpolacija parcijalnim diferencijalnim jednađbama

Počinjemo razmatranjem pristupa interpolaciji slika koji se temelji na parcijalnim diferencijalnim jednađbama. Cilj je istražiti potencijal parcijalnih diferencijalnih jednađbi za jedan teški problem interpolacije raspršenih podataka, odnosno kompresiju slike uz gubitak informacijskog sadržaja.

Dok se primjene parcijalnih diferencijalnih jednađbi i odgovarajućih varijacijskih tehnika u obradi slike i računalnom vidu često povezuju s problemima uklanjanja šuma (vidi npr. [4, 19, 90]), postoji veći broj publikacija u kojima se istražuje njihov potencijal u smislu interpolacijskih metoda. Rani primjeri u tom smjeru uključuju varijacijske metode optičkog tijeka [46, 70] gdje nas zanima procjena prividnog polja gibanja u slijedu slika kao minimizatora energetske funkcionala. U ravnim područjima gdje lokalni podatci s razinama svjetline ne dopuštaju računanje pouzdanih polja gibanja, informacije iz susjednih područja šire se pomoću tzv. *filling-in effect* učinka uglađivanja. Slični varijacijski modeli također se koriste za srodne probleme kao što su stereo rekonstrukcija [63, 96] ili registracija slike [7, 67], kad su potrebna gusta polja posmaka.

Nedavno je ovaj filling-in učinak također postao glavno obilježje metoda ucrtavanja u sliku koje se temelje na parcijalnim diferencijalnim jednađbama, kao što su [11, 12, 18, 44, 64, 84]. Ovdje je cilj obnoviti informacije koje nedostaju u određenim oštećenim područjima slike pomoću parcijalnih diferencijalnih jednađbi drugog ili višeg reda. Osnovna zamisao je dane slike promatrati kao Dirichletove rubne uvjete i interpolirati podatke u područjima ucrtavanja u sliku rješavanjem prikladnih problema rubnih vrijednosti.

Varijacijske metode i metode koje se temelje na parcijalnim diferencijalnim jednađbama, koje su predložene za ucrtavanje u sliku također su se istraživale za klasičnije interpolacijske probleme, kao što je zumiranje slike povećavanjem njezine rezolucije [2, 8, 9, 17, 61, 77, 91]. Kod takvih interpolacijskih problema s podacima koji su zadani u pravilnoj mreži te se tehnike natječu sa splineovima trećeg ili petog reda, funkcijama radijalne baze i interpolacijskim tehnikama koje

se temelje na sincu; vidi npr. [57, 65]. Ako podatci nisu na raspolaganju u pravilnoj mreži, predlažu se tehnike za interpolaciju raspršenih podataka [38, 71], među kojima su funkcije radijalne baze kao što su splineovi tankih ploča [32] omiljene i imaju dobre performanse.

Zanimljivo je da se za interpolaciju raspršenih podataka ne koristi puno tehnika varijacijskih metoda i metoda koje se temelje na parcijalnim diferencijalnim jednačbama te tehnika ucrtavanja u sliku. Čini se da slaba popunjenost raspršenih podataka predstavlja pravi izazov za te tehnike. Dok parcijalne diferencijalne jednačbe drugoga reda mogu zadovoljavati načelo maksimuma-minimuma, one često stvaraju singularitete u izoliranim točkama interpolacije u 2-D. S druge strane, parcijalne diferencijalne jednačbe višeg reda mogu dati ugađenija rješenja, ali kršenje načela ekstrema može dovesti do neželjenih prebačaja i podbačaja; vidi npr. [17].

Prvo raspravljamo o općem modelu, zatim istražujemo određeni broj mogućnosti za operator ugađivanja, i konačno prikazujemo eksperiment koji ilustrira njihovu performansu.

4.1 Opći model

Većina ljudi ima intuitivnu predodžbu o difuziji kao o fizikalnom procesu koji uravnotežuje razlike u koncentraciji bez stvaranja ili uništavanja mase. Ova fizikalna opservacija može se lako uobličiti u matematičku formulaciju.

Svojstvo održavanja ravnoteže izraženo je Fickovim zakonom

$$j := -D \cdot \nabla u. \quad (4.1)$$

Ova jednačba kaže da gradijent koncentracije ∇u uzrokuje protok j čiji je cilj kompenzacija ovog gradijenta. Odnos između ∇u i j opisuje se koeficijentom difuzije D , pozitivnom konačnom simetričnom matricom. Slučaj u kojem su j i ∇u paralelni naziva se izotropnim. Tada možemo zamijeniti koeficijent difuzije skalarno vrednovanom pozitivnom difuzivnošću g . U općenitom anizotropnom slučaju, j i ∇u nisu paralelni. Opažanje da difuzija samo prenosi masu bez uništavanja iste ili stvaranja nove mase izraženo je jednačbom kontinuiteta

$$\partial_t u := -\operatorname{div} j. \quad (4.2)$$

gdje t označava vrijeme. Ako primijenimo Fickov zakon u jednačbu kontinuiteta, dobijemo jednačbu difuzije

$$\partial_t u := -\operatorname{div} (D \cdot \nabla u). \quad (4.3)$$

Ova jednačba pojavljuje se u brojnim procesima fizikalnog prijenosa. U kontekstu prijenosa topline naziva se toplinskom jednačbom. U obradi slike možemo identificirati koncentraciju sa vrijednošću razine svjetline na određenoj točki. Ako

je koeficijent difuzije konstantan preko cijele domene slike, govorimo o homogenoj difuziji, a prostorno ovisno filtriranje naziva se inhomogenim. Često je koeficijent difuzije funkcija diferencijalne strukture same slike koja se razvija. Takva povratna veza dovodi do nelinearnih difuzijskih filtera. Difuzija koja ne ovisi o slici koja se razvija naziva se linearnom. U nekim slučajevima literatura koja se bavi računalnim prikazom odstupa od prethodnih napomena; može se dogoditi da se homogeno filtriranje naziva izotropnim, a nehomogeno zamućivanje anizotropnim, čak i ako koristi skalarno vrjednovanu difuzivnost umjesto koeficijenta difuzije.

Neka $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ označava n -dimenzionalno područje slike. Želimo obnoviti neku nepoznatu skalarnu funkciju $v : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, iz koje znamo njezine vrijednosti na nekom podskupu $\Omega_1 \subset \Omega$. Naš je cilj pronaći interpolacijsku funkciju $u : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ koja je ugađena i blizu v na $\Omega \setminus \Omega_1$ i identična s v in Ω_1 .

Ovaj problem možemo postaviti u evolucijski kontekst s nekim evolucijskim parametrom ("vrijeme") $t \geq 0$. Njegovo rješenje $u(x, t)$ daje željenu interpolacijsku funkciju kao stacionarno stanje ($t \rightarrow \infty$). Inicijalizirat ćemo evoluciju s nekom funkcijom $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ koja je identična v on Ω_1 i koja se postavlja na neku proizvoljnu vrijednost (npr. na 0) na $\Omega \setminus \Omega_1$:

$$f(x) := \begin{cases} v(x) & \text{if } x \in \Omega_1 \\ 0 & \text{else.} \end{cases} \quad (4.4)$$

Promatramo evoluciju

$$\partial_t u = (1 - c(x)) Lu - c(x)(u - f) \quad (4.5)$$

s f kao početnom vrijednosti,

$$u(x, 0) = f(x), \quad (4.6)$$

i reflektirajućim (homogenim von Neumannovim) rubnim uvjetima na rubu slike $\partial\Omega$. Funkcija $c : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ karakteristična je funkcija na Ω_1 , i.e.

$$c(x) := \begin{cases} 1 & \text{if } x \in \Omega_1 \\ 0 & \text{else,} \end{cases} \quad (4.7)$$

i L je eliptični diferencijalni operator. Zamisao je riješiti jednadžbu za stacionarno stanje

$$(1 - c(x)) Lu - c(x)(u - f) = 0 \quad (4.8)$$

s reflektirajućim rubnim uvjetima. U Ω_1 imamo $c(x) = 1$ tako da je ispunjen interpolacijski uvjet $u(x) = f(x) = v(x)$. U $\Omega \setminus \Omega_1$ iz $c(x) = 0$ slijedi da rješenje mora zadovoljiti $Lu = 0$. Ova eliptična parcijalna diferencijalna jednadžba može se smatrati stacionarnim stanjem evolucijske jednadžbe

$$\partial_t u = Lu \quad (4.9)$$

s Dirichletovim rubnim uvjetima koji su dani interpolacijskim podacima na Ω_1 .

4.2 Homogena difuzija

Postoje brojne mogućnosti vezano uz eliptički diferencijalni operator L . Najjednostavniji najbolje istraženi od njih koristi $Lu := \Delta u$ što vodi do *homogene difuzije* [49]:

$$\partial_t u = \Delta u. \quad (4.10)$$

s f kao početnom vrijednosti,

$$u(x, 0) = f(x). \quad (4.11)$$

Rješenje je jedinstveno i kontinuirano ovisi o inicijalnoj slici f . Homogena difuzija ili linearno difuzijsko filtriranje koristi se za brojne primjene na polju obrade slike i računalnog vida. Nalazi se u skoro svakom standardnom udžbeniku koji se bavi ovim područjem.

Usprkos nekoliko svojstava koja čine linearno difuzijsko filtriranje jedinstvenim i lakim za upotrebu, ono ima i nekoliko nedostataka. Očit nedostatak je da osim što uglađuje šum, već i zamućuje bitne značajke kao što su rubovi te na taj način otežava njihovo uočavanje. Ne može uzimati u obzir nikakve a-priori informacije o strukturama koje vrijedi sačuvati (ili čak poboljšati). Linearno difuzijsko filtriranje dislocira rubove kad se ide od finijih prema grubljim mjerilima, vidi npr., Witkin[439]. Tako strukture koje su identificirane u grubom mjerilu ne daju točnu lokaciju te ih je potrebno locirati u izvornoj slici. Ove teškoće pri praćenju iz finog u grubo općenito se označavaju kao problem korespondencije.

Linearna difuzija je dobro postavljena i ima solidan aksiomatski temelj. Ispunjava načelo maksimuma i minimuma

$$\inf f \leq u(x, y) \leq \sup f.$$

S druge strane, u nekim primjenama posjeduje nepoželjno svojstvo da ne dopušta poboljšavanje kontrasta te da može dovesti do zamućivanja i delokalizacije struktura.

4.3 Bilinearno uglađivanje

Prototip diferencijalnog operatora višeg reda biharmonijski je operator $Lu := -\Delta^2 u$ koji daje evoluciju *biharmonijskog uglađivanja*

$$\partial_t u = -\Delta^2 u. \quad (4.12)$$

Njezina uporaba dovodi do spline interpolacije kod tankih ploča [32], rotacijski invarijantne višedimenzionalne poopćene kubične spline interpolacije.

Biharmonijsko uglađivanje uvedeno je zbog svoje sposobnosti da priguši numerički šum puno učinkovitije od homogene difuzije. Biharmonijsko uglađivanje

krši načelo maksimuma-minimuma. Biharmonijska interpolacija zamućuje rubove slike i pokazuje vidljive oscilacije u blizini rubova. Općenito je nemoguće predvidjeti minimalne i maksimalne interpolirane vrijednosti prije rješavanja biharmonijskih jednadžbi.

4.4 Trilinearno ugađivanje

Višedimenzionalna generalizacija spline-interpolacije petog reda vodi ka m glade-nju koje se temelji na $Lu := \Delta^3 u$:

$$\partial_t u = \Delta^3 u. \quad (4.13)$$

Primijetimo da samo diferencijalni operatori drugog reda dopuštaju načelo maksimuma-minimuma, gdje vrijednosti u ostaju unutar okvira vrijednosti f in Ω_1 .

Triharmonijsko ugađivanje krši načelo maksimuma-minimuma, nemoguće je predvidjeti minimalne i maksimalne interpolirane vrijednosti. Triharmonijsko ugađivanje zamućuje rubove slike i pokazuje vidljive oscilacije u blizini rubova još više od biharmonijskog ugađivanja. Triharmonijski interpolanti u bliskom su odnosu s drugom skupinom interpolanata, funkcijom radijalne baze (RBF).

4.5 Apsolutna monotona Lipschitzova ekstenzija

Parcijalna diferencijalna jednadžba drugog reda, čija se uporaba zagovarala u svrhu interpolacije [17], dana je modelom *apsolutne monotone Lipschitzove ekstenzije* (eng. *absolutely minimizing Lipschitz extension (AMLE)*). On koristi usmjerenu derivaciju drugog reda $Lu := \partial_{\eta\eta} u$ u smjeru gradijenta $\eta := \nabla u / |\nabla u|$:

$$\partial_t u = \partial_{\eta\eta} u. \quad (4.14)$$

4.6 Nelinearna izotropna difuzija

Prilagodljive metode izgađivanja temelje se na zamisli primjene postupka koji sam ovisi o lokalnim svojstvima slike. Odgovarajuću PDE formulaciju prvi su dali Perona i Malik [73]. Perona i Malik predlažu metodu *nelinearne izotropne difuzije* za izbjegavanje problema zamućivanja i lokalizacije koji se pojavljuju kod homogene difuzije. Koriste inhomogeni proces koji smanjuje difuzivnost na onim lokacijama za koje je veća vjerojatnost da se radi o rubovima. Ova vjerojatnost mjeri se vrijednošću $|\nabla u|^2$. Perona-Malik filter temelji se na eliptičkom operatoru $Lu := \operatorname{div} (g(|\nabla u|^2) \nabla u)$, to daje jednadžbu

$$\partial_t u = \operatorname{div} (g(|\nabla u|^2) \nabla u) \quad (4.15)$$

te koristi difuzivnosti kao što je

$$g(s^2) = \frac{1}{1 + s^2/\lambda^2}. \quad (4.16)$$

s parametrom kontrasta $\lambda > 0$. Možemo primjerice odabrati drugačiju funkciju difuzivnosti kao što je *Charbonnierovu difuzivnost* [22]

$$g(s^2) = \frac{1}{\sqrt{1 + s^2/\lambda^2}}. \quad (4.17)$$

Argument funkcije difuzivnosti g opada, budući da je cilj smanjiti ugađivanje na rubovima gdje je $|\nabla u|$ velik. Time dolazi do poboljšanja rubova. Budući da (4.15) koristi skalarnu difuzivnost, taj proces nazivamo *izotropnim* (za razliku od nazivlja u [73]). Tok $j = -g\nabla u$ uvijek je paralelan u odnosu na ∇u .

Glavna primjetna nestabilna značajka tzv. je efekt stvaranja stepenica (eng. *staircasing effect*) kod kojeg se sigmoidni rub razvija u linearne segmente odvojene skokovima. Pokušaj prostorne regularizacije možemo postići zamjenom difuzivnosti $g(|\nabla u|^2)$ inačicom filtriranom Gaussovom funkcijom $g(|\nabla u_\sigma|^2)$ uz $u_\sigma := K_\sigma * u$ gdje je σ standardna devijacija, dobiva se anizotropna regularizacija Perona-Malik procesa

$$\partial_t u = \operatorname{div} (g(|\nabla u_\sigma|^2) \nabla u). \quad (4.18)$$

Prednost prostornih regularizacija sastoji se u tome da čine filter neosjetljivim na šum pri mjerilima manjim od σ . Stoga, kad promatramo (4.18) kao jednadžbu za obnavljanje slike, ona izražava, osim parametra kontrasta λ , i dodatnu veličinu šuma σ . Ovim se izbjegava nedostatak originalnog Perona-Malik procesa koji pogrešno interpretira snažne oscilacije uzrokovane šumom kao rubove koje treba očuvati ili čak poboljšati. U unutrašnjosti segmenta jednadžbe za nelinearnu izotropnu difuziju (4.18) ponaša se skoro isto kao i homogena difuzija (4.10), ali je difuzija na rubovima spriječena. Stoga, šum na rubovima nije moguće uspješno eliminirati ovim procesom.

4.7 Nelinearna anizotropna difuzija

Metoda (4.18) može se proširiti i na anizotropne procese kod kojih se koristi prilagođeni koeficijent difuzije umjesto skalarne difuzivnosti. Bilo bi poželjno podesiti tijekom prema orijentaciji zanimljivih značajki. Skalarna difuzivnost više ne može pratiti ove zahtjeve te je potrebno uvesti koeficijent difuzije koji vodi do anizotropnih difuzijskih filtera. Anizotropni difuzijski filteri obično koriste strategije prostorne regularizacije.

Pravo anizotropno ponašanje moguće je ako se koristi difuzijski tenzor. Kao prototip za nelinearno anizotropno difuzijsko filtriranje uzimamo *difuziju poboljšanja rubova* (eng. *edge-engancing diffusion (EED)*) [89]. Zamisao je smanjiti

uglađivanje po rubovima i dopustiti difuziju duž njih. Difuzijski tenzor EED-a ima jedan svojstveni vektor v_1 paralelan sa ∇u_σ , gdje se u_σ dobija konvolucijom u s Gaussovom funkcijom sa standardnom devijacijom σ . Pridružena svojstvena vrijednost dana je s $\lambda_1(\nabla u_\sigma) := g(|\nabla u_\sigma|^2)$ s funkcijom difuzivnosti kao (4.17). Drugi svojstveni vektori ortogonalni su s ∇u_σ i imaju odgovarajuće svojstvene vrijednosti $\lambda_2(\nabla u_\sigma) := 1$. Konstruiran je ortonormalni sustav svojstvenih vektora v_1, v_2 koeficijenta difuzije D na način da oni odražavaju procijenjenu strukturu ruba. Ovako definirane svojstvene vrijednosti daju prednost filtriranju duž ruba u odnosu na filtriranje okomito na njega. Ako koristimo konvenciju kako bismo proširili skalarnu funkciju $g(x)$ u matricnu funkciju $g(A)$ primjenom g na svojstvene vrijednosti na A i ne mijenjajući svojstvene vektore, tada se EED može formalno povezati s $Lu := \text{div}(g(\nabla u_\sigma \nabla u_\sigma^\top) \nabla u)$. Prema tome, njezinom evolucijom upravlja

$$\partial_t u = \text{div}(g(\nabla u_\sigma \nabla u_\sigma^\top) \nabla u). \quad (4.19)$$

Ovom metodom uspješno se eliminira šum na rubovima jer je dana prednost difuziji duž rubova u odnosu na difuziju okomito na njih. Ne uzimaju samo u obzir koeficijent detektora ruba ∇u_σ , već i njegov smjer. Općenito, ∇u ne koindicira ni s jednim od svojstvenih vektora od D dok god je $\sigma > 0$. Dakle, ovaj model doista se ponaša anizotropno. Ako dopustimo da parametar regularizacije σ teži k 0, dobivamo izotropni Perona-Malikov proces.

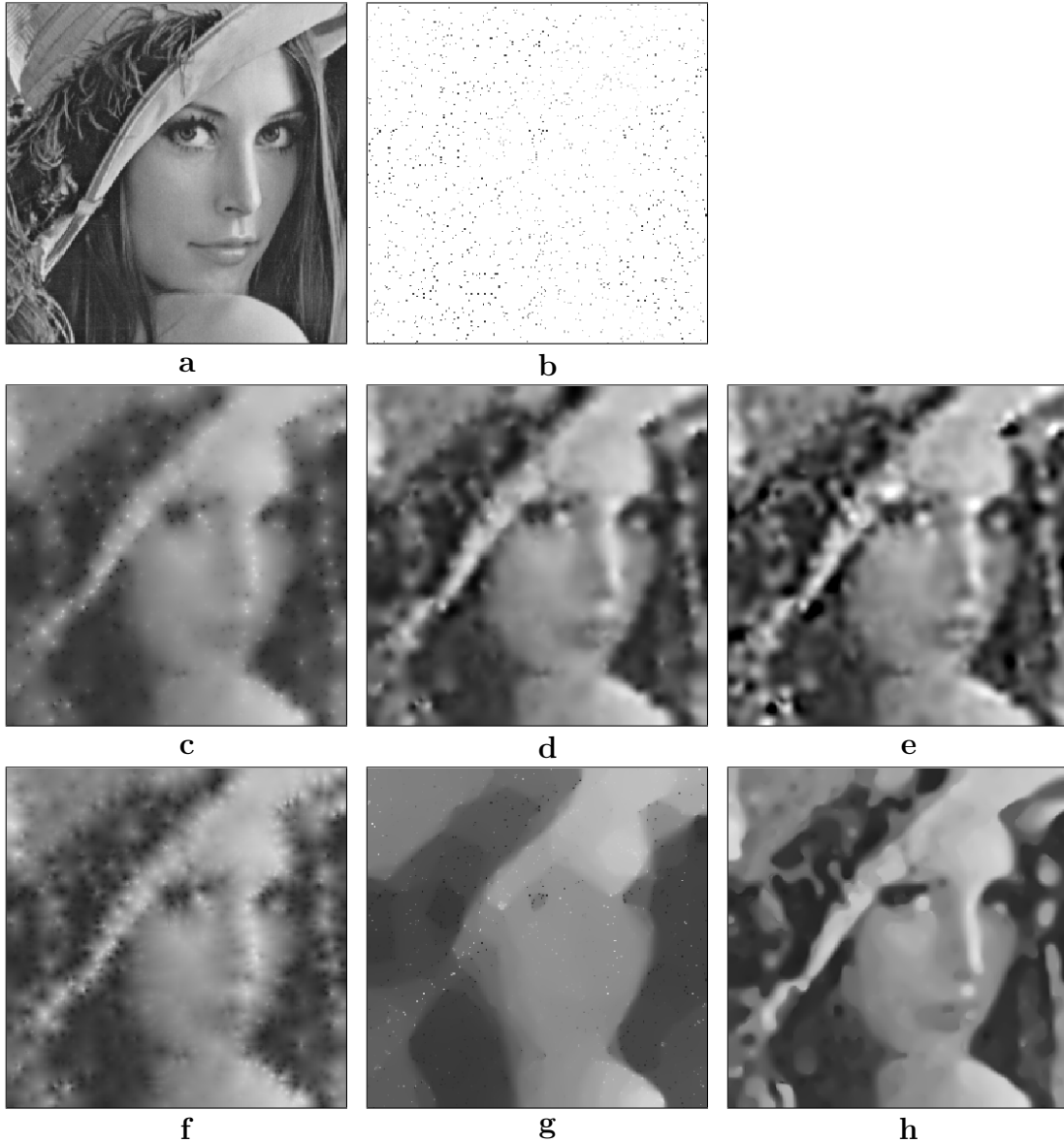
Poboljšanje rubova nastaje uslijed činjenice da se zbog rapidno padajuće difuzivnosti izgladivanje unutar svake regije snažno preferira u odnosu na difuziju između dvaju susjednih regija. Nelinearno anizotropno filtriranje dijeli prednosti homogene difuzije i nelinearne izotropne difuzije. Njime se kombiniraju svojstva dobre eliminacije šuma kod linearne difuzije sa stabilnom strukturom rubova kod nelinearnog izotropnog filtriranja. Budući da je dopušteno izgladivanje duž rubova, međutim, kutovi postaju zaobljeniji nego kod nelinearnog izotropnog filtriranja.

Nelinearni difuzijski filteri primijenjuju se za naknadnu obradu fluktuirajućih podataka, za vizualiziranje obilježja kvalitete u računalno potpomognutom nadzoru kvalitete, za poboljšavanje poduzorkovanja, za algoritme segmentacije temeljene na nizovima skala (eng. *scale-space*), kao i za praćenje cilja na infracrvenim prikazima. Većina primjena odnosi se na filtriranje medicinskih slika.

4.8 Eksperimenti s interpolacijom

Kako bi se vrjednovao potencijal prethodnih parcijalnih diferencijalnih jednadžbi za interpolaciju raspršenih podataka, mi smo ih diskretizirali sa središnjim konačnim razlikama u prostoru. Za difuzijske smo jednadžbe izvršili semi-implicitnu vremensku diskretizaciju sa SOR-om kao solverom za linearne sustave jednadžbi, dok smo za AMLE, biharmonijskog i triharmonijskog uglađivanja koristili eksplicitnu shemu. Vrijeme izvođenja za neoptimiranu C implementaciju

na prijenosnom računalu Centrino od 1.5 GHz u rasponu je od nekoliko sekundi do nekoliko minuta za sliku 256×256 . Ako je potrebno, ove je operacije moguće pomoću više mrežnih algoritama ubrzati do performansi u stvarnom vremenu [55].



Slika 4.1: (a) Zumiranje testne slike *lena*, 256×256 piksela. (b) Razine svjetline raspršenih točaka interpolacije (2 posto svih elemenata slike, slučajno odabranih) (c) Interpolacija linearnom difuzijom. (d) Biharmonijsko ugađivanje. (e) Triharmonijsko ugađivanje. (f) AMLE (g) Nelinearna izotropna difuzija ($\lambda = 0.1$). (h) EED ($\lambda = 0.1$, $\sigma = 1$).

Na slici 4.1 prikazan je eksperiment koji ilustrira uporabu različitih operatora ugađivanja za interpolaciju raspršenih podataka. Ona prikazuje zumiranje čuvene slike *lena*, gdje je 2 posto svih elemenata slike odabrano slučajno kao raspršene točke interpolacije. Primijetili smo da homogena difuzija nije jako pogodna za interpolaciju raspršenih podataka, budući da stvara singularitete u točkama interpolacije. To se može izbjeći interpolacijom pomoću biharmonijskog ugađivanja. Na taj se način dobivaju prilično dobri rezultati, ali je nedostatak u tome što dolazi do prebačaja i podbačaja blizu rubova zbog kršenja načela ekstrema (pogledajte npr. rame). Ova ograničenja postaju još očitija kod triharmonijskog ugađivanja. Uprkos brojnim povoljnim teorijskim značajkama [17], AMLE ne ispunjava očekivanja. Ni polaganje od homogene difuzije k nelinearnoj izotropnoj difuziji ne daje poboljšanje. Dok nelinearna izotropna difuzija može dopustiti diskontinuitet, njezin interpolant previše je ravan i nastoji zadržati puno točaka interpolacije kao izolirane singularitete. S druge strane, činjenica da EED daje najbolje rezultate pokazuje važnost anizotropnog ponašanja. Njezina sposobnost ugađivanja po rubovima čini se vrlo korisnom za izbjegavanje singulariteta u točkama interpolacije. Osim toga, ova parcijalna diferencijalna jednadžba drugog reda poštuje načelo maksimuma-minimuma, tako da se rješenje nalazi unutar granica razina svjetline točaka interpolacije.

Kvantitativna analiza pogriješaka prikazana je u tablici 4.1, gdje smo izračunali aritmetičku sredinu apsolutne vrijednosti pogriješke i srednju kvadratnu pogriješku između interpolirane slike $(u_{i,j})$ i izvorne slike $(v_{i,j})$.

PDE metoda	AAE	MSE
homogena difuzija (4.10)	16.98	611.5
Biharmonijsko ugađivanje (4.12)	15.79	615.5
Triharmonijsko ugađivanje (4.13)	18.69	807.9
AMLE (4.14)	17.33	631.7
Charbonnier difuzija (4.15)	21.80	987.0
Difuzija poboljšanja rubova (4.19)	14.58	591.7

Tablica 4.1: Aritmetička sredina apsolutne vrijednosti pogriješke (AAE) i srednja kvadratna pogriješka (MSE) za parcijalne diferencijalne jednadžbe koje se koriste za interpolaciju raspršenih podataka na slici 4.1.

Kako je već spomenuto, biharmonijska i triharmonijska interpolacija mogu stvoriti prebačaje i podbačaje. Oni su odsječeni na mjestima gdje vode ka sivim vrijednostima izvan intervala $[0, 255]$.

U našim eksperimentima aritmetička sredina apsolutne vrijednosti pogriješke daje poredak koji dobro odgovara našem vizualnom dojmu, dok srednja kvadratna pogriješka ne uspijeva napraviti razliku između uočljivo snažnih različitih kvaliteta linearne difuzije, biharmonijskog glađenja i AMLE. Čini se da MSE veći naglasak

stavlja na odstupanje pojedinačnih elemenata slike nego što to čini naša ljudska percepcija. Prema tome, ona može biti manje korisna za kvantifikaciju percipirane vizualne kvalitete. Zanimljivo je da u oba mjerenja grješaka kao i u našoj vizualnoj analizi EED daje najbolju interpolaciju raspršenih podataka. Ovi nalazi također su u skladu s rezultatima iz [91] gdje je dokazano da je EED parcijalna diferencijalna jednačba izabrana za interpolaciju tenzorskih podataka. Stoga ćemo se od sada usredotočiti na EED, a svaka optimizacija kvalitete aproksimacije vršit će se s obzirom na aritmetičku sredinu apsolutne vrijednosti pogreške.

Poglavlje 5

Kompresija parcijalnim diferencijalnim jednađbama

Trenutnim metodama za kompresiju slike dominiraju koncepti koji uključuju diskretnu kosinusnu transformaciju (kao što je široko primijenjeni JPEG standard [72]) ili diskretnu wavelet transformaciju (u JPEG 2000 [83]), bit će dana potvrda zamisli koja kaže da postoje druge mogućnosti gdje parcijalne diferencijalne jednađbe mogu biti korisne.

Osnovna zamisao je smanjiti sliku u obliku podataka na dobro prilagođeni skup vrlo malog broja značajnih točaka koje se mogu kodirati na učinkovit način. Dekodiranje se postiže korištenjem tih raspršenih podataka i njihovom interpolacijom pomoću prikladne parcijalne diferencijalne jednađbe. Parcijalna diferencijalna jednađba koja je odabrana je anizotropna difuzija poboljšanja rubova (EED). Ona koristi difuzijski tenzor koji omogućava ugađivanje duž diskontinuiteta dok istovremeno sprječava ugađivanje preko njih. Iako je EED izvorno uvedena kao tehnika za uklanjanje šuma iz slike [89], u Poglavlju 4 je pokazano kako je posebice korisna za interpolaciju raspršenih podataka.

U poglavlju 3 pokazano je kako se slike mogu uspješno kodirati pomoću binarnih stabala. Ta binarna stabla mogu se koristiti kao okosnica za kodek koji se temelji na EED-u. Međutim, da bi se završilo s okvirom za kompresiju, koji se temelji na parcijalnim diferencijalnim jednađbama s optimalnom kvalitetom, nije dovoljno primijeniti BTTC u njegovoj izvornoj inačici. Format kodirane slike ostaje, no korak po korak uvodimo određeni broj izmjena i dopuna, kao što su adaptacija praga pogreške, odabir točke na temelju difuzije, i posebne strategije kvantizacije. Svaka od njih poboljšava kvalitetu obnovljene slike pri danom stupnju kompresije.

Srodni radovi. U kontekstu kompresije slika, parcijalne diferencijalne jednađbe i srodne varijacijske tehnike uglavnom su se koristile kao korak predobrade prije kodiranja slika ili videa [20, 37, 36, 54, 85] ili kao alat naknadne obrade za uklanjanje izobličenja u slici koja su nastala kodiranjem [1, 33, 36, 43, 68, 94, 95]. Ovaj se rad razlikuje od tih članaka po tome što su korištene parcijalne difer-

encijalne jednadžbe *unutar* koraka kodiranja i dekodiranja, a ne prije kodiranja ili nakon dekodiranja. Chan i Zhou [21] predložili su potpunu varijacijsku regularizaciju kako bi modificirali koeficijente u wavelet dekompoziciji tako da se smanji osciliranje izobličenja rubova. Ponekad su interpolacijske strategije koje se temelje na parcijalnim diferencijalnim jednadžbama prilagođene posebnim skupovima podataka, kao što su površinski podatci u digitalnom modelu reljefa [35, 80, 92]. Nadalje, neke varijacijske L^1 minimizacijske zamisli imaju važnu ulogu u novijim konceptima komprimiranog očitavanja [15].

Korisnost koncepta ucrtavanja u sliku za kompresiju slike potvrđena je u nekoliko članaka, gdje su zamisli ucrtavanja strukture i teksture u sliku integrirane u standardne kodeke (tj. metode kompresije i dekompresije) poput JPEG-a [60, 74, 93].

S obzirom na to da je namjera ove disertacije rekonstruirati sliku iz malog skupa svojstvenih podataka, to ima neke veze s publikacijama gdje se podatci o rubovima koriste za prikazivanje glavnog sadržaja slike. To je napravljeno u različitim formulacijama sljedećih autora: Zeevi i Rotem [97], Carlsson [16], Hummel i Moniot [48], Mallat i Zhong [62], Aurich i Daub [5], Desai et al. [29] i Elder [34]. Metode ove vrste mogu se promatrati kao predstavnici druge generacije pristupa kodiranju koji koriste percepcijski relevantna obilježja kao što su konture [56].

Alternativni način prikaza signala i slika pomoću vrlo malog skupa značajnih točaka sastoji se od rekonstrukcije gornjih točaka u prostoru mjerila, kako su istraživali Johansen et al. [52] i Kanters et al. [53]. Općenitije rasprave o tome kako rekonstruirati sliku iz prikladnog skupa točaka i njihovih derivacija (local jet) dali su Lillholm et al. [59]. O dojmljivim globalnim rekonstrukcijama prirodnih slika pomoću local jet strukture izvijestio je Bruckstein [13], koji je predložio ugrađivanje Tikhonove regularizacije i filtriranja prema smjeru.

Što se tiče trokutnog kodiranja B-stabla autora Distasi et al. [31] koje je korišteno u ovom istraživanju, postoji veći broj srodnih algoritama za kodiranje na temelju promjenjive veličine bloka slike, posebno metode koje se temelje na dekompoziciji pomoću quadtree stabla; vidi npr. [81, 82]. Zanimljivu kodnu shemu koja koristi interpolaciju raspršenih podataka predložili su Demaret et al. [28]. Oni su konstruirali adaptivnu Delaunayjevu triangulaciju koja se koristi za dekodiranje slike linearnom interpolacijom. Njihovi eksperimenti pokazuju da to može biti alternativa kodiranju JPEG 2000 za slike bez teksture.

5.1 Dekodiranje pomoću EED-a

Budući da smo vidjeli da EED ima dobre performanse kao interpolant raspršenih podataka, prirodno je poreći korak linearne interpolacije za dekodiranje u metodi Q64+BTTC(L)-L, i umjesto toga primijeniti EED na masku interpolacije. Ovaj kodek skraćujemo na **Q64+BTTC(L)-EED**. Na toj se metodi temelji naš

čla-nak s radionice [39].

Primijetimo da se za razliku od Q64+BTTC(L)-L metoda Q64+BTTC(L)-EED ne oslanja na triangulaciju, nego jedino na njezine vrhove kao točke interpolacije. Osim toga, ova zamjena linearne interpolacije s EED-om jedini je korak koji utječe na dekodiranje. Sve izmjene i dopune koje su naknadno opisane događaju se u fazi kodiranja. One optimiziraju korak stvaranja raspršenih točaka interpolacije i njihove pohranjene razine svjetline.

5.2 Adaptivni parametar praga pogriješke

Jedan pristup poboljšanju postupka kompresije odnosi se na odabir parametra praga pogriješke ε . U izvornom BTTC postupku ovaj je parametar stalan tijekom konstrukcije binarnog stabla. Međutim, podsjetimo se da se odluka o tome treba li ili ne dijeliti trokut temelji na maksimalnoj apsolutnoj vrijednosti pogriješke na koju se nailazi unutar toga trokuta. Budući da dijeljenje velikog trokuta utječe na puno više elemenata slike nego dijeljenje malog trokuta, očekuje se da je učinkovitije u smanjenju aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogriješke. Time se predlaže strategija u kojoj se koristi restriktivniji, tj. manji prag ε na nižim razinama binarnog stabla.

Budući da se veličina trokuta smanjuje eksponencijalno s indeksom razine našeg binarnog stabla, eksponencijalno skaliranje također je odabrano za prag. Počevši od maloga praga ε_0 na najgrubljoj razini, koji se prilagođava pomoću konstantnog faktora $\alpha > 1$ po razini (ustaljeno u rasponu između 1.35 i 1.5), što rezultira s

$$\varepsilon_k = \alpha^k \varepsilon_0 \quad (5.1)$$

na razini k binarnog stabla. Ovaj algoritam označavamo adaptivnim pragom pomoću **Q64+BTTC(L,AT)-EED**.

5.3 Kodiranje pomoću EED-a

U podpoglavlju 5.1 zamijenili smo linearnu interpolaciju unutar svakog trokuta u koraku dekodiranja s interpolacijom koja se temelji na EED-u. To već vodi ka značajnom poboljšanju kvalitete dekodirane slike. U isto vrijeme je na taj način došlo do neslaganja između kodiranja i dekodiranja, budući da smo zadržali linearnu interpolaciju u postupku kodiranja.

