



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U  
NOVOM SADU

---



Mr. Željko Lukač

# Algoritmi za interpolaciju uz očuvanje strukture slike

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor:  
prof. dr Miodrag Temerinac

Novi Sad, 2016.





УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА  
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, <b>РБР</b> :	
Идентификациони број, <b>ИБР</b> :	
Тип документације, <b>ТД</b> :	Монографска документација
Тип записа, <b>ТЗ</b> :	Текстуални штампани материјал
Врста рада, <b>ВР</b> :	Докторски рад
Аутор, <b>АУ</b> :	Жељко Лукач, магистар техничких наука
Ментор, <b>МН</b> :	проф. др Миодраг Темеринац
Наслов рада, <b>НР</b> :	Алгоритми за интерполацију уз очување структуре слике
Језик публикације, <b>ЈП</b> :	Српски / латиница
Језик извода, <b>ЈИ</b> :	Српски
Земља публикација, <b>ЗП</b> :	Република Србија
Уже географско подручје, <b>УГП</b> :	Војводина
Година, <b>ГО</b> :	2016.
Издавач, <b>ИЗ</b> :	Ауторски репринт
Место и адреса, <b>МА</b> :	Нови Сад; трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, <b>ФО</b> : (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	8 поглавља / 58 страна / 45 референци / 3 табеле / 24 слике / 0 прилога
Научна област, <b>НО</b> :	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Научна дисциплина, <b>НД</b> :	Рачунарска техника
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО</b> :	интерполација слике, интерполација уз очување ивица, обрада сигнала
<b>УДК</b>	
Чува се, <b>ЧУ</b> :	У библиотеци Факултета техничких наука, Нови Сад
Важна напомена, <b>ВН</b> :	
Извод, <b>ИЗ</b> :	Предмет истраживања ове докторске дисертације је проблем интерполације слике. Главни фокус дисертације је интерполација слике уз очување природности текстуре и очување ивица (оштрине) интерполиране слике. Додатни изазов је да алгоритам за интерполацију слике буде погодан за примену у уређајима са ограниченим ресурсима. Квалитет решења се оцењује поређењем са алгоритмима познатим у доступној литератури коришћењем одговарајућих метрика.
Датум прихватања теме, <b>ДП</b> :	16.05.2012.
Датум одбране, <b>ДО</b> :	
Чланови комисије, <b>КО</b> :	Председник: др Мирослав Поповић, ред. проф. Члан: др Ирини Рељин, ред. проф. Члан: др Никола Теслић, ред. проф. Члан: др Драган Кукољ, ред. проф. Члан, ментор: др Миодраг Темеринац, ред. проф.
	Потпис ментора





## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :	
Identification number, <b>INO</b> :	
Document type, <b>DT</b> :	Monographic publication
Type of record, <b>TR</b> :	Textual printed material
Contents code, <b>CC</b> :	Doctoral dissertation
Author, <b>AU</b> :	Željko Lukač
Mentor, <b>MN</b> :	Miodrag Temerinac, PhD
Title, <b>TI</b> :	Interpolation algorithms with image structure preservation
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian
Country of publication, <b>CP</b> :	Republic of Serbia
Locality of publication, <b>LP</b> :	Vojvodina
Publication year, <b>PY</b> :	2016.
Publisher, <b>PB</b> :	Author's reprint
Publication place, <b>PP</b> :	Novi Sad, Dositeja Obradovica sq. 6
Physical description, <b>PD</b> : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	8 chapters / 58 pages/ 45 references / 3 tables / 24 pictures / 0 appendixes
Scientific field, <b>SF</b> :	Electrical and Computer Engineering
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Engineering of Computer Based Systems
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	edge directed interpolation, edge preservation, image interpolation, image processing
<b>UC</b>	
Holding data, <b>HD</b> :	The Library of Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia
Note, <b>N</b> :	
Abstract, <b>AB</b> :	This PhD dissertation addresses the problem of image interpolation. The main focus of the dissertation is image interpolation algorithm which preserves edges and keeps a natural texture of interpolated images. Additional challenge for image interpolation algorithm is to be suitable for application on resource-limited platforms. The quality of the proposed solution is benchmarked against known image interpolation algorithms using appropriate metrics.
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	16.05.2012.
Defended on, <b>DE</b> :	
Defended Board, <b>DB</b> :	President: dr Miroslav Popović, Professor
	Member: dr Irini Reljin, Professor
	Member: dr Nikola Teslić, Professor
	Member: dr Dragan Kukolj, Professor
	Member, Mentor: dr Miodrag Temerinac, Professor
	Menthor's sign



## Sažetak

Tehnike za interpolaciju slike pružaju poboljšanje kvaliteta rezolucije, i one predstavljaju neizostavni deo u postupku obrade slike. U mnogim aplikacijama rezolucija originalne slike je različita od željene rezolucije slike. Na primer, u multimedijalnim sistemima suočavamo se sa problemom prikazivanja slika u različitim formatima, na različitim izlaznim uređajima sa različitim rezolucijama. U medicinskim i satelitskim postupcima obrade i analize slike zahteva se dobra rezolucija.

Glavni problem u interpolaciji slike je očuvanje utiska prirodnosti teksture slike uz očuvanje ivica, tj., oštine slike. To su dva međusobno sukobljena zahteva i većina algoritama za interpolaciju fokusira se na jedan od njih više nego na drugi. Takođe, u mnogim primenama, necelobrojni faktor skaliranja predstavlja dodatni problem.

Bitan aspekt interpolacije slike je kompleksnost korištenih algoritama. Za određene aplikacije raspoloživi su skoro neograničeni računarski resursi, ali za većinu aplikacija potrebno je naći kompromis između kompleksnosti interpolacionog algoritma i očekivanog kvaliteta interpolirane slike.

Cilj ove disertacije je pronalaženje algoritma za interpolaciju slike koji čuva prirodnost teksture uz očuvanje ivica interpolirane slike i koji je pogodan za primenu u uređajima potrošačke elektronike. Kvalitet rešenja je ocenjen poređenjem sa algoritmima poznatim u dostupnoj literaturi korišćenjem odgovarajućih metrika. Predloženo rešenje omogućava interpolaciju slike uz očuvanje ivica i teksture i primenjivo je u uređajima sa ograničenim resursima.



## Abstract

Image interpolation methods provide image resolution improvement and they represent important part in image processing. In many applications, there is a mismatch between the original and desired image resolution. For example, multimedia systems are facing the problem of how images in many different formats can be presented on displays with different resolutions. Furthermore, in medical and satellite image diagnostics and analysis, an enhanced resolution is preferred.

The main problem in image interpolation is to preserve the natural appearance of image texture, while maintaining edges, i.e., the image sharpness. These are two mutually opposing requirements and most of interpolation algorithms pursue one of them better than the other. Furthermore, in many applications, a non-integer scaling factor is an additional problem.

The other aspect of image interpolation is complexity of used algorithms. For certain applications almost unlimited computational resources are available, however, for most of them a compromise between interpolation complexity and expected quality must be made.

The main goal of this dissertation is developing of an algorithm for image interpolation that keeps natural texture while preserving edges of interpolated image. The algorithm should be suitable for application on resource limited platforms. The quality of the proposed solution is benchmarked against known image interpolation

## ABSTRACT

---

algorithms using appropriate metrics. Proposed image interpolation algorithm keeps edges and texture and is suitable for application on resource limited platforms.

*Želeo bih da se najiskrenije zahvalim mentoru prof. dr Miodragu Temerincu na strpljenju i motivaciji tokom doktorskih studija, kao i iskrenoj podršci u naučno-istraživačkom radu. Zahvalio bih se i svim članovima komisije na ukazanoj pažnji, konstruktivnim komentarima i suvislim sugestijama.*

*Hvala mojoj porodici koja je u svakom trenutku bila uz mene i svojom velikom podrškom učinila da istrajem.*



SADRŽAJ

<b>POGLAVLJE 1.UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivacija.....	1
1.2 Zahtevi za interpolaciju slike.....	2
1.3 Pregled strukture rada.....	2
<b>POGLAVLJE 2.IDENTIFIKACIJA I DEFINICIJA PROBLEMA</b>	
<b>INTERPOLACIJE .....</b>	<b>5</b>
2.1 Postavka ciljeva istraživanja .....	7
<b>POGLAVLJE 3.PREGLED POSTOJEĆEG STANJA.....</b>	<b>9</b>
3.1 Jednostavni algoritmi za interpolaciju slike nezavisno od sadržaja slike .....	10
3.1.1 Sample-and-hold algoritam.....	11
3.1.2 Bilinearna interpolacija .....	11
3.1.3 Bikubična interpolacija .....	12
3.2 Lokalno adaptivni algoritmi za interpolaciju .....	12
3.2.1 Unapređena interpolacija korišćenjem lokalnih informacija (K-interpolacija).....	13
3.2.2 Interpolacija kontrolisana strukturom slike (LAI) .....	13

3.3	Algoritmi za interpolaciju slike koji se adaptiraju na osnovu informacija iz šire okoline interpolirane tačke (globalno adaptivni) .....	15
3.3.1	Interpolacija zasnovana na uzorcima.....	15
3.4	Projektovanje algoritama za interpolaciju.....	16
<b>POGLAVLJE 4.HIPOTEZA.....</b>		<b>17</b>
<b>POGLAVLJE 5.PREDLOG METODE ZA INTERPOLACIJU KOJA ČUVA IVICE I BAZIRA SE NA ANALOGIJI SA GRAVITACIONIM ZAKONOM ....</b>		<b>19</b>
5.1	Osnovna ideja .....	20
5.2	Sortiranje vrednosti piksela.....	21
5.3	Grupisanje prema sličnosti .....	21
5.4	Određivanje pripadnosti interpoliranog piksela grupi sličnosti .....	22
5.5	Interpolacioni metod zasnovan na analogiji za zakonom gravitacije .....	24
5.6	Generički kod predloženog algoritma.....	25
5.7	Elementi optimizacije algoritma u implementaciji .....	25
<b>POGLAVLJE 6.NEKE OSNOVNE OSOBINE PREDLOŽENE METODE.....</b>		<b>29</b>
6.1	Očuvanje ivica .....	29
6.2	Očuvanje integriteta ivica .....	30
6.3	Impulsni odziv i prenosna funkcija .....	31
6.3.1	1D slučaj.....	32
6.3.2	2D slučaj.....	32
6.4	Korektna interpolacija teksture.....	34
6.5	Jednostavna generalizacija za multi-dimenzionalnu interpolaciju .....	34
<b>POGLAVLJE 7.EVALUACIJA.....</b>		<b>37</b>