U svrhu otklanjanja teškoća u koraku stvaranja raspršenih točaka interpolacije također se može koristiti interpolacija koja se temelji na difuziji. Pri donošenju odluke o tome dijeliti trokut ili ne, trenutna raspršena slika popunjava se pomoću EED interpolacije te se uspoređuje s izvornom slikom. Ako pogriješka nekog elementa slike unutar dotičnog trokuta prelazi prag koji se odnosi na razinu trenutnog rafiniranja, trokut se dijeli.

Za razliku od linearne interpolacije iz poglavlja 3.3, difuzijska interpolacija nije ograničena unutar svakog trokuta. Promjene vezane uz rezultat interpolacije do kojih dolazi unošenjem novoga vrha nisu ograničene na trokut koji je podijeljen ili čak susjedne trokute. Nakon ažuriranja stabla interpolacija se uvijek mora ponovo izračunati za cijelu sliku, a ne samo za trokut. Za postizanje najbolje kvalitete kodiranja ponovno se izračunavanje vrši nakon svakog umetanja čvora. Alternativno se sve odluke o dijeljenju trokuta jednake veličine mogu donijeti istovremeno, pri čemu se ponovna izračunavanja ograničavaju na jednu interpolaciju po razini triangulacije. To dovodi do brže kompresije nauštrb manjeg gubitka kvalitete slike. Trenutno smo zainteresiraniji za optimalnu kvalitetu nego za brze algoritme. Stoga ponovno izračunavanje radimo za svaki umetnuti vrh. Ova metoda koja se temelji na EED-u naziva se **Q64+BTTC(EED,AT)-EED**.

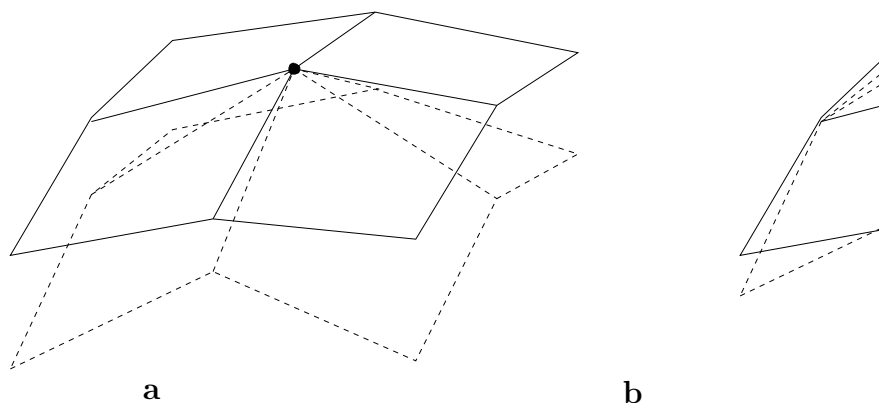
5.4 Pomak interpolacijskih vrijednosti

Bolji pogled na rezultate interpolacije koja se temelji na parcijalnim diferencijalnim jednadžbama prikazane na slici 4.1 otkriva da točke interpolacije koje su lokalni ekstremi teže isticanju u interpoliranoj slici kao oštri vrhovi. Ovaj je učinak najupadljiviji kod rezultata linearne difuzije, ali se također može primijetiti u manje naglašenom obliku kod nelinearne difuzijske interpolacije. U slučaju linearne interpolacije može se povezati s padom funkcija radijalne baze koje čine podlogu stacionarnom stanju difuzijske interpolacije.

Kao posljedica toga nije uvijek moguće prikladno pohraniti točne vrijednosti razina svjetline elemenata slike interpolacije koji se dobiju iz izvorne slike. Dok se pogriješka u rekonstrukciji samog elementa slike pri interpolaciji na ovaj način smanjuje na najmanju moguću mjeru, okolni elementi slike mogu se značajno pomicati. Primjerice, ako je element slike lokalni maksimum, razine svjetline u njegovoj okolini bit će sustavno potcijenjene. Umjesto toga, pohrana malo veće vrijednosti razina svjetline za interpolacijski element slike uvodi pogriješku u taj konkretni element slike, dok se smanjuje pogriješka u okolini istoga; vidi sliku 5.1. Kako potonje uključuje višestruke elemente slike, smanjuje se aritmetička sredina apsolutne vrijednosti pogriješke.

Napomena vezana uz korištenje ove zamisli je da je teško procijeniti zonu utjecaja danog elementa slike u interpolaciji skupa raspršenih podataka. Naša se realizacija temelji na konzervativnoj pretpostavci da postoji zona manjeg utjecaja koja je dana pomoću 3×3 okoline. Nakon utvrđivanja maske interpolacije, interpolirana slika koja koristi točne razine svjetline u svim interpolacijskim elementima slike uspoređuje se s izvornom slikom v . Za svaki element slike (i, j) maske interpolacije izračunavamo aritmetičku sredinu vrijednosti pogriješke

$$\tilde{e}_{i,j} := \frac{1}{9} \sum_{k=i-1}^{i+1} \sum_{l=j-1}^{j+1} (v_{k,l} - u_{k,l}) \quad (5.2)$$



Slika 5.1: Pomak interpolacijske vrijednosti. Okomiti smjer daje razine svjetline. Interpolacijski element slike (točka u sredini) sa svojom 3×3 okolinom u izvornoj slici (povezano punim crtama) i interpolirana slika (isprekidane crte). **(a)** Bez pomaka. **(b)** S pomakom.

i koristimo ju kako bismo popravili pohranjenu vrijednost razina svjetline za element slike (i, j) . Umjesto u $u_{i,j}$ pohranjujemo vrijednost

$$\tilde{u}_{i,j} := u_{i,j} + \tilde{e}_{i,j} . \quad (5.3)$$

Iako bi točnija procjena zona utjecaja interpolacijskih elemenata slike najvjerojatnije mogla dalje poboljšati kvalitetu pohranjenih slika, već jednostavan postupak koji je ovdje opisan nudi mjerljivo smanjenje pogreške u rekonstrukciji. Ova inačica algoritma s pomaknutom interpolacijom naziva se **Q64+BTTC(EED, AT)+B-EED**.

5.5 Naknadna obrada rekvantizacijom

Konačno, ponovno se bavimo postupkom rekvantizacije koji je opisan u podpoglavlju 3.5. Odgađanjem rekvantizacije do koraka stvarnog kodiranja dobija se točnije mjerenje pogreške tijekom postupka stvaranja raspršenih točaka interpolacije. S druge strane, interpolirane slike u postupku stvaranja raspršenih točaka interpolacije izračunavaju se na temelju razina svjetline različitih od onih koje su u konačnici pohranjene, što može pogoršati rezultate rekonstrukcije. Stoga je teško teoretski odgovoriti na pitanje koja je od tih dviju postavki superiorna, kvantizacija kao predobrada ili naknadna obrada.

Međutim, eksperimenti pokazuju da prednost ima naknadna obrada. To je posebice točno ako se primijenjuje zajedno s pomakom interpolacijskih vrijednosti kako je opisano u prethodnom podpoglavlju. Korekcije pomaka koje su tamo izračunate mogu često biti manje od razine jedne kvantizacije. Jedino onda kada kvantizacija djeluje kao naknadna obrada mogu se u obzir optimalno uzeti male

prilagodbe u kvantiziranom skupu podataka. Najbolji rezultati postobrade u ovom radu postignuti su kvantizacijom do 32 razine svjetline.

Kompresijski algoritam s postkvantizacijom do 32 razine nazvat ćemo **BTTC (EED,AT)+B-Q32-EED**. Važno je primijetiti promijenjeni redoslijed oznake Q. To je u ovom radu najnapredniji algoritam koji inkorporira sve izmjene i dopune. Zbog sažetosti se za ovaj kodek koji se temelji na EED-u također koristi kratica **EEDC** kad se on uspoređuje s drugim algoritmima kao što su JPEG ili JPEG 2000.

Poglavlje 6

Usporedba različitih metoda kompresije

Svaka metoda kompresije stvara različitu dekodiranu sliku. Zbog toga je potrebno testirati i usporediti različite metode kompresije na jednakim stupnjevima kompresije kako bi došli do najpovoljnije metode za kompresiju. Uspoređivanje se može vršiti na više načina, jedna od metoda usporedbe vizualno je vrjednovanje te kvantitativna mjerenja izračunavanjem aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške dekodirane slike u odnosu na izvornu sliku. Primjenjene su modifikacije uvedene od poglavlja 5.1 do 5.5 i izvršeno je subjektivno i objektivno ocjenjivanje utjecaja različitih modifikacija metode koja se temelji na trokutnom kodiranju pomoću binarnog stabla iz poglavlja 3, sa standardima u kompresiji slike opisanim u poglavlju 2. Korištena je nekomprimirana standardna testna slika *trui* prikazana na slici 6.1, veličine 257×257 elemenata slike. Testna slika komprimirana je sa svakom od uspoređivanih metoda kompresije, a usporedba se vrši na pripadnoj dekodiranoj slici.

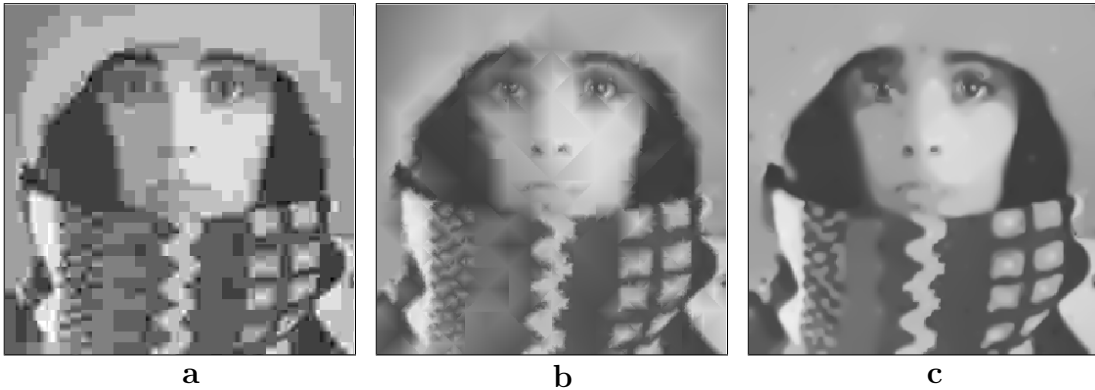


Slika 6.1: Testna slika *trui*, 257×257 elemenata slike.

6.1 Primjena anizotropne difuzije poboljšanja rubova u dekodiranju

Slika 6.2 (b) uzeta je kao osnovna slika na temelju rezultata iz poglavlja 3.6, gdje je pokazano da metoda s predobradom rekvantizacijom na 64 razine svjetline, koju slijedi trokutno kodiranje pomoću binarnog stabla gdje je inkorporirana linearna interpolacija i koja se dekodira pomoću linearne interpolacije označena s Q64+BTTC(L)-L daje bolje rezultate nego standardna metoda trokutnog kodiranja pomoću binarnog stabla BTTC(L)-L. U poglavlju 5.1 uveli smo dekodiranje pomoću EED-a na slike komprimirane Q64+BTTC(L) metodom, tu smo metodu označili s Q64+BTTC(L)-EED, slika 6.2 (c).

Usporedbom standardne slike *trui*, slika 6.1 s dekomprimiranim slikama za standard JPEG, slika 6.2 (a) te Q64+BTTC(L)-L, slika 6.2 (b) i Q64+BTTC(L)-EED, slika 6.2 (c) uočava se da su se provedenom rekvantizacijom s 256 na 64 razine svjetline i primjenom BTTC(L) metode uz korištenje linearne interpolacije u kompresiji slike te uz zamjenu linearne interpolacije u dekompresiji s anizotropnom difuzijom poboljšanja rubova, izgubila izobličenja u slici i da je slika kvalitetnija.



Slika 6.2: Usporedba za veliki stupanj kompresije 0.2 bpp testne slike *trui*. (a) JPEG. (b) Q64+BTTC(L)-L. (c) Q64+BTTC(L)-EED.

Primjećujemo da je kod JPEG kodiranja prisutno ozbiljno izobličenje blokova u slici koje je rezultat činjenice da se diskretna kosinusna transformacija računa unutar blokova od 8×8 elemenata slike.

S druge strane, metoda Q64+BTTC(L)-L stvara drugačiji tip izobličenja gdje predmetna triangulacija postaje vidljiva. Raspršena slika nastala je kompresijom pomoću Q64+BTTC(L) korištenjem $\varepsilon = 37.3$ čime je postignut stupanj kompresije 0.2 bpp i samo je 1543 elementa slike kodirano.

Metoda Q64+BTTC(L)-EED koristi samo točke interpolacije iz metode Q64+BTTC(L)-L, ali ne i odgovarajuću triangulaciju i interpolaciju. Jasno je da ova

metoda ne može imati nedostatak koji je posljedica linearne interpolacije nad triangulacijom. Ondje gdje nema dovoljno podataka na raspolaganju, interpolacija anizotropnom difuzijom poboljšanja rubova teži biti glatka.

Ovaj vizualni dojam potvrđuju kvantitativna mjerenja u tablici 6.1, gdje je navedena aritmetička sredina apsolutne vrijednosti pogreške dekodiranih slika u odnosu na izvornu sliku. Vidimo da za stupanj kompresije 0.2 bpp, JPEG ima najlošija svojstva, da Q64+BTTC(L)-EED daje najbolje rezultate, a kako je definirano prema (3.4), manji brojevi rezultata znači manju pogrešku, a veći daje veću pogrešku u slici.

kodek	AAE
JPEG	11.25
Q64+BTTC(L)-L	8.63
Q64+BTTC(L)-EED	8.45

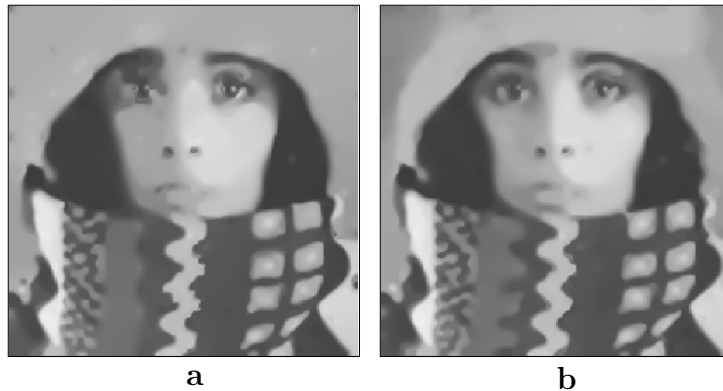
Tablica 6.1: Usporedba aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške (AAE) za sliku *trui* i stupanj kompresije 0.2 bpp.

Može se zaključiti da primjena interpolacije parcijalnim diferencijalnim jednadžbama, gdje se koriste samo točke interpolacije iz metode Q64+BTTC(L), daje rezultate koji su u prednosti u odnosu na druge dvije metode.

6.2 Primjena adaptivnog praga parametra pogreške

Budući da smo vidjeli da zamjenom linearne interpolacije u dekompresiji s anizotropnom difuzijom poboljšanja rubova rezultira poboljšanjem, ta metoda služiti će nam kao referentna metoda za usporedbu s metodom u kojoj izmjene vršimo u postupku kodiranja, a zadržavamo parcijalne diferencijalne jednadžbe u postupku dekodiranja. U poglavlju 5.2 uveden je adaptivni prag pogreške. Metoda je označena s Q64+BTTC(L,AT)-EED. Uspoređuju se dekodirane slike metode Q64+BTTC(L)-EED, slika 6.3 (a) i metode Q64+ BTTC(L, AT)-EED, slika 6.3 (b) s izvornom slikom *trui*, slika 6.1.

Za kompresiju pomoću Q64+BTTC(L,AT)-EED korišten je adaptivan parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 39.6$ čime je postignut stupanj kompresije 0.2 bpp i 1517 elementa slike je kodirano, što je 26 elementa slike manje u odnosu na Q64+BTTC(L)-EED. Unatoč manjem broju elemenata slike u raspršenoj slici, predložena strategija restriktivnijeg parametra praga na globalnim strukturama značajno je pridonijela boljem rezultatu. Poboljšanje je vidljivo na svim strukturama dekodirane slike.



Slika 6.3: Usporedba metoda kompresije koje se temelje na BTTC-u za stupanj kompresije slike 0.2 bpp. (a) Dekodiranje koje se temelji na EED-u (Q64+BTTC(L)-EED), s (b) adaptivnim pragom parametra pogreške (Q64+BTTC(L,AT)-EED).

U tablici 6.2 navedene su aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške dekodiranih slika u odnosu na izvornu sliku. Vidljivo je značajno smanjenje aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške za Q64+BTTC(L,AT)-EED u odnosu na Q64+BTTC(L)-EED, što znači daleko bolja kvaliteta dekodirane slike.

kodek	AAE	br. el. slike
Q64-BTTC(L)-EED	8.45	1543
Q64-BTTC(L,AT)-EED	5.98	1517

Tablica 6.2: Usporedba aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške za dekodiranje koje se temelji na EED-u s adaptivnim pragom parametra pogreške. Broj elemenata slike dan je u posljednjem stupcu.

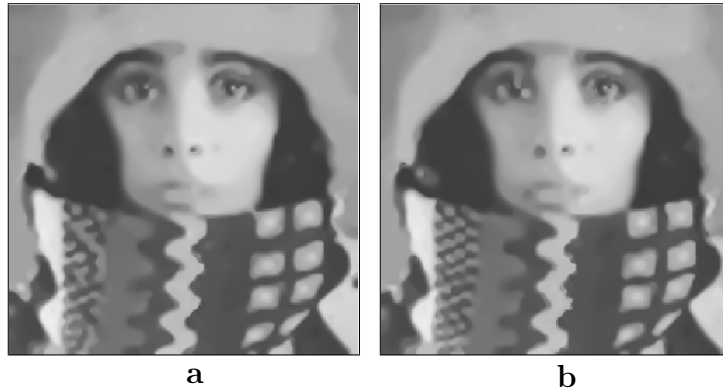
Može se zaključiti da se uvođenjem adaptivnog praga parametra pogreške u metodu Q64+BTTC(L)-EED u postupku kodiranja dobivaju bolji rezultati.

6.3 Primjena anizotropne difuzije poboljšanja rubova u kodiranju

Zamjena linearne interpolacije u postupku kodiranja s anizotropnom difuzijom poboljšanja rubova uvedena u poglavlju 5.3, označena je Q64+BTTC(EED,AT)-EED. To je metoda s predobradom rekvantizacijom s 256 na 64 razine svjetline, koju slijedi trokutno kodiranje pomoću binarnog stabla gdje je inkorporirana

interpolacija anizotropnom difuzijom poboljšanja rubova. Koristi se adaptivni prag parametra pogreške i dekodiranje se vrši pomoću interpolacije anizotropnom difuzijom poboljšanja rubova.

Dekodirane slike metode Q64+BTTC(L,AT)-EED, slika 6.4 (a) i Q64+ BTTC (L,AT)-EED, slika 6.4 (b) uspoređivat će se s izvornom slikom *trui*, slika 6.1. Za postizanje stupnja kompresije 0.2 bpp metodom Q64+BTTC(EED,AT)-EED korišten je adaptivan parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 38$ pa je 1542 elementa slike kodirano, što je 25 elementa slike više u odnosu na Q64+BTTC(L,AT)-EED. Zamjena linearne interpolacije u kompresiji s anizotropnom difuzijom poboljšanja rubova pridonijela je kvalitetnijoj dekodiranoj slici.



Slika 6.4: Usporedba metoda kompresije koje se temelje na BTTC-u za stupanj kompresije slike 0.2 bpp. (a) Primjena adaptivnog praga parametra pogreške (Q64+BTTC(L,AT)-EED), s (b) anizotropnom difuzijom poboljšanja rubova u kodiranju (Q64+BTTC(EED,AT)-EED).

Kvantitativna mjerenja kvalitete dekodiranih slika u odnosu na izvornu sliku dana su u tablici 6.3, gdje je navedena aritmetička sredina apsolutne vrijednosti pogreške. Vidimo da za stupanj kompresije 0.2 bpp, Q64+BTTC(EED,AT)-EED daje bolje rezultate od Q64+BTTC(L,AT)-EED.

kodek	AAE	br. el. slike
Q64-BTTC(L,AT)-EED	5.98	1517
Q64-BTTC(EED,AT)-EED	5.55	1542

Tablica 6.3: Usporedba aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške za različite metode kod 0.2 bpp. Za metode koje se temelje na BTTC-u broj elemenata slike dan je u posljednjem stupcu.

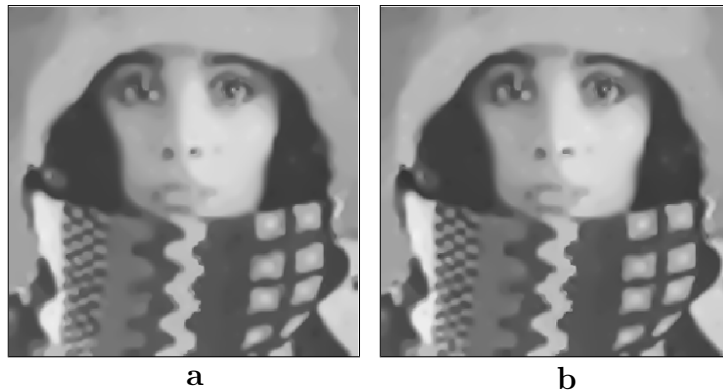
Kod metode kompresije koja koristi EED u koraku kodiranja, interpolacija se ponovno računa jednom po čvoru kako bi se postigla optimalna kvaliteta. Brzom

kompresijom (jedna jedina EED interpolacija po razini) vrijednosti AAE-a lošije su za otprilike 0.1 do 0.2. Zaključak je da primjena interpolacije parcijalnim diferencijalnim jednažbama u postupku kodiranja, kao nadogradnja svih prethodnih modifikacija, daje rezultate koji su u prednosti u odnosu na prethodne metode.

6.4 Primjena pomaka interpolacijskih vrijednosti

U poglavlju 5.4 uvedena je izmjena kompresije u postupku kodiranja tako da se nakon utvrđivanja maske interpolacije provodi inačica algoritma s pomaknutom interpolacijom. Cjelokupna metoda kompresije tada vrši predobradu rekvantizacijom s 256 na 64 razine svjetline, koju slijedi trokutno kodiranje pomoću binarnog stabla gdje je inkorporirana interpolacija anizotropnom difuzijom poboljšanja rubova. Koristi se adaptivni prag parametra pogreške i pomak interpolacijskih vrijednosti, a dekodira se pomoću interpolacije anizotropnom difuzijom poboljšanja rubova. Ta je metoda kraće označena s Q64+BTTC(EED,AT)+B-EED, slika 6.5 (b).

Uspoređuje se standardna slika *trui*, slika 6.1 s dekomprimiranim slikama Q64+BTTC(EED,AT)-EED, slika 6.5 (a) i Q64+BTTC(EED,AT)+B-EED, slika 6.5 (b). Za postizanje stupnja kompresije 0.2 bpp metodom Q64+BTTC(EED,AT)+B-EED korišten je adaptivan parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 38$, kodirano je 1530 elemenata slike. Uočava se da je slika kvalitetnija, što pokazuje i objektivno mjerenje pokazano u tablici 6.4.



Slika 6.5: Usporedba metoda kompresije koje se temelje na BTTC-u za stupanj kompresije slike 0.2 bpp. **(a)** Primjena anizotropne difuzije poboljšanja rubova u kodiranju (Q64+BTTC(EED,AT)-EED), s **(b)** Pomak interpolacijskih vrijednosti (Q64+BTTC(EED,AT)+B-EED).

Primjena pomaka interpolacijskih vrijednosti doprinosi unaprjeđenju metode kompresije koja se temelji na trokutnom kodiranju pomoću binarnog stabla i

kodek	AAE	br. el. slike
Q64-BTTC(EED,AT)-EED	5.55	1542
Q64-BTTC(EED,AT)+B-EED	5.32	1530

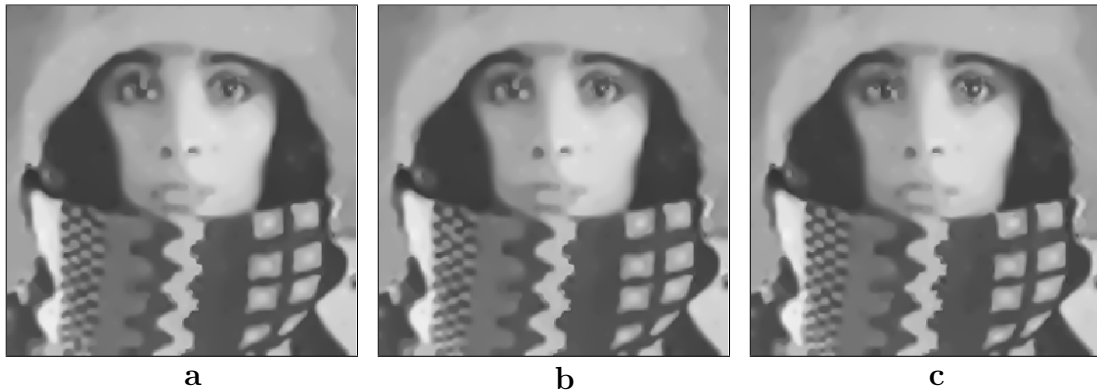
Tablica 6.4: Usporedba aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške za različite metode kod 0.2 bpp. Za metode koje se temelje na BTTC-u broj elemenata slike dan je u posljednjem stupcu.

primjeni interpolacije parcijalnim diferencijalnim jednadžbama u postupku kodiranja i dekodiranja.

6.5 Usporedba naknadne obrade rekvantizacijom

Odgađanjem rekvantizacije do koraka stvarnog kodiranja dobivaju se dvije metode: jedna vrši postkvantizaciju s 256 na 64 razine svjetline BTTC(EED,AT)+B+Q64-EED, a druga vrši postkvantizaciju s 256 na 32 razine svjetline BTTC(EED,AT)+B+Q32-EED. U poglavlju 5.5 uvedena je naknadna obrada rekvantizacijom.

Uspoređuju se dekodirane slike metode Q64+BTTC(EED,AT)+B-EED, slika 6.6 (a), metode BTTC(EED,AT)+B+Q64-EED, slika 6.6 (b) i metode BTTC(EED,AT)+B+Q62-EED, slika 6.6 (c) s izvornom slikom *trui*, slika 6.1.



Slika 6.6: Usporedba metoda kompresije koje se temelje na BTTC-u za stupanj kompresije slike 0.2 bpp. (a) Pomak interpolacijskih vrijednosti (Q64+BTTC(EED,AT)+B-EED), s (b) postkvantizacijom do 64 razine svjetline (BTTC(EED,AT)+B+Q64-EED), s (c) postkvantizacijom do 32 razine svjetline umjesto toga (BTTC(EED,AT)+B+Q64-EED).

Za metodu koja koristi postkvantizaciju s 256 na 64 razine svjetline korišten je adaptivan parametar praga pogriješke $\varepsilon_a = 38$ kako bi se postigao stupanj kompresije 0.2 bpp, kodirano je 1527 elemenata slike. Dok za metodu koja koristi postkvantizaciju s 256 na 32 razine svjetline korišten je adaptivan parametar praga pogriješke $\varepsilon_a = 38.5$ kako bi se postigao isti stupanj kompresije. Pri tome je kodirano 1769 elemenata slike, što je 242 elemenata slike više. Znatno veći broj kodiranih elemenata slike unatoč manjem broju razina svjetline daje vidno poboljšanje u odnosu na sve prethodne modifikacije trokutnog kodiranja pomoću binarnog stabla.

Usporedba, u smislu njihove aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogriješke, u tablici 6.5 govori dalje u prilog ovim razmatranjima. U tablici također uključujemo mjernu pogriješku za JPEG 2000. Kod metoda koje se temelje na BTTC-u također dajemo broj elemenata slike u raspršenim slikama. Iz tih se brojeva može iščitati prije svega da sve algoritamske modifikacije poboljšavaju kvalitetu odabranih elemenata slike, dok njihov broj ostaje u istom rasponu između 1500 i 1550 elemenata slike. Drugo, potvrđuje se da smanjeni broj razina kvantizacije omogućuje pohranjivanje značajno većeg broja elemenata slike.

kodek	AAE	br. el. slike
Q64-BTTC(L)-EED	8.45	1543
Q64-BTTC(L,AT)-EED	5.98	1517
Q64-BTTC(EED,AT)-EED	5.55	1542
Q64-BTTC(EED,AT)+B-EED	5.32	1530
BTTC(EED,AT)+B+Q64-EED	5.27	1527
BTTC(EED,AT)+B+Q32-EED	4.99	1769
JPEG 2000	4.86	

Tablica 6.5: Usporedba aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogriješke za različite metode kod 0.2 bpp. Za metode koje se temelje na BTTC-u broj elemenata slike dan je u posljednjem stupcu.

Usporedbu u tablici 6.5 proširujemo za kvantizaciju i predobrade i postobrade, uključujući i slučaj bez kvantizacije (256 razina svjetline). Možemo vidjeti da se smanjivanjem broja razina svjetline povećava broj elemenata slike. Međutim, kod vrlo malog broja razina svjetline sve veća kvantizacijska pogriješka dominira nad poboljšanjima AAE-a tako što ima više elemenata slike te preferira odabir od 32. Postkvantizacija ima prednost nad predkvantizacijom za srednje razine kvantizacije koje nestaju kad se broj razina kvantizacije smanji na 16.

Postupnom modifikacijom metoda kodiranja i dekodiranja ustanovljeno je kako je bolje provesti modifikacije u postupku kodiranja uz nemijenjanje metode kompresije u postupku dekodiranja. U postupku kodiranja od slike 6.2 (b) do slike 6.6 (c) provele su se sljedeće modifikacije. Za sliku 6.2 (c) u postupku

#kvantizacijske razine	predkvantizacija		postkvantizacija	
	AAE	br. el. slike	AAE	br. el. slike
256	6.42	1123	6.42	1123
64	5.32	1530	5.27	1527
32	5.04	1770	4.99	1769
16	5.33	2099	5.34	2054

Tablica 6.6: Usporedba aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške i brojeva pohranjenih elemenata slike za različite razine kvantizacije. Jukstaponiramo predkvantizaciju ($Q^{**}+BTTC(EED,AT)+B-EED$) i postkvantizaciju ($BTTC(EED,AT)+B+Q^{**}-EED$).

kompresije zamijenjena je linearna interpolacija u dekompresiji s anizotropnom difuzijom poboljšanja rubova, pri kompresiji slike 6.3 (b) u postupku kodiranja primijenjena je adaptacija praga pogreške, u slici 6.4 (b) u postupku kodiranja zamijenjena je linearna interpolacija s anizotropnom difuzijom poboljšanja rubova, u slici 6.5 (b) pri kompresiji poveden je algoritam a pomaknutom interpolacijom, kod slike 6.6 (b) provedena je promjena koraka kvantizacije od 256 na 64 razine svjetline nakon stvaranja raspršenih točaka interpolacije, a prije dekodiranja. Nakon stvaranja raspršenih točaka interpolacije dobro je smanjiti broj razina svjetline korakom rekvantizacije s 256 na 32, slika 6.6 (c), a u dekodiranju i nadalje primijenjivati interpolaciju anizotropne difuzije poboljšanja rubova. Dobivena slika pri subjektivnoj ocjeni pokazuje oštrinu rubova, sačuvano je najviše detalja, a što pokazuje i objektivno mjerenje pokazano u tablici 6.6.

Pregled svih izmjena dan je u tablici 6.7 gdje su u prvom stupcu navedeni postupci korišteni u kodiranju, u drugom stupcu postupci korišteni u dekodiranju, a u trećem stupcu sklop za kodiranje i dekodiranje koji nazivamo kodek. Najoptimiziraniji kodek koji se temelji na EED-u dan je s $BTTC(EED,AT)+B+Q32-EED$ (od sada će se jednostavno nazivati EEDC).

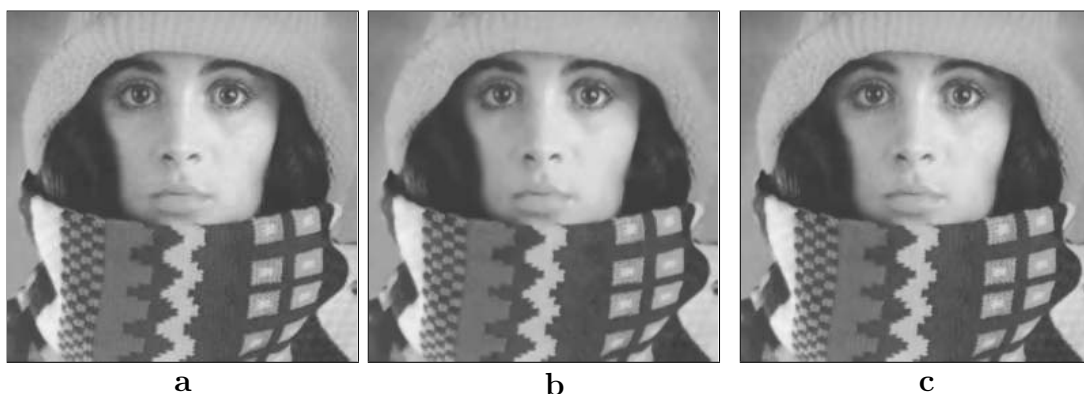
kodiranje	dekodiranje	kodek
Q64+BTTC(L)	L	Q64+BTTC(L)-L
Q64-BTTC(L)	EED	Q64-BTTC(L)-EED
Q64-BTTC(L,AT)	EED	Q64-BTTC(L,AT)-EED
Q64-BTTC(EED,AT)	EED	Q64-BTTC(EED,AT)-EED
Q64-BTTC(EED,AT)+B	EED	Q64-BTTC(EED,AT)+B-EED
BTTC(EED,AT)+B+Q64	EED	BTTC(EED,AT)+B+Q64-EED
BTTC(EED,AT)+B+Q32	EED	BTTC(EED,AT)+B+Q32-EED

Tablica 6.7: Postupci pri kodiranju i dekodiranju.

6.6 Usporedba sa standardima JPEG i JPEG 2000

Nadalje se provodi usporedba postupaka kompresije JPEG i JPEG 2000 s EEDC-om. EEDC je kodek koji se u prethodnom poglavlju pokazao kao najbolje rješenje. To je metoda kompresije koja primijenjuje trokutno kodiranje pomoću binarnog stabla gdje je inkorporirana interpolacija anizotropnom difuzijom poboljšanja rubova, koristi se adaptivni prag parametra pogriješke, pomak interpolacijskih vrijednosti i naknadna obrada rekvantizacijom s 256 na 32 razine svjetline, a dekodiranje se vrši pomoću interpolacije anizotropnom difuzijom poboljšanja rubova.

Odabran je adaptivan parametar praga pogriješke ε_a tako da se postigne stupanj kompresije od 0.8, 0.4, 0.2, 0.1 i 0.05 bpp. Komprimirana je testna slika *trui*, veličine 257×257 elemenata slike. Za JPEG kompresiju korišten je standardni software *IJG*, a za JPEG 2000 kompresiju korišten je standardni software *jasper*.



Slika 6.7: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0.8 bpp za testnu sliku *trui* (257×257 elemenata slike). Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) JPEG-a, (b) EEDC-a i (c) JPEG 2000.