<b>7.1</b>	<b>Baza referentnih slika (LIVE) .....</b>	<b>37</b>
<b>7.2</b>	<b>Mere za procenu kvaliteta slike .....</b>	<b>38</b>
7.2.1	PSNR/MSE .....	38
7.2.2	SSIM .....	39
7.2.3	SM .....	41
7.2.4	BIQI.....	44
<b>7.3</b>	<b>Poređenje korišćenjem objektivnih metoda .....</b>	<b>45</b>
<b>7.4</b>	<b>Poređenje korišćenjem subjektivnih metoda .....</b>	<b>48</b>
<b>7.5</b>	<b>Poređenje vremena potrebnog za interpolaciju.....</b>	<b>51</b>
	<b>POGLAVLJE 8.ZAKLJUČAK.....</b>	<b>53</b>
	<b>POGLAVLJE 9.LITERATURA .....</b>	<b>55</b>



## SPISAK SLIKA

SLIKA 2.1 ORIGINALNI RASTER (PLAVO) I INTERPOLACIONI RASTER (CRVENO) ZA $F_v = F_H = 1.5$ .....	6
SLIKA 2.2 INTERPOLIRANA TAČKA U ORIGINALNOM RASTERU SA OVIČENIM OKOLINAMA (2X2 CRVENO; 3X3 PLAVO) SUSEDNIH TAČAKA NA OSNOVU KOJIH SE RAČUNA INTERPOLIRANA VREDNOST.....	6
SLIKA 3.1 INTERPOLACIJA SA SH ALGORITMOM .....	11
SLIKA 3.2 BILINEARNA INTERPOLACIJA .....	12
SLIKA 3.3 ČETIRI SLUČAJA IVICOM KONTROLISANE INTERPOLACIJE SA RAZLIKAMA VREDNOSTI PIKSELA KORIŠTENIH PRILIKOM GRUPISANJA .....	14
SLIKA 5.1 (A) RASTERI ORIGINALNE I INTERPOLIRANE SLIKE I (B) OKRUŽENJE SASTAVLJENO OD ČETIRI TAČKE ZA FAKTOR SKALIRANJA $F = 1.5$ .....	20
SLIKA 5.2 SEDAM MOGUĆIH PODELA SA LINIJAMA KOJE ODGOVARAJU PRETPOSTAVLJENIM ORJENTACIJAMA IVICA .....	23
SLIKA 5.3 GENERIČKI KOD PREDLOŽENOG ALGORITMA.....	25
SLIKA 6.1 REZULTATI INTERPOLACIJE ZA $F = 3$ : A) ORIGINALNA SLIKA, B) SH, C) BC, D) LAI, E) KI, F) GR. ....	30
SLIKA 6.2 PRIMER INTERPOLACIONOG ČETVOROUGLA (OVIČEN CRTKANO) I SUSEDNOG INTERPOLACIONOG ČETVOROUGLA (OVIČEN TAČKASTO). DVA KRAJNJA DESNA PIKSELA SUSEDNOG INTERPOLACIONOG ČETVOROUGLA IMAJU VREDNOSTI $A$ I $B$ . ....	31
SLIKA 6.3 ILUSTRACIJA OČUVANJA INTEGRITETA IVICA NA PRIMERU ZA FAKTOR SKALIRANJA $F = 20$ ..	31
SLIKA 6.4 IMPULSNI ODZIV I AMPLITUDSKA PRENOSNA FUNKCIJA ZA 1D KUBIČNU (CUB) I GRAVITACIJI- NALIK INTERPOLACIJU (GR) .....	32
SLIKA 6.5 IMPULSNI ODZIV INTERPOLACIONIH FILTERA ZA SH, BL I GR INTERPOLACIJU; FAKTOR SKALIRANJA $F = 20$ I VELIČINU ODZIVA $40 \times 40$ PIKSELA.....	33

---

SLIKA 6.6 AMPLITUDSKA PRENOSNA FUNKCIJA (BELO 1: 0 dB I CRNO 0: ISPOD -60 dB) INTERPOLACIONIH FILTERA ZA SH, BL I GR INTERPOLACIJE; FREKVENTNI OPSEZI U OBE DIMENZIJE ( $F_v$ I $F_h$ ) SU IZMEĐU 0 I 0.25 (NORMALIZOVANO). .....	33
SLIKA 6.7 KOREKTNIA INTERPOLACIJA TEKSTURE PRIMER SH U ODNOSU NA GR.....	34
SLIKA 7.1 PRIMERI TIPIČNIH SLIKA IZ BAZE REFERENTNIH SLIKA LIVE.....	37
SLIKA 7.2 POREĐENJE SLIKE „LENA“ SA RAZLIČITIM IZOBLIČENJIMA A) ORIGINALNA SLIKA, B) ZAMUČENA SLIKA (PSNR = 28.9; SSIM = 0.3235), C) ZAŠUMLJENA SLIKA (PSNR = 29; SSIM = 0.3143),41	
SLIKA 7.3 IVICA KAO SKOK FUNKCIJA $F(x)$ , RAZMAZANA IVICA $B(x)$ I NJENE DVE DODATNO ZAMUČENE VERZIJE $B_A(x)$ I $B_B(x)$ .....	42
SLIKA 7.4 PSNR METRIKA ZA RAZLIČITE FAKTORE SKALIRANJA – SREDNJA VREDNOST ZA 29 SLIKA IZ LIVE REFERENTNE BAZE .....	46
SLIKA 7.5 SSIM METRIKA ZA RAZLIČITE FAKTORE SKALIRANJA – SREDNJA VREDNOST ZA 29 SLIKA IZ LIVE REFERENTNE BAZE .....	47
SLIKA 7.6 SM METRIKA ZA RAZLIČITE FAKTORE SKALIRANJA – SREDNJA VREDNOST ZA 29 SLIKA IZ LIVE REFERENTNE BAZE .....	48
SLIKA 7.7 2D VIZUELIZACIJA (SSIM / SM) ZA FAKTOR SKALIRANJA $F = 3$ / SREDNJA VREDNOST ZA 29 SLIKA IZ LIVE REFERENTNE BAZE .....	48
SLIKA 7.8 UVEĆANI DETALJI INTERPOLIRANE SLIKE SAILING2 ZA FAKTOR SKALIRANJA $F = 9$ KORIŠĆENJEM ALGORITAMA ZA INTERPOLACIJU: A.) ORIGINAL, B.) SRCNN, C.) BC, D.) KI, E.) LAI, F.) GR.....	49
SLIKA 7.9 UVEĆANI DETALJI INTERPOLIRANE SLIKE WOMANHAT ZA FAKTOR SKALIRANJA $F = 9$ KORIŠĆENJEM ALGORITAMA ZA INTERPOLACIJU: A.) ORIGINAL, B.) SRCNN, C.) BC, D.) KI, E.) LAI, F.) GR.....	50

## SPISAK TABELA

TABELA 5.1 VREMENA U SEKUNDAMA POTREBNA ZA INTERPOLACIJU ZA RAZNE VREDNOSTI FAKTORA INTERPOLACIJE $F$ ZA VELIČINU SLIKE 256x256.....	27
TABELA 7.1 BIQI VREDNOSTI – SREDNJE VREDNOSTI ZA SVIH 29 SLIKE IZ LIVE BAZE REFERENTNIH SLIKA.....	50
TABELA 7.2 VREMENA U SEKUNDAMA POTREBNA ZA INTERPOLACIJU ZA RAZNE VELIČINE SLIKA ZA FAKTOR INTERPOLACIJE $F = 2$ .....	51



## SKRAČENICE

<b>BIQI</b>	<i>Blind Image Quality Index</i>
<b>DMOS</b>	<i>Differential Mean Opinion Score</i>
<b>FIR</b>	<i>Finite Impulse Response</i>
<b>HVS</b>	<i>Human Visual System</i>
<b>MSE</b>	<i>Mean Square Error</i>
<b>NSS</b>	<i>Natural Scene Statistic</i>
<b>PSNR</b>	<i>Peak Signal to Noise Ratio</i>
<b>RGB</b>	<i>Red-Green-Blue color space</i>
<b>SM</b>	<i>Sharpness Measure</i>
<b>SSIM</b>	<i>Structural Similarity Index Measure</i>



## POGLAVLJE 1.

### UVOD

#### **1.1 Motivacija**

Tehnike za interpolaciju slike pružaju poboljšanje kvaliteta rezolucije, i one predstavljaju neizostavni deo u postupku obrade slike. U mnogim aplikacijama rezolucija originalne (postojeće) slike je različita od željene rezolucije slike. Na primer, u multimedijalnim sistemima suočavamo se sa problemom prikazivanja slika u različitim formatima (rezolucijama), na različitim izlaznim uređajima sa različitim rezolucijama. U medicinskim i satelitskim postupcima obrade i analize slike zahteva se dobra rezolucija.

Ključni problem postupka interpolacije slike jeste pronalazak nepoznate vrednosti piksela slike koja se interpolira u tačkama koje ne pripadaju koordinatnoj mreži originalne slike. U opštem slučaju ovo je nerešiv problem. Pod određenim pretpostavkama ove vrednosti mogu biti adekvatno procenjene na osnovu poznavanja vrednosti piksela slike i pozicije tačke interpolacije u koordinatnoj mreži originalne slike. Na primer, u interpoliranoj slici, vrednosti piksela mogu biti pretpostavljene na osnovu poznatih vrednosti susednih piksela u originalnoj slici.

U specifičnim primenama mogu biti dodatni zahtevi – u uređajima potrošačke elektronike bitan je vizuelni utisak korisnika; u vojnim primenama i medicini bitni su detalji; u vizuelnim sistemima u industrijskoj automatizaciji (npr. brojanje flaša) nije

bitan kvalitet slike ali je bitno uočiti objekat; za kontrolu robotske ruke bitno je uočavanje pozicije u prostoru.

## **1.2 Zahtevi za interpolaciju slike**

Glavni problem u interpolaciji slike je očuvanje utiska prirodnosti teksture slike uz očuvanje ivica, tj., oštine slike. To su dva međusobno sukobljena zahteva i većina algoritama za interpolaciju fokusira se na jedan od njih više nego na drugi. Interpolacija slike je praćena i pojavom izobličenja u slici kao što su zamućenje ivica, stepeničasta struktura ivica i neprirodno uniformisana tekstura slike (blokofska mustra).

Bitan aspekt interpolacije slike je kompleksnost korištenih algoritama. Za određene aplikacije raspoloživi su skoro neograničeni računarski resursi, ali za većinu aplikacija potrebno je naći kompromis između kompleksnosti interpolacionog algoritma i očekivanog kvaliteta interpolirane slike.

Skup faktora skaliranja koje podržava interpolacioni algoritam je naredni bitan kriterijum prilikom odabira interpolacionog algoritma. Mnogi interpolacioni algoritmi podržavaju samo celobrojne faktore skaliranja (neki čak samo jedan faktor – povećanje rezolucije 2x u obe dimenzije). U nekim primenama prihvatljivo je da interpolirana slika bude u manjoj rezoluciji od željene (zbog ograničenja skupa faktora skaliranja), ali, u mnogim aplikacijama potreba za necelobrojnim faktorom skaliranja predstavlja dodatni problem.

## **1.3 Pregled strukture rada**

U poglavlju 2, data je identifikacija i definicija problema interpolacije, sa osvrtom na probleme koji se postavljaju pred sistem. Identifikuju se zahtevi koji postavljaju pred algoritam za interpolaciju slike i uvode se mere za procenu kvaliteta slike.

Poglavlje 3 se bavi istraživanjem dosadašnjih dostignuća u oblasti i tu su, u cilju postavljanja okvira istraživanja, analizirani pristupi u interpolaciji slike koji predstavljaju u poznatoj naučnoj literaturi.

U poglavlju 4, izložena je hipoteza koja se dokazuje u ostatku rada.

U poglavlju 5, dat je detaljan opis predloženog algoritma kroz opis postupaka, praćenih odgovarajućim jednačinama, čijom primenom se izračunava interpolirana vrednost na osnovu poznatih koordinata tačke u kojoj se računa nepoznata vrednost i poznatih vrednosti tačaka iz originalne slike u njenoj neposrednoj okolini.

Poglavlje 6 se bavi evaluacijom nekih osnovnih osobina predložene metode kao što su očuvanje ivica, očuvanje integriteta ivica, impulsni odziv i prenosna funkcija, korektna interpolacija tekstone i jednostavna generalizacija u više dimenzija.

U poglavlju 7, izvršeno je poređenje predložene metode sa nekim karakterističnim poznatim metodama. Metode su poređene korišćenjem objektivnih kriterija (metrike za ocenu kvaliteta slike), subjektivno i poređenjem kompleksnosti evaluiranih metoda za interpolaciju slike.

U poglavlju 8, dat je zaključak istraživanja sa posebnim osvrtom na pravce daljeg razvoja.



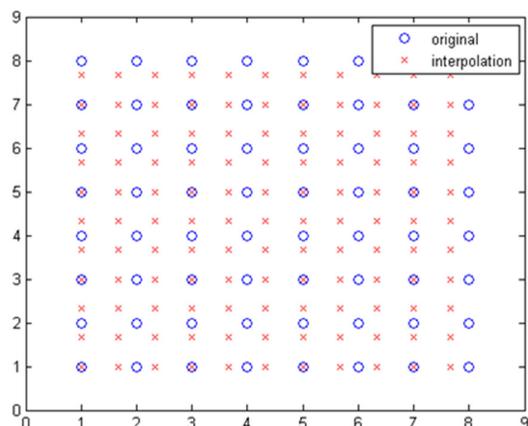
## POGLAVLJE 2.

### IDENTIFIKACIJA I DEFINICIJA PROBLEMA INTERPOLACIJE

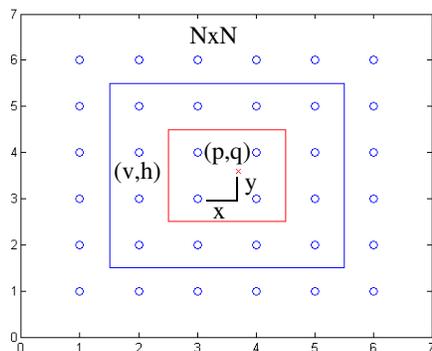
Problem interpolacije može se uopšteno formulisati na sledeći način. Neka je originalna slika je definisana u tačkama  $(v, h)$  originalnog 2D rastera kao što je prikazano na slici 2.1 (plavo). U opštem slučaju to je uniformni pravougaoni raster veličine  $V \times H$  ( $v = 1, \dots, V$  i  $h = 1, \dots, H$ ). U svakoj tački rastera poznata je odgovarajuća vrednost slike, data sa  $C$  komponenti  $I_{in}(v, h, c)$  gde je  $(c = 1, \dots, C)$ . Monohromatske (crno-bele) slike imaju samo jednu komponentu ( $C = 1$ ) a slike u boji imaju tri komponente ( $C = 3$ ) koje mogu biti ili crveno-zelena-plavo (R, G, B) komponente ili luminantna (osvetljaj) sa dve hrominentne komponente (Y, C<sub>r</sub>, C<sub>b</sub>). Promenu veličine slike možemo definisati sa dva faktora skaliranja, vertikalnim  $F_v$  i horizontalnim  $F_h$ . U tom slučaju interpolirana slika  $I_{out}(p, q, c)$  će imati raster sa  $V_{out} \times H_{out}$  tačaka ( $p = 1, \dots, V_{out}$  i  $q = 1, \dots, H_{out}$ ) gde je  $V_{out} = F_v V$  i  $H_{out} = F_h H$ , čije koordinate  $(v_p, h_q)$  se ne moraju poklapati

$$v = \left\lfloor \frac{p-1}{F_v} \right\rfloor + 1 \quad h = \left\lfloor \frac{q-1}{F_h} \right\rfloor + 1. \quad (2.1)$$

sa tačkama u originalnom rasteru ali će se nalaziti u istoj oblasti slike, kao što je prikazano na slici 2.1 (crveno):



Slika 2.1 Originalni raster (plavo) i interpolacioni raster (crveno) za  $F_v = F_h = 1.5$



Slika 2.2 Interpolirana tačka u originalnom rasteru sa ovičenim okolinama (2x2 crveno; 3x3 plavo) susjednih tačaka na osnovu kojih se računa interpolirana vrednost

Sušтина problema interpolacije je kako naći interpolirane vrednosti  $I_{out}(p, q, c)$  kad su poznate njihove koordinate  $(p, q)$  i vrednosti originalne slike  $I_{in}(v, h, c)$  sa svojim koordinatama  $(v, h)$ .

Ključni problem postupka interpolacije slike jeste pronalazak nepoznate vrednosti piksela slike koja se interpolira u tačkama koje ne pripadaju rasteru originalne slike. Uopšteno gledano, ovo uvek predstavlja problem. S druge strane, pod određenim pretpostavkama ove nepoznate vrednosti mogu biti adekvatno procenjene na osnovu

poznavanja vrednosti piksela slike i pozicije tačke interpolacije u rasteru originalne slike. Na primer, u slici nakon interpolacije, vrednosti piksela mogu biti pretpostavljene na osnovu poznatih vrednosti susednih piksela u originalnoj slici. Moguće je koristiti neka apriori znanja o slici da bi se nedostajući deo informacije smisleno procenio (neprekidnost ivica, lokalna okolina, globalna okolina interpolirane tačke, ...).

Pred algoritme za interpolaciju postavljaju se različiti zahtevi u zavisnosti od oblasti primene.

Fleksibilnost algoritma za interpolaciju slike je bitna u uređajima potrošačke elektronike. Ogleda se u opsegu faktora skaliranja koje podržava algoritam za interpolaciju.

Efikasnost implementacije je naročito bitna na platformama sa ograničenim resursima. Na nju najviše utiču potrebni resursi za računanje i potrebni resursi za memorisanje (vreme i memorija).

Kvalitet interpolirane slike je bitan u mnogim oblastima primene. Objektivna mera kvaliteta (metrika) interpolacije slike je još uvek nerešen problem. Vršni odnos signal šum (PSNR) [Wang 09] najstarija je mera. Definisana je kao inverzna vrednost srednje kvadratne greške (MSE) između interpolirane slike i referentne slike iste rezolucije. Druga rasprostranjena mera kvaliteta interpolirane slike je mera sličnosti strukture slike (SSIM) [Wang 04]. Zasnovana je na pretpostavci da pikseli slike demonstriraju veliku zavisnost i da ta zavisnost nosi bitne informacije o strukturi slike. Ni jedna od pomenutih mera ne govori dovoljno o efikasnosti interpolacije ivica.

## **2.1 Postavka ciljeva istraživanja**

Cilj istraživanja je razvoj novog rešenja za interpolaciju slike, sa naglaskom na očuvanje strukture slike, koje bi moglo biti primenjeno na platformama sa ograničenim resursima

U okviru disertacije potrebno je istražiti raspoložive izvore informacija i na osnovu dobijenih rezultata definisati kriterijume u pogledu:

- Kvaliteta interpolirane slike
- Fleksibilnosti (mogućnosti)

- Složenosti

Nova naučna dostignuća, koja su rezultat istraživanja, potrebno je zaštititi odgovarajućim mehanizmima zaštite intelektualne svojine.