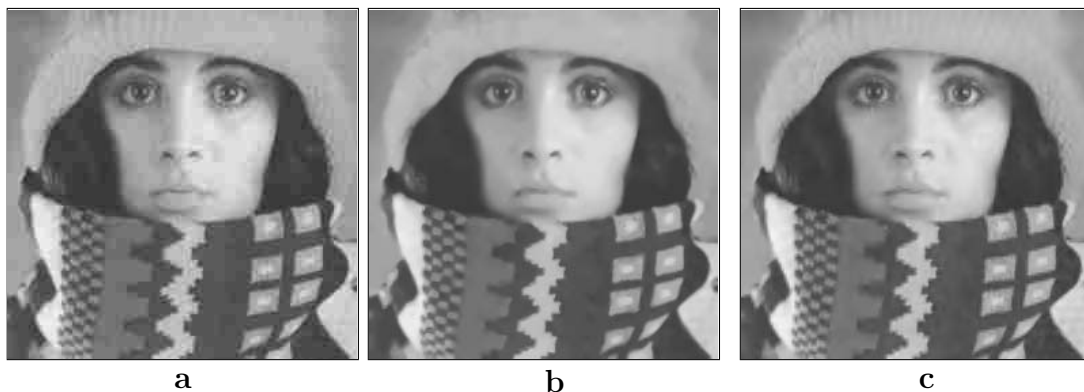
Dekodirane slike za stupanj kompresije slike 0.8 bpp pomoću EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 prikazane su na slici 6.7. Iz slika je vidljivo da ne dolazi do veće degradacije zbog kompresije bilo kojom od testiranih metoda. Slike posjeduju iznimnu kvalitetu, gdje je moguće raspoznati svaki detalj koji se na slici nalazi. Na svim slikama lice je raspoznatljivo do najmanjih detalja. Ne postoje velike razlike u kvaliteti između dekodiranih slika, ali ciljanim promatranjem svakog detalja iz izvorne slike na dekodiranoj slici moguće je uočiti sitne razlike.

Slika 6.7 (a) prikazuje dekodiranu sliku nakon kompresije JPEG metodom. U odnosu na izvornu sliku na licu su zamjetna odstupanja u intenzitetima svjetline, a jako fini detalji počinju se gubiti.

Na slici 6.7 (b) prikazana je dekodirana slika nakon kompresije EEDC meto-

dom. Za postizanje kompresije od 0.8 bpp korišten je adaptivan parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 18.72$, na taj način preostalo je 7375 elemenata slike koji su kodirani, a u postupku dekodiranja služe kao raspršene točke interpolacije za EED difuziju. Kod dekodirane slike u odnosu na izvornu sliku primjetan je mali gubitak detalja. Unatoč neznatnom gubitku finih detalja dekodirana slika ostavlja dojam najboljeg kontrasta.

Dekodirana slika nakon kompresije JPEG 2000 metodom prikazana je na slici 6.7 (c). U odnosu na JPEG i EEDC metodu slika se najmanje razlikuje u odnosu na izvornu sliku. Na dijelovima slike gdje postoji jako puno detalja koji imaju male razlike u razini svjetline dolazi do zamućenja.



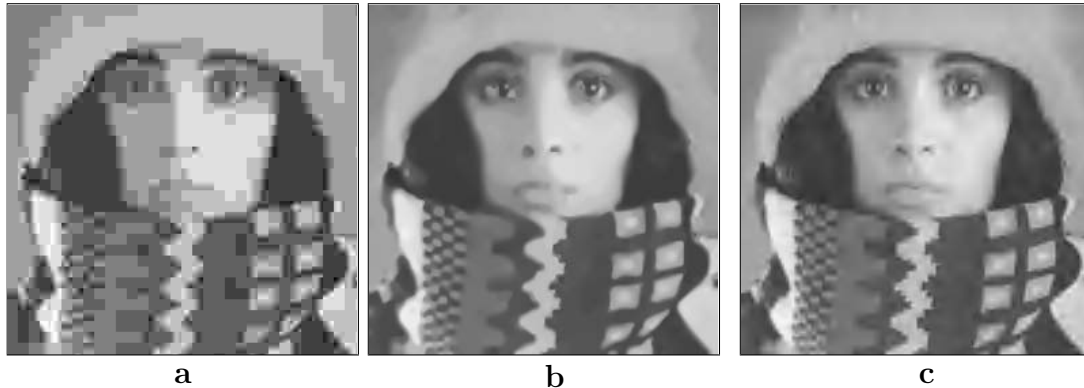
Slika 6.8: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0.4 bpp za testnu sliku *trui* (257×257 elemenata slike). Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) JPEG-a, (b) EEDC-a i (c) JPEG 2000.

Dekodirana slika nakon kompresije za stupanj kompresije slike 0.4 bpp pomoću EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 prikazana je na slici 6.8. Degradacija postaje zamjetna i primjetne razlike u kvaliteti između ispitivanih metoda. Na svim slikama lice je raspoznatljivo do najmanjih detalja.

Na slici 6.8 (a) dekodirana je slika nakon kompresije JPEG-om. Izobličenja blokova počinju se pojavljivati na slici, što utječe i na izgled rubova koji više nisu glatki nego isprekidani. Pojedini rubovi, gdje razlike u svjetlini između dvaju područja nisu velike, gube se, a na rubovima gdje su kontrasti veliki dolazi do zamućenja. Dolazi do gubitka finih detalja. Od svih dekodiranih slika na kompresiji 0.4 bpp vizualno ostavlja najlošiji dojam.

Dekodirana slika prikazana na slici 6.8 (b) nastala je nakon kompresije EEDC metodom. Za postizanje kompresije od 0.4 bpp korišten je adaptivan parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 26.1$, na taj način preostalo je 3603 elemenata slike koji su kodirani, a u postupku dekodiranja služe kao raspršene točke interpolacije za EED difuziju. Došlo je do gubitka finih detalja. Slika ostavlja blago zamućeni dojam iako su rubovi glatki i dobro očuvani, ali su plohe unutar rubova prejednolike.

U odnosu na JPEG i EEDC slika dekodirana nakon kompresije JPEG 2000 prikazana na slici 6.8 (c) posjeduje najbolju kvalitetu. Moguće je raspoznati svaki detalj koji se na slici nalazi. Pojedini rubovi postaju zamućeni dok se kod nekih rubova pojavljuju umjetne sjene. Kao i kod JPEG-a postoji problem rubova gdje je jedno područje jako tamno, a drugo svijetlo.



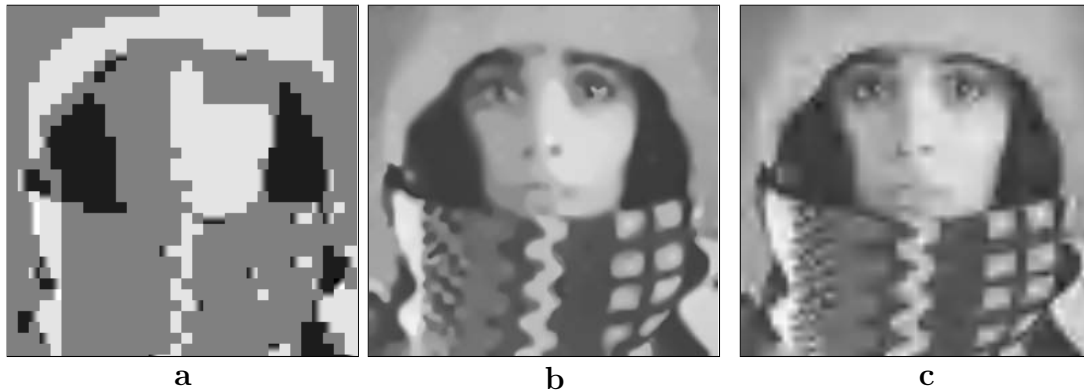
Slika 6.9: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0,2 bpp za testnu sliku *trui* (257×257 elemenata slike). Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) JPEG-a, (b) EEDC-a i (c) JPEG 2000.

Slike dekodirane nakon kompresije za stupanj kompresije slike 0.2 bpp pomoću EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 prikazane su na slici 6.9. Postoje velike razlike u kvaliteti između dekodiranih slika, bez detaljnijeg promatranja na svim slikama zamjetan je gubitak detalja u odnosu na izvornu sliku.

Vidljivo je najlošija dekodirana slika nakon kompresije JPEG metodom prikazana na slici 6.9 (a). Na slici nije moguće prepoznati što slika prikazuje bez uvida u izvornu sliku. Prisutna izobličenja blokova dominiraju slikom i dijelovi lica teško se raspoznaju. Dijelovi lica kao usta i nos potpuno su neprepoznatljivi. Najbolje su sačuvani detalji strukture šala.

Slika 6.9 (b) prikazana je dekodirana slika nakon kompresije EEDC metodom. Za postizanje kompresije od 0.2 bpp korišten je adaptivan parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 35.835$, na taj način preostalo je 1771 elemenata slike koji su kodirani, a u postupku dekodiranja služe kao raspršene točke interpolacije za EED difuziju. Iako dolazi do gubitka detalja, rubovi su najbolje prikazani. Detalji su sačuvani na globalnoj razini, dok su na lokalnoj izgubljeni. To je najbolje vidljivo na dijelovima slike koji u izvornoj slici imaju puno detalja.

Slika 6.9 (c) dekodirana nakon kompresije JPEG 2000 možda sadrži najviše detalja, ali izraženi su artefakti na rubovima u obliku umjetnih sjena koji su posljedica rasipanja wavelet koeficijenata oko diskontinuiteta. Rubovi su isprekidani, što je najbolje vidljivo na prijelazima iz izrazito svijetlih područja u izrazito tamna područja.



Slika 6.10: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0,1 bpp za testnu sliku *trui* (257×257 elemenata slike). Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) JPEG-a, (b) EEDC-a i (c) JPEG 2000.

Na izrazito velikom stupnju kompresije od 0.1 bpp kod ispitivanih metoda došlo je do degradacije dekodirane slike. Slika 6.10 prikazuje dekodirane slike nakon kompresije pomoću EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000.

Na slici 6.10 (a) je slika dekodirana nakon kompresije JPEG metodom. Vidljivo je da je sačuvan samo vrlo mali broj DCT koeficijenata, što je nedostavno za dekodiranje slike. Sadržaj slike je neprepoznatljiv.

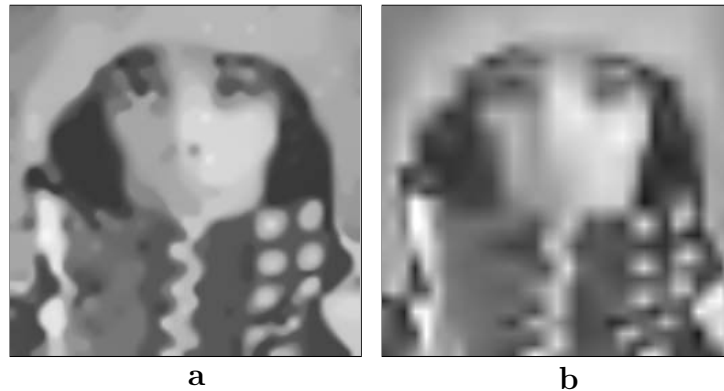
Za postizanje kompresije od 0.1 bpp EEDC metodom korišten je adaptivan parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 47$, na taj način preostalo je 896 elemenata slike koji su kodirani. Dekodirana slika prikazana je na slici 6.10 (b). Slika djeluje zamućeno i izražen je gubitak detalja, ali očuvani rubovi su jasni. Kao posljedica primjene difuzije slici nedostaje dojam prostorne dubine.

Gubitak detalja izražen je i na slici dekodiranoj nakon kompresije JPEG 2000 metodom, prikazanoj na slici 6.10 (c). Pojedine su strukture iz izvorne slike neprepoznatljive. Umjetne sjene oko rubova čine sliku nejasnom unatoč sačuvanim detaljima. Slika ostavlja dojam zamućenja nastalog pokretom.

JPEG metoda nije u mogućnosti komprimirati sliku za stupanj kompresije 0.05 bpp, što je i očekivano nakon rezultata kompresije za 0.1 bpp koji je bio potpuno nezadovoljavajući. Dekodirane slike nakon kompresije za stupanj kompresije slike 0,05 bpp pomoću EEDC-a i JPEG 2000 prikazane su na slici 6.11. Iz slika je vidljivo da dolazi do gotovo potpune degradacije zbog kompresije. Slike su jako loše i nije moguće raspoznati detalje koji se nalaze na izvornoj slici.

Na slici 6.11 (a) prikazana je dekodirana slika nakon kompresije EEDC metodom. Za postizanje kompresije od 0.05 bpp korišten je adaptivan parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 60.22$, na taj način preostalo je samo 425 elemenata slike koji su kodirani. Obrisi lika i objekata na slici sačuvani su i glatki, ali detalji su neprepoznatljivi.

Dekodirana slika nakon JPEG 2000 kompresije prikazana je na slici 6.11 (b).



Slika 6.11: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0,05 bpp za testnu sliku *trui* (257×257 elemenata slike). Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) EEDC-a i (b) JPEG 2000.

Za razliku od prethodne slike obrisi lika su gotovo neprepoznatljivi jer umjetne sjene degradiraju strukturu slike.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	2.24	2.52	1.97
0.4	4.12	3.41	3.05
0.2	11.25	4.99	4.84
0.1	33.65	7.55	7.72
0.05		10.49	13.53

Tablica 6.8: Usporedba aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške (AAE) za sliku *trui* i različite stupnjeve kompresije.

Kvantitativna mjerenja aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške prikazana su u tablici 6.8. Manja vrijednost AAE znači manju pogrešku dekodirane slike u odnosu na izvornu.

Analizirajući slike 6.7 do 6.11, a koje predstavljaju usporedbu između JPEG, JPEG 2000 i EEDC metode za različite stupnjeve kompresije može se ustanoviti da sva tri postupka zadovoljavaju kvalitetom, ali se opaža velika razlika kad se mijenja stupanj kompresije. Ustanovilo se da pri manjim stupnjevima kompresije 0.8 bpp nema velike razlike u subjektivnoj ocjeni kvalitete dekodiranih slika, dok je pri velikim stupnjevima kompresije 0.05 bpp nakon dekodiranja JPEG 2000 lošiji od EEDC što se vidi i u tablici 6.8.

Poglavlje 7

Mjerenje kvalitete dekodirane slike

Postupkom kompresije slike s gubitcima dobiva se slika koja nije identična izvornoj slici. Određeni su podatci odbačeni i potrebno je utvrditi u kojoj mjeri je to utjecalo na kvalitetu dekodirane slike. Vrijednovanje kvalitete slike ima značajnu ulogu u ocjeni uspješnosti pojedinog postupka kompresije koji se procijenjuje na temelju njegova utjecaja na kvalitetu slike. Time se omogućuje usporedba učinkovitosti različitih kompresijskih postupaka ili učinkovitosti istog kompresijskog postupka uz različite omjere kompresije.

Važno je istaknuti da je analizirana slika prošla kroz postupak kodiranja i dekodiranja. Kako promatrača digitalne slike zanima ocjena kvalitete na strani prijema, onda se ta ocjena provodi na dobivenoj dekodiranoj slici.

Kvaliteta dekodirane slike može se mjeriti korištenjem različitih mjera. Mjere kvalitete slike općenito se mogu podijeliti na objektivne i subjektivne. Objektivne se proračunavaju uz upotrebu matematičkih operacija i modela ili su rezultat mjerenja mjernim instrumentima [87]. Kod subjektivnih mjera ocjene daju promatrači.

Kako bi se analizirala kvaliteta predložene EEDC metode za kompresiju slike korištene su različite nekomprimirane standardne testne slike *peppers*, *camera* i *lena* u *pgm* formatu. Slike su veličine 257×257 elemenata slike, a izabrane su tako da svojim sadržajem dobro predstavljaju različite tipove slika. Nekomprimirane slike komprimirane su pomoću JPEG-a, JPEG 2000 i EEDC-a tako da veličina slike zadovoljava traženi stupanj kompresije. Kompresija se vršila za 5 različitih stupnjeva kompresije 0.8, 0.4, 0.2, 0.1 i 0.05 bpp. Nakon toga slike su dekomprimirane i pohranjene u *pgm* formatu.

7.1 Objektivno mjerenje kvalitete

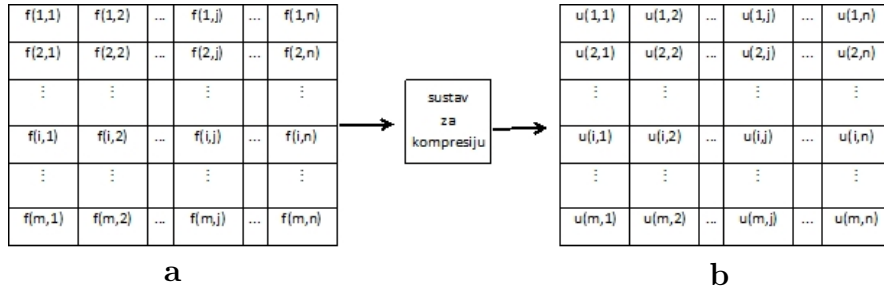
Objektivno vrjednovanje kvalitete digitalne slike temelji se na razlici izvorne i dekodirane slike koja predstavlja pogrješku, odnosno gubitak kvalitete. Razvijene su brojne metode koje se razlikuju po pristupu, kompleksnosti i točnosti.

Pojam pogrješke temeljni je pojam za mjerenje kvalitete, a porijeklo mu je u teoriji pogrješaka od C. F. Gaussa. Digitalna se slika može predstaviti dvodimenzionalnom matricom čiji elementi predstavljaju svjetlinu slike. Utjecaj kompresije s gubiticima možemo razmotriti prema slici 7.1. Neka je f izvorna slika prije kompresije, a $f_{i,j}$ razina svjetline u elementu slike na mjestu (i, j) . Dekodirana slika nakon dekompresije u ima u elementu slike na mjestu (i, j) razinu svjetline $u_{i,j}$. Određivanjem razlike između odgovarajućih elemenata izvorne i dekodirane slike definirana je apsolutna pogreška

$$p_{i,j} = u_{i,j} - f_{i,j} \quad (7.1)$$

gdje je i red, a j stupac. Apsolutnu ćemo pogrješku dalje zvati samo pogreška. Apsolutna vrijednost pogreške je

$$|p_{i,j}| = |u_{i,j} - f_{i,j}|. \quad (7.2)$$



Slika 7.1: Predstavljanje slike dvodimenzionalnom matricom, **(a)** izvorna slika, **(b)** dekodirana slika nakon dekompresije.

Aritmetička sredina apsolutne vrijednosti pogreške (eng. *average absolute error (AAE)*) između dekodirane slike ($u_{i,j}$) i izvorne slike ($f_{i,j}$) je

$$AAE(u, v) := \frac{1}{nm} \sum_{i,j} |u_{i,j} - f_{i,j}| \quad (7.3)$$

gdje m označava broj elemenata slike u okomitom smjeru (tj. visinu slike), a n označava broj elemenata slike u vodoravnom smjeru (tj. širinu slike). Manja vrijednost AAE znači manju pogrješku dekodirane slike u odnosu na izvornu.

Srednja kvadratna pogriješka (eng. *mean squared error (MSE)*) između dekodirane slike $(u_{i,j})$ i izvorne slike $(f_{i,j})$ je

$$\text{MSE}(u, v) := \frac{1}{nm} \sum_{i,j} |u_{i,j} - f_{i,j}|^2. \quad (7.4)$$

MSE je mjera snage šuma. Kvadrat pogriješke prigušuje male razlike između dvaju elemenata slike, ali kažnjava velike. Manja vrijednost MSE znači manju pogriješku.

Omjer signal/šum (eng. *signal to noise ratio (SNR)*)

$$\text{SNR}(f, g) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sigma^2(g)}{\text{MSE}} \right). \quad (7.5)$$

To je omjer prosječne snage signala i omjer prosječne snage prisutnog šuma, tj. u ovom slučaju odstupanja od izvorne slike. Jedinica je mjere decibel (dB). Veća vrijednost SNR znači veću sličnost s izvornom slikom.

Amplituda elemenata slike ima raspon

$$\text{MAX} := |0, 2^q - 1| \quad (7.6)$$

pri čemu je q broj bitova potrebnih za prikaz amplitude elemenata izvorne slike. MSE ne uzima u obzir MAX stoga se uvodi *vršni omjer signal/šum* (eng. *peak signal to noise ratio (PSNR)*):

$$\text{PSNR}(u, v) := 10 \log_{10} \frac{\text{MAX}^2}{\text{MSE}} = 20 \log_{10} \frac{\text{MAX}}{\sqrt{\text{MSE}}} \quad (7.7)$$

PSNR je logaritamski omjer između najveće moguće snage signala i snage šuma. Jedinica je mjere decibel (dB). Vrijednost $\text{PSNR} = 0$ znači da nema sličnosti između ispitivanih slika, dok vrijednost $\text{PSNR} = 100$ znači da su uspoređivane slike jednake.

SSIM mjera (eng. *structure similarity*) novija je metoda računanja sličnosti između dvaju slika [86]. SSIM je razvijen kako bi poboljšao tradicionalne metode objektivne ocjene kvalitete koje su se pokazale nekonzistentnima sa subjektivnom ocjenom kvalitete. Osnovna je zamisao da je ljudski vizualni sustav prilagođen za obradu strukturalnih informacija i ova mjera nastoji mjeriti promjenu u ovoj informaciji između izvorne slike i dekodirane slike. Neka su x_i i y_i dva diskretna signala gdje je $i = 1, 2, \dots, N$. Srednja vrijednost diskretnog signala x_i je

$$\mu_x := \frac{1}{N} \sum_i^N x_i. \quad (7.8)$$

Srednja vrijednost diskretnog signala y_i je

$$\mu_y := \frac{1}{N} \sum_i^N y_i. \quad (7.9)$$

Varijanca od x_i je

$$\sigma_x^2 := \frac{1}{N-1} \sum_i^N (x_i - \mu_x)^2. \quad (7.10)$$

Varijanca od y_i je

$$\sigma_y^2 := \frac{1}{N-1} \sum_i^N (y_i - \mu_y)^2. \quad (7.11)$$

Kovarijanca od x_i i y_i je

$$\sigma_{xy} := \frac{1}{N-1} \sum_i^N (x_i - \mu_x) (y_i - \mu_y). \quad (7.12)$$

SSIM se računa lokalno preko prozora određene veličine (uobičajeno je 8×8). Za svaki lokalni prozor izračunaju se tri vrijednosti: svjetlina, kontrast i struktura prozora. Vrijednost koja iskazuje promjenu intenziteta svjetline računa se pomoću izraza

$$l(x, y) := \frac{2\mu_x\mu_y}{\mu_x^2 + \mu_y^2}. \quad (7.13)$$

Kontrast se računa pomoću varijance između izvorne i dekodirane slike prema

$$c(x, y) := \frac{2\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}. \quad (7.14)$$

Strukturna sličnost koristi kovarijancu dviju slika i izračunava se pomoću

$$s(x, y) := \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x\sigma_y}. \quad (7.15)$$

Na kraju se te tri komponente kombiniraju u izraz

$$\text{SSIM}(x, y) := [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma \quad (7.16)$$

gdje su α, β i γ parametri koji definiraju relativnu važnost svake komponente. Poseban je slučaj kada su $\alpha = \beta = \gamma = 1$ pa je rezultirajući SSIM indeks dan izrazom

$$\text{SSIM}(x, y) = \frac{4\mu_x\mu_y\sigma_{xy}}{(\mu_x^2 + \mu_y^2)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}. \quad (7.17)$$

U slučaju kada je nazivnik blizu 0, rezultirajuća mjera postaje nestabilna. Taj je problem moguće riješiti ako se vodi računa o dinamičkoj granici vrijednosti elemenata slike L . U pravilu je $L = 2^b - 1$, gdje je b broj bita po elementu slike. Za 8 bita po elementu slike, tj. 256 različitih razina svjetline $L = 255$. Kako bi se stabiliziralo dijeljenje s jako malim nazivnikom uvode se konstante C_1 i C_2 koje

se računaju pomoću dinamičke granice vrijednosti elemenata slike L sljedećim izrazima

$$C_1 := (K_1 L)^2, \quad (7.18)$$

$$C_2 := (K_2 L)^2, \quad (7.19)$$

gdje je konstanta $K_1 \ll 1$ i konstanta $K_2 \ll 1$. Najčešće se koriste $K_1 = 0.01$ i $K_2 = 0.03$. Indeks SSIM opisan je izrazom

$$\text{SSIM}(x, y) := \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}. \quad (7.20)$$

Da ne bi došlo do pojave blokova u mapi SSIM indeksa, kao posljedica računanja unutar lokalnog prozora, uzorci se filtriraju pomoću Gaussovog prozora (11×11). Tip prozora, stabilizacijske konstante i eksponenti mogu se prilagođavati primjeni. Ukupni SSIM izračuna se kao srednja vrijednost SSIM indeksa svih prozora. Rezultat može biti između 0 i 1, a bolje su veće vrijednosti. Vrijednost $\text{SSIM} = 0$ znači da nema sličnosti između ispitivanih slika, dok vrijednost $\text{SSIM} = 1$ znači da su uspoređivane slike jednake. Ova metoda uzima u obzir prostorno vremenska svojstva ljudskog vizualnog sustava.

MS-SSIM mjera (eng. *multi-scale structure similarity*) temeljena je na SSIM mjeri [88], ali se kontrast i struktura računaju na različitim frekvencijskim skalama. Računanje na različitim skalama ispituje kvalitetu slike za različite udaljenosti promatranja. Svjetlina se računa samo na zadnjoj skali (najnižim frekvencijama) te se MS-SSIM računa kao kombinacija svih ranije izračunatih koeficijenata na svim skalama. Na ovaj način mogu se podešavati različiti parametri eksperimenta poput udaljenosti promatrača od ispitivanih slika. Na izvornoj i dekodiranoj slici iterativno se primijenjuje nisko-propusni filter koji rekvantizira filtriranu sliku za faktor 2. Izvorna slika označava se kao skala 1, a najveća skala kao skala M . Najveća skala M dobije se iterativnim postupkom nakon $M - 1$ iteracija. Promjena intenziteta svjetline (7.13) računa se samo na skali M i označava se s $l_M(x, y)$. Na proizvoljnoj skali j , računaju se kontrast $c_j(x, y)$ pomoću (7.14) i strukturna sličnost $s_j(x, y)$ pomoću (7.15).

$$\text{MS-SSIM}(x, y) := [l(x, y)]^{\alpha_M} \prod_{j=1}^M [c(x, y)]^{\beta_j} [s(x, y)]^{\gamma_j} \quad (7.21)$$

Slično kao i kod (7.16), eksponenti α_M, β_j i γ_j služe dodijeljivanju relativnih važnosti različitim komponentama. Kao i kod SSIM, rezultat može biti između 0 (nema sličnosti) i 1 (identične slike). Nedostatak ove mjere zahtjevan je izračun koji treba nekoliko puta više vremena od SSIM mjere.

VIF mjera (eng. *visual information fidelity*) [79] kvantificira informaciju koja je podijeljena između referentne i izobličene slike u odnosu na informaciju koja

je sadržana u samoj referentnoj slici. Koristi model prirodne scene NSS (eng. *Natural Scene Statistic*) zajedno s modelom izobličenja slike i modelom ljudskog vizualnog sustava (eng. *human visual system (HSV)*). Rezultat može biti između 0 (nema sličnosti) i 1 (identične slike).

7.2 Rezultati i analiza objektivnog mjerenja kvalitete

Kako bi se pouzdano utvrdila uspješnost EEDC kompresije izvršena je vizualno deskriptivna usporedba različitih metoda kompresije i mjerena je objektivna kvaliteta komprimiranih standardnih testnih slika *trui*, *peppers*, *camera* i *lena*. Ove testne slike izabrane su tako da njihov sadržaj prikazuje detalje na kojima se može provesti ispitivanje. EEDC kompresija uspoređivana je s JPEG-om i JPEG 2000 na osnovi dekodiranih slika za stupnjeve kompresije 0.8, 0.4, 0.2, 0.1 i 0.05 bpp. Ocjena kvalitete provedena je na dekodiranim slikama u *pgm* formatu.

Sljedeće metode korištene su za izračunavanje objektivne kvalitete slike: aritmetička sredina apsolutne vrijednosti pogreške (AAE) prema (7.3), srednja kvadratna pogreška (MSE) prema (7.4), omjer signal/šum (SNR) prema (7.5), vršni omjer signal/šum (PSNR) prema (7.7), SSIM mjera prema (7.16), MS-SSIM mjera prema (7.21) i VIF mjera prema [79]. Rezultati objektivnog mjerenja kvalitete bit će prikazani u tablicama i pripadnim grafovima. Graf se sastoji od horizontalne osi gdje je iskazan stupanj kompresije u bitovima po elementu slike, a na vertikalnoj je osi iznos dobiven ispitivanom mjerom.

7.2.1 Standardna testna slika *trui*

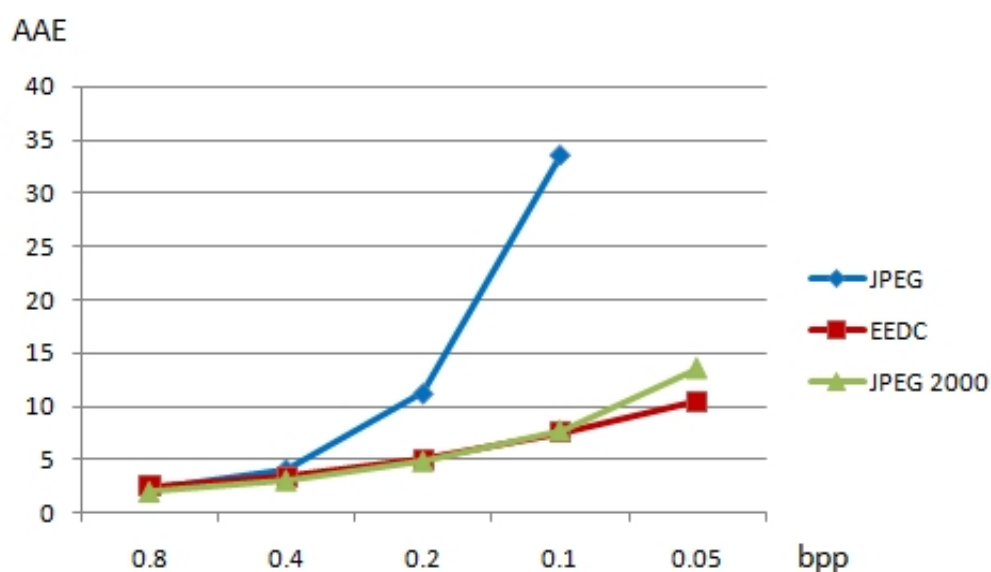
U poglavlju 6.6 provedena je vizualno deskriptivna usporedba EEDC metode s JPEG-om i JPEG 2000 za testnu sliku *trui*. Ta ocjena bit će proširena s rezultatima objektivnog mjerenja kvalitete.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	2.24	2.52	1.97
0.4	4.12	3.41	3.05
0.2	11.25	4.99	4.84
0.1	33.65	7.55	7.72
0.05		10.49	13.53

Tablica 7.1: Usporedba aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške (AAE) za sliku *trui* i različite stupnjeve kompresije.

Kvantitativna mjerenja aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške

prikazana su u tablici 7.1. Manja vrijednost AAE znači manju pogrešku dekodirane slike u odnosu na izvornu. Vidimo da za stupanj kompresije 0.8 bpp, EEDC ima najlošije performanse, JPEG je malo bolji, a JPEG 2000 daje najbolje rezultate. Za stupanj kompresije od 0.4 i 0.2 bpp JPEG postaje lošiji od EEDC metode i s većim stupnjem kompresije postaje bitno lošiji, dok je JPEG 2000 još uvijek najbolji. Za stupanj kompresije 0.1 bpp, JPEG je daleko najlošiji, dok EEDC daje bolje rezultate od JPEG 2000 koji predstavlja najnovije dostignuće u području kompresije slike. Za stupanj kompresije 0.05 bpp, JPEG 2000 postiže aritmetičku sredinu apsolutne vrijednosti pogreške od 13.53 postaje značajno lošiji od EEDC-a s pogreškom 10.63.



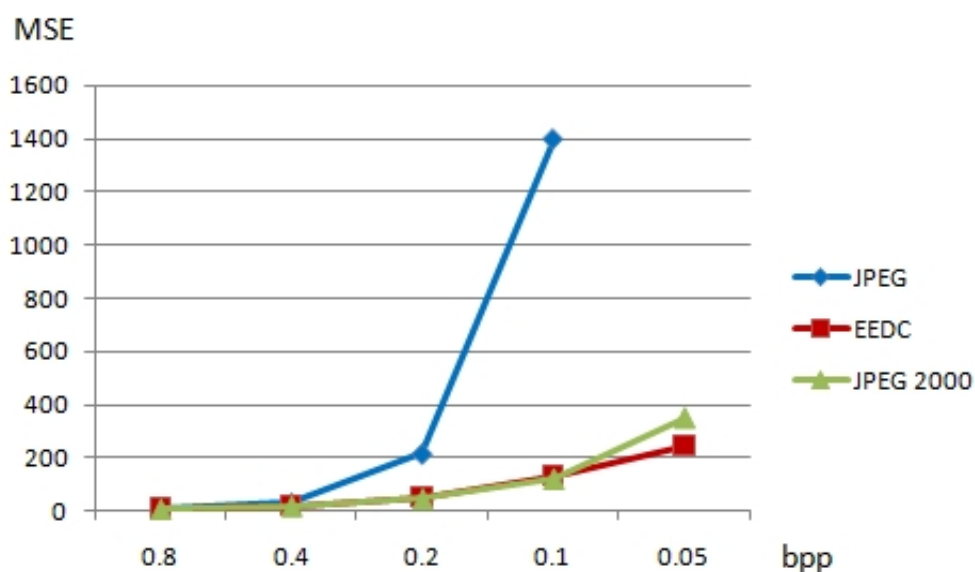
Slika 7.2: Usporedba aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 bita po elementu slike do 0.05 bpp za testnu sliku *trui*.

Na slici 7.2 prikazan je odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije pomoću vrijednosti aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške koju svaka od metoda ostvaruje. Za najveći ispitivani stupanj kompresije 0.8 bpp, razlike između svih metoda su rubne. Dok se kvaliteta JPEG metode naglo pogoršava kako se povećava kompresija, JPEG 2000 i EEDC pokazuju umjereno povećanje pogreške u dekodiranju s povećavanjem kompresije. Na grafu je vidljivo da su vrijednosti aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške za JPEG 2000 i EEDC vrlo blizu po vrijednostima sve do najveće ispitivane kompresije od 0.05 bpp kada EEDC ima vidno manju pogrešku od JPEG 2000 metode.

Izračunata srednja kvadratna pogriješka za uspoređivane metode prikazana je u tablici 7.2. Manja vrijednost MSE znači manju pogriješku. Prema izračunatim vrijednostima MSE pri stupnju kompresije od 0.8 bpp, EEDC je najlošija metoda, malo bolji je JPEG, a JPEG 2000 daje izrazito najbolje rezultate. Pri stupnjevima kompresije od 0.4, 0.2 i 0.1 bpp, JPEG je značajno najlošiji, EEDC je u sredini, a JPEG 2000 je najbolji. Pri stupnju kompresije 0.05 bpp, JPEG 2000 ima srednju kvadratnu pogriješku 349.34 pa je znatno lošiji od EEDC metode s $MSE = 274.02$.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	9.54	10.89	6.71
0.4	32.06	21.71	18.10
0.2	216.59	51.54	46.16
0.1	1400.25	134.09	119.94
0.05		245.14	349.34

Tablica 7.2: Usporedba srednje kvadratne pogriješke (MSE) za sliku *trui* i različite stupnjeve kompresije.



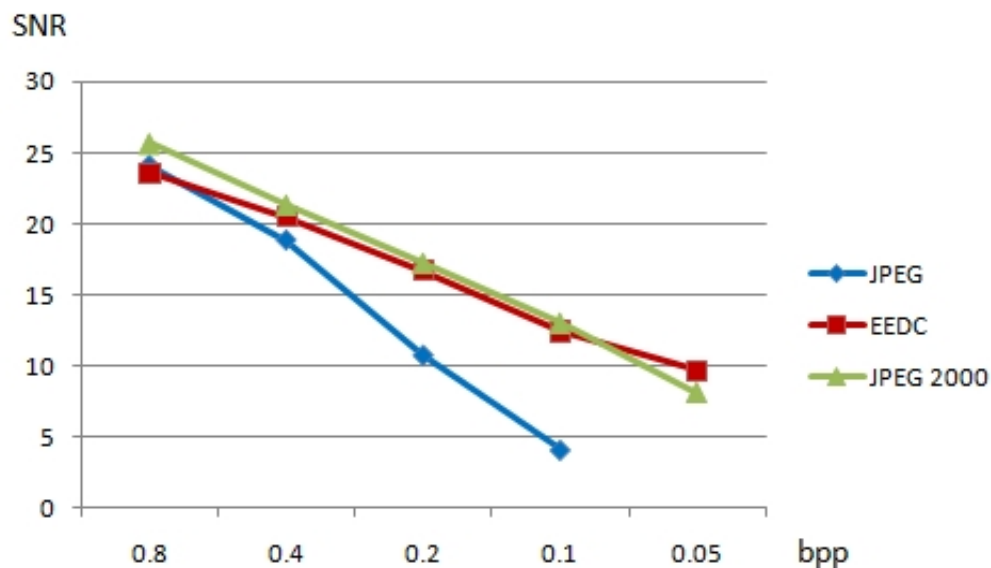
Slika 7.3: Usporedba srednje kvadratne pogriješke EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *trui*.