## POGLAVLJE 3.

### **PREGLED POSTOJEĆEG STANJA**

Interpolacija slike je dugo poznati (“stari”) problem i postoji mnogo različitih algoritama kojima se pokušava rešiti problem. S obzirom da su problemi koje algoritmi rešavaju različiti ne postoji jedinstvena podjela algoritama, kao ni rang lista algoritama prema kvalitetu. U ovoj studiji (disertaciji, radu) zanimaju nas aplikacije sa ograničenim resursima uz kompromis između kvaliteta teksture i ivica. Imajući u vidu ta dva aspekta (očuvanje teksture u odnosu na oštrinu i kompleksnost u odnosu na očekivanja) algoritme za interpolaciju slike možemo podeliti u sledeće grupe. Prva grupa obuhvata najjednostavnije algoritme, kao što su „sample and hold“ (SH) [Hou 78], bilinearna interpolacija (BL) [Hou 78] i bikubična interpolacija (BC) [Keys 81], čijom primenom se dobija interpolirana slika ograničenog kvaliteta. Drugu grupu čine algoritmi male kompleksnosti koji čuvaju ivice (oštrinu slike). Taj pristup je originalno demonstriran u [Battiato 07] i unapređen u nedavno objavljenim algoritmima kao što su „adaptive image scaling based on local edge directions“ (LAI) [Lai 10] i „image magnification using interval information“ (KI) [Jurio 11]. Treća grupa algoritama kao što su [Li 01], [Giachetti 11], [Zhang 06], [Zhang 08], [Liu 11], [Dong 11], i „super resolution convolutional neural network“ (SRCNN) [Dong IEEE16] zasnovana je na naprednoj analizi slike, velike kompleksnosti i dobrim kvalitetom interpolirane slike.

Predstavnici sve tri grupe algoritama biće upotrebljeni u određenim fazama evaluacije. Naime, SH i BC algoritam iz prve grupe i LAI i KI algoritmi iz druge grupe

i SRCNN algoritam iz treće grupe biće korišteni u analizi kvaliteta interpolacije. Algoritmi „regularized local linear regression“ (RLLR) [Liu 11] i „image adaptive sparse domain selection“ (ASDS) [Dong 11] biće korišteni u analizi kompleksnosti algoritama.

### **3.1 Jednostavni algoritmi za interpolaciju slike nezavisno od sadržaja slike**

Kod najjednostavnijih algoritama ideja interpolacije je da se interpolirana vrednost u tački (p, q) izračunava na osnovu  $N \times N$  ( $N$  parno) poznatih, susednih vrednosti. Necelobrojne koordinate interpolacione tačke u rasteru osnovne slike su:

$$v_r = \frac{p-1}{F} + 1 \quad h_r = \frac{q-1}{F} + 1. \quad (3.1)$$

Da bi se odredile susedne tačke u originalnom rasteru, potrebno je pronaći celobrojne vrednosti:

$$v = \lfloor v_r \rfloor \quad h = \lfloor h_r \rfloor, \quad (3.2)$$

i necelobrojne ostatke (vrednosti između 0 i 1):

$$y = v_r - v \quad x = h_r - h. \quad (3.3)$$

Interpolirana vrednost je onda linearna kombinacija susednih, poznatih vrednosti:

$$I_i(p, q) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N w(n, k) \cdot I(v - N/2 + n, h - N/2 + k), \quad (3.4)$$

gde su težinski koeficijenti funkcije pozicije u kvadratu interpolacije  $N \times N$ :

$$w(n, k) = f_{n,k}(y, x). \quad (3.5)$$

Algoritam interpolacije se može posmatrati i kao linearni FIR filter dimenzija  $N \times N$ . Da bi se zadržalo jedinično pojačanje DC komponenti, koeficijenti moraju ispuniti uslov:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N w(n, k) = 1. \quad (3.6)$$

Najmanji kvadrat interpolacije je  $2 \times 2$  koji svaku interpoliranu vrednost izračunava na osnovu 4 susedne poznate vrednosti iz originalne slike.

### 3.1.1 Sample-and-hold algoritam

Ovo je najjednostavniji algoritam u kojem se za interpoliranu vrednost uzima poznata vrednost iz najbliže tačke u osnovnom rasteru:

$$\begin{aligned}
 x < 0.5 \quad y < 0.5 &\Rightarrow w(1,1) = 1 \quad w(1,2) = 0 \quad w(2,1) = 0 \quad w(2,2) = 0 \\
 x \geq 0.5 \quad y < 0.5 &\Rightarrow w(1,1) = 0 \quad w(1,2) = 1 \quad w(2,1) = 0 \quad w(2,2) = 0 \\
 x < 0.5 \quad y \geq 0.5 &\Rightarrow w(1,1) = 0 \quad w(1,2) = 0 \quad w(2,1) = 1 \quad w(2,2) = 0 \\
 x \geq 0.5 \quad y \geq 0.5 &\Rightarrow w(1,1) = 0 \quad w(1,2) = 0 \quad w(2,1) = 0 \quad w(2,2) = 1
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

Algoritam se može izraziti i jednostavnije:

$$\begin{aligned}
 x < 0.5 \quad y < 0.5 &\Rightarrow w(1,1) = 1 \quad w(1,2) = 0 \quad w(2,1) = 0 \quad w(2,2) = 0 \\
 x \geq 0.5 \quad y < 0.5 &\Rightarrow w(1,1) = 0 \quad w(1,2) = 1 \quad w(2,1) = 0 \quad w(2,2) = 0 \\
 x < 0.5 \quad y \geq 0.5 &\Rightarrow w(1,1) = 0 \quad w(1,2) = 0 \quad w(2,1) = 1 \quad w(2,2) = 0 \\
 x \geq 0.5 \quad y \geq 0.5 &\Rightarrow w(1,1) = 0 \quad w(1,2) = 0 \quad w(2,1) = 0 \quad w(2,2) = 1
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

Na slici 3.1 je prikazana interpolacija sa SH algoritmom. Velika prednost ovog algoritma je jednostavnost (praktično nepotrebni procesorski resursi) a nedostatak je stepeničasta struktura ivica i neprirodno uniformisana tekstura slike (blokovska muštra).



Slika 3.1 Interpolacija sa SH algoritmom

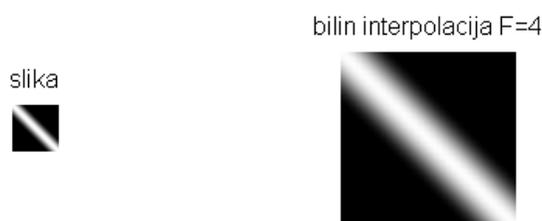
### 3.1.2 Bilinearna interpolacija

Bilinearna interpolacija je nešto kompleksniji algoritam gde se koeficijenti interpolacije računaju na osnovu udaljenosti tačaka iz osnovnog rastera od interpolacione tačke:

$$\begin{aligned}
 w(1,1) &= (1 - y) \cdot (1 - x) & w(1,2) &= (1 - y) \cdot x \\
 w(2,1) &= y \cdot (1 - x) & w(2,2) &= y \cdot x
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

Lako je proveriti da ovi koeficijenti ispunjavaju i uslov jediničnog DC pojačanja.

Na slici 3.2 je prikazana interpolacija sa korišćenjem ovog algoritma. Uz veće zahteve u procesorskim resursima, postiže se prirodnija tekstura objekata i bolja interpolacija ivica iako su ivice donekle razmazane.



Slika 3.2 Bilinearna interpolacija

### 3.1.3 Bikubična interpolacija

Bikubična interpolacija daje bolji kvalitet interpolirane slike u odnosu na SH i bilinearnu interpolaciju na račun povećane složenosti izračunavanja. Koeficijenti interpolacije se kao kod bilinearne transformacije računaju na osnovu udaljenosti tačaka iz osnovnog rastera od interpolacione tačke. Pri interpolaciji koristi se 16 piksela iz originalnog rastera (4 x 4 okolina) i vrednosti piksela koji su bliži interpoliranom pikselu imaju veći uticaj na interpoliranu vrednost:

$$w(d) = \begin{cases} \frac{3}{2}|d|^3 - \frac{5}{2}|d|^2 + 1 & |d| < 1 \\ -\frac{1}{2}|d|^3 + \frac{5}{2}|d|^2 - 4|d| + 2 & 1 \leq |d| < 2 \\ 0 & \text{inače} \end{cases} \quad (3.10)$$

gde je  $d$  udaljenost između interpoliranog piksela i piksela originalnog rastera.

Korišćenjem bikubične interpolacije dobija se bolja interpolacija detalja u odnosu na SH i bilinearnu interpolaciju uz veću složenost izračunavanja.

## 3.2 Lokalno adaptivni algoritmi za interpolaciju

U ovu grupu algoritama spadaju algoritmi koji vode računa o sadržaju slike u okolini interpoliranog piksela i u zavisnosti od neposredne okoline interpolirane tačke određuju interpoliranu vrednost. Algoritmi iz ove grupe teže čuvanju ivica (oštrine

slike) uz umerenu kompleksnost kao posledicu korišćenja neposredne okoline slike za adaptaciju interpolacionih koeficijenata.

Ovaj pristup je originalno demonstriran u [Battiato 02] i unapređen u nedavno objavljenim algoritmima: „adaptive image scaling based on local edge directions“ (LAI) [Lai 10], „image magnification using interval information“ (KI) [Jurio 11] i „fast image interpolation using directional inverse distance weighting for real-time applications“ [Jing 13].

### **3.2.1 Unapređena interpolacija korišćenjem lokalnih informacija (K-interpolacija)**

Poboljšani algoritmi za interpolaciju koriste širu okolinu originalnih piksela oko interpoliranog piksela za kontrolu interpolacionih koeficijenata. Dobar primer je interpolacioni algoritam koji koristi K-funkciju pri računanju interpolacionih koeficijenata.

U predloženoj nelinearnoj metodi za interpolaciju slike svakom pikselu se pridružuje interval dobijen na osnovu okolnih piksela. Interpolacija se radi na osnovu dobijenog intervala i  $K_\alpha$  funkcije (operatora). Rezultati pokazuju značajno poboljšanje u opštem izgledu slike ali se i dalje javljaju problemi na ivicama slike.

### **3.2.2 Interpolacija kontrolisana strukturom slike (LAI)**

Algoritmi za interpolaciju kontrolisani strukturom slike pokušavaju da detektuju ivice u slici i da to koriste pri interpolaciji. Dobar primer je algoritam koji koristi sličnosti četiri susedna piksela i na osnovu toga bira samo pouzdane originalne piksele za interpolaciju u zavisnosti od pozicije interpolirane tačke (LAI).

Ovaj algoritam za interpolaciju koristi minimalnu okolinu interpolirane tačke (2x2 - minimalan pravougaonik). Prvo identifikuje strukturu ivice definišući pet mogućih slučajeva: bez ivica, horizontalna ivica, vertikalna ivica i dve različite dijagonalne ivice (u SW-NE i SE-NW smerovima). Zatim, za svaki slučaj koristi se različit skup interpolacionih koeficijenata za interpolaciju na osnovu četiri piksela (3.4).

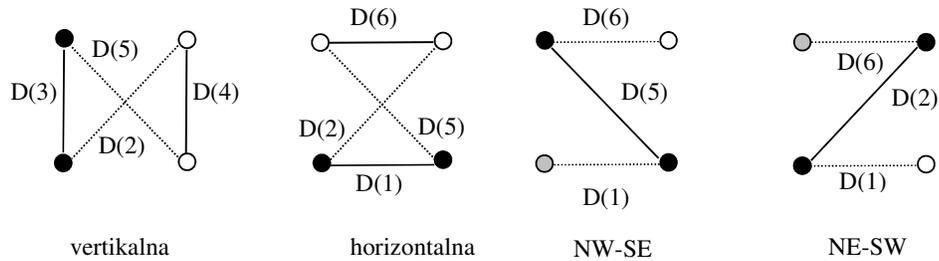
U prvom koraku četiri tačke se grupišu prema sličnosti njihovih vrednosti. Grupisanje je zasnovano na šest mogućih razlika vrednosti piksela originalne slike:

$$\begin{aligned}
 D(1) &= \max_{c=1,..C} (|I_{in}(1,1,c) - I_{in}(1,2,c)|) & D(2) &= \max_{c=1,..C} (|I_{in}(1,1,c) - I_{in}(2,2,c)|) \\
 D(3) &= \max_{c=1,..C} (|I_{in}(1,1,c) - I_{in}(2,1,c)|) & D(4) &= \max_{c=1,..C} (|I_{in}(1,2,c) - I_{in}(2,2,c)|) \\
 D(5) &= \max_{c=1,..C} (|I_{in}(1,2,c) - I_{in}(2,1,c)|) & D(6) &= \max_{c=1,..C} (|I_{in}(2,2,c) - I_{in}(2,1,c)|)
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Odluka o grupisanju piksela sa sličnim vrednostima u pet slučajeva donosi se na osnovu minimuma razlika korišćenjem ekperimentalno utvrđenog praga  $Th$ :

$$\begin{aligned}
 &D(3) \text{ ili } D(4) \text{ min } i \ D(2) > Th \ i \ D(5) > Th && \text{vertikalna} \\
 &D(1) \text{ ili } D(6) \text{ min } i \ D(2) > Th \ i \ D(5) > Th && \text{horizontalna} \\
 &D(5) \text{ min } i \ D(1) > Th \ i \ D(6) > Th && \text{NW - SE} \\
 &D(2) \text{ min } i \ D(1) > Th \ i \ D(6) > Th && \text{NE - SW} \\
 &\text{inače} && \text{bilinearna}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Prva četiri slučaja, kontrolisana strukturom ivice prikazana su na Slici 3.3.



**Slika 3.3 Četiri slučaja ivicom kontrolisane interpolacije sa razlikama vrednosti piksela korištenih prilikom grupisanja**

U drugom koraku vrši se interpolacija na osnovu četiri piksela (3.4) sa različitim skupovima koeficijenata specificiranim na osnovu identifikovanog slučaja i položaja interpoliranog piksela:

$$\begin{array}{l}
 \text{vertikalna} \\
 \text{horizontalna} \\
 \text{NW - SE} \\
 \text{NE - SW} \\
 \text{bilinearna}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 \begin{array}{l}
 \left\{ \begin{array}{l}
 dh < 0.5 \quad w(1,1) = 1 - dv \quad w(1,2) = 0 \quad w(2,1) = dv \quad w(2,2) = 0 \\
 dh \geq 0.5 \quad w(1,1) = 0 \quad w(1,2) = 1 - dv \quad w(2,1) = 0 \quad w(2,2) = dv
 \end{array} \right. \\
 \left\{ \begin{array}{l}
 dv < 0.5 \quad w(1,1) = 1 - dh \quad w(1,2) = dh \quad w(2,1) = 0 \quad w(2,2) = 0 \\
 dv \geq 0.5 \quad w(1,1) = 0 \quad w(1,2) = 0 \quad w(2,1) = 1 - dh \quad w(2,2) = dh
 \end{array} \right. \\
 \begin{array}{l}
 \left\{ \begin{array}{l}
 dv < 0.5 - dh \quad w(1,1) = 1 \quad w(1,2) = 0 \quad w(2,1) = 0 \quad w(2,2) = 0 \\
 dv > 1.5 - dh \quad w(1,1) = 0 \quad w(1,2) = 0 \quad w(2,1) = 0 \quad w(2,2) = 1 \\
 \text{inače} \quad w(1,1) = 0 \quad w(1,2) = 0.5 \cdot (1 + dh - dv) \quad w(2,1) = 0.5 \cdot (1 - dh + dv) \quad w(2,2) = \\
 \left\{ \begin{array}{l}
 dv < -0.5 + dh \quad w(1,1) = 0 \quad w(1,2) = 1 \quad w(2,1) = 0 \quad w(2,2) = 0 \\
 dv > 0.5 + dh \quad w(1,1) = 0 \quad w(1,2) = 0 \quad w(2,1) = 1 \quad w(2,2) = 0 \\
 \text{inače} \quad w(1,1) = 0.5 \cdot (2 - dh - dv) \quad w(1,2) = 0 \quad w(2,1) = 0 \quad w(2,2) = 0.5 \cdot (dh + dh \\
 w(1,1) = (1 - dv) \cdot (1 - dh) \quad w(1,2) = (1 - dv) \cdot dh \quad w(2,1) = dv \cdot (1 - dh) \quad w(2,2) = dv \cdot d
 \end{array} \right.
 \end{array}
 \right.
 \end{array}
 \right.
 \quad (3.12)$$

Ovaj algoritam čuva strukturu ivica uz očuvanje teksture. Ipak, kvalitet interpolacije znatno zavisi od praga i izbor optimalnog praga mnogo zavisi od sadržaja slike.

### 3.3 Algoritmi za interpolaciju slike koji se adaptiraju na osnovu informacija iz šire okoline interpolirane tačke (globalno adaptivni)

Treću grupu algoritama karakterišu složena analiza slike, povećana kompleksnost i dobar kvalitet interpolacije. Predstavnici ove grupe algoritama su algoritmi opisani u [LI 01], [Zhang 06], [Zhang 08], [Dong 11], [Giachetti 11], [Liu 11] kao i „super-resolution convolutional neural network (SRCNN) [Dong IEEE16]“

#### 3.3.1 Interpolacija zasnovana na uzorcima

Algoritmi koji pripadaju ovoj grupi koriste osobinu samosličnosti slike. Na osnovu analiziranja primera slika u maloj i velikoj rezoluciji kreira se skup (rečnik) uzoraka a zatim se na osnovu naučenog mapiranja uzoraka male rezolucije na uzorke velike rezolucije rekonstruiše slika velike rezolucije

Primer ove grupe algoritama je algoritam koji koristi konvolucione neuralne mreže (single image super resolution convolution neural networks) (SRCNN) [Dong IEEE16]

### **3.4 Projektovanje algoritama za interpolaciju**

Prilikom projektovanje algoritama za interpolaciju potrebno je napraviti kompromis između složenosti izračunavanja i kvaliteta interpolirane slike. Algoritmi zasnovani na poznavanju karakteristika kompletne slike pružaju bolji kvalitet interpolirane slike ali zahtevaju veoma kompleksna izračunavanja. Algoritmi zasnovani na poznavanju karakteristika slike u neposrednoj okolini interpolirane tačke ne zahtevaju visok nivo kompleksnosti izračunavanja ali i pružaju nešto lošiji kvalitet interpolirane slike. Kvalitet slike se definiše kao strukturalni kvalitet (očuvanje ivica) i prirodan izgled (tekstura) interpolirane slike. Dakle, pri projektovanju algoritama za interpolaciju suočavamo se sa tri bitne odluke:

- Veličina analizirane okoline oko interpoliranog piksela ima direktan uticaj na složenost računanja i kvalitet slike (najmanja veličina analizirane okoline je 2x2 susedna piksela originalne slike);
- Očuvanje ivica za identifikovane strukture u slici; i
- Interpolaciono pravilo (računanje nepoznate vrednosti slike na poziciji interpoliranog piksela na osnovu poznatih vrednosti u susednim pikselima originalne slike) garantujući prirodan izgled slike (teksturu).

## POGLAVLJE 4.

### **HIPOTEZA**

U ovom radu postavljena je sledeća hipoteza:

- moguće je vršiti interpolaciju na osnovu poznavanja ograničenog (malog) broja tačaka iz okoline interpolirane tačke određujući podskup tačaka koje će biti korištene za računanje interpolirane vrednosti;
- interpolacione koeficijente moguće je odrediti praveći analogiju sa gravitacionim zakonom;
- moguće je očuvati ivice slike uz korektnu interpolaciju teksture.