Graf na slici 7.3 prikazuje odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 za niz

različitih stupnjeva kompresije iskazan kroz srednju kvadratnu pogrešku. Za najmanji stupanj kompresije 0.8 bpp, razlike između svih metoda su rubne. Dok se JPEG ubrzano pogoršava pri većim stupnjevima kompresije JPEG 2000 i EEDC pokazuju umjereno povećanje pogreške u dekodiranju i male razlike u kvaliteti. Za najveću kompresiju 0.05 bpp vidljivo je da EEDC ima manju pogrešku od JPEG 2000.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	24.09	23.58	25.67
0.4	18.85	20.52	21.33
0.2	10.75	16.72	17.21
0.1	4.07	12.43	12.98
0.05		9.64	8.09

Tablica 7.3: Usporedba omjera signal/šum (SNR) za sliku *trui* i različite stupnjeve kompresije.



Slika 7.4: Usporedba omjera signal/šum EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *trui*.

Kvantitativna mjerenja omjera signal/šum za ispitivane metode i stupnjeve kompresije dana su tablici 7.3. Veća vrijednost SNR znači veću sličnost s izvornom slikom. Za stupanj kompresije 0.8 bpp EEDC ima najlošije performase, JPEG je

u sredini, a JPEG 2000 daje najbolje rezultate. Pri stupnjevima kompresije 0.4, 0.2 i 0.1 bpp JPEG je najlošiji, EEDC s povećanjem kompresije postaje primjetno bliži JPEG 2000 koji ostvaruje najbolje vrijednosti. Pri kompresiji od 0.05 bpp JPEG 2000 ostvaruje vrijednost omjera signal/šum 8.09 što je lošije od EEDC-a s vrijednošću omjera 9.27.

Grafički prikaz izračunatih vrijednosti omjera signal/šum za sliku *trui* i različite stupnjeve kompresije prikazan je na slici 7.4, za EEDC, JPEG, i JPEG 2000. Za najmanju kompresiju 0.8 bpp, vidljivo je da JPEG 2000 ostvaruje bolje rezultate, dok su razlike između JPEG-a i EEDC-a rubne. Dok se JPEG ubrzano pogoršava pri većim stupnjevima kompresije, JPEG 2000 i EEDC pokazuju podjednako smanjenje SNR vrijednosti u dekodiranju. Za najveću ispitivanu kompresiju 0.05 bpp vidljivo je da EEDC ostvaruje veću vrijednost od JPEG 2000, a time ima i veću sličnost s izvornom slikom.

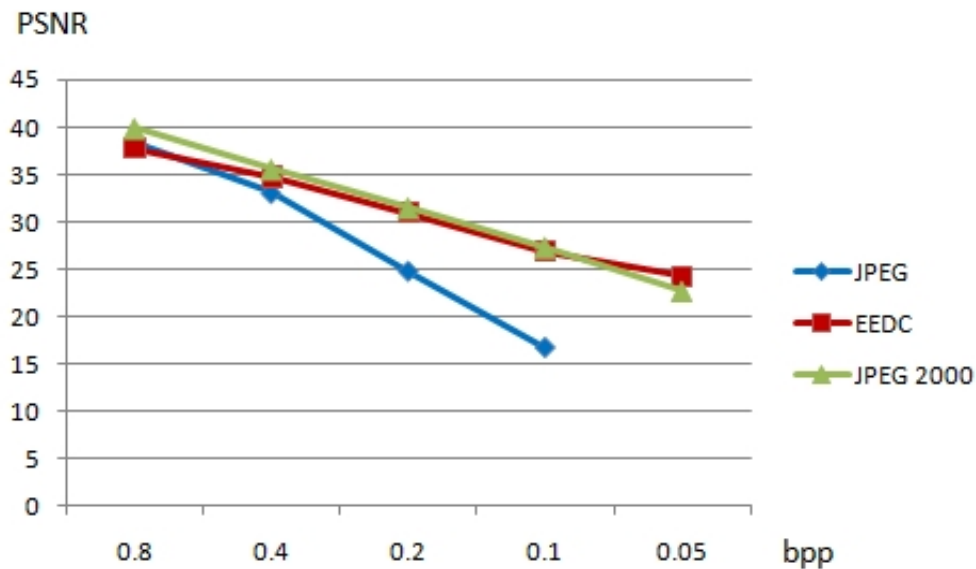
Kvantitativna mjerenja vršni omjer signal/šum dana su u tablici 7.4. Veća vrijednost PSNR znači veću sličnost s izvornom slikom. Za stupanj kompresije 0.8 bpp EEDC ima najlošiji rezultat, JPEG je malo bolji, ali lošiji od JPEG 2000. Pri stupnjevima kompresije 0.4, 0.2 i 0.1 bpp kvaliteta JPEG je najmanja i naglo se pogoršava s povećanjem kompresije, a EEDC postaje značajnije bolji od JPEG-a, JPEG 2000 daje najbolje rezultate, ali za veću kompresiju razlika u kvaliteti u odnosu na EEDC se smanjuje. Za najveću kompresiju 0.05 bpp, EEDC ostvaruje vršni omjer signal/šum 23.75 što je bolje od vršnog omjera JPEG-a 2000 22.70.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	38.34	37.76	39.87
0.4	33.07	34.76	35.55
0.2	24.77	31.01	31.49
0.1	16.67	26.86	27.34
0.05		24.24	22.70

Tablica 7.4: Usporedba vršnog omjera signal/šum (PSNR) za sliku *trui* i različite stupnjeve kompresije.

Odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije i pripadne PSNR vrijednosti, prikazan je grafički na slici 7.5. Za kompresiju 0.8 bpp, vidljivo je da JPEG 2000 ostvaruje bolje rezultate, dok su razlike između JPEG-a i EEDC-a rubne. Dok se JPEG ubrzano pogoršava pri većim stupnjevima kompresije, JPEG 2000 i EEDC također pokazuju smanjenje kvalitete u dekodiranju, ali PSNR vrijednosti se približavaju. Na najvećoj ispitivanoj kompresiji 0.05 bpp vidljivo je da EEDC ostvaruje veću vrijednost od JPEG 2000, što i u ovom slučaju označava veću sličnost s izvornom slikom, a time i bolju kvalitetu dekodiranja.

Izračunate vrijednosti SSIM mjere za ispitivane metode kompresije i različite



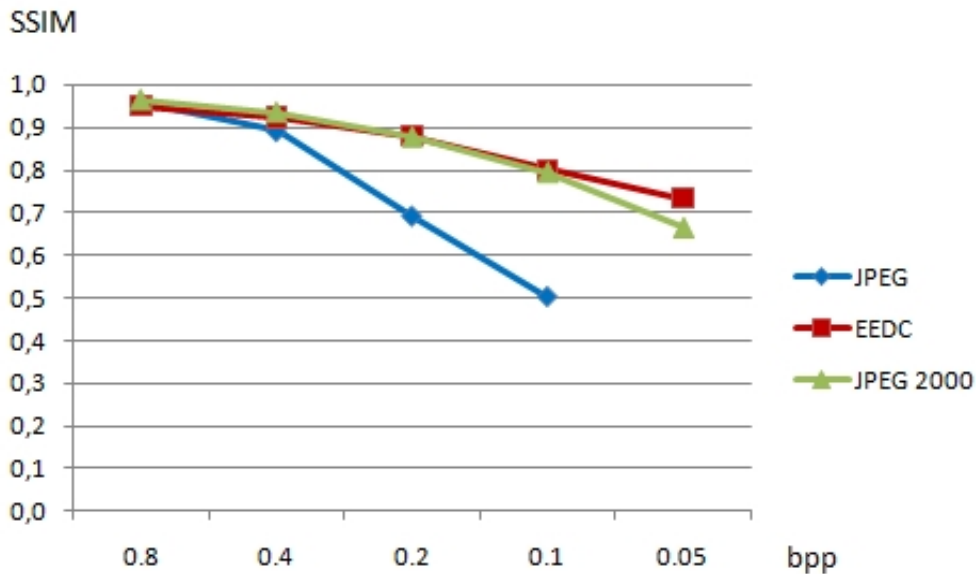
Slika 7.5: Usporedba vršnog omjera signal/šum EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *trui*.

stupnjeve kompresije prikazane su u tablici 7.5. SSIM mjera poprima vrijednosti na intervalu od 0 do 1. Pri usporedbi dvaju metoda bolja je ona metoda koja ostvaruje veće vrijednosti. Vidimo da za kompresiju od 0.8 bpp EEDC ima najlošije vrijednosti, JPEG je u sredini, a JPEG 2000 daje najbolje rezultate. Pri kompresiji od 0.4 bpp, JPEG ima najlošije performanse, EEDC je u sredini, JPEG 2000 daje najbolje rezultate. Za stupnjeve kompresije 0.2 bpp i 0.1 bpp, JPEG ima najlošije performanse, JPEG 2000 je u sredini, a EEDC daje najbolje rezultate. Za 0.05 bpp JPEG 2000 je znatno lošiji od EEDC metode.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	0.96	0.95	0.97
0.4	0.89	0.92	0.94
0.2	0.69	0.88	0.88
0.1	0.50	0.80	0.79
0.05	-	0.73	0.66

Tablica 7.5: Usporedba SSIM mjere za sliku *trui* i različite stupnjeve kompresije.

Prema vrijednostima dobivenim SSIM mjerom na slici 7.6 dan je grafički prikaz odnosa između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupn-



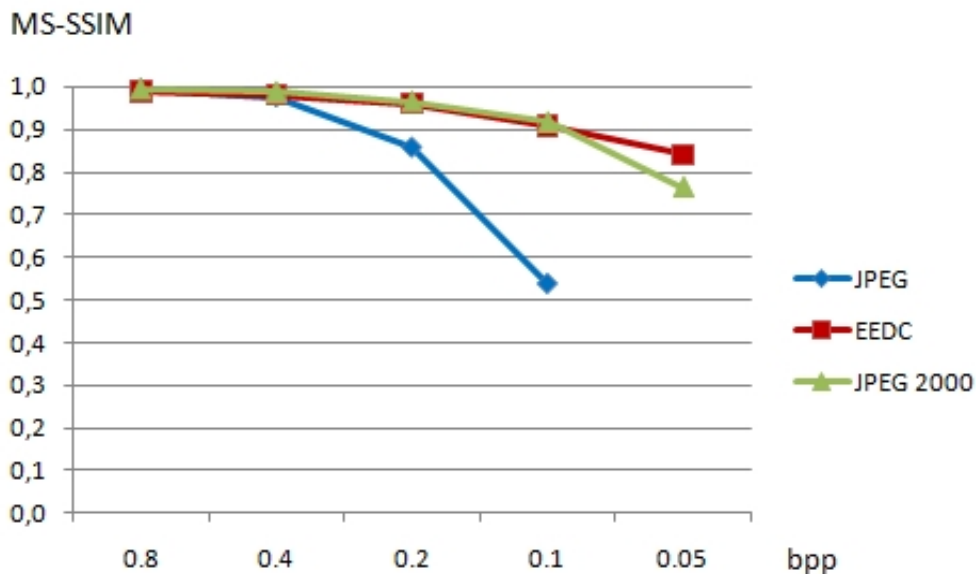
Slika 7.6: Usporedba SSIM mjere EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *trui*.

jeva kompresije. Vidljivo je da JPEG 2000 ostvaruje najbolje rezultate za stupanj kompresije 0.8 bpp, slijedi JPEG, a zatim EEDC. Povećanjem stupnja kompresije JPEG se ubrzano pogoršava, JPEG 2000 i EEDC pokazuju gotovo linearno smanjenje kvalitete u dekodiranju. Za najveći ispitivani stupanj kompresije 0.05 bpp vidljivo je da EEDC ostvaruje značajnije veću vrijednost od JPEG 2000.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	0.99	0.99	0.99
0.4	0.97	0.98	0.99
0.2	0.86	0.96	0.96
0.1	0.54	0.91	0.91
0.05		0.84	0.76

Tablica 7.6: Usporedba MS-SSIM mjere za sliku *trui* i različite stupnjeve kompresije.

Izvršena je usporedba ispitivanih metoda kompresije za različite stupnjeve kompresije, dobiveni rezultati MS-SSIM mjerom prikazani su u tablici 7.6. Rezultat MS-SSIM mjere može biti između 0 i 1, bolju kvalitetu označavaju veće vrijednosti. Za najmanju ispitivanu kompresiju (0.8 bpp) JPEG, EEDC i JPEG



Slika 7.7: Usporedba MS-SSIM mjere EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *trui*.

2000 imaju jednako dobru kvalitetu dekodiranja. JPEG je najlošiji za veće stupnjeve kompresije. Pri stupnjevima kompresije 0.2 i 0.1 bpp EEDC i JPEG 2000 ostvaruju jednaku kvalitetu. EED je izrazito bolji od JPEG 2000 za stupanj kompresije 0.05 bpp.

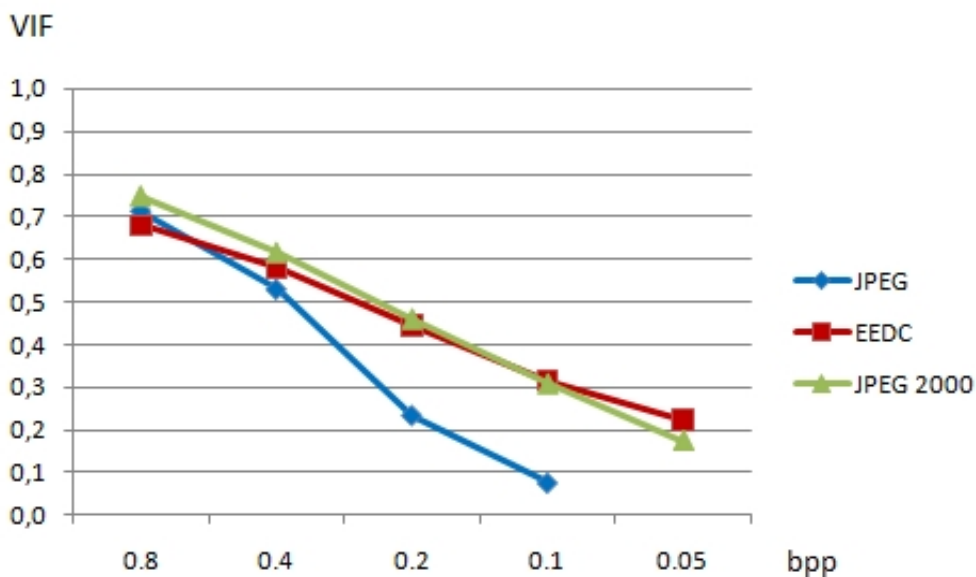
Na slici 7.7 grafički pokazujemo odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000. Kroz niz različitih stupnjeva kompresije izračunat ćemo pomoću MS-SSIM mjere. Sve metode kompresije imaju jednaku vrijednost za stupanj kompresije 0.8 bpp, za veći stupanj kompresije 0.4 bpp razlika u kvaliteti ostaje mala. Kvaliteta JPEG naglo se pogoršava pri većim stupnjevima kompresije. JPEG 2000 i EEDC nemaju tako nagli pad kvalitete dekodirane slike i ostvarene vrijednosti za stupanj kompresije 0.2 i 0.1 bpp jednake su. Vidljivo bolju kvalitetu ostvaruje EEDC u odnosu na JPEG 2000 za najveći ispitivani stupanj kompresije 0.05 bpp.

Posljednja je ispitivana objektivna mjera kvalitete VIF mjera, a rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 7.7. Rezultat može biti između 0 i 1, veće vrijednosti su bolje. Vidimo da za stupanj kompresije od 0.8 bpp EEDC ima najlošije performanse, JPEG je u sredini, a JPEG 2000 daje najbolje rezultate. Za veće stupnjeve kompresije JPEG daje sve lošije rezultate koji s povećavanjem stupnja sve više odstupaju od JPEG 2000 i EEDC metode. Pri stupnjevima kompresije 0.4 i 0.2 bpp EEDC je sve bliže kvaliteti JPEG 2000 koji daje najbolje rezultate. Povećanjem kompresije JPEG 2000 postaje lošiji od EEDC-a koji daje sve bolje rezultate.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	0.71	0.68	0.75
0.4	0.53	0.58	0.61
0.2	0.23	0.45	0.46
0.1	0.08	0.32	0.31
0.05		0.22	0.17

Tablica 7.7: Usporedba VIF mjere za sliku *trui* i različite stupnjeve kompresije.

Grafički prikaz odnosa između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije izračunatih pomoću VIF mjere prikazan je na slici 7.8. Za kompresiju 0.8 i 0.4 bpp vidljivo je da JPEG 2000 ostvaruje najbolje rezultate, dok su razlike između JPEG 2000 i EEDC-a za kompresiju 0.2 bpp rubne. JPEG 2000 ostvaruje malo lošije rezultate od EEDC-a porastom kompresije na 0.1 bpp, a za najveću kompresiju 0.05 bpp vidljivo je da EEDC ostvaruje veću vrijednost od JPEG 2000. JPEG se ubrzano pogoršava povećavanjem stupnja kompresije, pri tome je najveći pad između 0.4 i 0.2 bpp. Za veću kompresiju rezultati su znatno lošiji u odnosu na JPEG 2000 i EEDC, koji također pokazuju smanjenje kvalitete dekodirane slike za veću kompresiju.



Slika 7.8: Usporedba VIF mjere EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 10:1 (0.8 bpp) do 160:1 (0.05 bpp) za testnu sliku *trui*.

Analiza različitih objektivnih mjera pokazala je da postoje razlike u ocjeni kvalitete od metode do metode, ali odstupanja nisu velika. Svim metodama je zajednička ocjena JPEG metode, koja za mali stupanj kompresije ima dobru kvalitetu često vrlo blizu kvaliteti JPEG 2000 metode, a bolju kvalitetu od EEDC metode. Povećanjem kompresije kvaliteta naglo opada i sve više odstupa od ostalih metoda. Zajednička je i ocjena kvalitete za stupnjeve kompresije 0.8 i 0.4 bpp. Za ta dva stupnja kompresije sve metode ocjenile su JPEG 2000 kao najbolju metodu. Za stupnjeve kompresije 0.2 i 0.1 bpp dolazi do neusuglašenosti pa neke metode ocjenjuju EEDC metodu najboljom dok druge JPEG 2000. Važno je napomenuti da su pri tim stupnjevima kompresije razlike između ocjena rubne. Za stupanj kompresije 0.05 bpp ocjena je kvalitete potpuno usuglašena i najboljom je ocijenjena EEDC metoda koja ostvaruje primjetno bolje rezultate.

7.2.2 Standardna testna slika *peppers*

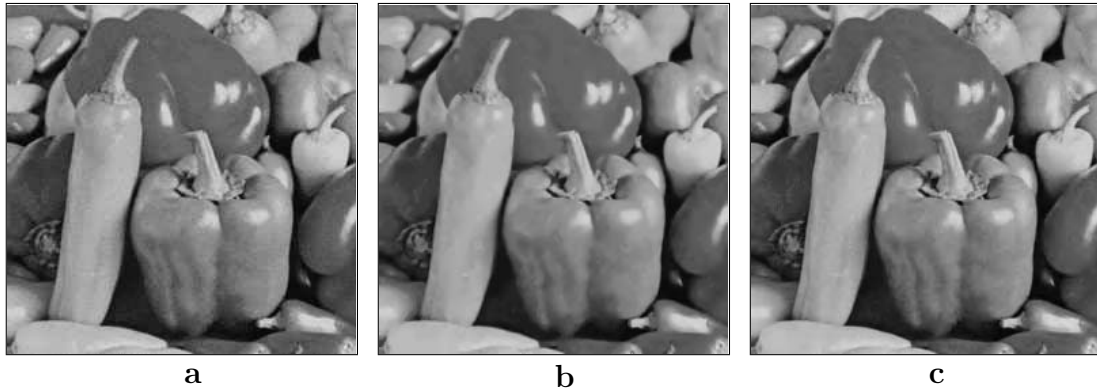
Ispitivani su učinci EEDC kompresije i uspoređivani s JPEG-om i JPEG 2000 za standardnu testnu sliku *peppers*, prikazanu na slici 7.9. Ispitivana je slika veličine 257×257 elemenata slike. Prvo je provedena vizualno deskriptivna usporedba, zatim objektivna ocjena kvalitete.



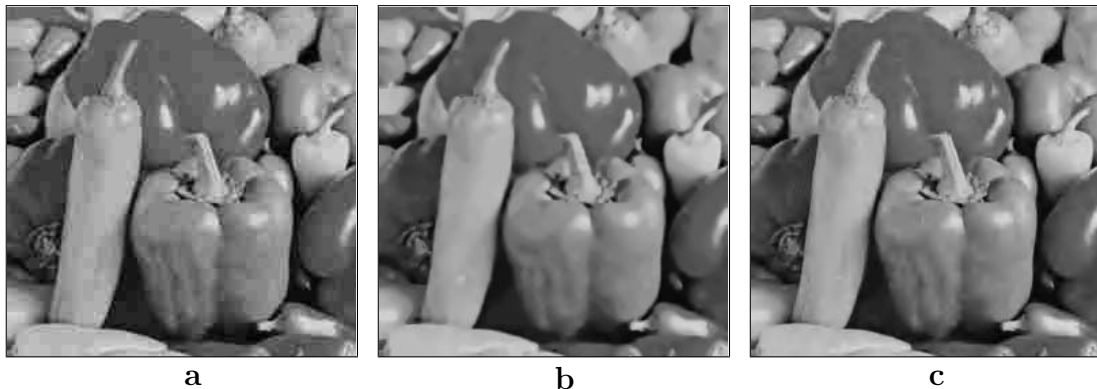
Slika 7.9: Testna slika *peppers*, 257×257 elemenata slike.

Dekodirane slike nakon kompresije za stupanj kompresije slike 0.8 bpp pomoću EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 prikazane su na slici 7.10. Iz slika je vidljivo da ne dolazi do degradacije zbog kompresije bilo kojom od testiranih metoda. Slike posjeduju iznimnu kvalitetu, gdje je moguće raspoznati svaki detalj koji se na njemu nalazi. Dekodirana slika nakon kompresije JPEG metodom prikazana je na slici 7.10 (a). Na slici 7.10 (b) prikazana je dekodirana slika nakon kompresije EEDC metodom. Za postizanje kompresije od 0.8 bpp korišten je adaptivni parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 23.49$. Na taj način preostalo je 7207 elemenata slike koji su kodirani, a u postupku dekodiranja služe kao raspršene točke interpolacije za EED difuziju. Tek pažljivim promatranjem i usporedbom s izvornom

slikom primjetan je vrlo mali gubitak detalja. Najbolji omjer detalja i kvalitete postignut je na slici 7.10 (c), koja predstavlja dekodiranu sliku nakon kompresije JPEG2000 metodom.



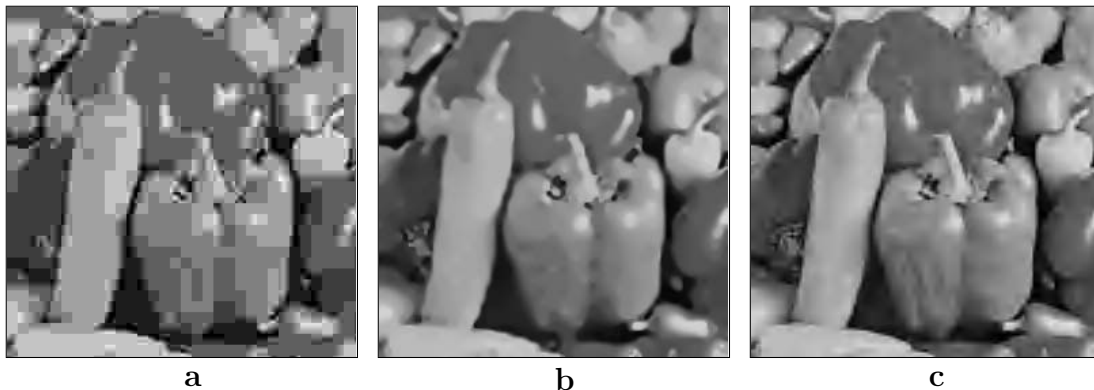
Slika 7.10: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0.8 bpp za testnu sliku *peppers* (257×257 elemenata slike). Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) JPEG-a, (b) EEDC-a i (c) JPEG 2000.



Slika 7.11: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0.4 bpp za testnu sliku *peppers* (257×257 elemenata slike). Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) JPEG-a, (b) EEDC-a i (c) JPEG 2000.

Na slici 7.11 prikazane su dekodirane slike nakon kompresije za stupanj kompresije slike 0.4 bpp pomoću EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000. Na ovom stupnju kompresije kod svih slika degradacija počinje biti primjetna, ali ne utječe na mogućnost raspoznavanja detalja. Razlike u kvaliteti počinju biti izražene. Najviše je degradacije vidljivo kod dekodirane slike nakon kompresije JPEG metodom koja je prikazana na slici 7.11 (a). Struktura blokova počinje biti primjetna. Na slici 7.11 (b) prikazana je dekodirana slika nakon kompresije EEDC

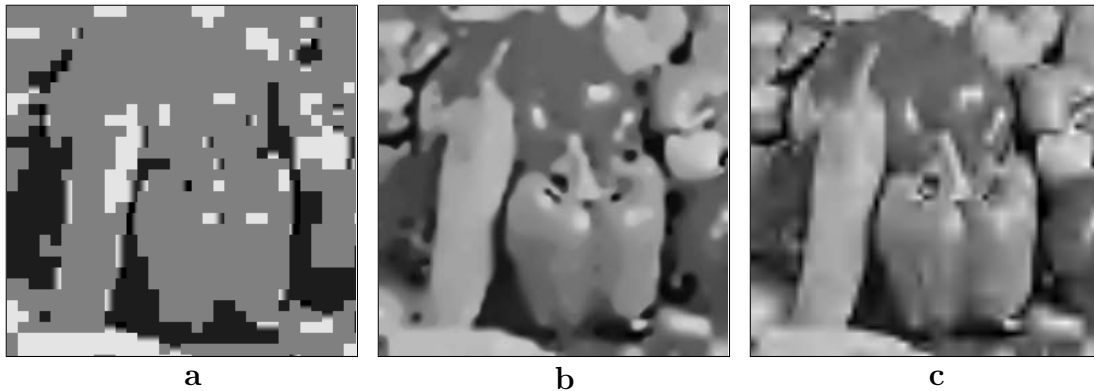
metodom. Za postizanje kompresije od 0.4 bpp EEDC metodom korišten je adaptivni parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 30.9$, a preostalo je 3459 elemenata slike. Jako fini detalji blago su zamućeni i kontrast je ublažen. Na slici 7.11 (c) je dekodirana slika nakon kompresije JPEG200 metodom. Ova slika ostavlja dojam najbolje kvalitete za ovaj stupanj kompresije jer je sačuvano najviše detalja, ali pojedini su rubovi nazubljeni.



Slika 7.12: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0.2 bpp za testnu sliku *peppers* (257×257 elemenata slike). Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) JPEG-a, (b) EEDC-a i (c) JPEG 2000.

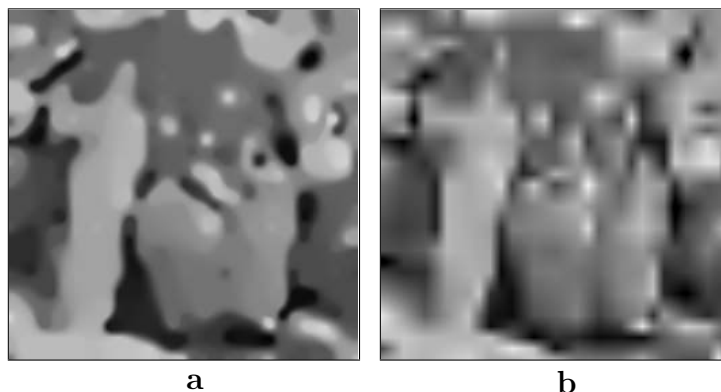
Na slici 7.12 prikazane su dekodirane slike nakon kompresije za stupanj kompresije slike 0.2 bpp pomoću EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000. Na svim je slikama izražena degradacija kvalitete. Dekodirana slika nakon kompresije JPEG metodom prikazana je na slici 7.12 (a). Primjetan je nagli pad kvalitete u odnosu na prethodni stupanj kompresije i struktura podjele na pravokutne blokove je izražena. Većina je detalja izgubljena, a samo se tri najveća objekta na slici mogu raspoznati. Na slici 7.12 (b) prikazana je dekodirana slika nakon kompresije EEDC metodom. Za postizanje kompresije od 0.2 bpp korišten je adaptivni parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 40.53$. Na taj način preostalo je 1726 elemenata slike. Rubovi su dobro očuvani, ali zbog gubitka detalja i kao posljedica difuzije slika djeluje zamućeno. Na slici 7.12 (c) vidimo dekodiranu sliku nakon kompresije JPEG200 metodom. Slika sadrži najviše detalja, ali wavelet artefakti počinju biti izraženi.

Slika 7.13 prikazuje dekodirane slike nakon kompresije za stupanj kompresije slike 0.1 bpp pomoću EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000. Potpuno je nezadovoljavajuća dekodirana slika nakon kompresije JPEG metodom prikazana na slici 7.13 (a). Vrlo mali broj DCT koeficijenata nedostatan je za rekonstrukciju slike, na kojoj nije moguće prepoznati što prikazuje. Na slici 7.13 (b) prikazana je dekodirana slika nakon kompresije EEDC metodom. Za postizanje kompresije od 0.1 bpp korišten je adaptivni parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 53.22$. Na taj način



Slika 7.13: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0.1 bpp za testnu sliku *peppers* (257×257 elemenata slike). Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) JPEG-a, (b) EEDC-a i (c) JPEG 2000.

preostalo je 834 elemenata slike. Mali broj elemenata slike u postupku dekodiranja kao posljedicu ima gubitak detalja i zamućenost slike. Na slici 7.13 (c) je dekodirana slika nakon kompresije JPEG2000 metodom. Detalji su izgubljeni, a rubovi su isprekidani i struktura blokova je primjetna.



Slika 7.14: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0,05 bpp za testnu sliku *peppers* (257×257 elemenata slike). Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) EEDC-a i (b) JPEG 2000.

JPEG ne može komprimirati sliku za stupanj kompresije 0.05 bpp. Na slici 7.14 nalaze se dekodirane slike nakon kompresije za stupanj kompresije slike 0,05 bpp pomoću EEDC-a i JPEG 2000. Za obje metode vrijedi da su izgubljene neke osnovne strukture objekata, a ne samo detalji i bez uvida u izvornu sliku ne može se raspoznati što slika prikazuje. Na slici 7.14 (a) prikazana je dekodirana slika nakon kompresije EEDC metodom. Za postizanje kompresije od 0.05 bpp korišten je adaptivni parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 69.55$. Na taj način preostalo je 412

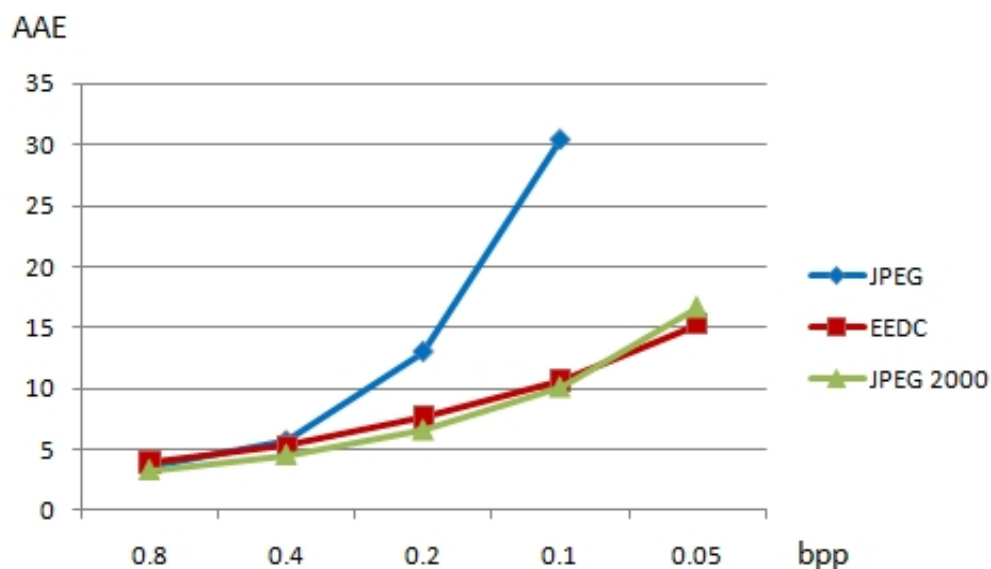
elemenata slike. Slika 7.14 (b) predstavlja dekodiranu sliku nakon kompresije JPEG 2000 metodom. Neželjene informacije u obliku izrazito izraženih umjetnih sjena na slici dominiraju i čine sliku lošijom od 7.14 (a).

Objektivno mjerenje kvalitete dekodiranih slika testne slike *peppers* za različite stupnjeve kompresije započinjemo usporedbom aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	3.59	3.94	3.28
0.4	5.62	5.25	4.53
0.2	12.99	7.51	6.55
0.1	30.49	10.63	10.06
0.05		15.28	16.59

Tablica 7.8: Usporedba aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške (AAE) za sliku *peppers* i različite stupnjeve kompresije.

U tablici 7.8 dana je aritmetička sredina apsolutne vrijednosti pogreške. Vidimo da za kompresije od 0.8 do 0.1 bpp JPEG 2000 daje najbolje rezultate. Za kompresiju 0.05 bpp EEDC daje najbolje rezultate.



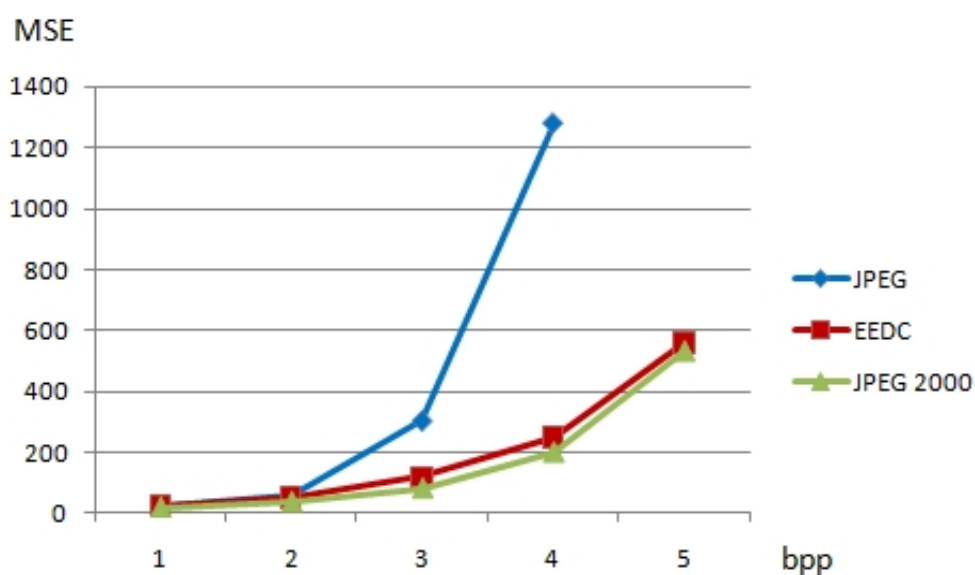
Slika 7.15: Usporedba aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *peppers*.

Na slici 7.15 grafički pokazujemo odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije izračunat pomoću AAE. Za najmanji ispitivani stupanj kompresije 0.8 bpp razlike su između svih metoda rubne. Dok se JPEG ubrzano pogoršava pri većim stupnjevima kompresije, JPEG 2000 i EEDC pokazuju umjereno povećanje pogreške u dekodiranju.

U tablici 7.9 navedena je srednja kvadratna pogreška. Vidimo da JPEG 2000 daje najbolje rezultate do stupnja kompresije 0.05 bpp gdje je JPEG 2000 znatno lošiji od EEDC metode.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	22.24	25.96	17.79
0.4	56.56	50.68	36.12
0.2	303.91	115.88	80.70
0.1	1280.52	247.71	198.83
0.05		558.89	531.53

Tablica 7.9: Usporedba srednje kvadratne pogreške (MSE) za sliku *peppers* i različite stupnjeve kompresije.