Sa ovim se ispunjavaju zahtevi za kvalitet, fleksibilnost i efikasnost implementacije (mogućnost korišćenja na platformama sa ograničenim resursima).

U cilju dokazivanja hipoteze analiziraće se postojeća rešenja sa ciljem da se prikupe informacije o trenutnim dostignućima, njihovim mogućnostima i složenosti.

Odrediće se skup željenih scenarija i formirati skup uzoraka (izborom iz referentnih baza slike kao i generisanjem slika određenih karakteristika) koji će se kasnije koristiti za analizu i razvoj algoritma.

Pregledom postojećih postupaka za interpolaciju slike utvrdiće se koje klase algoritama su pogodne za primenu u sistemima za rad u realnom vremenu. Razviće se poboljšani algoritam u cilju postizanja boljih performansi sistema.

Hipoteza će se dokazati simulacijom na personalnom računaru. Odabrat će se i odgovarajuće mere za ocenu kvaliteta interpolirane slike i porediće se efikasnost novog pristupa postojećem.

Za verifikaciju rezultata koristiće se referentne slike iz javno dostupnih baza slika kao i namenski generisane slike.

## POGLAVLJE 5.

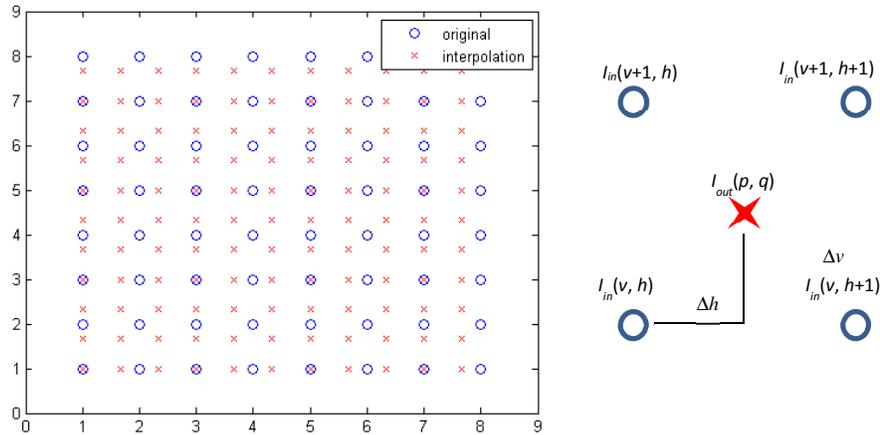
### **PREDLOG METODE ZA INTERPOLACIJU KOJA ČUVA IVICE I BAZIRA SE NA ANALOGIJI SA GRAVITACIONIM ZAKONOM**

Problem interpolacije se generalno definiše kao problem izračunavanja nepoznate vrednosti interpoliranog piksela na osnovu poznatih vrednosti piksela iz originalne slike, pri čemu je pozicija interpoliranog piksela proizvoljna u odnosu na raster originalne slike (Slika 5.1).

Algoritam za interpolaciju primenjujemo na originalnu sliku  $\{ I_{in}(v, h, c); v = 1, \dots, V, h = 1, \dots, H \text{ i } c = 1, \dots, C \}$  gde su  $V$  i  $H$  broj piksela u vertikalnoj i horizontalnoj dimenziji a  $C$  je broj komponenta boje ( $C = 1$  za monohromatske slike i  $C = 3$  za slike u boji). Za dati faktor skaliranja (interpolacije)  $F$ , pikseli interpolirane slike su  $\{ I_{out}(p, q, c); p = 1, \dots, V_{out} \text{ i } q = 1, \dots, H_{out}, c = 1, \dots, C \}$  gde su veličine slike po vertikalnoj i horizontalnoj dimenziji  $V_{out} = F \cdot V$  and  $H_{out} = F \cdot H$ . Originalni raster i raster interpolirane slike prikazani su na Slici 5.1.a. Imajući u vidu aplikaciju sa ograničenim resursima, vrednost interpoliranog piksela  $I_{out}(p, q, c)$  računa se korišćenjem samo četiri susedna piksela iz originalne slike (Slika 5.1.b):

$$\begin{bmatrix} I_{in}(v+1, h, c) & I_{in}(v+1, h+1, c) \\ I_{in}(v, h, c) & I_{in}(v, h+1, c) \end{bmatrix} \begin{matrix} v = \left\lfloor \frac{p-1}{F} + 1 \right\rfloor \\ h = \left\lfloor \frac{q-1}{F} + 1 \right\rfloor \end{matrix} \begin{matrix} \Delta v = \frac{p-1}{F} + 1 - v \\ \Delta h = \frac{q-1}{F} + 1 - h \end{matrix}, \quad (5.1)$$

gde su  $\Delta v$  i  $\Delta h$  su necelobrojni ostaci (vrednosti između 0 i 1) koordinata (vertikalne i horizontalne) u četvorouglu definisanom sa pikselima  $I_{in}()$  iz (5.1).



Slika 5.1 (a) rasteri originalne i interpolirane slike i (b)okruženje sastavljeno od četiri tačke za faktor skaliranja  $F = 1.5$

## 5.1 Osnovna ideja

Zbog zahteva za malom kompleksnošću interpolacijom obuhvaćena okolina interpolirane tačke sadrži četiri piksela originalne slike. Zbog zahteva za očuvanjem ivica potrebno je identifikovati ivicu u analiziranoj okolini od četiri tačke. Ako je ivica prisutna tada je moguće podeliti četiri piksela koji predstavljaju okolinu interpolirane tačke u dve grupe. Pikseli u svakoj grupi su međusobno slični.

Podela piksela u dve grupe na osnovu njihove sličnosti postiže se sortiranjem četiri poznate vrednosti originalne slike prema njihovoj sličnosti i traženjem maksimalne razlike u tom nizu sortiranih piksela. Ta maksimalna razlika deli niz u dva dela. Na taj način definisane su dve grupe sličnosti gde svaka sadrži piksele koji pripadaju suprotnim stranama ivice.

Zatim je potrebno odrediti pripadnost interpoliranog piksela jednoj od te dve grupe sličnosti na osnovu pozicije interpoliranog piksela. Konačno, interpoliranu vrednost treba izračunati korišćenjem samo vrednosti piksela iz identifikovane grupe sličnosti. Odgovarajuće pravilo za interpolaciju bi trebalo biti primenjivo na bilo koju veličinu grupe (1, 2, 3 ili 4 piksela) i treba da obezbedi prirodan izgled interpolirane slike. U svrhu predložen je način interpolacije zasnovan na analogiji sa zakonom gravitacije.

Metod za interpolaciju zasnovan na analogiji sa zakonom gravitacije je generalizacija metoda za interpolaciju bez ograničenja broja piksela koji se koriste u interpolaciji i položaju interpolacionih piksela. Dodatno, osobine metode kao filtera su uporedive (ne lošije) od bikubične (i bilinearne) metode. Ukratko, predloženi algoritam sastoji se od četiri koraka: sortiranje, grupisanje prema sličnosti, određivanje pripadnosti interpoliranog piksela i interpolacija prema analogiji sa zakonom gravitacije.

## 5.2 Sortiranje vrednosti piksela

Četiri piksela koji pripadaju originalnoj slici (5.1) treba da budu grupisana u dva regiona prema sličnosti njihovih vrednosti. Proces počinje sortiranjem vrednosti interpolacionih piksela. Interpolacioni pikseli organizovani su u dvodimenzionalnoj matrici i pre sortiranja potrebno ih je organizovati u jednodimenzionalnu matricu (reorganizacija 2D matrice u 1D matricu definisana je u (5.2)). Četiri piksela iz dvodimenzionalne matrice  $I_{in}$  organizovani su u sekvencijalnu matricu (niz)  $S$ , posebno za svaku komponentu boja ( $c$ ):

$$S(2 \cdot (v_s - 1) + h_s, c) = I_{in}(v + v_s - 1, h + h_s - 1, c) \quad v_s = 1,2 \quad h_s = 1,2. \quad (5.2)$$

Četiri indeksa ove matrice odgovaraju po redovima indeksima četiri interpolaciona piksela:  $\begin{bmatrix} 3 & 4 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$ .

Sekvencijalna matrica (niz)  $S$  sortirana je prema vrednostima koje sadrži (prvo najmanja vrednost) čime su takođe definisana četiri indeksa ( $n_c$ ) sortirane matrice (niza) iz originalnog skupa  $[1,2,3,4]$ :

$$S_c(k) = S(n_c(k), c) \quad k = 1, \dots, 4 \quad (5.3)$$

$$n_c(k) \text{ tako da je } S(n_c(1), c) \leq S(n_c(2), c) \leq S(n_c(3), c) \leq S(n_c(4), c).$$

## 5.3 Grupisanje prema sličnosti

Nakon sortiranja vrednosti interpolacionih piksela potrebno ih je grupisati prema njihovoj sličnosti. To se radi traženjem maksimalne razlike među vrednostima susednih interpolacionih piksela iz sortirane matrice (niza).

Maksimalna vrednost  $D_{c,\max}$  među susedima u ovoj sortiranoj matrici (nizu)  $|S_c(k, c) - S_c(k+1, c)|$  je određena ( $k = 1, \dots, 3$ ), zajedno sa svojom pozicijom  $k_{c,\max}$  (1, 2 ili 3).

Zatim, komponenta boja  $c^*$  sa maksimalnom razlikom vrednosti piksela slike  $D_{c^*,\max}$  definiše indeks podele  $k_{c^*,\max}$  i listu originalnih indeksa  $n_{c^*}(k)$ . Lista  $n_{c^*}(k)$  i indeks podele  $k_{c^*,\max}$  koriste se za formiranje dve grupe piksela iz originalne slike sa odgovarajućim listama originalnih indeksa  $n_1$  i  $n_2$  kao što je

$$\begin{aligned}
 k_{c^*,\max}, n_{c^*} : D_{c^*,\max} &= \max_{c=1,\dots,C} \{D_{c,\max}\}, c^* = \arg \max_{c=1,\dots,C} \{D_{c,\max}\} \\
 n_1(k) &= n_{c^*}(k) \quad k = 1, \dots, k_{c^*,\max} \\
 n_2(k) &= n_{c^*}(k_{c^*,\max} + k) \quad k = 1, \dots, 4 - k_{c^*,\max}.
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Moguće su dve vrste particionisanja piksela u dve grupe : 1:3 ( $k_{c^*,\max} = 1$  or 3) ili 2:2 ( $k_{c^*,\max} = 2$ ). Treća mogućnost (0:4) dozvoljena je ako je maksimalna razlika  $D_{c^*,\max}$  manja od predefinisano praga  $D_{th}$  ( $k_{c^*,\max} = 0$ ). Ukupno postoji sedam mogućih načina za podelu piksela originalne slike.

Uloga predefinisano praga  $D_{th}$  je da pomogne identifikaciji oblasti koje ne sadrže ivice. Ako je postavljena suviše visoko ne bi detektovali ivice u slikama sa malim kontrastom. Postavljanje male vrednosti praga nije tako kritično jer se u detekciji ivica koriste i drugi kriteriji. Eksperimentalni rezultati prikazani u ovom radu dobijeni su za vrednosti praga  $D_{th}$  postavljenu na 10.

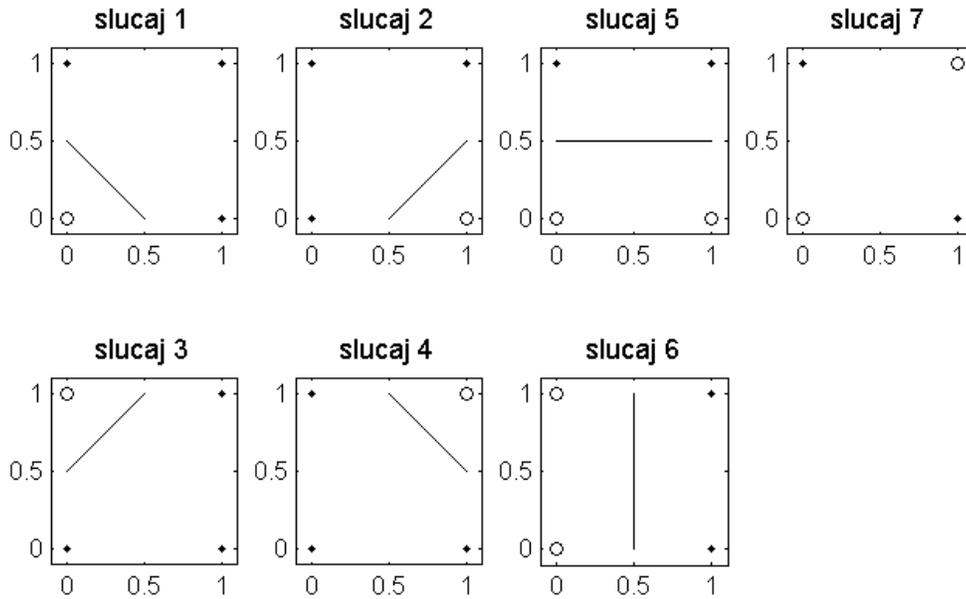
### **5.4 Određivanje pripadnosti interpoliranog piksela grupi sličnosti**

Interpolacioni pikseli podeljeni su u prethodnom koraku u dve particije prema njihovoj sličnosti. Pre interpolacije novog piksela potrebno ga je pridružiti odgovarajućoj particiji. Originalni pikseli iz odabrane particije biće korišteni za interpolaciju. Sedam različitih slučajeva podela na particije prikazano je na Slici 5.2, pri čemu slučajevi 1 do 4 odgovaraju particionisanju 1:3, slučajevi 5 do 7 odgovaraju particionisanju 2:2 dok slučaj 7 takođe odgovara i podeli 0:4.

Odlučivanje o tome koji slučaj je aktuelan zasnovano je na prepoznavanju oblika poretka sortiranih piksela:

$$\text{slučaj} = \begin{cases} n_1(1) & (D_{c^*,\max} > D_{th}) \wedge (k_{c^*,\max} = 1) \\ n_2(1) & (D_{c^*,\max} > D_{th}) \wedge (k_{c^*,\max} = 3) \\ 5 & (D_{c^*,\max} > D_{th}) \wedge (k_{c^*,\max} = 2) \wedge ((n_1 = [1,2]) \vee (n_1 = [3,4])) \\ 6 & (D_{c^*,\max} > D_{th}) \wedge (k_{c^*,\max} = 2) \wedge ((n_1 = [1,3]) \vee (n_1 = [2,4])) \\ 7 & (D_{c^*,\max} \leq D_{th}) \vee ((k_{c^*,\max} = 2) \wedge ((n_1 = [1,4]) \vee (n_1 = [2,3]))) \end{cases} \quad (5.5)$$

Za svaki slučaj sa Slike 5.2, linije predstavljaju pretpostavljenu orijentaciju ivice. Kako je za slučaj sedam orijentacija ivice nepoznata ona se takođe smatra podelom 0:4.



**Slika 5.2 Sedam mogućih podela sa linijama koje odgovaraju pretpostavljenim orijentacijama ivica**

U zavisnosti od pojedinog slučaja piksel se pridružuje prema sledećim pravilima, gde je sa  $n_i$  označena lista indeksa piksela koji pripadaju odabranoj partaciji (5.6).

$$\begin{aligned}
 \text{slučaj } = 1 : n_i &= \begin{cases} n_1 = [1], \Delta v < 0.5 - \Delta h \\ n_2 = [2,3,4], \text{ inače} \end{cases} & \text{slučaj } = 2 : n_i &= \begin{cases} n_1 = [2], \Delta v < \Delta h - 0.5 \\ n_2 = [1,3,4], \text{ inače} \end{cases} \\
 \text{slučaj } = 3 : n_i &= \begin{cases} n_1 = [3], \Delta v > 0.5 + \Delta h \\ n_2 = [1,2,4], \text{ inače} \end{cases} & \text{slučaj } = 4 : n_i &= \begin{cases} n_1 = [4], \Delta v > 1.5 - \Delta h \\ n_2 = [1,2,3], \text{ inače} \end{cases} \\
 \text{slučaj } = 5 : n_i &= \begin{cases} n_1 = [1,2], \Delta v < 0.5 \\ n_2 = [3,4], \text{ inače} \end{cases} & \text{slučaj } = 6 : n_i &= \begin{cases} n_1 = [1,3], \Delta h < 0.5 \\ n_2 = [2,4], \text{ inače} \end{cases} \\
 \text{slučaj } = 7 : n_i &= n_2 = [1,2,3,4] & & 
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

$\Delta v$  i  $\Delta h$  su razlomljeni delovi (vrednosti između 0 i 1) koordinata definisanih u (5.1). Na primer, u slučaju 1, ako je novi piksel iznad linije, originalni pikseli 2, 3 i 4 biće korišteni za interpolaciju.

### 5.5 Interpolacioni metod zasnovan na analogiji za zakonom gravitacije

Vrednost interpoliranog piksela računa se korišćenjem originalnih piksela definisanih listom interpolacionih indeksa:

$$I_{out}(p, q, c) = \sum_{k=1}^{L_i} w(n_i(k)) \cdot S(n_i(k), c) \quad L_i = \text{dužina od } n_i, \tag{5.7}$$

gde su  $w(n_i(k))$  koeficijenti interpolacije. Primitimo da  $L$  može uzeti bilo koju vrednost od 1 do 4 (npr. za  $L = 3$  interpolacioni pikseli definišu trougao i interpolirani piksel se nalazi u unutrašnjosti trougla). Dakle, upotreba konvencionalnih algoritama za interpolaciju nije uvek moguća.

Novi algoritam za interpolaciju nazvan gravitaciji-nalik-interpolacija zasnovan je na analogiji sa gravitacionim zakonom:

$$w(n_i(k)) = \frac{Q}{d^2(n_i(k))} \quad k = 1, \dots, L_i, \tag{5.8}$$

gde su  $d(n_i(k))$  udaljenosti susednih piksela od interpoliranog piksela. Sve četiri moguće udaljenosti definisane su kao:

$$d^2((v-1) \cdot 2 + h) = (h-1-\Delta h)^2 + (v-1-\Delta v)^2 \quad \begin{aligned} v &= 1,2 \\ h &= 1,2. \end{aligned} \tag{5.9}$$

Konstanta  $Q$  definisane je uslovom da interpolacija treba da ima jedinično pojačanje. Prema tome interpolacioni koeficijenti su dati sa:

$$\sum_{k=1}^{L_i} w(n_i(k)) = 1 \Rightarrow w(n_i(k)) = \frac{\prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{L_i} d^2(n_i(m))}{\sum_{r=1}^{L_i} \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq r}}^{L_i} d^2(n_i(m))} \quad k = 1, \dots, L_i. \quad (5.10)$$

Na primer, u slučaju jednog interpolacionog piksela ( $L_i = 1$ ) postoji samo jedan interpolacioni koeficijent sa vrednošću jedan, što odgovara SH interpolaciji.

## 5.6 Generički kod predloženog algoritma

Generički kod za predloženi algoritam sumira programsku petlju za sve interpolirane piksele:

```

for p=1:Vo & q=1:Ho
    izračunaj originalne koordinate v i h i necelobrojne ostatke Δv i Δh (5.1)
    preuredi i sortiraj piksele za svaku komponentu boja (5.2) i (5.3)
    izračunaj  $D_{c^*,\max}$ , i  $k_{c^*,\max}$  (5.4)
    identifikuj konstelaciju (Slika. 5.2), (5.5) i (5.6)
    Izračunaj interpolacione koeficijente w (5.8), (5.9) i (5.10)
    for c=1:C
        izračunaj vrednost interpoliranog piksela  $I_o(p,q,c)$  (5.7)
    end
end
end
    
```

Slika 5.3 Generički kod predloženog algoritma

## 5.7 Elementi optimizacije algoritma u implementaciji

Ako posmatramo osnovne algoritamske korake: sortiranje, grupisanje prema sličnosti, određivanje pripadnosti interpoliranog piksela i interpolacija prema analogiji sa zakonom gravitacije možemo primetiti da se u prva tri koraka koriste i operacije grananja (odlučivanja) koje mogu znatno uticati na brzinu izvršenja algoritma. Iako u

četvrtom koraku nema grananja u njemu se izvršava mnogo računskih operacija tako da i on utiče na performansu algoritma.