Slika 7.16: Usporedba srednje kvadratne pogreške EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *peppers*.

Odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 prikazan je na slici 7.16 kroz niz

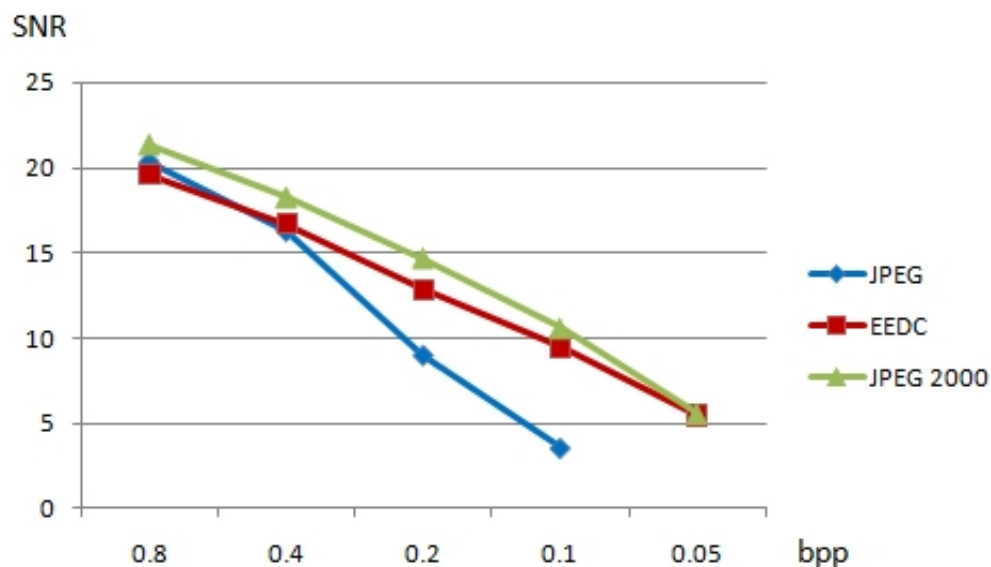
različitih stupnjeva kompresije iskazan kroz MSE mjeru. Za najmanju ispitivanu kompresiju 0.8 bpp, razlike su između svih metoda rubne. Pri većim stupnjevima kompresije JPEG se ubrzano pogoršava, a JPEG 2000 i EEDC pokazuju umjereno povećanje pogreške u dekodiranju.

Kvantitativna mjerenja omjera signal/šum dana su u tablici 7.10. Vidimo da je JPEG 2000 najbolji od 0.8 do 0.1 bpp. Pri kompresiji od 0.05 bpp JPEG 2000 lošiji je od EEDC metode.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	20.32	19.62	21.33
0.4	16.25	16.69	18.24
0.2	8.97	12.98	14.69
0.1	3.53	9.47	10.57
0.05		5.45	5.58

Tablica 7.10: Usporedba omjera signal/šum (SNR) za sliku *peppers* i različite stupnjeve kompresije.

Na slici 7.17 pokazujemo odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije za izračunati SNR. Sve metode pokazuju smanjenje kvalitete povećanjem stupnja kompresije.



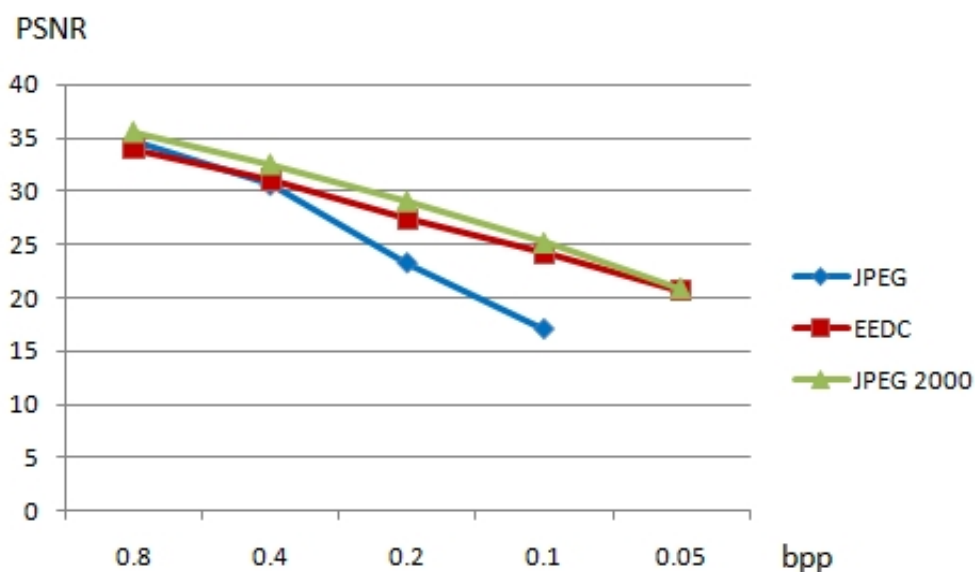
Slika 7.17: Usporedba omjera signal/šum EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *peppers*.

U tablici 7.11 naveden je vršni omjer signal/šum. JPEG 2000 daje najbolje rezultate pri stupnjevima kompresije od 0.8 do 0.1 bpp, ali za 0.05 bpp JPEG 2000 lošiji je od EEDC metode.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	34.66	33.99	35.63
0.4	30.61	31.08	32.55
0.2	23.30	27.49	29.06
0.1	17.06	24.19	25.15
0.05		20.66	20.88

Tablica 7.11: Usporedba vršnog omjera signal/šum (PSNR) za sliku *peppers* i različite stupnjeve kompresije.

Grafički prikaz izračunatih PSNR vrijednosti dan je na slici 7.18. Sve metode pokazuju smanjenje kvalitete povećanjem stupnja kompresije. Na najmanjem stupnju kompresije 0.8 bpp razlike su između metoda rubne, ali se kvaliteta JPEG-a naglo pogoršava pri većim stupnjevima kompresije.

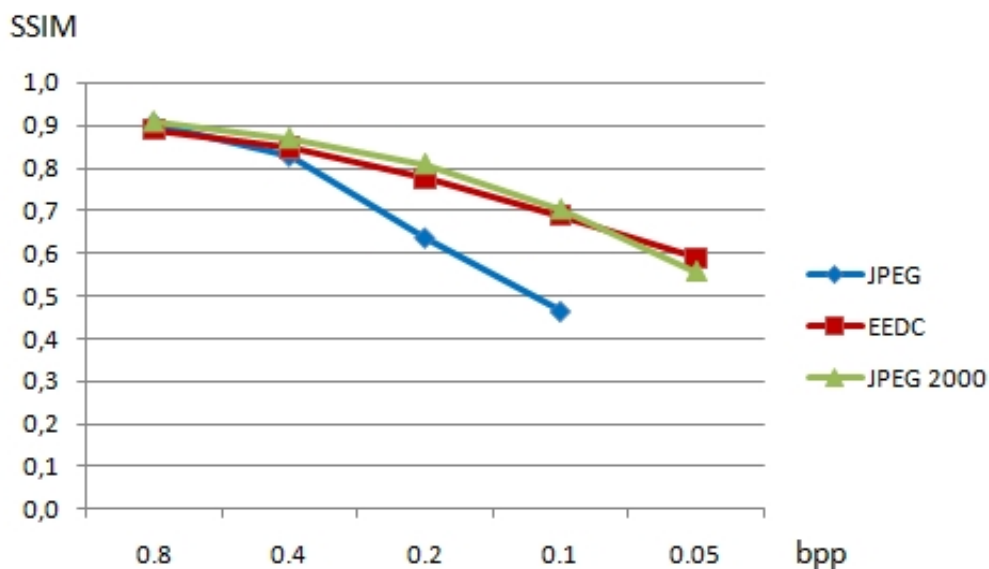


Slika 7.18: Usporedba vršnog omjera signal/šum za EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *peppers*.

Kvantitativna mjerenja pomoću SSIM mjere dana su u tablici 7.12. Vidimo da pri stupnjevima kompresije od 0.8 do 0.1 bpp JPEG 2000 daje najbolje rezultate. Pri stupnju kompresije 0.05 bpp najbolji rezultat daje EEDC metoda.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	0.91	0.89	0.91
0.4	0.83	0.85	0.87
0.2	0.64	0.78	0.81
0.1	0.46	0.69	0.70
0.05		0.59	0.56

Tablica 7.12: Usporedba SSIM mjere za sliku *peppers* i različite stupnjeve kompresije.



Slika 7.19: Usporedba SSIM mjere EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *peppers*.

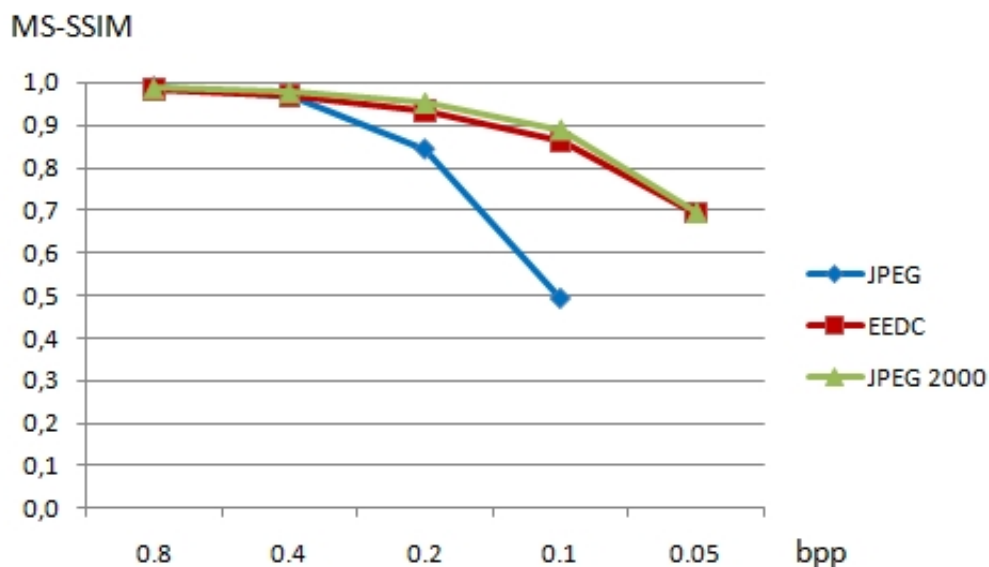
Na slici 7.19 pokazujemo odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije iz izračunatih vrijednosti SSIM mjere. Na najmanjem ispitivanom stupnju kompresije 0.8 bpp razlike su između metoda rubne. Kvaliteta se dekodirane slike za sve metode smanjuje na većim stupnjevima kompresije, a kod JPEG metode to je pogoršanje izraženije. Na najvećoj

ispitivanoj kompresiji 0.05 bpp vidljivo je da EEDC ostvaruje veću vrijednost od JPEG 2000.

Mjerenja kvalitete pomoću MS-SSIM mjera prikazana su u tablici 7.13. Na stupnju kompresije 0.8 bpp JPEG i JPEG 2000 imaju jednake vrijednosti. Za stupnjeve kompresije od 0.4 i 0,1 bpp JPEG 2000 daje najbolje rezultate. Pri stupnju kompresije 0.05 bpp JPEG 2000 i EEDC ostvaruju jednak rezultat.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	0.99	0.98	0.99
0.4	0.97	0.97	0.98
0.2	0.84	0.93	0.95
0.1	0.49	0.86	0.89
0.05		0.69	0.69

Tablica 7.13: Usporedba MS-SSIM mjere za sliku *peppers* i različite stupnjeve kompresije.



Slika 7.20: Usporedba MS-SSIM mjere EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *peppers*.

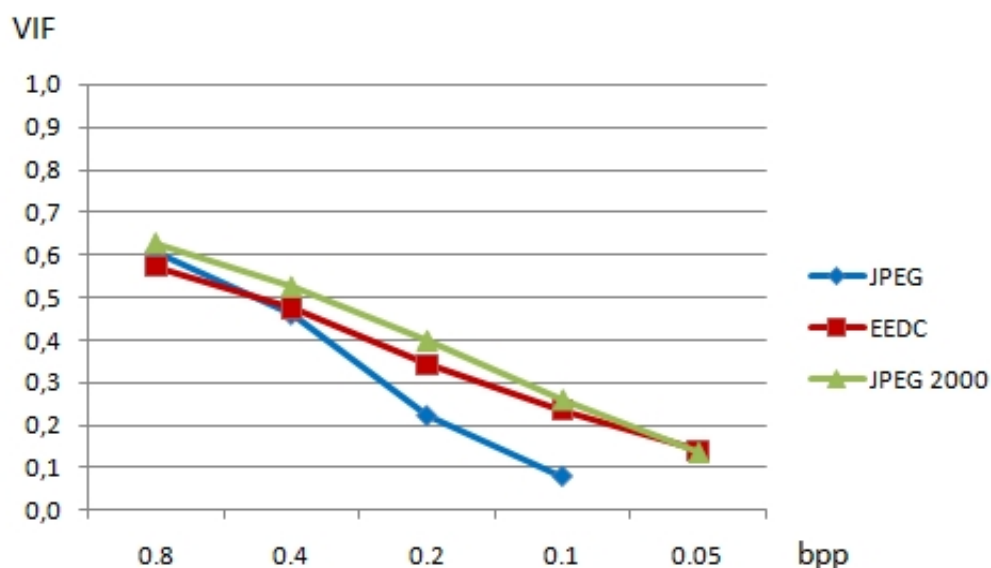
Rezultati iz tablice 7.13 prikazani su grafički, gdje postaje vidljivo da je za sve stupnjeve kompresije razlika između JPEG 2000 i EEDC metode rubna. Izraženo je naglo pogoršavanje kvalitete JPEG metode porastom stupnja kompresije.

Rezultati mjerenja VIF mjere dani su u tablici 7.14. Za stupnjeve kompresije od 0.8 do 0.1 bpp najbolji rezultat ostvaruje JPEG 2000, dok je pri kompresiji 0.05 bpp najbolja EEDC metoda.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	0.61	0.57	0.63
0.4	0.46	0.48	0.53
0.2	0.22	0.35	0.39
0.1	0.08	0.24	0.26
0.05		0.14	0.13

Tablica 7.14: Usporedba VIF mjere za sliku *peppers* i različite stupnjeve kompresije.

Na slici 7.21 grafički je prikaz rezultata iz tablice 7.14. Kvaliteta je JPEG 2000 i EEDC metode podjednaka, dok se JPEG od stupnja kompresije 0.4 bpp naglo pogoršava.



Slika 7.21: Usporedba VIF mjere EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *peppers*.

Analiza je pokazala da se kvaliteta dekodirane slike može značajno razlikovati kod različitih slika za isti stupanj kompresije, pogotovo za veće stupnjeve kompresije. Također je pokazano da se porastom stupnja kompresije smanjuje kvaliteta

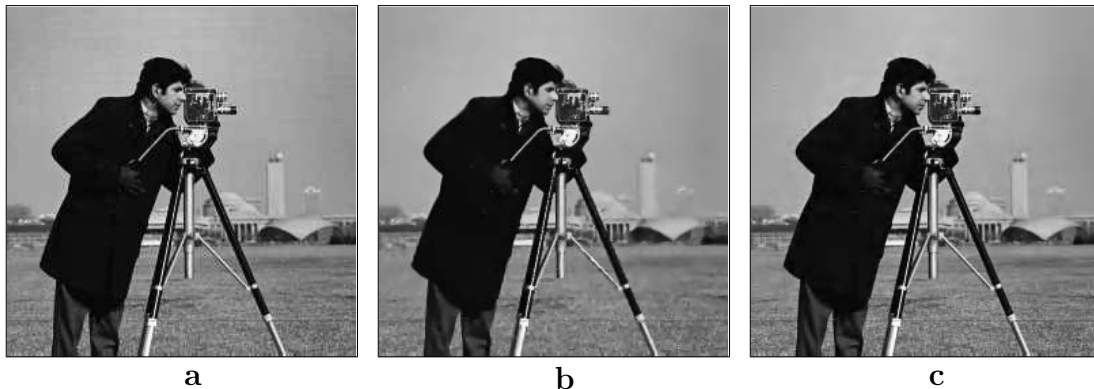
rekonstruiranih slika, što je posebno izraženo kod JPEG-a koji pri većim stupnjevima kompresije naglo gubi na kvaliteti. Na manjim stupnjevima kompresije JPEG 2000 ostvaruje najbolje rezultate, dok je na najvećem stupnju kompresije najbolja EEDC metoda.

7.2.3 Standardna testna slika *camera*

Istraženi su učinci EEDC kompresije i uspoređeni s JPEG-om i JPEG 2000 za standardnu testnu sliku *camera*, slika 7.22. Slika je veličine 257×257 elemenata slike. Usporedba dekodiranih slika je vizualno deskriptivna, zatim je izvršena analiza objektivnim mjerama kvalitete.



Slika 7.22: Testna slika *camera*, 257×257 elemenata slike.



Slika 7.23: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0.8 bpp za testnu sliku *camera* (257×257 elemenata slike). Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) JPEG-a, (b) EEDC-a i (c) JPEG 2000.

Dekodirane slike za stupanj kompresije 0.8 bpp pomoću EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 prikazane su na slici 7.23. Iz slike je vidljivo da za sve metode kom-

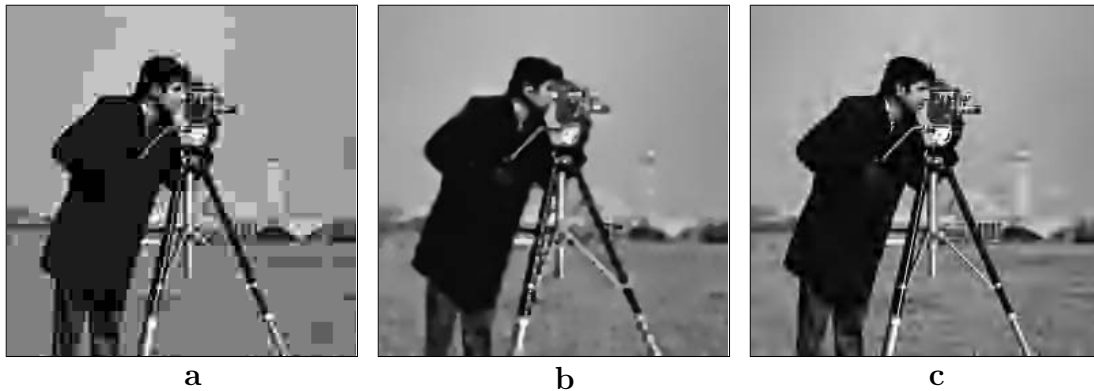
presije ne dolazi do veće degradacije zbog kompresije. Kvaliteta je slika zadovoljavajuća, moguće je raspoznati svaki detalj iz izvorne slike. Na slici 7.23 (a) je dekodirana slika za JPEG kompresiju. Na slici 7.23 (b) prikazana je dekodirana slika nakon kompresije EEDC metodom. Za postizanje kompresije od 0.8 bpp korišten je adaptivni parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 29.09$, kodirano je 6940 elemenata slike. Dekodirana slika za JPEG 2000 prikazana je na slici 7.23 (c).



Slika 7.24: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0.4 bpp za testnu sliku *camera* (257×257 elemenata slike). Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) JPEG-a, (b) EEDC-a i (c) JPEG 2000.

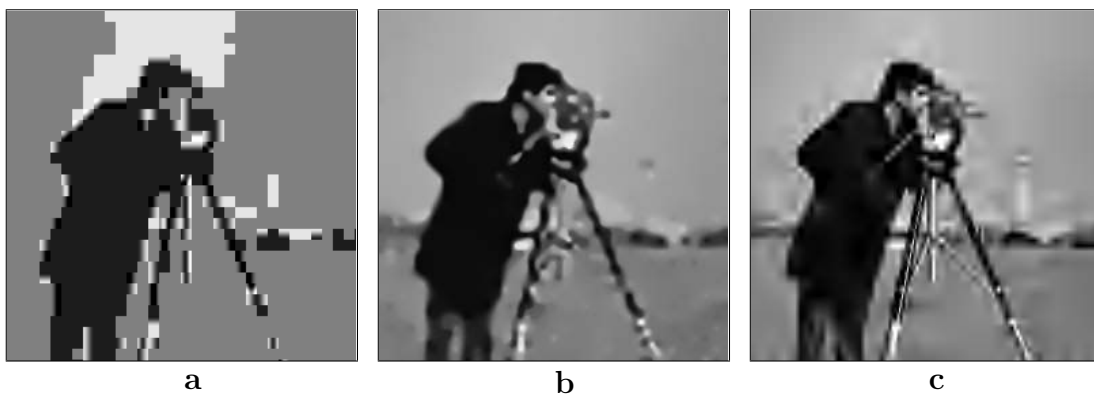
Dekodirane slike nakon kompresije za stupanj kompresije 0.4 bpp pomoću EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 prikazane su na slici 7.24. Degradacija postaje zamjetna i razlike u kvaliteti dekodiranih slika postaju vidljive. Na slici 7.24 (a) je dekodirana slika nakon kompresije JPEG-om. Izobličenja blokova počinju biti primjetna, ali unatoč blokovima detalji su na objektima u pozadini najbolje očuvani. Na slici 7.24 (b) prikazana je dekodirana slika nakon kompresije EEDC metodom. Za postizanje kompresije od 0.4 bpp korišten je adaptivni parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 37.53$, a 3352 elemenata slike je kodirano. Primjetan je gubitak detalja i blago zamućenje unatoč dobro očuvanim rubovima. Rezultat dekodiranja JPEG 2000 kompresije prikazan je na slici 7.24 (c). U odnosu na JPEG i EEDC ova dekodirana slika ima najbolje očuvane detalje u odnosu na izvornu sliku.

Na slici 7.25 prikazane su dekodirane slike nakon kompresije za stupanj kompresije 0.2 bpp pomoću EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000. Došlo je do gubitka detalja kod svih metoda, a kvaliteta između metoda značajno se razlikuje. Izrazito je najlošija slika 7.25 (a) koja prikazuje dekodiranu sliku za JPEG. Detalji su izgubljeni, a izobličenja blokova dominiraju slikom. Na slici 7.25 (b) prikazana je dekodirana slika nakon kompresije EEDC metodom. Za postizanje kompresije od 0.2 bpp korišten je adaptivni parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 46.44$. Na taj način preostalo je 1650 elemenata slike. Detalji su na globalnoj razini sačuvani, dok su na lokalnoj izgubljeni pa slika djeluje zamućeno. Slika 7.25 (c) je dekodirana



Slika 7.25: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0.2 bpp za testnu sliku *camera* (257×257 elemenata slike). Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) JPEG-a, (b) EEDC-a i (c) JPEG 2000.

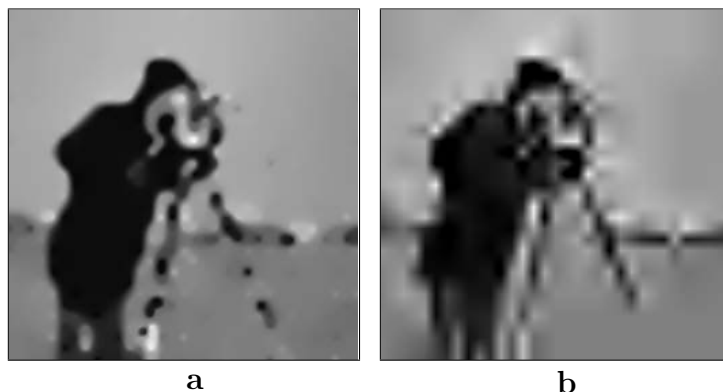
slika za JPEG 2000 metodu. Izraženi su wavelet artefakti na rubovima koji su isprekidani.



Slika 7.26: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0,1 bpp za testnu sliku *camera* (257×257 elemenata slike). Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) JPEG-a, (b) EEDC-a i (c) JPEG 2000.

Dekodirane slike nakon kompresije za stupanj kompresije 0,1 bpp pomoću EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 prikazane su na slici 7.26. Na slici 7.26 (a) koja prikazuje dekodiranu sliku za JPEG metodu, nije moguće prepoznati što slika prikazuje. Mali broj DCT koeficijenata nije dostatan za prikaz sadržaja slike, a većina informacija izgubljena je. Na slici 7.26 (b) prikazana je dekodirana slika nakon kompresije EEDC metodom. Za postizanje kompresije od 0.1 bpp korišten je adaptivni parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 56.67$, a 835 elemenata slike je kodirano. Detalji nisu očuvani, što je posebno vidljivo za objekte u pozadini, a slika djeluje zamućeno. Očuvani su rubovi glatki. Gubitak detalja izražen je i na

dekodiranoj slici nakon JPEG 2000 kompresije prikazanoj na slici 7.26 (c). Slika je zamućena umjetnim sjenama oko rubova.



Slika 7.27: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0,05 bpp za testnu sliku *camera* (257×257 elemenata slike). Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) EEDC-a i (b) JPEG 2000.

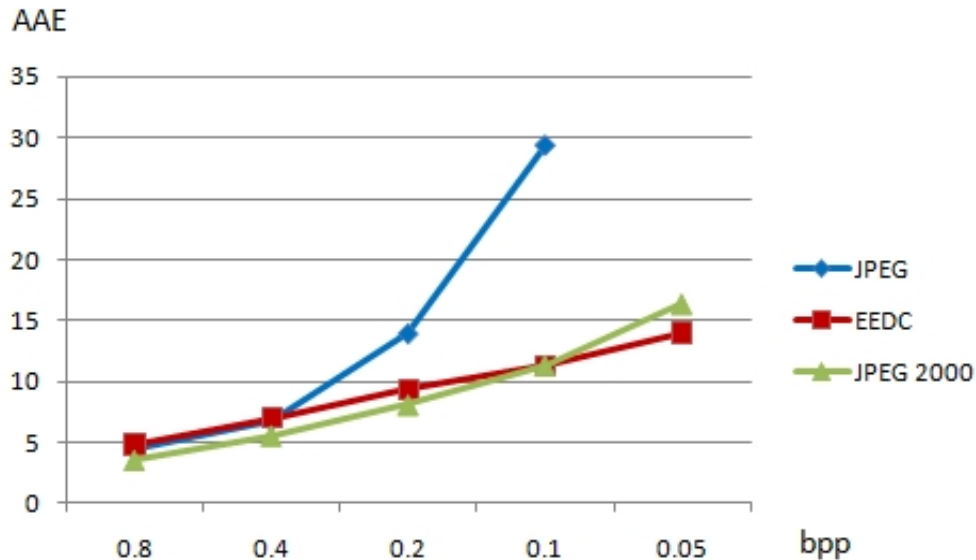
JPEG ne može komprimirati sliku za stupanj kompresije 0.05 bpp. Dekodirane slike nakon kompresije za stupanj kompresije 0.05 bpp pomoću EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 prikazane su na slici 7.27. Iz slika je vidljivo da dolazi do gotovo potpune degradacije zbog kompresije. Slike su jako loše i nije moguće raspoznati detalje koji se nalaze na izvornoj slici. Na slici 7.27 (a) prikazana je dekodirana slika nakon kompresije EEDC metodom. Za postizanje kompresije od 0.05 bpp korišten je adaptivni parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 70.2$. Na taj način preostalo je 411 elemenata slike koji su kodirani. Očuvani su samo osnovni obrisi na slici. Na slici 7.27 (b) prikazana je dekodirana slika za JPEG 2000 metodu. Obrisi su gotovo neprepoznatljivi zbog wavelet artefakata koji do neprepoznatljivosti degradiraju sliku.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	4.45	4.79	3.51
0.4	6.74	6.99	5.53
0.2	13.97	9.32	8.07
0.1	29.46	11.29	11.33
0.05		13.98	16.40

Tablica 7.15: Usporedba aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške (AAE) za sliku *camera* i različite stupnjeve kompresije.

Aritmetička sredina apsolutne vrijednosti pogreške za vizualno uspoređivane slike na različitim stupnjevima kompresije prikazana je u tablici 7.15. Vidimo da

JPEG 2000 daje najbolje rezultate za stupnjeve kompresije od 0.8 do 0.2 bpp. Za kompresije 0.1 i 0.05 bpp EEDC daje najbolje rezultate.



Slika 7.28: Usporedba aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogriješke EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *camera*.

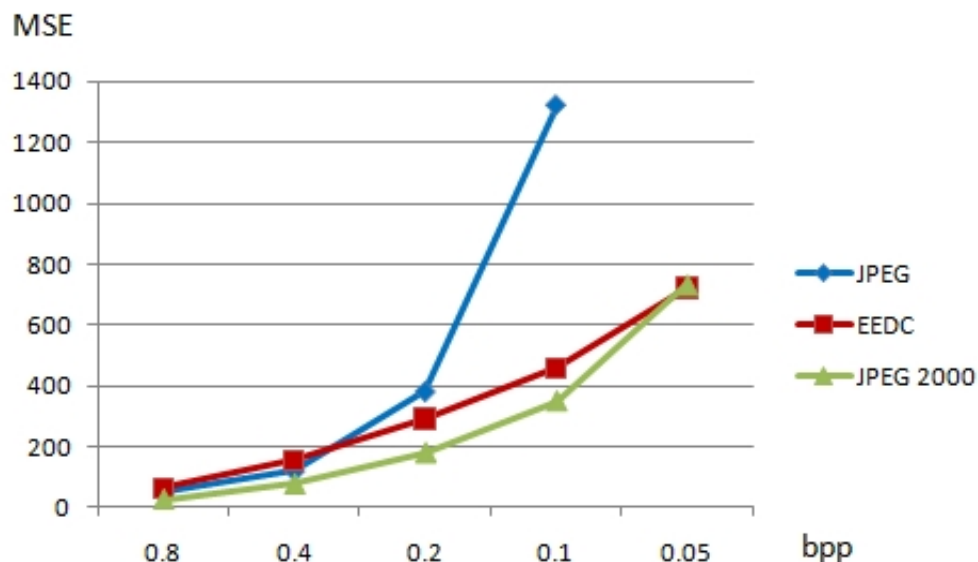
Na slici 7.28 grafički je prikaz odnosa između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 za različite stupnjeve kompresije iskazan pomoću AAE mjere. Za najmanji ispitivani stupanj kompresije 0.8 bpp, razlike su između svih metoda rubne. Sve metode pokazuju povećanje pogriješke za veće stupnjeve kompresije, a JPEG se ubrzano pogoršava pri većim stupnjevima kompresije.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	50.94	62.44	25.30
0.4	120.64	153.93	75.69
0.2	380.96	290.49	179.32
0.1	1320.13	465.88	349.99
0.05		720.39	732.88

Tablica 7.16: Usporedba srednje kvadratne pogriješke (MSE) za sliku *camera* i različite stupnjeve kompresije.

Tablica 7.16 sadrži izračunate srednje kvadratne pogriješke za uspoređivane metode. Za stupnjeve kompresije od 0.8 do 0.1 bpp najmanju srednju kvadratnu

pogrješku ima JPEG 2000. Pri kompresiji 0.05 bpp najmanju pogrješku ima EEDC metoda.



Slika 7.29: Usporedba srednje kvadratne pogrješke EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *camera*.

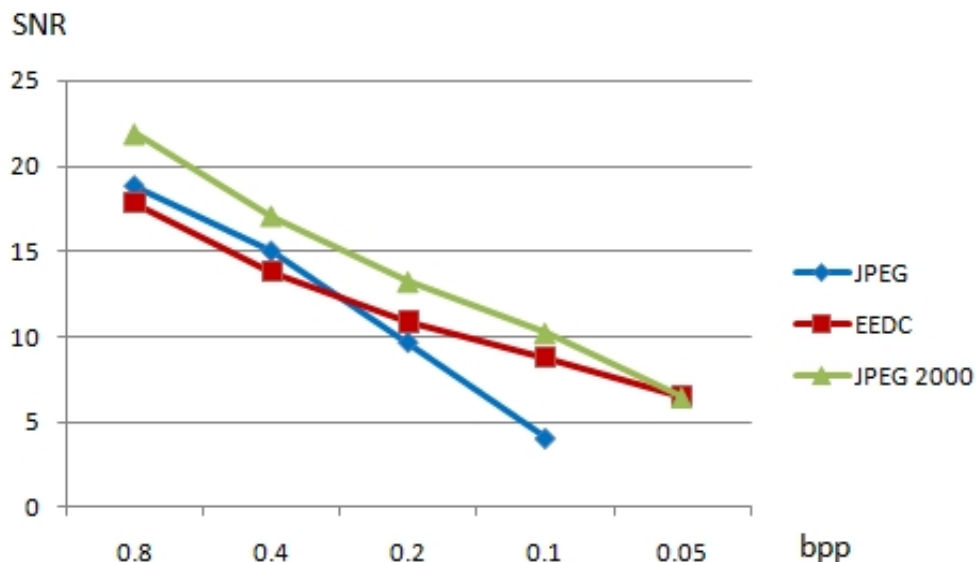
Grafički prikaz srednje kvadratne pogrješke za EEDC, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije dan je na slici 7.29. Sve metode pokazuju povećanje pogrješke s povećanjem stupnja kompresije, za JPEG naglo pogoršava nastaje od 0.2 bpp prema većim stupnjevima kompresije.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	18.79	17.83	21.92
0.4	14.97	13.80	17.09
0.2	9.63	10.88	13.22
0.1	4.00	8.78	10.19
0.05		6.48	6.40

Tablica 7.17: Usporedba omjera signal/šum (SNR) za sliku *camera* i različite stupnjeve kompresije.

Kvantitativna mjerenja omjera signal/šum dana su u tablici 7.17. Najveći omjer signal/šum, a time i najbolju kvalitetu ostvaruje JPEG 2000 za stupnjeve

kompresije od 0.8 do 0.1 bpp. Za kompresiju 0.05 bpp najbolju kvalitetu ima EEDC.



Slika 7.30: Usporedba omjera signal/šum EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *camera*.

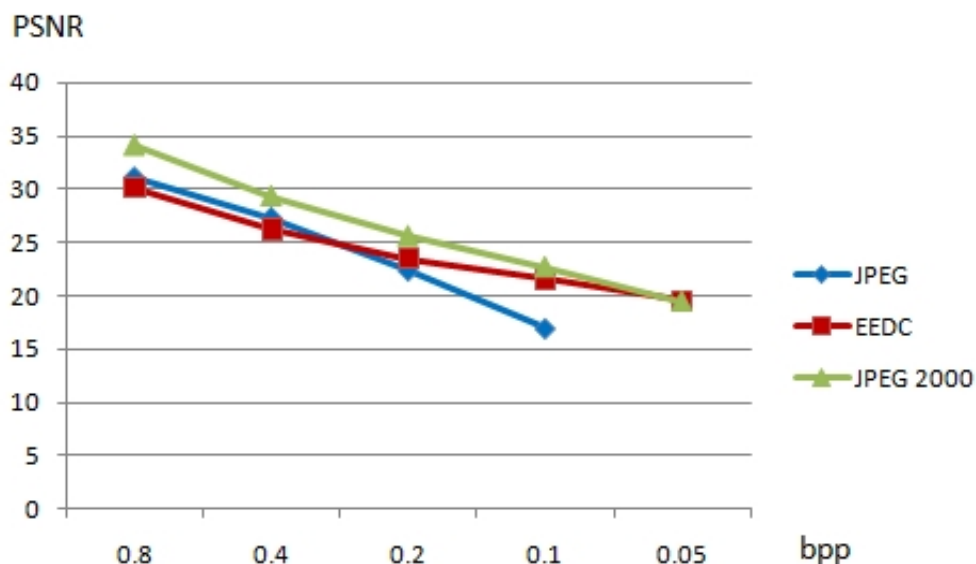
Na slici 7.30, pokazujemo odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije iskazan preko SNR vrijednosti. Sve metode pokazuju smanjenje kvalitete povećanjem stupnja kompresije, a najmanji pad kvalitete je kod EEDC metode.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	31.06	30.18	34.09
0.4	27.32	26.26	29.34
0.2	22.32	23.49	25.59
0.1	16.93	21.53	22.69
0.05		19.56	19.48

Tablica 7.18: Usporedba vršnog omjera signal/šum (PSNR) za sliku *camera* i različite stupnjeve kompresije.

Kvantitativna mjerenja vršnog omjera signal/šum navedena su u tablici 7.18. Vidljivo je da JPEG 2000 ima najbolju kvalitetu od stupnja kompresije 0.8 do 0.1 bpp, dok na 0.05 bpp najbolju kvalitetu ima EEDC metoda.

Grafički prikaz izračunatih PSNR vrijednosti za EEDC, JPEG i JPEG 2000 dan je na slici 7.31. Vidljivo je smanjenje kvalitete povećanjem stupnja kompresije, najmanji je pad kvalitete kod EEDC metode, a najveći kod JPEG-a.



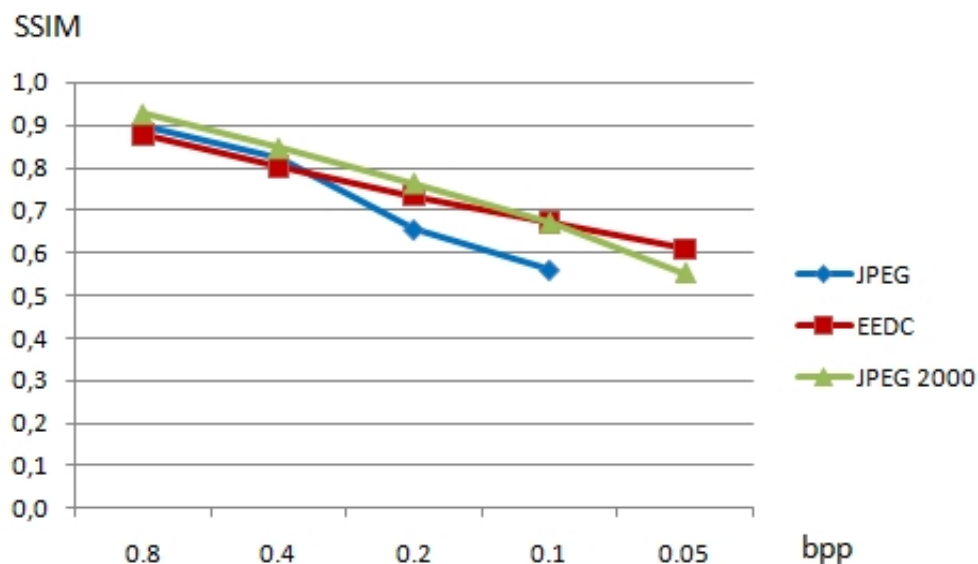
Slika 7.31: Usporedba vršnog omjera signal/šum EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *camera*.

Tablica 7.19 sadrži vrijednosti izračunate pomoću SSIM mjere. Na stupnjevima kompresije 0.8 do 0.2 bpp JPEG 2000 ostvaruje vrijednosti koje su najbliže 1 u odnosu na druge metode, što označava bolju kvalitetu. Za stupanj kompresije 0.1 bpp JPEG 2000 i EEDC izjednačeni su, dok je na 0.05 bpp EEDC bolji.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	0.90	0.88	0.93
0.4	0.83	0.80	0.85
0.2	0.66	0.73	0.76
0.1	0.56	0.67	0.67
0.05		0.61	0.55

Tablica 7.19: Usporedba SSIM mjere za sliku *camera* i različite stupnjeve kompresije.

Na slici 7.32 prikazan je odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije s iskazanim ostvarenim SSIM vrijednostima. Sve metode pokazuju smanjenje kvalitete povećanjem stupnja kompresije, a razlike između JPEG 2000 i EEDC-a vrlo su male.



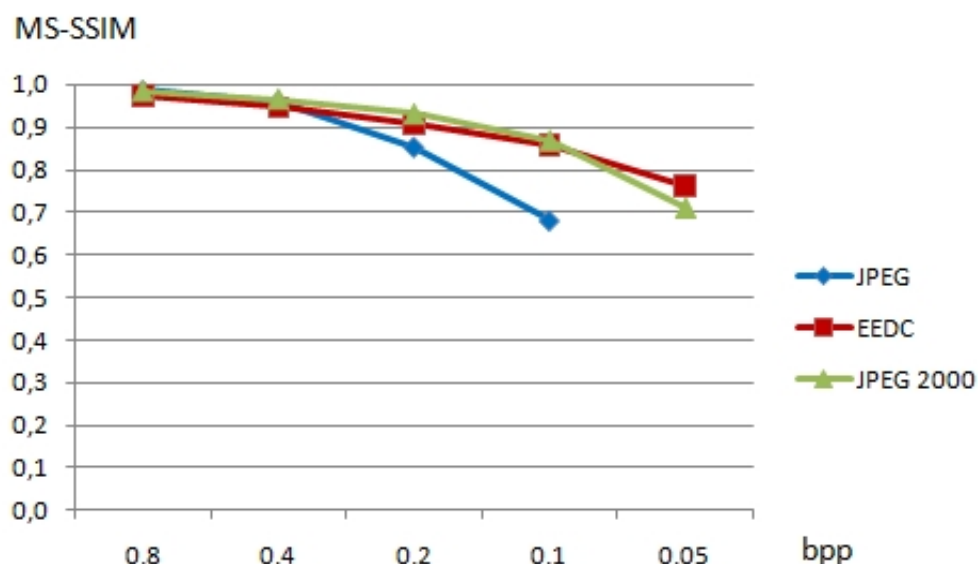
Slika 7.32: Usporedba SSIM mjere EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *camera*.

Mjerenja kvalitete MS-SSIM mjerom prikazana su u tablici 7.20. Na stupnju kompresije 0.8 bpp JPEG ostvaruje najbolje vrijednosti. Za stupnjeve kompresije od 0.4 i 0.1 bpp JPEG 2000 daje najbolje rezultate. Pri stupnju kompresije 0.05 bpp EEDC ostvaruje najbolji rezultat.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	0.99	0.97	0.98
0.4	0.96	0.95	0.97
0.2	0.85	0.91	0.93
0.1	0.68	0.86	0.87
0.05		0.76	0.71

Tablica 7.20: Usporedba MS-SSIM mjere za sliku *camera* i različite stupnjeve kompresije.

Na slici 7.33 grafički pokazujemo odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije izračunat pomoću MS-SSIM mjere. Povećavanjem stupnja kompresije dolazi do smanjenja kvalitete kod svih ispitivanih metoda, razlike između JPEG 2000 i EEDC-a vrlo su male, dok se JPEG za kompresije veće od 0.4 bpp naglo pogoršava.



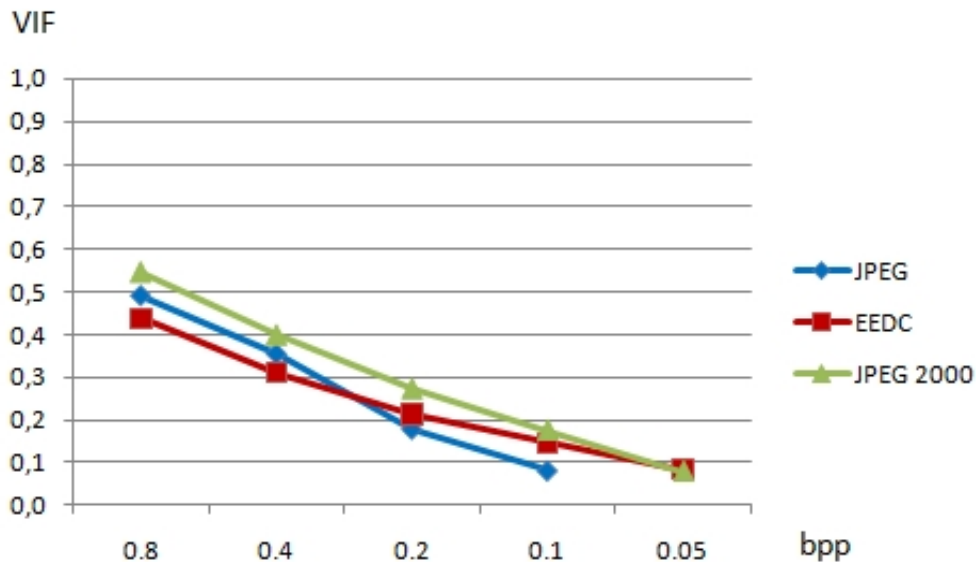
Slika 7.33: Usporedba MS-SSIM mjere EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *camera*.

Rezultati mjerenja VIF mjere dani su u tablici 7.21. JPEG ostvaruje nabolje rezultate za stupnjeve kompresije od 0.8 do 0.1 bpp, a na 0.05 bpp JPEG 2000 i EEDC metoda ostvaruju jednaku vrijednost.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	0.49	0.44	0.55
0.4	0.36	0.31	0.39
0.2	0.18	0.21	0.27
0.1	0.08	0.15	0.17
0.05		0.08	0.08

Tablica 7.21: Usporedba VIF mjere za sliku *camera* i različite stupnjeve kompresije.

Grafički prikaz odnosa između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeve kompresije izračunata pomoću VIF mjere prikazan je na slici 7.34. Sve metode pokazuju smanjenje kvalitete povećanjem stupnja kompresije.



Slika 7.34: Usporedba VIF mjere EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *camera*.

Analizirajući slike 7.23 do 7.27 može se ustanoviti da za stupanj kompresije 0.8 bpp između metoda nema primjetne razlike, povećavanjem stupnja kompresije razlike se povećavaju. Povećanjem kompresije za JPEG metodu kvaliteta dekodirane slike naglo opada i sve više odstupa od ostalih metoda. Ustanovilo se da je pri velikim stupnjevima kompresije 0.05 bpp nakon dekodiranja JPEG 2000 lošiji od EEDC što se vidi i iz objektivnih mjera kvalitete.

7.2.4 Standardna testna slika *lena*

Jedna od najčešće korištenih standardnih testnih slika, kada se istražuju učinci različitih metoda kompresije, je *lena*, slika 7.35. Slika je veličine 257×257 elemenata slike. Izvršit ćemo usporedbu EEDC kompresije sa standardnim metodama kompresije slike JPEG i JPEG 2000. Rezultati će biti prikazani i analizirani objektivnim mjerenjem kvalitete.

Dekodirane slike nakon kompresije za stupanj kompresije 0.8 bpp pomoću EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 prikazane su na slici 7.36. Iz slika je vidljivo da ne dolazi do značajne degradacije zbog kompresije bilo kojom od testiranih metoda. Slike posjeduju iznimnu kvalitetu, gdje je moguće raspoznati svaki detalj



Slika 7.35: Testna slika *lena*, 257×257 elemenata slike.

koji se na slici nalazi. Na svim je slikama lice žene raspoznatljivo do najmanjih detalja. Unatoč ujednačenoj kvaliteti pažljivijim gledanjem moguće je uočiti razlike. Na slici 7.36 (a) moguće je primijetiti blagu strukturu podjele na pravokutne blokove koju koristi JPEG kompresija. Rubovi na slici izraženi su, ali nisu glatki nego isprekidani. Za postizanje kompresije od 0.8 bpp EEDC metodom korišten je adaptivni parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 25.46$. Na taj način preostalo je 7032 elemenata slike koji su kodirani, a u postupku dekodiranja služe kao raspršene točke interpolacije za EED difuziju. U odnosu na JPEG 2000 i JPEG za stupanj kompresije 0.8 bpp najlošiju kvalitetu ima EEDC metoda prikazana na slici 7.36 (b). Rubovi objekata na slici nisu jednako oštri kao na prethodnim dvjema, već je kontrast ublažen. Dojam najbolje kvalitete ostavlja slika 7.36 (c) koja ima najbolji omjer detalja i kvalitete. Tonovi i prijelazi su najbolji, lice izgleda najoštrije i detalji pera najbolje su očuvani. Nedostatci su primjetni kod odraza u ogledalu gdje konture šešira imaju nazubljen rub.



Slika 7.36: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0.8 bpp za testnu sliku *lena* (257×257 elemenata slike). Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) JPEG-a, (b) EEDC-a i (c) JPEG 2000.

Dekodirane slike nakon kompresije za stupanj kompresije 0.4 bpp pomoću EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 prikazane su na slici 7.37. Iz slika je vidljivo da dolazi do degradacije zbog kompresije. Slike posjeduju dobru kvalitetu, gdje je moguće raspoznati većinu detalja koji se na slici nalaze. Na svim je slikama lice žene raspoznatljivo. Kvaliteta nije više ujednačena pa je lakše uočiti razlike. Na cijeloj je slici 7.37 (a) primjetna struktura podjele na pravokutne blokove i kvantizacija. Detalji su dobro očuvani. Na zaobljenim rubovima nastale su umjetne sjene. Iznad gornje usne artefakti stvaraju dojam brkova. Pojavili su se halo artefakti oko prijelaza kontrasta sa šešira na pozadinu, što je vidljivo i u slici iz zrcala. Za postizanje kompresije od 0.4 bpp EEDC metodom korišten je adaptivni parametar praga pogriješke $\varepsilon_a = 37.77$. Na taj način preostalo je 3433 elemenata slike koji su kodirani, a u postupku dekodiranja služe kao raspršene točke interpolacije za EED difuziju. Slika 7.37 (b) izgleda blago zamućena u odnosu na ostale slike. Sitni detalji i strukture izgubljeni su. Od svih prikazanih slika oči izgledaju najlošije. Dojam najbolje kvalitete ostavlja slika 7.37 (c). Slika izgleda najoštrije i detalji se čine najbolje očuvani. Nedostatci su primjetni na rubovima jer imaju izraženije artefakte nego na manjem stupnju kompresije.



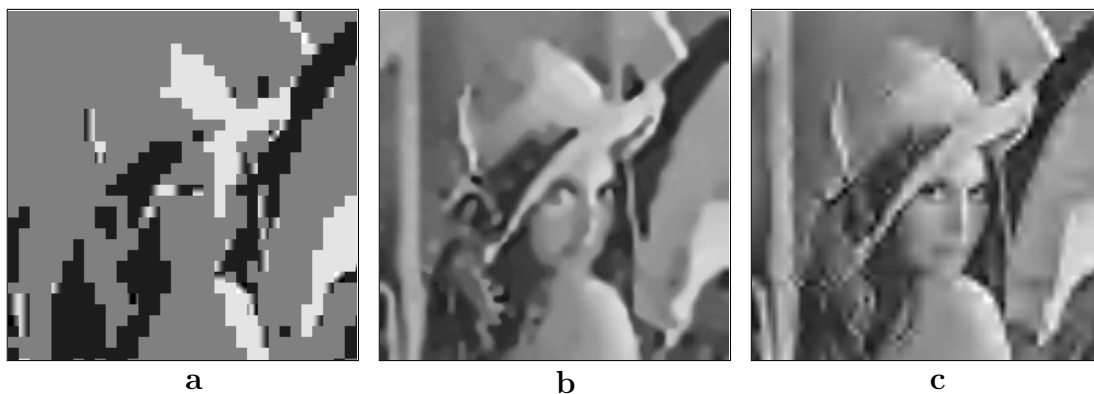
Slika 7.37: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0.4 bpp za testnu sliku *lena*. Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) JPEG-a, (b) EEDC-a i (c) JPEG 2000.

Dekodirane slike nakon kompresije za stupanj kompresije 0.2 bpp pomoću EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 prikazane su na slici 7.38. Na svim je slikama lice žene raspoznatljivo, ali je vidljiva degradacija kvalitete. Najlošija je slika 7.38 (a) gdje je još uvijek moguće prepoznati da se na slici nalazi osoba, ali je većina detalja izgubljena. Najbolje su očuvani dio lica oči. Za postizanje kompresije od 0.2 bpp EEDC metodom korišten je adaptivni parametar praga pogriješke $\varepsilon_a = 43.63$. Na taj način preostalo je 1634 elemenata slike koji su kodirani, a u postupku dekodiranja služe kao raspršene točke interpolacije za EED difuziju.

Slika 7.38 (b) zamućena je, ali lice je raspoznatljivo. Detalji su izgubljeni i svi su rubovi ugađeni. Na slici 7.38 (c) moguće je raspoznati najviše detalja u odnosu na ostale dvije slike. Artefakti su najizraženiji na rubovima.



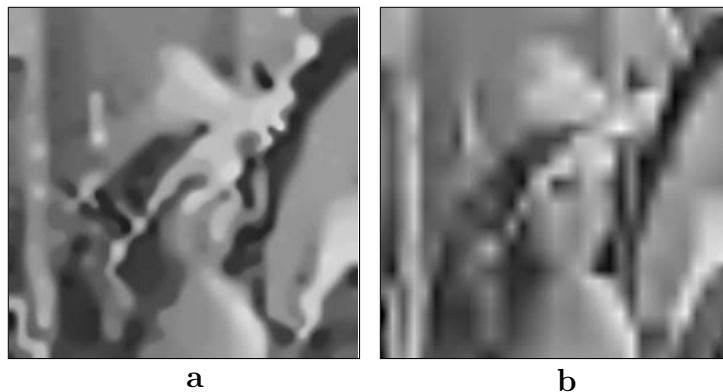
Slika 7.38: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0.2 bpp za testnu sliku *lena*. Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) JPEG-a, (b) EEDC-a i (c) JPEG 2000.



Slika 7.39: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0,1 bpp za testnu sliku *lena*. Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) JPEG-a, (b) EEDC-a i (c) JPEG 2000.

Dekodirane slike nakon kompresije za stupanj kompresije 0,1 bpp pomoću EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 prikazane su na slici 7.39. Na slici 7.39 (a) je dekodirana slika za JPEG metodu, a iz slike nije moguće prepoznati što predstavlja. Očuvano je samo nekoliko DCT koeficijenata što je nedostavno za rekonstrukciju pa je slika negledljiva. Za postizanje kompresije od 0.1 bpp EEDC

metodom korišten je adaptivni parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 54.27$. Na taj način preostalo je 864 elemenata slike koji su kodirani, a u postupku dekodiranja služe kao raspršene točke interpolacije za EED difuziju. Slika 7.39 (b) izrazito je zamućena. Detalji su potpuno izgubljeni, a vide se samo obrisi slike. Slika 7.39 (c) zamućena je i izgubljeni su detalji. Moguće je raspoznati što se nalazi u krupnom planu slike. Obrisi su očuvani iako su oko rubova izražene umjetne sjene.



Slika 7.40: Usporedba različitih metoda kompresije za stupanj kompresije 0,05 bpp za testnu sliku *lena* (257×257 elemenata slike). Dekodirane slike nakon kompresije pomoću (a) EEDC-a i (b) JPEG 2000.

Na slici 7.40 prikazane su slike dekodirane nakon kompresije za stupanj kompresije 0,05 bpp pomoću EEDC-a i JPEG 2000. JPEG metoda ne može komprimirati sliku za stupanj kompresije 0.05 bpp. Iz slika je vidljivo da dolazi do gotovo potpune degradacije zbog kompresije bilo kojom od testiranih metoda. Slike posjeduju jako lošu kvalitetu gdje nije moguće raspoznati ni jedan detalj koji se na slici nalazi. Na slikama nije raspoznatljivo što prikazuju bez izvorne slike. Unatoč nekvaliteti i ujednačenosti moguće je uočiti razlike usporedbom s izvornom slikom. Za postizanje kompresije od 0.05 bpp EEDC metodom korišten je adaptivni parametar praga pogreške $\varepsilon_a = 69.31$. Na taj način preostalo je 461 elemenata slike koji su kodirani, a u postupku dekodiranja služe kao raspršene točke interpolacije za EED difuziju. Slika 7.40 (a) izobličena je, a sačuvane su samo neke konture. Slika izgleda kao razlivena. Slika 7.40 (b) iznimno je zamućena, očuvani su samo obrisi šešira i lica. Rubovi nisu glatki nego nazubljeni.

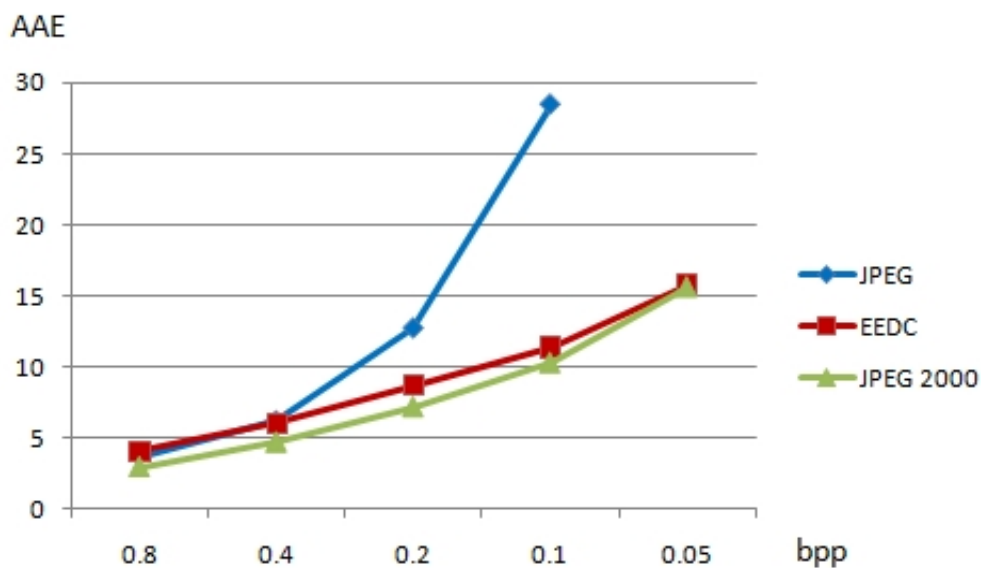
Objektivno mjerenje kvalitete dekodiranih slika testne slike *lena* za različite stupnjeve kompresije započinjemo usporedbom aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške. Kvantitativna mjerenja aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogreške prikazana su u tablici 7.22. Vidimo da JPEG 2000 daje najbolje rezultate pri stupnjevima kompresije od 0.8 do 0,1 bpp. Pri kompresiji 0.05 bpp

EEDC metoda ima najmanju pogrješku.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	3.73	4.05	2.98
0.4	6.19	6.02	4.72
0.2	12.73	8.72	7.20
0.1	28.49	11.39	10.32
0.05		15.78	15.67

Tablica 7.22: Usporedba aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogrješke (AAE) za sliku *lena* i različite stupnjeve kompresije.

Na slici 7.41 pokazujemo odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije izračunat pomoću AAE. Za najmanji stupanj kompresije 0.8 bpp, razlike su između svih metoda rubne. Dok se JPEG ubrzano pogoršava pri većim stupnjevima kompresije, i JPEG 2000 i EEDC pokazuju umjereno povećanje pogrješke u dekodiranju. Na najvećem stupnju kompresije 0.05 bpp vidljivo je da EEDC ima manju pogrješku od JPEG 2000.



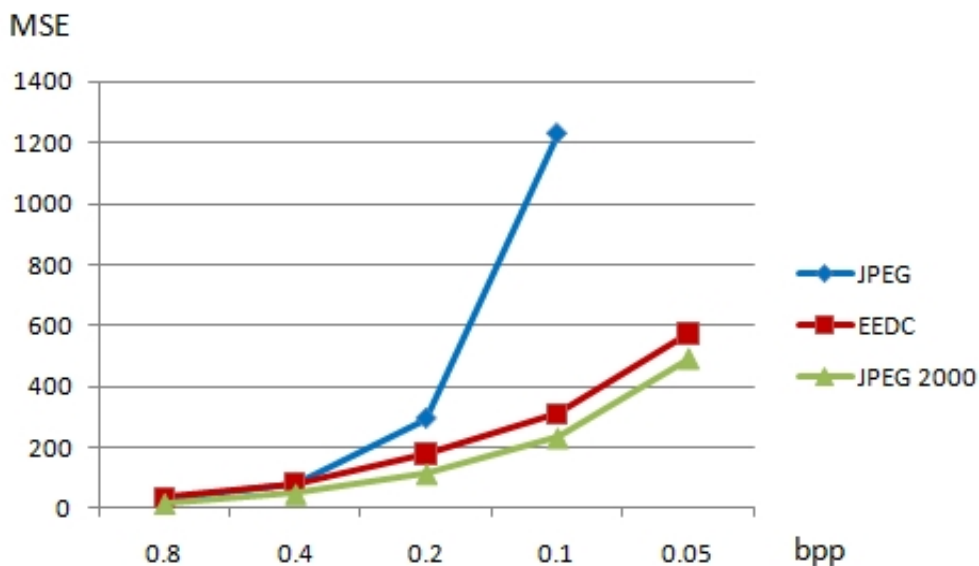
Slika 7.41: Usporedba aritmetičke sredine apsolutne vrijednosti pogrješke EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *lena*.

Kvantitativna mjerenja srednje kvadratne pogreške dana su u tablici 7.23. Vidimo da JPEG 2000 daje najbolje rezultate.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	32.29	34.21	16.54
0.4	82.07	81.05	47.42
0.2	293.77	177.02	113.68
0.1	1230.19	310.33	231.19
0.05		574.16	491.75

Tablica 7.23: Usporedba srednje kvadratne pogreške (MSE) za sliku *lena* i različite stupnjeve kompresije.

Na slici 7.42 pokazujemo odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije izračunat MSE. Za najmanji stupanj kompresije 0.8 bpp, razlike su između svih metoda rubne. Sve metode pokazuju povećanje pogreške s povećanjem stupnja kompresije, ali JPEG se ubrzano pogoršava pri većim stupnjevima kompresije. Razlike između JPEG 2000 i EEDC metode vrlo su male.



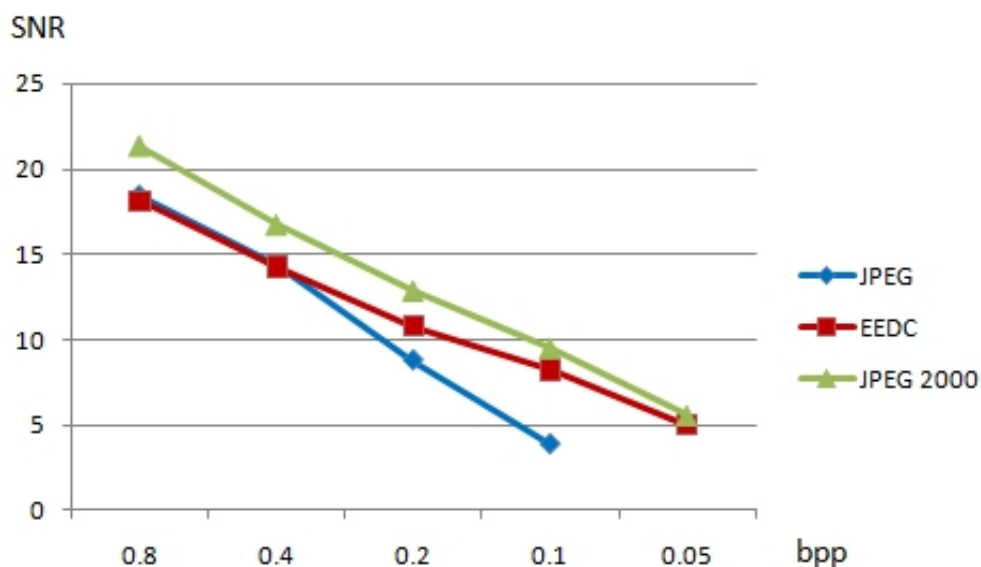
Slika 7.42: Usporedba srednje kvadratne pogreške EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *lena*.

U tablici 7.24 prikazan je omjer signal/šum. Najveće vrijednosti omjera signal/šum ostvaruje JPEG 2000.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	18.42	18.14	21.38
0.4	14.36	14.28	16.74
0.2	8.77	10.79	12.86
0.1	3.85	8.15	9.49
0.05		4.83	5.54

Tablica 7.24: Usporedba omjera signal/šum (SNR) za sliku *lena* i različite stupnjeve kompresije.

Grafički prikaz izračunatih vrijednosti omjera signal/šum za sliku *lena* i različite stupnjeve kompresije prikazan je na slici 7.43. JPEG se ubrzano pogoršava pri većim stupnjevima kompresije u odnosu na JPEG 2000 i EEDC koji također pokazuju smanjenje SNR vrijednosti.



Slika 7.43: Usporedba omjera signal/šum EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *lena*.

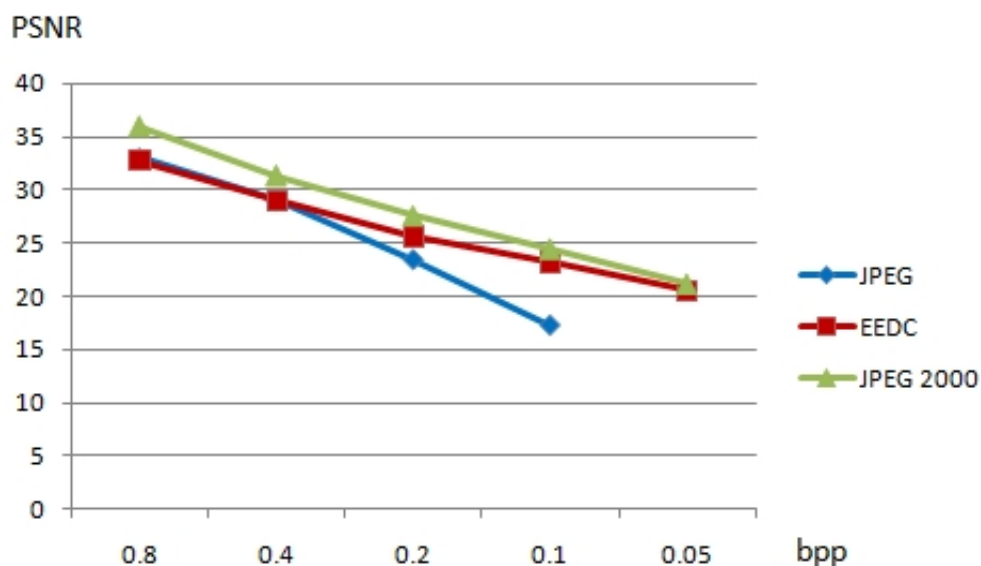
U tablici 7.25 prikazan je vršni omjer signal/šum. Vidimo da najveće vrijed-

nosti vršnog omjera signal/šum ostvaruje JPEG 2000.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	33.04	32.79	35.95
0.4	28.99	29.04	31.37
0.2	23.45	25.65	27.58
0.1	17.23	23.21	24.49
0.05		20.54	21.21

Tablica 7.25: Usporedba vršnog omjera signal/šum (PSNR) za sliku *lena* i različite stupnjeve kompresije.

Na slici 7.44 pokazujemo odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije pomoću izračunatih PSNR vrijednosti iz tablice 7.25. Sve metode pokazuju smanjenje kvalitete povećanjem stupnja kompresije. Na najmanjem stupnju kompresije 0.8 bpp, razlike su između metoda rubne, ali se kvaliteta JPEG naglo pogoršava pri većim stupnjevima kompresije.

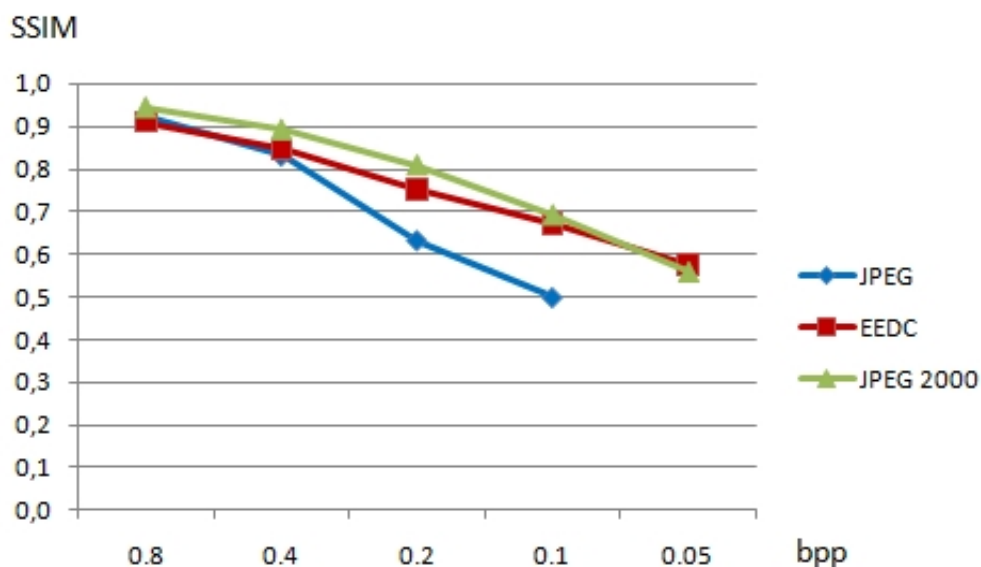


Slika 7.44: Usporedba vršnog omjera signal/šum EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *lena*.

Kvantitativna mjerenja pomoću SSIM mjere dana su u tablici 7.26. Vidimo da pri stupnjevima kompresije od 0.8 do 0.1 bpp JPEG 2000 daje najbolje rezultate. Pri stupnju kompresije 0.05 bpp najbolji rezultat daje EEDC metoda.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	0.92	0.91	0.94
0.4	0.83	0.85	0.89
0.2	0.63	0.75	0.81
0.1	0.49	0.67	0.69
0.05		0.58	0.56

Tablica 7.26: Usporedba SSIM mjere za sliku *lena* i različite stupnjeve kompresije.



Slika 7.45: Usporedba SSIM mjere EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *lena*.

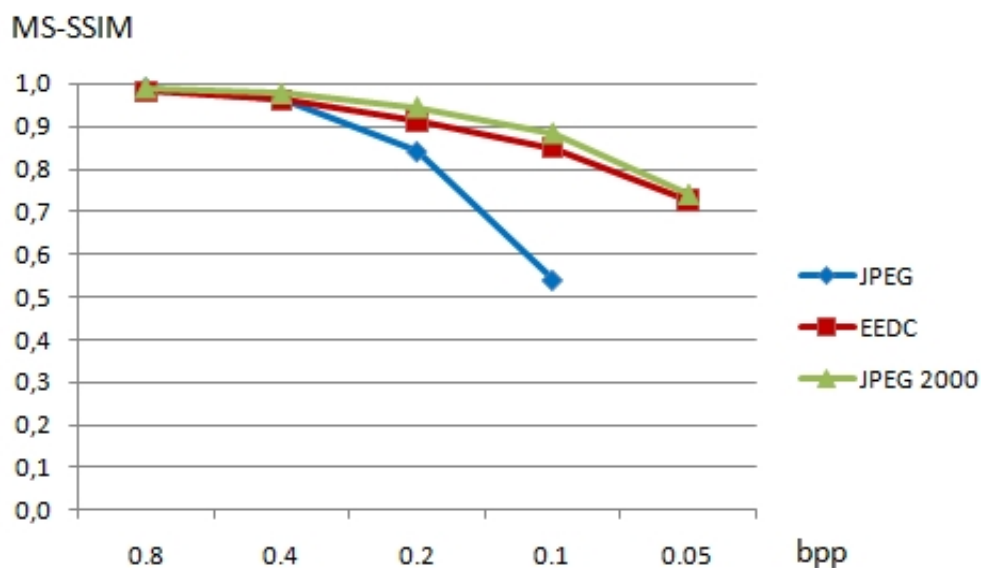
Na slici 7.45 pokazujemo odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije izračunat SSIM. Na najmanjem stupnju kompresije 0.8 bpp, razlike su između ispitivanih metoda rubne. JPEG 2000 i EEDC pokazuju smanjenje kvalitete dekodirane slike za veće stupnjeve kompresije, a to je smanjenje posebno izraženo kod JPEG-a koji se ubrzano pogoršava pri većim stupnjevima kompresije.

Mjerenja kvalitete MS-SSIM mjerom prikazana su u tablici 7.27. Vidimo da pri kompresiji od 0.8 bpp JPEG i JPEG 2000 ostvaruju jednak rezultat. Za veće stupnjeve kompresije JPEG 2000 daje najbolje rezultate.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	0.99	0.98	0.99
0.4	0.96	0.96	0.98
0.2	0.84	0.91	0.95
0.1	0.54	0.85	0.89
0.05		0.73	0.74

Tablica 7.27: Usporedba MS-SSIM mjere za sliku *lena* i različite stupnjeve kompresije.

Na slici 7.46 pokazujemo odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije izračunat MS-SSIM-om. Za najmanji stupanj kompresije 0.8 bpp, razlike su između svih metoda rubne. Sve metode pokazuju povećanje pogreške s povećanjem stupnja kompresije, ali JPEG se ubrzano pogoršava pri većim stupnjevima kompresije. Razlike između JPEG 2000 i EEDC metodu vrlo su male.



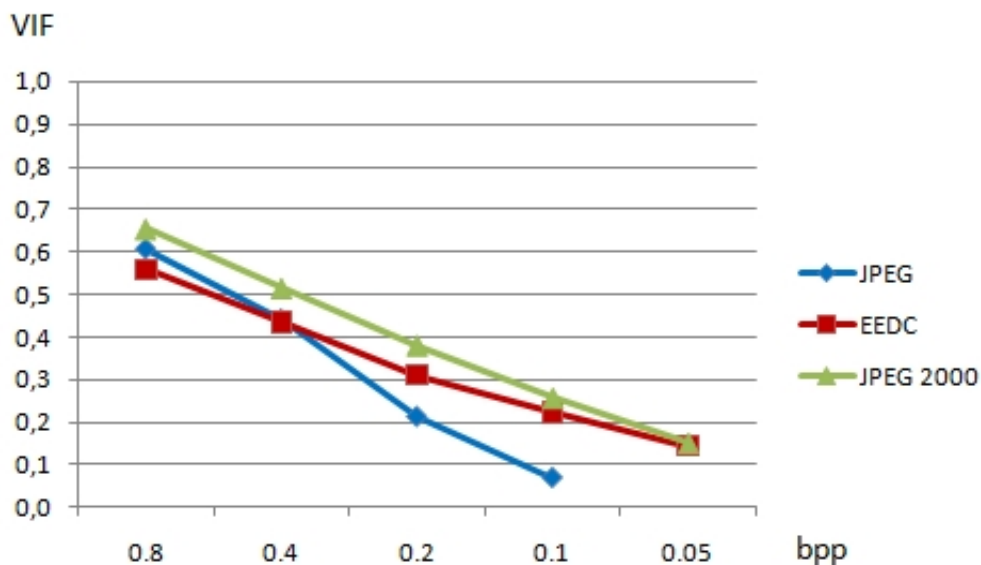
Slika 7.46: Usporedba MS-SSIM mjere EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *lena*.

Rezultati mjerenja VIF mjere dani su u tablici 7.28. Lako je primijetiti da JPEG 2000 ostvaruje najbolje rezultate.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	0.61	0.56	0.65
0.4	0.44	0.43	0.52
0.2	0.21	0.31	0.38
0.1	0.07	0.22	0.26
0.05		0.14	0.15

Tablica 7.28: Usporedba VIF mjere za sliku *lena* i različite stupnjeve kompresije.

Na slici 7.47 pokazujemo odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije i izračunatih vrijednosti VIF mjere. JPEG 2000 i EEDC pokazuju smanjenje kvalitete dekodirane slike kao i JPEG koji se ubrzano pogoršava pri većim stupnjevima kompresije.



Slika 7.47: Usporedba VIF mjere EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *lena*.

Iz različitih objektivnih mjera kvalitete vidljivo je da se kvaliteta dekodirane slike pogoršava povećanjem stupnja kompresije. Posebno je izraženo smanjenje kvalitete kod JPEG metode pri većim stupnjevima kompresije gdje dekodirane slike naglo gube na kvaliteti. Za najmanji stupanj kompresije 0.8 bpp, razlike su između svih metoda rubne.

7.3 Subjektivno mjerenje kvalitete

Objektivno mjerenje kvalitete koristi se za brzu i jednostavnu ocjenu kvalitete. Neke od metoda koriste modele koji u određenoj mjeri posjeduju ugrađena svojstva ljudskog oka. Problem je što ni jedna objektivna mjera ne postiže potpunu korelaciju sa subjektivnim ispitivanjima. Dvije dekodirane slike mogu imati jednaku vrijednost MSE za različite vrste grješaka, od kojih su neke više vidljive od drugih.

Mjerodavna mjera za ocjenu digitalne slike ljudski je vizualni sustav, dakle subjektivna ocjena slike. Standardni postupci za subjektivnu ocjenu kvalitete slike određeni su ITU-R preporukom BT.500 [51] koja definira nekoliko mjera za subjektivno ocjenjivanje komprimirane slike. Definirani su opći i alternativni postupci ispitivanja, svrha ispitivanja, ljestvice za ocjenu i uvjeti promatranja pri ocjeni kvalitete slike.

Subjektivne mjere mogu se podijeliti u nekoliko skupina po ITU-R preporuci 500. Osnovna je podjela na opće i alternativne postupke. Opći postupci za subjektivnu ocjenu kvalitete slike dalje možemo podijeliti na dvopodražajni postupak s ocjenom izobličenja slike (eng. *Doublestimulus impairment scale (DSIS)*) i dvopodražajni postupak s ocjenom kvalitete slike (eng. *Doublestimulus continuous quality-scale (DSCQS)*). Alternativne postupke za subjektivnu ocjenu kvalitete slike dijelimo na jednopodražajne i dvopodražajne postupke. Kod jednopodražajnih postupaka razlikujemo postupak s usporedbom podražaja i postupak s kontinuiranom ocjenom kvalitete.

Dvopodražajni postupak s ocjenom izobličenja slike jedan je od najčešće korištenih postupaka za subjektivnu ocjenu kvalitete slike. To je postupak u komu se promatra par sadržajno istih slika gdje je jedna referentna, a druga ispitna slika. Referentna slika nekomprimirana je slika, dok je ispitna slika u pravilu dekodirana slika. Prvo je prikazana referentna slika, zatim ispitna slika. Za svaku ispitnu sliku promatrači daju ocjenu o stupnju izobličenja u odnosu na referentnu sliku. Ocjene mogu biti od 1 do 5, gdje 1 znači potpuno izobličenje slike, a 5 nezamjetno izobličenje. Ocjene su dane u tablici 7.29. Preporučuje se da pojedino ispitivanje ne traje duže od 30 minuta. Slijed parova slika treba imati slučajan raspored u odnosu na kvalitetu. U svakom krugu ispitivanja primijenjuje se korištenje nekomprimirane slike kao ispitne slike u svrhu provjere koncentracije promatrača.

Nakon provedenog ispitivanja izračunava se srednja ocjena za sve ispitne slike i vrijednosti parametara ispitivanja. Srednja vrijednost ocjene naziva se *srednja iskustvena vrijednost* (eng. *Mean Opinion Score (MOS)*) i računa se kao:

$$MOS = \sum_{i=1}^5 i \cdot p(i) \quad (7.22)$$

gdje je $p(i)$ udio ocjene i u ukupnom broju ocjena. U dvopodražajnom postupku s

Tablica 7.29: Tablica ocjene izobličenja slike.

ocjena	izobličenje
1	izazito iritirajuće
2	iritirajuće
3	pomalo iritirajuće
4	zamjetno
5	nezamjetno

ocjenom izobličenja slike za ocjenu koristi se ljestvica izobličenja koja daje stabilnije rezultate za mala nego za velika pogoršanja kvalitete uzrokovane promjenom razine izobličenja.

Dvopodražajni postupak s ocjenom kvalitete slike postupak je u komu je promatraču prvo prikazana izvorna slika, a zatim ista slika ili dekodirana slika umanjene kvalitete, nakon čega promatrač donosi ocjenu o kvaliteti druge slike u odnosu na prvu. Ocjena kvalitete referentne i ispitne slike vrši se opisnim ocjenama u odnosu na apsolutnu kvalitetu slike prema tablici 7.30. Umjesto opisnih ocjena može se koristiti skala s kontinuiranim vrijednostima od 0 do 100 koje označavaju raspon od negledljive do izvrsne ocjene. Slijed parova slika treba imati slučajan raspored ispitivane slike unutar pojedinog prikazanog para te slučajan raspored parova u odnosu na razinu izobličenja. Na kraju se računa razlika ocjena referentne i ispitne slike koja predstavlja razinu gubitka kvalitete. Kao i kod dvopodražajnog postupak s ocjenom izobličenja slike preporučuje se trajanje pojedinog kruga ispitivanja od najviše 30 minuta.

Tablica 7.30: Tablica ocjene kvalitete slike.

ocjena	kvaliteta
1	negledljivo
2	jedva gledljivo
3	gledljivo
4	dobro
5	izvrsno

Dvopodražajni postupak s usporednom ocjenom kvalitete slike postupak je u komu promatrač istovremeno promatra par slika neznajući koja je referentna, a koja ispitna. Ocjena kvalitete referentne i ispitne slike vrši se opisnim ocjenama u odnosu na apsolutnu kvalitetu slike prema tablici 7.30 ili se koristi skala s kontinuiranim vrijednostima od 0 do 100. Slijed parova slika treba imati slučajan raspored referentne i ispitivane slike unutar pojedinog prikazanog para te slučajan raspored parova u odnosu na razinu izobličenja. Na kraju se računa razlika

ocjena referentne i ispitne slike koja predstavlja razinu gubitka kvalitete. Kod ovog postupka ocjene kvalitete postoji mogućnost negativnih vrijednosti u slučaju da promatrač smatra kvalitetu ispitne slike boljom od referentne slike. Kao i kod prethodnih postupaka preporučuje se trajanje pojedinog kruga ispitivanja od najviše 30 minuta.

Kod jednopodražajnih postupaka kao ispitni materijal prikazuje se više odvojenih slika. U osnovi moguća su dva pristupa: bez ponavljanja ispitnih slika ili s ponavljanjem ispitnih slika pri čemu se ispitne slike ponavljaju više puta. Ocjenjivanje se može vršiti prema sljedećim trima ljestvicama: ljestvica za ocjenu izobličenja slike s pet ocjena, ljestvica s 11 numeričkih ocjena i kontinuirana ljestvica bez numeričkih vrijednosti ili s velikim rasponom numeričkih vrijednosti (npr. 0-100). Ljestvica je za ocjenu izobličenja slike s pet ocjena najkorištenija. U slučaju kad referentna slika nije uključena u ispitivanje korisna je ljestvica s 11 numeričkih ocjena.

Na rezultate subjektivnog ocjenjivanja utječe više čimbenika. Prvenstveno su potrebni jednaki uvjeti za sve promatrače. Okruženje može biti ispitni laboratorij ili okruženje koje je najbliže kućnom ako se želi ispitati kvaliteta s potrošačke strane. Bez obzira na okruženje najbolje je ocjenjivanje vršiti u nekoj prostoriji uz nepromjenjen vizualni izgled prostorije. Za optimalne uvjete potrebno je osigurati isti zaslon za sve promatrače, jednaku udaljenost i kut promatrača u odnosu na zaslon. Jednako je važno imati jednaku razinu osvjetljenja, vlagu, temperaturu i tlak zraka u prostoriji. Zbog različitih uvjeta, za istu ispitnu sliku, mogu nastati velike razlike u njezinoj ocjeni.

Ocjene ovise i o uputstvima koje promatrači dobiju od instruktora. Ponekad se promatrači upute obratiti pažnju na detalje u slici, a ponekad na sliku kao cjelinu. Veliki utjecaj može imati i interpretacija opisnih ocjena jer se one različito prevode na različitim jezicima. Da bi se razlike u ocjenjivanju smanjile, potrebno je povećati broj promatrača. Subjektivna ocjena kvalitete slike ne može biti automatizirana i zahtijeva više vremena od objektivnog ocjenjivanja. Nedostatak je što različite studije daju različite rezultate i rezultati ne mogu biti provjereni. Ako je primjena metode kompresije prvenstveno usmjerena prema čovjeku, tada je važnost subjektivne ocjene od presudne važnosti.

Za skup ispitivanih slika, MOS vrijednosti dobivene su iz eksperimenta koji uključuje 25 neznanstvenih promatrača. Metoda testiranja vopodražajni je postupak s ocjenom kvalitete slike i skalom od 5 ocjena opisanoj u ITU-R BT Rec. 500 (ITU, "Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures", ITU-R Rec. BT. 500-9(1998).)

7.4 Rezultati subjektivnog mjerenja kvalitete

Subjektivna ocjena kvalitete slike provedena je kao dvopodražajni postupak s ocjenom kvalitete slike. U ispitivanju je sudjelovalo 35 promatrača i to 7 ženskog

i 28 muškog spola. Svi promatrači dobili su iste verbalne i pisane informacije o postupku ispitivanja. Promatraču je prvo prikazana izvorna slika, a zatim ista slika ili dekodirana slika umanjene kvalitete, nakon čega promatrač donosi ocjenu o kvaliteti druge slike u odnosu na prvu.

Subjektivna ocjena slike bila je opisna kao: *negledljivo* (jako loše, potpuna dekompozicija slike), *jedva gledljivo* (loše, izražena dekompozicija slike), *gledljivo* (vidljive promjene kvalitete slike), *dobro* (male promjene kvalitete slike) i *izvršno* (nema promjena kvalitete slike) prema tablici 7.30. Na kraju, izračunata je srednja iskustvena vrijednost (MOS) za sve ispitne slike.

Skupni rezultati subjektivnog mjerenja kvalitete slika nakon kompresije prikazani su u tablicama i pripadnim grafovima. Graf se sastoji od horizontalne osi gdje je iskazan stupanj kompresije u bitovima po elementu slike, a na vertikalnoj osi iznos MOS vrijednosti.

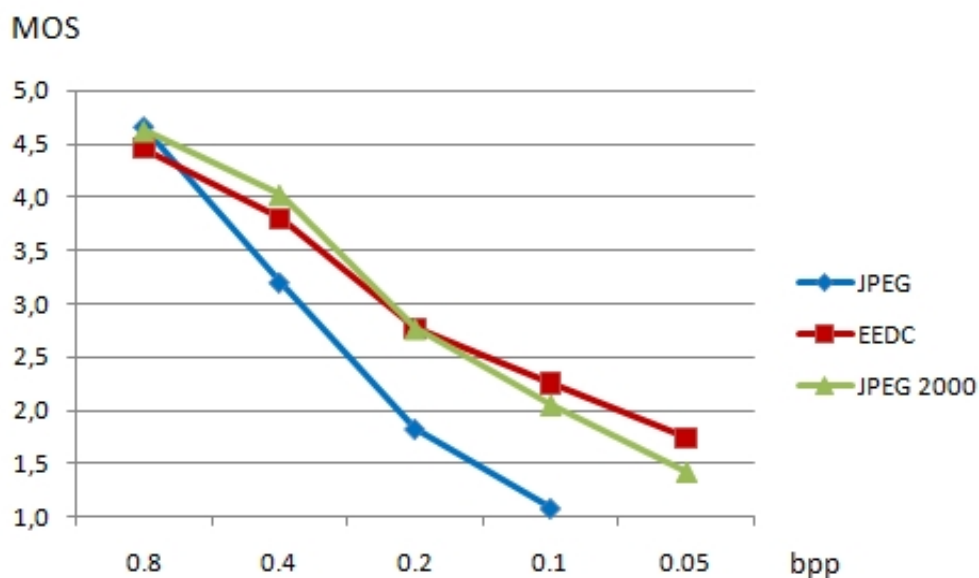
Kvantitativna analiza srednje iskustvene vrijednosti za testnu sliku *trui* prikazana je u tablici 7.31. Vidimo da pri stupnju kompresije od 0.8 bpp sve ispitivane metode imaju jednaku ocjenu *izvrstan*. Ni jedna slika nema ocjenu 5.0 i sve ocjene su na granici između *izvrstan* i *dobar* vrlo blizu jedna drugoj pa bismo mogli reći da gotovo nema promjena kvalitete slike. Pri stupnju kompresije 0.4 bpp JPEG 2000 i EEDC dobile su ocjenu *dobar*, dok je JPEG dobila ocjenu *gledljivo*. Za 0.2 bpp JPEG je ocijenjen najlošije, *jedva gledljivo*, a EEDC i JPEG 2000 imaju jednaku ocjenu *dobar*. Pri stupnju kompresije 0.1 bpp JPEG je ocijenjen kao *negledljiv*, a EEDC i JPEG 2000 kao *jedva gledljivi*. Pri stupnju kompresije 0.05 bpp JPEG 2000 je ocijenjen kao *negledljiv*, što je lošije od EEDC metode koja je dobila ocjenu *jedva gledljivo*.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	4.66	4.46	4.63
0.4	3.20	3.80	4.03
0.2	1.83	2.77	2.77
0.1	1.09	2.26	2.06
0.05		1.74	1.43

Tablica 7.31: Usporedba srednje iskustvene vrijednosti (MOS) mjere za sliku *trui* i različite stupnjeve kompresije.

Grafički prikaz subjektivne ocjene kvalitete dan je na slici 7.48 gdje pokazujemo odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije. Vidljiv je nagli pad ocjene pri porastu kompresije za JPEG metodu. Također je vidljiva i ujednačenost ocjena za stupanj kompresije 0.8 bpp, gdje su sve metode ocijenjene jednako. Razlike su između JPEG200 i EEDC-a rubne. Obje metode pokazuju smanjenje kvalitete u dekodiranoj slici. Na manjim stupnjevima kompresije JPEG 2000 ocijenjen je bolje od EEDC metode. Promjena

se događa za stupanj kompresije 0.2 bpp gdje su obje metode dobile istovjetnu ocjenu 2.77. Za velike stupnjeve kompresije EEDC je ocijenjena kao kvalitetnija u odnosu na JPEG 2000.



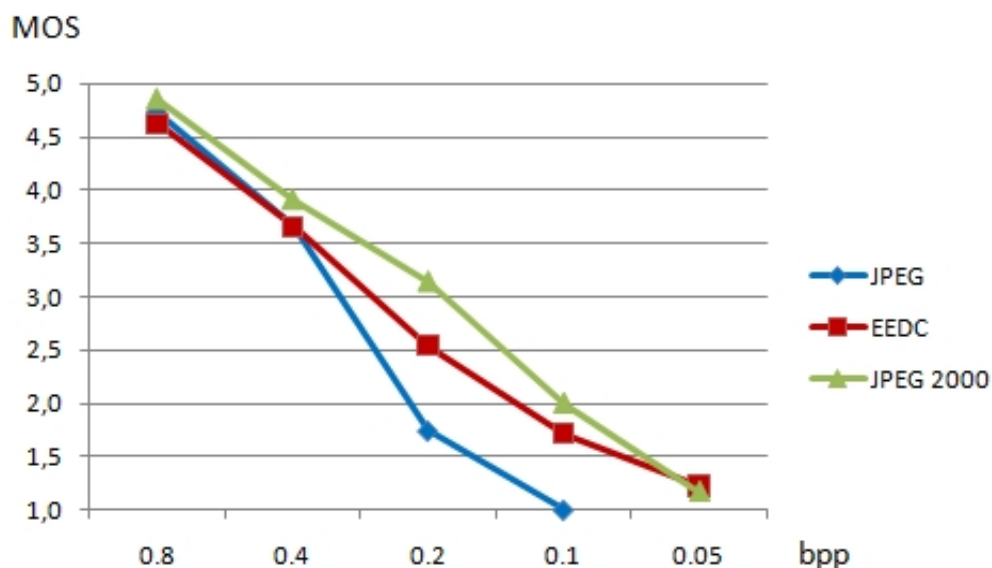
Slika 7.48: Usporedba srednje iskustvene vrijednosti EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *trui*.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	4.74	4.63	4.86
0.4	3.66	3.66	3.91
0.2	1.74	2.54	3.14
0.1	1.00	1.71	2.00
0.05		1.23	1.17

Tablica 7.32: Usporedba srednje iskustvene vrijednosti (MOS) mjere za sliku *peppers* i različite stupnjeve kompresije.

Kvantitativna analiza srednje iskustvene vrijednosti za testnu sliku *peppers* prikazana je u tablici 7.32. Sve ispitivane metode dobile su jednaku ocjenu za 0.8 bpp, gdje je subjektivna ocjena kvalitete *izvrstan*. Jednako kvalitetnima ocijenjene su i za stupanj kompresije 0.4 bpp, ocjenom *dobar*. Za 0.2 bpp JPEG je ocijenjen ocjenom *jedva gledljivo* što je znatno lošije od ocjene JPEG 2000 i

EEDC metode, koje su ocijenjene ocjenom *gledljivo*. Pri stupnju kompresije 0.1 bpp JPEG metoda ocijenjena je kao *negledljiva*, a JPEG 2000 i EEDC metode kao *jedva gledljive*. Pri stupnju kompresije 0.05 bpp JPEG 2000 i EEDC metoda ocijenjene su *negledljivima*.



Slika 7.49: Usporedba srednje iskustvene vrijednosti EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *peppers*.

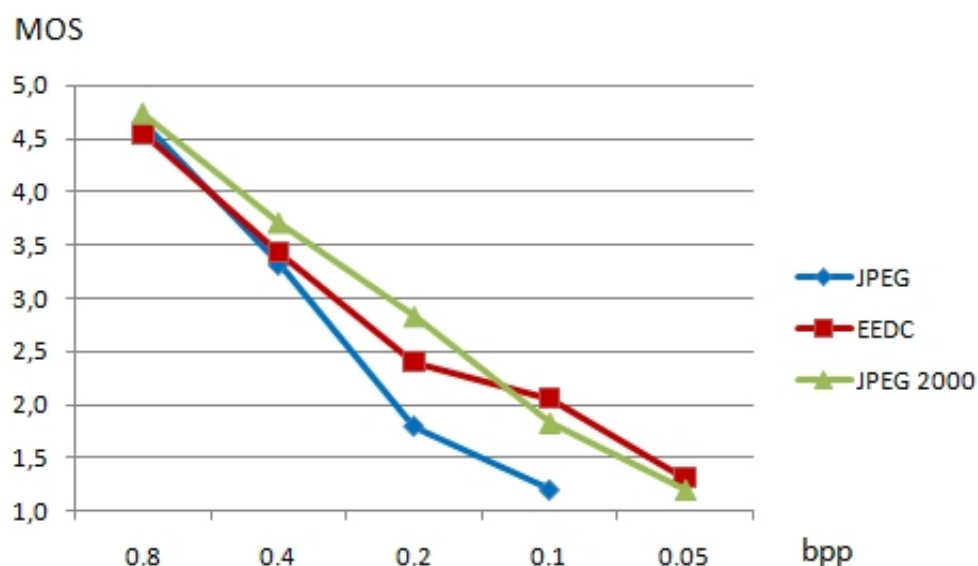
Odnos subjektivnih ocjena između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije prikazan je na slici 7.49. Vidljiva je ujednačenost ocjena za stupnjeve kompresije 0.8 i 0.4 bpp za sve ispitivane metode. Za veće kompresije JPEG metoda pokazuje nagli pad subjektivne ocjene. Subjektivne ocjene za JPEG 2000 i EEDC jednake su i za ostale stupnjeve kompresije, iako je vidljiva razlika u grafovima, posebno za 0.2 bpp gdje je JPEG 2000 vidno bolji od EEDC metode. Na najvećoj ispitivanoj kompresiji 0.05 bpp vidljivo je da EEDC ostvaruje malo veću ocjenu od JPEG 2000.

Izračunata srednja iskustvena vrijednost za testnu sliku *camera* prikazana je u tablici 7.33. Ocjenom *izvrstan* ocijenjene su sve ispitivane metode za stupanj kompresije 0.8 bpp. Za 0.4 bpp najbolje je ocijenjena JPEG 2000 ocjenom *dobar*, dok su EEDC i JPEG ocijenjene kao *gledljive*. Slična je raspodjela ocjena, samo s nižim ocjenama, za stupanj kompresije 0.2 bpp, gdje je JPEG 2000 ocijenjena ocjenom *gledljiva*, a EEDC i JPEG ocijenjene kao *jedva gledljive*. Pri stupnju kompresije 0.1 bpp JPEG metoda ocijenjena je kao *negledljiva*, a EEDC i JPEG 2000 kao *jedva gledljive*. Pri stupnju kompresije 0.05 bpp EEDC i JPEG 2000

metoda ocijenjene su *negledljivima*.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	4.66	4.54	4.74
0.4	3.31	3.43	3.71
0.2	1.80	2.40	2.83
0.1	1.20	2.06	1.83
0.05		1.31	1.20

Tablica 7.33: Usporedba srednje iskustvene vrijednosti (MOS) mjere za sliku *camera* i različite stupnjeve kompresije.



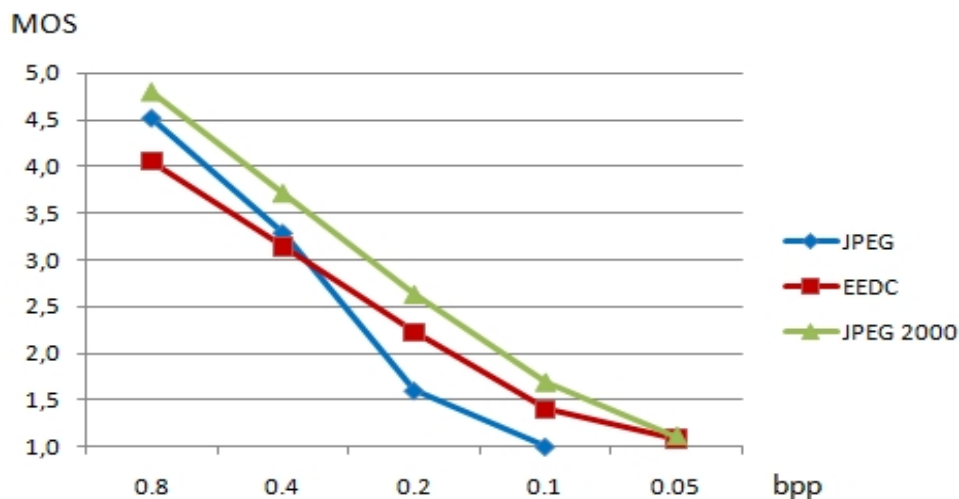
Slika 7.50: Usporedba srednje iskustvene vrijednosti EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *camera*.

Grafički prikaz srednje iskustvene vrijednosti za EEDC, JPEG i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *camera* dan je na slici 7.50. Za stupnjeve kompresije 0.8 i 0.4 bpp za sve ispitivane metode vrijedi ujednačenost ocjena. Za veće kompresije JPEG metoda pokazuje nagli pad subjektivne ocjene. Subjektivna ocjena JPEG 2000 veća je od subjektivne ocjene EEDC-a, sve do 0.1 bpp gdje dolazi do promjene i EEDC dobiva bolje subjektivne ocjene.

bpp	JPEG	EEDC	JPEG 2000
0.8	4.51	4.06	4.80
0.4	3.29	3.14	3.71
0.2	1.60	2.23	2.63
0.1	1.00	1.40	1.69
0.05		1.09	1.11

Tablica 7.34: Usporedba srednje iskustvene vrijednosti (MOS) mjere za sliku *lena* i različite stupnjeve kompresije.

Kvantitativna analiza srednje iskustvene vrijednosti za testnu sliku *lena* prikazana je u tablici 7.34. Vidimo da su pri stupnju kompresije 0.8 bpp JPEG 2000 i JPEG metode ocijenjene ocjenom *izvrstan*, dok je EEDC ocijenjena ocjenom *dobar*. Jednakom ocjenom *gledljivo* ocijenjene su JPEG i EEDC metoda za stupanj kompresije 0.4 bpp, dok je JPEG 2000 ocijenjena ocjenom *dobar*. Na 0.2 bpp JPEG je najlošije ocijenjena *jedva gledljivo*, iako na drugom kraju intervala ocjene *jedva gledljivo* tu ocjenu je dobila i EEDC metoda, dok je JPEG 2000 ocijenjena ocjenom *gledljivo*. Pri stupnju kompresije 0.1 bpp JPEG metoda ocijenjena je kao *negledljiva*, kao i u prethodnom slučaju, iako je EEDC na rubu ocjene, dobila ocjenu *negledljiva*, a JPEG 2000 kao *jedva gledljiva*. Pri stupnju kompresije 0.05 bpp i EEDC i JPEG 2000 metoda ocijenjene su *negledljivima*.



Slika 7.51: Usporedba srednje iskustvene vrijednosti EEDC-a s JPEG-om i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije od 0.8 do 0.05 bpp za testnu sliku *lena*.

Na slici 7.51 pokazujemo odnos između EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 kroz niz različitih stupnjeva kompresije izračunat MOS. Vidljivo je da je JPEG 2000 kompresija dobila zamjetno bolje subjektivne ocjene u odnosu na JPEG i EEDC. Na najmanjoj kompresiji 0.8 bpp vidljivo je da JPEG ostvaruje bolje rezultate od EEDC metode. Subjektivna ocjena JPEG-a naglo se smanjuje od stupnja kompresije 0.4 bpp. Za najveću kompresiju 0.05 bpp, razlike su u subjektivnim ocjenama JPEG 2000 i EEDC-a rubne.

Subjektivnom procjenom sve slike dobivene JPEG 2000 kompresijom za malu kompresiju 0.8 bpp ocijenjene su kao izvrsne. Dok za najveći ispitivani stupanj kompresije 0.05 bpp EEDC metoda ocijenjena je boljom od JPEG 2000, osim za sliku *lena*. Ostale su ocjene različite, ovisno o sadržaju slika. Slikovni zapisi mogu se komprimirati do određenog stupnja kompresije, a da pri tome kvaliteta slike, po subjektivnoj procjeni, odgovara izvornoj slici. Kod svih metoda kompresije kvaliteta slike bit će nezadovoljavajuća u zadnja dva stupnja kompresije (0.1 bpp i 0.05 bpp).

Rezultati pokazuju da ni jedna ispitana objektivna mjera ne postiže potpunu korelaciju sa subjektivnim ispitivanjima, ali da neke mjere koje u postupku vrjednovanja kvalitete slike uzimaju u obzir značajke ljudskog vizualnog sustava postižu veći stupanj korelacije s rezultatima subjektivnog ispitivanja.

Zaključak

U radu je pokazano da parcijalne diferencijalne jednačbe primjenjene u kompresiji digitalne slike daju vrlo dobre rezultate u postignutoj kvaliteti slike i mogu se koristiti kao nadopuna postojećoj diskretnoj kosinusnoj transformaciji i dekompoziciji waveleta.

Da bi se ostvarila kompresija pomoću parcijalnih diferencijalnih jednačbi s optimalnom kvalitetom primijenjene su zamisli vezane uz ucrtavanje u sliku koje se temelje na parcijalnim diferencijalnim jednačbama. Te zamisli dovedene su do ekstrema tako što se pohranjuje samo raspršeni skup svih elemenata slike, a podatci koji nedostaju interpoliraju se pomoću anizotropne difuzije poboljšanja rubova. Raspršeni skup konstruiran je pomoću trokutnog kodiranja binarnog stabla s nekoliko poboljšanja kao što su adaptacija praga pogreške, odabir točke na temelju difuzije te posebne strategije kvantizacije.

U svrhu kompresije istražena je metoda trokutnog kodiranja pomoću binarnog stabla koja omogućava koristan prikaz slike s raspršenim podacima. U poglavlju 3 dana je shema za kompresiju i dekompresiju slike koja se oslanja na adaptivnom prorjeđivanju elemenata slike pomoću triangulacije i uvedena je modifikacija smanjivanja broja razina svjetline s 256 na 64 prije trokutnog kodiranja pomoću binarnog stabla gdje je inkorporirana linearna interpolacija, a koja se dekodira pomoću linearne interpolacije. Uvedena modifikacija ishodila je povećanjem kvalitete dekodirane slike.

U poglavlju 4 istražen je potencijal parcijalnih diferencijalnih jednačbi za problem interpolacije raspršenih podataka. Ispitane su interpolacije homogenom difuzijom, bilinearom i trilinearom ugađivanje, apsolutna monotona Lipschitzova ekstenzija, nelinearna izotropna difuzija i nelinearna anizotropna difuzija. Pokazano je da metoda ucrtavanja u sliku, koja se temelji na anizotropnoj difuziji poboljšanja rubova najbolje interpolira raspršenu sliku.

Primijenjena je interpolacija parcijalnim diferencijalnim jednačbama u postupku kompresije slike u poglavlju 5.1. Osnovna metoda s predobrađom relevantizacijom s 256 na 64 razine svjetline, koju slijedi trokutno kodiranje pomoću binarnog stabla gdje je inkorporirana linearna interpolacija u kodiranju i dekodiranju, promijenjena je u postupku dekodiranja. Dekodiranje pomoću parcijalnih diferencijalnih jednačbi koristi samo točke interpolacije iz metode Q64+BTTC-(L)-L, a ostvareni rezultati subjektivno su i objektivno ocijenjeni kvalitetnijima

u odnosu na JPEG i Q64+BTTC(L)-L metode.

U izvornom BTTC postupku parametar praga pogreške stalan je tijekom konstrukcije binarnog stabla uvođenjem adaptivnog parametra praga pogreške u metodu s predobradom rekvantizacijom s 256 na 64 razine svjetline, koju slijedi trokutno kodiranje pomoću binarnog stabla gdje je inkorporirana linearna interpolacija u kodiranju, a dekodiranje se vrši pomoću interpolacije anizotropnom difuzijom poboljšanja rubova, poglavlje 5.2; postignuto je poboljšanje postupka kompresije.

Primjena interpolacije parcijalnim diferencijalnim jednadžbama u postupku kodiranja kao nadogradnja svih prethodnih modifikacija uvedena je u poglavlje 5.3. Nova metoda koja se temelji na trokutnom kodiranju pomoću binarnog stabla i primjeni interpolacije parcijalnim diferencijalnim jednadžbama u postupku kodiranja i dekodiranja daje rezultate koji su u prednosti u odnosu na prethodne metode.

U postupku kodiranja nakon adaptivnog prorjeđivanja elemenata slike pomoću triangulacije uveden je pomak interpolacijskih vrijednosti koji doprinosi unaprijeđenju metode kompresije. Iako se tim postupkom uvedenim u poglavlju 5.4 uvodi pogreška u pohranjeni element slike, smanjuje se pogreška u okolini istoga, a time se smanjuje i aritmetička sredina apsolutne vrijednosti pogreške.

Postupak kvantizacije ponovo je razmatran u poglavlju 5.5, gdje se u svrhu točnijeg mjerenja pogreške tijekom postupka stvaranja raspršenih točaka interpolacije predlaže naknadna rekvantizacija. U odnosu na razinu svjetline pokazalo se da se dobiju bolji rezultati primjenom kvantizacije nakon trokutnog kodiranja pomoću binarnog stabla zajedno s pomakom interpolacijskih vrijednosti, a prije početka dekodiranja.

Ostvarivanje kompresije digitalnih slika pomoću parcijalnih diferencijalnih jednadžbi učinjeno je sukcesivno u više koraka, čime je ostvaren osnovni cilj ove disertacije. U poglavljima 6.1 do 6.5 analiziramo, a na slikama 6.2 do 6.6 pokazujemo kako se kvaliteta dekodirane slike postupno poboljšava uvođenjem različitih modifikacija. Uspoređivane su metode kompresije koje se temelje na BTTC-u za stupanj kompresije slike 0.2 bpp. Svaki korak predstavlja poboljšanje u odnosu na prethodni. Također ustanovljeno je kako je bolje provesti modifikacije u postupku kodiranja uz nemijenjanje metode kompresije u postupku dekodiranja, što pokazuje tablica 6.5 izračunata na osnovu objektivne mjere kvalitete.

U disertaciji je izvršeno mjerenje kvalitete dekodirane slike u poglavlju 7 niza standardnih slika *trui*, *peppers*, *camera* i *lena*. Korištene su objektivne i subjektivne ocjene kvalitete. Od objektivnih su mjera korištene: aritmetička sredina apsolutne vrijednosti pogreške, srednja kvadratna pogreška, omjer signal/šum, vršni omjer signal/šum, SSIM, MS-SSIM i VIF mjera. Iz rezultata objektivne ocjene kvalitete niza ispitnih slika zaključuje se da pri malim stupnjevima kompresije sve metode daju bolju kvalitetu, ali ne preporučuju se za velike stupnjeve kompresije kada je zahtjev za kvalitetom velik. Od subjektivnih mjera korišten je dvopodražajni postupak s ocjenom izobličenja slike. Na osnovi rezultata su-

bjektivnog mjerenja kvalitete pokazano je da pri malim stupnjevima kompresije od 0.8 bpp sve ispitivane slike imaju izvrsnu srednju subjektivnu ocjenu, dok je pri velikim stupnjevima kompresije 0.05 bpp sklop za kompresiju standarda JPEG 2000 ocijenjen kao jako loš, a EEDC nešto malo bolji.

Usporedba EEDC-a, JPEG-a i JPEG 2000 na većem broju standardnih testnih slika pokazala je da se kompresija koja se temelji na parcijalnim diferencijalnim jednadžbama u smislu kvalitete dekodirane slike pri manjem stupnju kompresije dosljedno nalazi između JPEG-a i JPEG 2000 i uvijek je bliža posljednjem spomenutom. Kod slika s puno detalja i tekstura, poput slike *lena*, sklonost k ugađivanju postaje uočljivija. Međutim, u tim slučajevima čak i JPEG 2000 pokazuje znatan gubitak detalja. EEDC jasno nadmašuje JPEG standard, ne samo pri visokim stupnjevima kompresije, te se približava i na velikim stupnjevima kompresije nadmašuje po kvaliteti visoko optimizirani JPEG 2000.

S obzirom na posebnu metodu u ovoj disertaciji, zasigurno postoji prostor za daljnju optimizaciju, npr. inkorporiranjem zamisli iz teorije o izobličenju. Kako bi metode koje se temelje na parcijalnim diferencijalnim jednadžbama postale općenitija alternativa postojećim paradigmama, u tijeku je dodatno istraživanje, npr. s obzirom na teorijske osnove interpolacije koja se temelji na difuziji [10], alternativne strategije raspršenosti [27, 10], uključujući i one koje se temelje na značajkama [98], kompaktan prikaz područja s teksturom, visoko učinkovite numeričke algoritme [55], kao i poopćenja vektorskih i tenzorskih slika [91], slijedove slika [55] i plošne podatke [6].

Izvorni znanstveni doprinosi jesu:

- Pokazano je da metoda ucrtavanja u sliku koja se temelji na parcijalnim diferencijalnim jednadžbama interpolira raspršenu sliku uz dobre pokazatelje pomoću anizotropne difuzije poboljšanja rubova.
- Primijenjena je interpolacija parcijalnim diferencijalnim jednadžbama u postupku dekodiranja, a rezultati su subjektivno i objektivno ocijenjeni kvalitetnijima u odnosu na JPEG i trokutno kodiranje pomoću binarnog stabla.
- Primijenjen je novi postupak za kompresiju slike pomoću parcijalnih diferencijalnih jednadžbi u postupku kodiranja uz primjenu trokutnog kodiranja binarnim stablom.
- Dokazano je da je bolje provesti modifikacije u postupku kodiranja (adaptivni parametar praga pogreške, pomak interpolacijskih vrijednosti) uz nemijenjanje metode dekodiranja pomoću anizotropne difuzije poboljšanja rubova, što potvrđuju objektivne mjere kvalitete.
- Utvrđeno je pri analizi kvalitete slike da se smanjenje koraka kvantizacije s 256 na 32 razine svjetline treba provesti nakon trokutnog kodiranja, a prije

dekodiranja i nadalje uz provedbu anizotropne difuzije poboljšanja rubova.

- Nakon provedene analize standardnih digitalnih slika *trui*, *peppers*, *camera* i *lena* utvrđeno je objektivnim i subjektivnim postupkom ocjene kvalitete, da kompresija koja se temelji na parcijalnim diferencijalnim jednažbama u smislu kvalitete dekodirane slike pri velikim stupnjevima kompresije daje bolje rezultate od JPEG 2000.

Sažetak. *Kompresija je važno područje u digitalnoj obradi slike gdje postoje dobro razvijene metode visokih performansi. Međutim, parcijalne diferencijalne jednačbe nisu se do sada u tom kontekstu značajnije istraživale. U disertaciji se uvodi novi okvir za kompresiju slika koji koristi kvalitete interpolacije vezane uz difuziju poboljšanja rubova. Iako je ova jednačba anizotropne difuzije s difuzijskim tenzorom izvorno predložena za uklanjanje šuma iz slike, bit će pokazano da ona nadmašuje brojne druge parcijalne diferencijalne jednačbe kada je potrebno interpolirati vrlo mali broj raspršenih podataka. Kako bi se ovo svojstvo moglo iskoristiti za kompresiju slike, promatrana je adaptivna metoda triangulacije za uklanjanje manje značajnih elemenata slike iz slike. Preostale točke služe kao raspršeni interpolacijski podatci za proces difuzije. Oni se mogu kodirati na kompaktan način koji odražava strukturu binarnog stabla u triangulaciji. Korak kodiranja nadopunjen je brojnim izmjenama i dopunama kao što su adaptacija praga pogreške, odabir točke na temelju difuzije te posebne strategije kvantizacije. Provedeni eksperimenti ilustriraju korisnost svake od tih modifikacija. Oni pokazuju da za velik stupanj kompresije ovaj novi pristup koji se temelji na parcijalnim diferencijalnim jednačbama, ne samo da daje puno bolje rezultate od JPEG standarda, koji je u širokoj primjeni, nego čak može nadmašiti kvalitetu visoko optimiziranog JPEG 2000 kodeka.*

Ključne riječi: *kompresija, digitalna mirna slika, trokutno kodiranje pomoću binarnog stabla, interpolacija slike, parcijalne diferencijalne jednačbe, anizotropna difuziju poboljšanja rubova, objektivna i subjektivna kvaliteta.*

Summary. *Compression is an important field of digital image processing where well-engineered methods with high performance exist. Partial differential equations (PDEs), however, have not much been explored in this context so far. In this thesis a novel framework for image compression that makes use of the interpolation qualities of edge-enhancing diffusion is introduced. Although this anisotropic diffusion equation with a diffusion tensor was originally proposed for image denoising, we show that it outperforms many other PDEs when sparse scattered data must be interpolated. To exploit this property for image compression, we consider an adaptive triangulation method for removing less significant pixels from the image. The remaining points serve as scattered interpolation data for the diffusion process. They can be coded in a compact way that reflects the B-tree structure of the triangulation. We supplement the coding step with a number of amendments such as error threshold adaptation, diffusion-based point selection, and specific quantisation strategies. Our experiments illustrate the usefulness of each of these modifications. They demonstrate that for high compression rates, PDE-based approach does not only give far better results than the widely-used JPEG standard, but can even beat the quality of the highly optimised JPEG 2000 codec.*

Key words: *compression, still digital image, B-tree triangular coding, image interpolation, partial differential equations, edge-enhancing anisotropic diffusion, objective and subjective quality assessment*

Bibliografija

- [1] F. Alter, S. Durand, and J. Froment. Adapted total variation for artifact free decompression of JPEG images. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, Vol. 23, No. 2, pp. 199–211, September 2005.
- [2] H. A. Aly and E. Dubois. Image up-sampling using total-variation regularization with a new observation model. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 14, No. 10, pp. 1647–1659, October 2005.
- [3] M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu, I. Daubechies. Image coding using wavelet transform. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 5, No. 1, pp. 205–220, April 1992.
- [4] G. Aubert and P. Kornprobst. Mathematical Problems in Image Processing: Partial Differential Equations and the Calculus of Variations *Applied Mathematical Sciences*, Vol. 147, Springer, New York, 2002.
- [5] V. Aurich and U. Daub. Bilddatenkompression mit geplanten Verlusten und hoher Rate. In B. Jähne, P. Geißler, H. Haußecker, and F. Hering, editors, *Mustererkennung 1996*, pp. 138–146. Springer, Berlin, 1996.
- [6] E. Bae. *New PDE-based methods for surface and image reconstruction*. Master’s thesis, Dept. of Mathematics, University of Bergen, Norway, 2007.
- [7] R. Bajcsy and S. Kovačič. Multiresolution elastic matching. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Vol. 46, No. 1, pp. 1–21, April 1989.
- [8] S. Battiato, G. Gallo, and F. Stanco. Smart interpolation by anisotropic diffusion. In *Proc. Twelfth International Conference on Image Analysis and Processing*, pp. 572–577, Montova, Italy, September 2003. IEEE Computer Society Press.
- [9] A. Belahmidi and F. Guichard. A partial differential equation approach to image zoom. In *Proc. 2004 IEEE International Conference on Image Processing*, Vol. 1, pp. 649–652, Singapore, October 2004.

- [10] Z. Belhachmi, D. Bucur, B. Burgeth, and J. Weickert. How to choose interpolation data in images. Technical Report 205, Dept. of Mathematics, Saarland University, Saarbrücken, Germany, February 2008.
- [11] M. Bertalmío, G. Sapiro, V. Caselles, and C. Ballester. Image inpainting. In *Proc. SIGGRAPH 2000*, pp. 417–424, New Orleans, LI, July 2000.
- [12] F. Bornemann and T. März. Fast image inpainting based on coherence transport. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, Vol. 28, No. 3, pp. 259–278, July 2007.
- [13] A. M. Bruckstein. On image extrapolation. Technical Report CIS9316, Computer Science Department, Technion, Haifa, Israel, April 1993.
- [14] P. J. Burt, E. H. Adelson The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 31, No.14, April 1983.
- [15] E. Candés, J. Romberg, and T. Tao. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 52, No. 2, pp. 489–509, February 2006.
- [16] S. Carlsson. Sketch based coding of grey level images. *Signal Processing*, Vol. 15, pp. 57–83, 1988.
- [17] V. Caselles, J.-M. Morel, and C. Sbert. An axiomatic approach to image interpolation. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 7, No. 3, pp. 376–386, March 1998.
- [18] T. F. Chan and J. Shen. Non-texture inpainting by curvature-driven diffusions (CDD). *Journal of Visual Communication and Image Representation*, Vol. 12, No. 4, pp. 436–449, 2001.
- [19] T. F. Chan and J. Shen. *Image Processing and Analysis: Variational, PDE, Wavelet, and Stochastic Methods*. SIAM, Philadelphia, 2005.
- [20] T. F. Chan and H. M. Zhou. Feature preserving lossy image compression using nonlinear PDE’s. In F. T. Luk, editor, *Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations VIII*, volume 3461 of *Proceedings of SPIE*, pp. 316–327. SPIE Press, Bellingham, 1998.
- [21] T. F. Chan and H. M. Zhou. Total variation improved wavelet thresholding in image compression. In *Proc. Seventh International Conference on Image Processing*, Vol. II, pp. 391–394, Vancouver, Canada, September 2000.

- [22] P. Charbonnier, L. Blanc-Féraud, G. Aubert, and M. Barlaud. Deterministic edge-preserving regularization in computed imaging. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 6, No. 2, pp. 298–311, 1997.
- [23] C. Christopoulos and A. Skodras. The JPEG 2000 still image coding system: An overview. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 46, No. 4, pp. 1103–1127, Nov. 2000.
- [24] R. E. Crochiere, S. A. Webber, J. L. Flanagan. Digital Coding of Speech in Subbands *The Bell System Technical Journal*, Vol. 55, No. 8, October 1976
- [25] A. Crosier, D. Esteban, C. Galand. Perfect Channel Splitting by use of Interpolation/Decimation/Tree Decomposition Techniques. In *Proc. First International Conference on Information Sciences and Systems*, Patras, pp. 443–446, 1976
- [26] I. Daubechies. *Ten lectures on wavelets*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, 1992
- [27] H. Dell. *Seed points in PDE-driven interpolation*. Bachelor’s Thesis, Dept. of Computer Science, Saarland University, Saarbrücken, Germany, 2006.
- [28] L. Demaret, N. Dyn, and A. Iske. Image compression by linear splines over adaptive triangulations. *Signal Processing*, Vol. 86, No. 7, pp. 1604–1616, 2006.
- [29] U. Y. Desai, M. M. Mizuki, I. Masaki, and B. K. P. Horn. Edge and mean based image compression. Technical Report 1584 (A.I. Memo), Artificial Intelligence Lab., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, U.S.A., November 1996.
- [30] R. DeVore, B. Jawerth and B. Lucier. Image compression through wavelet transform coding. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 38, pp. 719–746, March 1992.
- [31] R. Distasi, M. Nappi, and S. Vitulano. Image compression by B-tree triangular coding. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 45, No. 9, pp. 1095–1100, September 1997.
- [32] J. Duchon. Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces. *RAIRO Mathematical Models and Methods in the Applied Sciences*, Vol. 10, pp. 5–12, 1976.
- [33] S. Durand and M. Nikolova. Restoration of wavelet coefficients by minimizing a specially designed objective function. In O. Faugeras and N. Paragios, editors, *Proc. Second IEEE Workshop on Geometric and Level Set Methods in Computer Vision*, Nice, France, October 2003. INRIA.

- [34] J. H. Elder. Are edges incomplete? *International Journal of Computer Vision*, Vol. 34, No. 2/3, pp. 97–122, 1999.
- [35] G. Facciolo, F. Lecumberry, A. Almansa, A. Pardo, V. Caselles, and B. Rougé. Constrained anisotropic diffusion and some applications. In *Proc. 2006 British Machine Vision Conference*, Vol. 3, pp. 1049–1058, Edinburgh, Scotland, September 2006.
- [36] G. E. Ford. Application of inhomogeneous diffusion to image and video coding. In *Proc. 13th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Vol. 2, pp. 926–930, Asilomar, CA, November 1996.
- [37] G. E. Ford, R. R. Estes, and H. Chen. Scale-space analysis for image sampling and interpolation. In *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vol. 3, pp. 165–168, San Francisco, CA, March 1992.
- [38] R. Franke. Scattered data interpolation: Tests of some methods. *Mathematics of Computation*, Vol. 38, pp. 181–200, 1982.
- [39] I. Galić, J. Weickert, M. Welk, A. Bruhn, A. Belyaev, and H.-P. Seidel. Towards PDE-based image compression. In N. Paragios, O. Faugeras, T. Chan, and C. Schnörr, editors, *Variational, Geometric and Level-Set Methods in Computer Vision*, volume 3752 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 37–48. Springer, Berlin, 2005.
- [40] I. Galić, J. Weickert, M. Welk, A. Bruhn, A. Belyaev, and H.-P. Seidel. Image Compression with Anisotropic Diffusion. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, Vol. 31, pp. 255–269, 2008.
- [41] P. Goupillaud, A. Grossman, and J. Morlet. Cycle-Octave and Related Transforms in Seismic Signal Analysis. *Geoexploration*, Vol. 23, pp. 85–102, 1984.
- [42] E. De Giorgi. Some remarks on Γ -convergence and least squares methods. *Composite Media and Homogenization Theory*, Birkhauser Press, pp. 135–142, 1991.
- [43] A. Gothandaraman, R. Whitaker, and J. Gregor. Total variation for the removal of blocking effects in DCT based encoding. In *Proc. 2001 IEEE International Conference on Image Processing*, Vol. 2, pp. 455–458, Thessaloniki, Greece, October 2001.
- [44] H. Grossauer and O. Scherzer. Using the complex Ginzburg–Landau equation for digital inpainting in 2D and 3D. In L. D. Griffin and M. Lillholm, editors, *Scale-Space Methods in Computer Vision*, volume 2695 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 225–236. Springer, Berlin, 2003.

- [45] A. Haar. Zur Theorie der orthogonalen Funktionensysteme. *Mathematische Annalen*, Vol. 69, No. 3, pp. 331–371, 1910.
- [46] B. Horn and B. Schunck. Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, Vol. 17, pp. 185–203, 1981.
- [47] D. A. Huffman. A method for the construction of minimum redundancy codes. *Proceedings of the IRE*, Vol. 40, pp. 1098–1101, 1952.
- [48] R. Hummel and R. Moniot. Reconstructions from zero-crossings in scale space. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 37, pp. 2111–2130, 1989.
- [49] T. Iijima. Basic theory on normalization of pattern (in case of typical one-dimensional pattern). *Bulletin of the Electrotechnical Laboratory*, Vol. 26, pp. 368–388, 1962. In Japanese.
- [50] ISO/IEC IS 10918, Digital Compression and Coding of Continuous Tone Still Images, February 1991.
- [51] ITU-R BT.500-11 Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures International Telecommunication Union/ITU Radio-communication Sector, 2002.
- [52] P. Johansen, S. Skelboe, K. Grue, and J. D. Andersen. Representing signals by their toppoints in scale space. In *Proc. Eighth International Conference on Pattern Recognition*, pp. 215–217, Paris, France, October 1986.
- [53] F. M. W. Kanters, M. Lillholm, R. Duits, B. J. P. Jansen, B. Platel, L.M.J. Florack, and B. M. ter Haar Romeny. On image reconstruction from multi-scale top points. In R. Kimmel, N. Sochen, and J. Weickert, editors, *Scale Space and PDE Methods in Computer Vision*, volume 3459 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 431–439. Springer, Berlin, 2005.
- [54] I. Kopilovic and T. Szirányi. Artifact reduction with diffusion preprocessing for image compression. *Optical Engineering*, Vol. 44, No. 2, pp. 1–14, February 2005.
- [55] H. Köstler, M. Stürmer, C. Freundl, and U. Rüdè. PDE based video compression in real time. Technical Report 07-11, Lehrstuhl für Informatik 10, Univ. Erlangen–Nürnberg, Germany, 2007.
- [56] M. Kunt, A. Ikonomopoulos, and M. Kocher. Second-generation image-coding techniques. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 73, No.4, pp. 549–574, April 1985.

- [57] T. Lehmann, C. Gönner, and K. Spitzer. Survey: Interpolation methods in medical image processing. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, Vol. 18, No.11, pp. 1049–1075, November 1999.
- [58] A. S. Lewis and G. P. Knowles. Image compression using the 2-D wavelet transform. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 1, No. 2, pp. 244–250, April 1992.
- [59] M. Lillholm, M. Nielsen, and L. D. Griffin. Feature-based image analysis. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 52, No. 2/3, pp. 73–95, 2003.
- [60] D. Liu, X. Sun, F. Wu, S. Li, and Y.-Q. Zhang. Image compression with edge-based inpainting. *IEEE Transactions on Circuits, Systems and Video Technology*, Vol. 17, No. 10, pp. 1273–1286, October 2007.
- [61] F. Malgouyres and F. Guichard. Edge direction preserving image zooming: A mathematical and numerical analysis. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, Vol. 39, No. 1, pp. 1–37, 2001.
- [62] S. Mallat and S. Zhong. Characterisation of signals from multiscale edges. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, pp. 720–732, 1992.
- [63] R. March. Computation of stereo disparity using regularization. *Pattern Recognition Letters*, Vol. 8, pp. 181–187, October 1988.
- [64] S. Masnou and J.-M. Morel. Level lines based disocclusion. In *Proc. 1998 IEEE International Conference on Image Processing*, Vol. 3, pp. 259–263, Chicago, IL, October 1998.
- [65] E. Meijering. A chronology of interpolation: From ancient astronomy to modern signal and image processing. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 90, No. 3, pp. 319–342, March 2002.
- [66] Y. Meyer. *Ondelettes et opérateurs*. I, II. Actualités Mathématiques, Hermann, Paris, 1990.
- [67] J. Modersitzki. *Numerical Methods for Image Registration*. Oxford University Press, Oxford, 2004.
- [68] P. Mrázek. *Nonlinear Diffusion for Image Filtering and Monotonicity Enhancement*. PhD thesis, Czech Technical University, Prague, Czech Republic, June 2001.
- [69] D. Mumford and J. Shah. Optimal approximations by piecewise smooth functions and associated variational problems. *Communications of Pure and Applied Mathematics*, Vol. 42, 1989, p. 577–685.

- [70] H.-H. Nagel and W. Enkelmann. An investigation of smoothness constraints for the estimation of displacement vector fields from image sequences. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 8, pp. 565–593, 1986.
- [71] G. M. Nielson and J. Tvedt. Comparing methods of interpolation for scattered volumetric data. In D. F. Rogers and R. A. Earnshaw, editors, *State of the Art in Computer Graphics: Aspects of Visualization*, pp. 67–86. Springer, New York, 1994.
- [72] W. B. Pennebaker and J. L. Mitchell. *JPEG: Still Image Data Compression Standard*. Springer, New York, 1992.
- [73] P. Perona and J. Malik. Scale space and edge detection using anisotropic diffusion. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 12, pp. 629–639, 1990.
- [74] S. D. Rane, G. Sapiro, and M. Bertalmio. Structure and texture filling-in of missing image blocks in wireless transmission and compression applications. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 12, No. 3, pp. 296–302, March 2003.
- [75] S. Rimac-Drlje, B. Zovko-Cihlara and S. Grgić. A Visually Tuned Image Compression with Discrete Wavelet Transform. In Proceedings of the *7th International Workshop on Systems, Signals and Image Processing, IWSSIP 2000*, Maribor, Slovenia, pp. 135–138, June 2000.
- [76] J. Rissanen and G. G. Langdon Jr. Arithmetic coding. *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 23, No. 2, pp. 149–162, 1979.
- [77] A. Roussos and P. Maragos. Vector-valued image interpolation by an anisotropic diffusion-projection PDE. In F. Sgallari, F. Murli, and N. Paragios, editors, *Scale Space and Variational Methods in Computer Vision*, volume 4485 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 104–115. Springer, Berlin, 2007.
- [78] L. Rudin, S. Osher, and E. Fatemi. Nonlinear total variation based noise removal algorithms. *Physica D*, Vol. 60, pp. 259–268 1992.
- [79] H. R. Sheikh and A. C. Bovik. Image information and visual quality. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 15, No. 2, pp. 430–444, 2003.
- [80] A. Solé, V. Caselles, G. Sapiro, and F. Arandiga. Morse description and geometric encoding of digital elevation maps. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 13, No. 9, pp. 1245–1262, September 2004.

- [81] P. Strobach. Quadtree-structured recursive plane decomposition coding of images. *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 39, No. 6, pp. 1380–1397, June 1991.
- [82] G. J. Sullivan and R. J. Baker. Efficient quadtree coding of images and video. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 3, No. 3, pp. 327–331, May 1994.
- [83] D. S. Taubman and M. W. Marcellin, editors. *JPEG 2000: Image Compression Fundamentals, Standards and Practice*. Kluwer, Boston, 2002.
- [84] D. Tschumperlé and R. Deriche. Vector-valued image regularization with PDEs: A common framework for different applications. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 27, No. 4, pp. 506–516, April 2005.
- [85] H. Tsuji, T. Sakatani, Y. Yashima, and N. Kobayashi. A nonlinear spatio-temporal diffusion and its application to prefiltering in MPEG-4 video coding. In *Proc. 2002 IEEE International Conference on Image Processing*, Vol. 1, pp. 85–88, Rochester, NY, September 2002.
- [86] Z. Wang, A. C. Bovik., H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 13, No.4, pp. 600-612, 2004.
- [87] Z. Wang, A. C. Bovik. Modern Image Quality Assessment. Synthesis Lectures on Image, Video, and Multimedia Processing, Vol. 2, pp. 1–156, Morgan and Claypool publishers, 2006.
- [88] Z. Wang, E. P. Simoncelli, A. C. Bovik, Multiscale structural similarity for image quality assessment. In *37th Proc. IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Vol. 2, No. 1, pp. 1398–1402, 2003.
- [89] J. Weickert. Theoretical foundations of anisotropic diffusion in image processing. *Computing Supplement*, Vol. 11, pp. 221–236, 1996.
- [90] J. Weickert. *Anisotropic Diffusion in Image Processing*. Teubner, Stuttgart, 1998.
- [91] J. Weickert and M. Welk. Tensor field interpolation with PDEs. In J. Weickert and H. Hagen, editors, *Visualization and Processing of Tensor Fields*, pp. 315–325. Springer, Berlin, 2006.
- [92] Z. Xie, W. R. Franklin, B. Cutler, M. A. Andrade, M. Inanc, and D. M. Tracy. Surface compression using over-determined Laplacian approximation. In F. T. Luk, editor, *Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures*,

and *Implementations XVII*, volume 5266 of *Proceedings of SPIE*. SPIE Press, Bellingham, 2007.

- [93] Z. W. Xiong, X. Y. Sun, F. Wu, and S. P. Li. Image coding with parameter-assistant inpainting. In *Proc. 2007 IEEE International Conference on Image Processing*, Vol. 2, pp. 369–372, San Antonio, TX, September 2007.
- [94] S. Yang and Y.-H. Hu. Coding artifact removal using biased anisotropic diffusion. In *Proc. 1997 IEEE International Conference on Image Processing*, Vol. 2, pp. 346–349, Santa Barbara, CA, October 1997.
- [95] S. Yao, W. Lin, Z. Lu, E. P. Ong, and X. Yang. Adaptive nonlinear diffusion processes for ringing artifacts removal on JPEG 2000 images. In *Proc. 2004 IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, pp. 691–694, Taipei, Taiwan, June 2004.
- [96] N. Yokoya. Surface reconstruction directly from binocular stereo images by multiscale-multistage regularization. In *Proc. Eleventh International Conference on Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. 642–646, The Hague, The Netherlands, August 1992.
- [97] Y. Zeevi and D. Rotem. Image reconstruction from zero-crossings. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 34, pp. 1269–1277, 1986.
- [98] H. Zimmer. *PDE-based image compression using corner information*. Master’s thesis, Dept. of Computer Science, Saarland University, Saarbrücken, Germany, 2007.
- [99] B. Zovko-Cihlar. *Televizija u boji. Tehnička enciklopedija* Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Vol. 12, pp. 627–665, 1992.

Popis kratica

AAE	average absolute error
AMLE	absolutely minimizing Lipschitz extension
bpp	bits per pixel
BTTC	B-tree triangular coding
DCT	discrete cosine transform
DWT	discrete wavelet transform
DCT	discrete cosine transform
DWT	discrete wavelet transform
EBCOT	embedded block coding with optimal truncation
EED	edge-enhancing diffusion
FIR	finite impulse response
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Standards Organisation
JPEG	Joint Photographers Experts Group
MSE	mean squared error
MS-SSIM	multi-scale structure similarity
PDE	partial differential equations
pixel	picture element

PSNR	peak signal to noise ratio
ROI	region of interest coding
SNR	signal to noise ratio
SSIM	structure similarity
VIF	visual information fidelity

Popis slika

1.1	Blok shema postupka komprimiranja i dekomprimiranja.	6
1.2	Osnovni valni oblici 8×8 DCT transformacije.	13
1.3	Generiranje wavelet funkcije.	15
1.4	Diskretni waveleti u vrijeme-skala sustavu.	17
1.5	Spektar wavelet funkcija.	17
1.6	Spektar skalirajuće i wavelet funkcije.	18
1.7	Potpojasno kodiranje	19
2.1	Blok shema JPEG koda	22
2.2	Blok shema JPEG dekodera.	22
2.3	Tablice kvantiziranja JPEG normi	24
2.4	Cik-cak analiziranje.	25
3.1	Početni korak BTTC metode.	33
3.2	BTTC korak odlučivanja o dijeljenju	34
3.3	BTTC rastav slike i pripadno binarno stablo	35
3.4	Triangulacija domene za <i>trui</i> na 0.2 bita po elementu slike.	36
3.5	Testne slike <i>trui</i> i <i>peppers</i>	37
3.6	BTTC(L)-L kompresija slike <i>trui</i>	38
3.7	Q64+BTTC(L)-L kompresija slike <i>trui</i>	39
3.8	BTTC(L)-L kompresija slike <i>peppers</i>	41
3.9	Q64+BTTC(L)-L kompresija slike <i>peppers</i>	42
3.10	Grafička usporedba AAE za <i>trui</i>	43
3.11	Grafička usporedba AAE za <i>peppers</i>	44
4.1	Interpolacija parcijalnim diferencijalnim jednadžbama	52
5.1	Pomak interpolacijske vrijednosti.	59
6.1	Testna slika <i>trui</i>	61
6.2	JPEG, Q64+BTTC(L)-L i Q64+BTTC(L)-EED <i>trui</i>	62
6.3	Primjena adaptivnog parametra praga pogreške	64
6.4	Primjena EED-a u kodiranju	65
6.5	Pomak interpolacijskih vrijednosti	66

6.6	BTTC metode kompresije slike <i>trui</i>	67
6.7	JPEG, EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>trui</i> na 0.8 bpp . . .	70
6.8	JPEG, EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>trui</i> na 0.4 bpp . . .	71
6.9	JPEG, EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>trui</i> na 0.2 bpp . . .	72
6.10	JPEG, EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>trui</i> na 0.1 bpp . . .	73
6.11	EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>trui</i> na 0.05 bpp	74
7.1	Predstavljanje slike dvodimenzionalnom matricom	76
7.2	Grafička usporedba AAE <i>trui</i>	81
7.3	Grafička usporedba MSE <i>trui</i>	82
7.4	Grafička usporedba SNR <i>trui</i>	83
7.5	Grafička usporedba PSNR <i>trui</i>	85
7.6	Grafička usporedba SSIM <i>trui</i>	86
7.7	Grafička usporedba MS-SSIM <i>trui</i>	87
7.8	Grafička usporedba VIF <i>trui</i>	88
7.9	Testna slika <i>peppers</i>	89
7.10	JPEG, EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>peppers</i> na 0.8 bpp .	90
7.11	JPEG, EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>peppers</i> na 0.4 bpp .	90
7.12	JPEG, EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>peppers</i> na 0.2 bpp .	91
7.13	JPEG, EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>peppers</i> na 0.1 bpp .	92
7.14	EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>peppers</i> na 0.05 bpp	92
7.15	Grafička usporedba AAE <i>peppers</i>	93
7.16	Grafička usporedba MSE <i>peppers</i>	94
7.17	Grafička usporedba SNR <i>peppers</i>	95
7.18	Grafička usporedba PSNR <i>peppers</i>	96
7.19	Grafička usporedba SSIM <i>peppers</i>	97
7.20	Grafička usporedba MS-SSIM <i>peppers</i>	98
7.21	Grafička usporedba VIF <i>peppers</i>	99
7.22	Testna slika <i>camera</i>	100
7.23	JPEG, EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>camera</i> na 0.8 bpp . .	100
7.24	JPEG, EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>camera</i> na 0.4 bpp . .	101
7.25	JPEG, EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>camera</i> na 0.2 bpp . .	102
7.26	JPEG, EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>camera</i> na 0.1 bpp . .	102
7.27	EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>camera</i> na 0.05 bpp	103
7.28	Grafička usporedba AAE <i>camera</i>	104
7.29	Grafička usporedba MSE <i>camera</i>	105
7.30	Grafička usporedba SNR <i>camera</i>	106
7.31	Grafička usporedba PSNR <i>camera</i>	107
7.32	Grafička usporedba SSIM <i>camera</i>	108
7.33	Grafička usporedba MS-SSIM <i>camera</i>	109
7.34	Grafička usporedba VIF <i>camera</i>	110
7.35	Testna slika <i>lena</i>	111
7.36	JPEG, EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>lena</i> na 0.8 bpp . . .	111

7.37	JPEG, EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>lena</i> na 0.4 bpp . . .	112
7.38	JPEG, EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>lena</i> na 0.2 bpp . . .	113
7.39	JPEG, EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>lena</i> na 0.1 bpp . . .	113
7.40	JPEG, EEDC i JPEG 2000 kompresije slike <i>lena</i> na 0.05 bpp . . .	114
7.41	Grafička usporedba AAE <i>lena</i>	115
7.42	Grafička usporedba MSE <i>lena</i>	116
7.43	Grafička usporedba SNR <i>lena</i>	117
7.44	Grafička usporedba PSNR <i>lena</i>	118
7.45	Grafička usporedba SSIM <i>lena</i>	119
7.46	Grafička usporedba MS-SSIM <i>lena</i>	120
7.47	Grafička usporedba VIF <i>lena</i>	121
7.48	Grafička usporedba MOS <i>trui</i>	126
7.49	Grafička usporedba MOS <i>peppers</i>	127
7.50	Grafička usporedba MOS <i>camera</i>	128
7.51	Grafička usporedba MOS <i>lena</i>	129

Popis tablica

3.1	AAE usporedba BTTC(L)-L i Q64+BTTC(L)-L za <i>trui</i>	43
3.2	AAE usporedba BTTC(L)-L i Q64+BTTC(L)-L za <i>peppers</i>	44
4.1	AAE usporedba interpolacija	53
6.1	AAE usporedba JPEG, Q64+BTTC(L)-L i Q64+BTTC(L)-EED	63
6.2	AAE primjene adaptivnog parametra praga pogriješke	64
6.3	AAE usporedbe BTTC metoda kompresije slike <i>trui</i>	65
6.4	AAE usporedbe BTTC metoda kompresije slike <i>trui</i>	67
6.5	AAE usporedbe BTTC metoda kompresije slike <i>trui</i>	68
6.6	Usporedba predkvantizacije i postkvantizacije	69
6.7	Postupci pri kodiranju i dekodiranju	69
6.8	AAE usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>trui</i>	74
7.1	AAE usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>trui</i>	80
7.2	MSE usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>trui</i>	82
7.3	SNR usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>trui</i>	83
7.4	PSNR usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>trui</i>	84
7.5	SSIM usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>trui</i>	85
7.6	MS-SSIM usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>trui</i>	86
7.7	VIF usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>trui</i>	88
7.8	AAE usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>peppers</i>	93
7.9	MSE usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>peppers</i>	94
7.10	SNR usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>peppers</i>	95
7.11	PSNR usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>peppers</i>	96
7.12	SSIM usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>peppers</i>	97
7.13	MS-SSIM usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>peppers</i>	98
7.14	VIF usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>peppers</i>	99
7.15	AAE usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>camera</i>	103
7.16	MSE usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>camera</i>	104
7.17	SNR usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>camera</i>	105
7.18	PSNR usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>camera</i>	106
7.19	SSIM usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>camera</i>	107

7.20	MS-SSIM usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>camera</i>	108
7.21	VIF usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>camera</i>	109
7.22	AAE usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>lena</i>	115
7.23	MSE usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>lena</i>	116
7.24	SNR usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>lena</i>	117
7.25	PSNR usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>lena</i>	118
7.26	SSIM usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>lena</i>	119
7.27	MS-SSIM usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>lena</i>	120
7.28	VIF usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>lena</i>	121
7.29	Tablica ocjene izobličenja slike	123
7.30	Tablica ocjene kvalitete slike	123
7.31	MOS usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>trui</i>	125
7.32	MOS usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>peppers</i>	126
7.33	MOS usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>camera</i>	128
7.34	MOS usporedba JPEG, EEDC i JPEG 2000 za <i>lena</i>	129

Životopis

Irena Galić rođena je 26. srpnja 1974. godine u Osijeku, Republika Hrvatska. Osnovnu školu završila je u Osijeku. Nakon završene osnovne škole upisala se 1989. godine u Prirodoslovno-matematičku gimnaziju u Osijeku, koju je uspješno završila 1993. godine. Naziv profesora matematike i informatike stekla je na Pedagoškom fakultetu u Osijeku 1999. godine završivši program studija Matematike-informatike. Iste godine uposlila se kao znanstveni novak na Sveučilištu J. J. Strossmayera u Osijeku i započela poslijediplomski studij - magisterij Matematike na Matematičkom Odjelu Prirodoslovno-matematičkog fakulteta (PMF) u Zagrebu. Držala je vježbe iz Matematike na Poljoprivrednom fakultetu u Osijeku, vježbe iz Matematike 1 i 2 na Prehrambeno-tehnološkom fakultetu u Osijeku, vježbe iz Linearne Algebre 3 i Optimizacije na Odjelu za matematiku pri Sveučilištu J. J. Strossmayera u Osijeku. Na poslijediplomskom studiju iz matematike na PMF-u u Zagrebu položila je sljedeće ispite: Wavelets, Projektivna geometrija i Uvod u obradu slike. Tada dobivanjem ponude Max Planck Instituta za informatiku na Sveučilištu Saarland upisuje poslijediplomski studij Informatike. Od listopada 2001. godine pohađa poslijediplomski studij - magisterij Informatike pri Max Planck Institutu za informatiku na Sveučilištu Saarland u Saarbrckenu, Njemačka. Titulu magistra informatike stekla je u travnju 2004. godine položivši zahtjevane ispite (Effective computational geometry, Proof tools, Complexity, Security, Image processing and computer vision, Computer architecture), odradivši seminar Decision procedures for logical theories, napravivši praktični projekt i magistarski rad Local mode filtering for one-dimensional signals. Od 2004. do rujna 2007. pohađa poslijediplomski studij - doktorat Informatike na Sveučilištu Saarland. Od listopada 2007. kao asistent radi na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, gdje sudjeluje i u znanstveno istraživačkom radu. Uključena je u nastavu sljedećih kolegija na Elektrotehničkom fakultetu: Signali i sustavi, Digitalna obrada signala, Matematička obrada slike i računalni vid te Računalna grafika. Od listopada 2007. do danas suradnica je na znanstvenom projektu MZOS RH "Postupci raspoređivanja u samoodrživim raspodijeljenim računalnim sustavima" šifra: 165-0362980-2002. Do sada je objavila 4 znanstvena rada, sudjelovala na konferencijama i drugim skupovima, obavljala recenzije znanstvenih i stručnih radova. Posjeduje aktivno znanje engleskog, njemačkog i bugarskog jezika.