Analizom prva dva koraka može se uočiti da se u njima koriste samo vrednosti originalnih piksela, to jest, da ne zavise od interpoliranih piksela i da je njihov rezultat jednak za sve interpolirane piksele koji se računaju na osnovu istih originalnih piksela (interpolirani pikseli koji pripadaju istom bloku od  $2 \times 2$  originalnih piksela). Na osnovu toga moguće je zaključiti da je prva dva koraka dovoljno raditi samo jednom za sve piksele koji se nalaze unutar oblasti oivičene sa 4 originalna piksela. Što je veći faktor skaliranja  $F$  veća je i ušteda – umesto  $F \times F-1$  puta prva dva koraka radila bi se samo jednom za sve piksele koji se računaju na osnovu ista četiri originalna piksela.

U trećem koraku se na osnovu identifikovane grupe sličnosti i položaja interpoliranog piksela u odnosu na originalne piksele određuje pripadnost interpoliranog piksela jednoj od grupa sličnosti. S obzirom da je mogućih broj položaja interpoliranog piksela u odnosu na originalne piksele konačan za neko  $F$  ( $F \times F-1$  položaj) moguće kreirati tabelu sa svim kombinacijama položaja interpoliranog piksela u odnosu na originalne piksele i mogućim varijantama (slučajevima) grupa sličnosti. U tom slučaju određivanje pripadnosti interpoliranog piksela grupi sličnosti svodi se na čitanje vrednosti iz prethodno izračunate tabele. Tabelu je dovoljno izračunati jednom za jednu vrednost faktora skaliranja  $F$ .

U četvrtom koraku na osnovu pripadnosti interpoliranog piksela i položaja interpoliranog piksela u odnosu na originalne tačke računaju se interpolacioni koeficijenti. S obzirom da interpolacioni koeficijenti ne zavise od vrednosti u originalnim pikselima nego samo od pripadnosti interpoliranog piksela i njegovog položaja moguće je izračunati sve vrednosti interpolacionih koeficijenata za jedan faktor skaliranja  $F$  ( $F \times F \times F-1$  kompleta interpolacionih vrednosti) i smestiti ih u tabelu ( $4 \times 7 \times F \times F-1$  elemenata).

U tako optimizovanom algoritmu sortiranje i grupisanje prema sličnosti se radi samo jednom za sve piksele koji se nalaze unutar oblasti oivičene sa 4 originalna piksela i na osnovu toga se bira tabela koja se koristi za određivanje pripadnosti interpoliranog piksela i interpolacionih koeficijenata. Poređenje vremena izvršavanja originalnog algoritma i optimizovanog algoritma za različite faktore skaliranja  $F$  prikazani su u Tabeli 5.1.

**Tabela 5.1** Vremena u sekundama potrebna za interpolaciju za razne vrednosti faktora  
interpolacije  $F$  za veličinu slike 256x256

Algoritam	F = 2	F = 3	F = 4	F = 6	F = 8
GR_ORG	39.04	90.79	171.34	407.92	770.78
GR_OPT	3.73	4.79	8.21	10.28	14.62

\*Matlab simulacija je korištena za sve algoritme. Merenja su rađena na personalnom računaru sa Intel® Core™ i7 procesorom @2.5Gz sa 8GB memorije i SSD diskom.



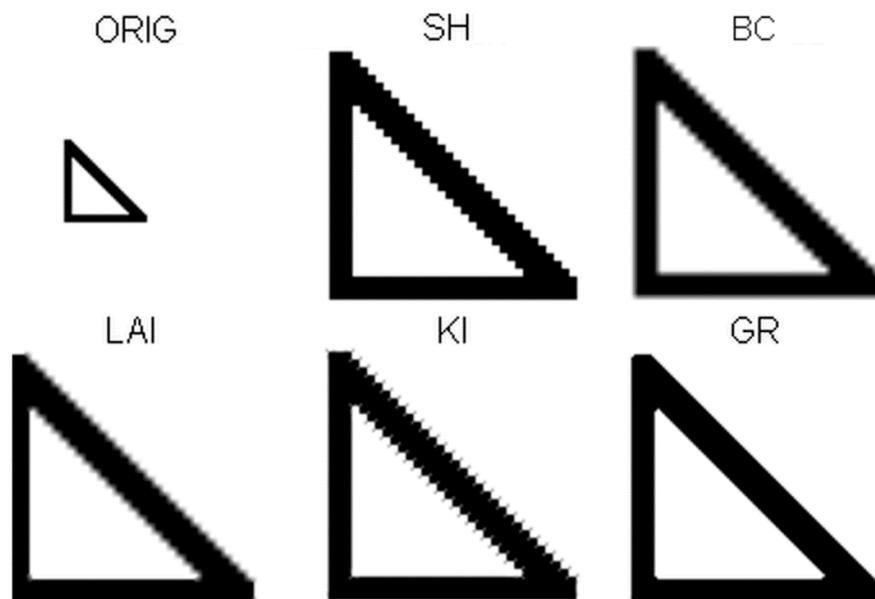
## POGLAVLJE 6.

### **NEKE OSNOVNE OSOBINE PREDLOŽENE METODE**

Neke osnovne osobine bitne za kvalitet interpolacije analizirane su i upoređene sa drugim algoritmima za interpolaciju: očuvanje ivica, integritet ivica, impulsni odziv sa odgovarajućom prenosnom funkcijom i očuvanje teksture.

#### **6.1 Očuvanje ivica**

Prednost predloženog algoritma je očuvanje ivica kao što je prikazano na Slici 6.1 korišćenjem jednostavne crno-bele slike trougla sa tri tipične orijentacije ivica: horizontalna, vertikalna i dijagonalna. Analizirani algoritmi za interpolaciju mogu biti korišteni za povećanje ( $F > 1$ ) ili smanjenje veličine slike ( $F < 1$ ). Povećanje slike je izabrano kao više ilustrativno.

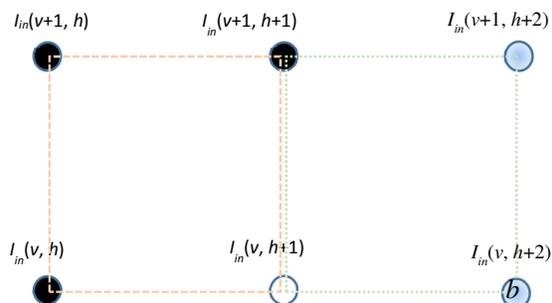


Slika 6.1 Rezultati interpolacije za  $F = 3$ : a) originalna slika, b) SH, c) BC, d) LAI, e) KI, f) GR.

SH algoritam dobro interpolira vertikalne i horizontalne ivice, ali je stepeničasta struktura primetna na dijagonalnoj ivici. BC algoritam razmazuje sve ivice. LAI algoritam dobro interpolira vertikalne i horizontalne ivice i blago popravlja kvalitet interpolacije dijagonalne ivice. KI algoritam takođe dobro interpolira vertikalne i horizontalne ivice ali unosi određena izobličenja na uglovima i dijagonalnoj ivici. Predloženi GR algoritam dobro očuvava sve ivice. Ipak, blago zaobljuje uglove.

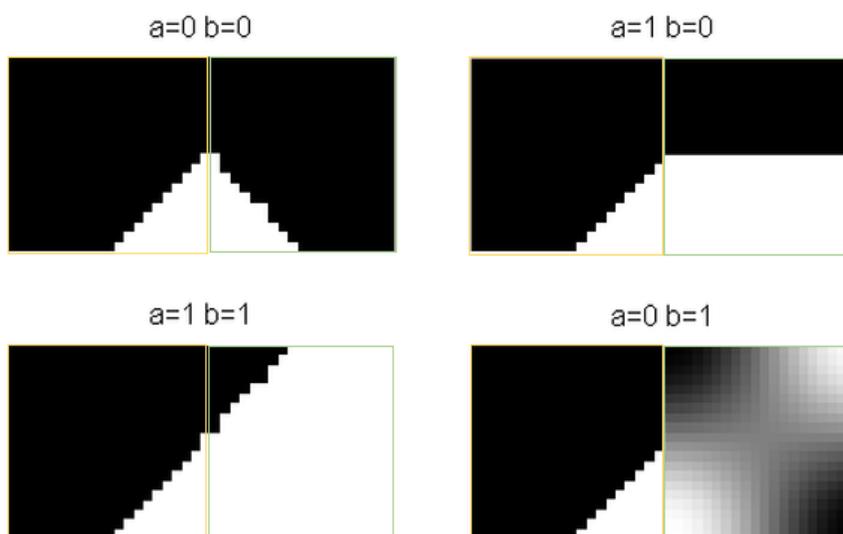
## 6.2 Očuvanje integriteta ivica

Inherentna (unutrašnja) osobina predloženog interpolacionog algoritma je očuvanje integriteta ivica – nema diskontinuiteta ivica između dva susedna interpolaciona četvorougla koji odgovaraju susednim interpoliranim pikselima. Ova osobina je ilustrovana na primeru crno-bele slike (vrednost 0-crna i 1-bela). Na primeru je prikazana desna vertikalna ivica interpoliranog četvorougla. Pretpostavimo sledeću konstelaciju četiri originalna piksela za interpolirani piksel:



**Slika 6.2** Primer interpolacionog četvorougla (oivičen crtkano) i susednog interpolacionog četvorougla (oivičen tačkasto). Dva krajnja desna piksela susednog interpolacionog četvorougla imaju vrednosti  $a$  i  $b$ .

i u četvorouglu neposredno pored njene desne strane moguće su četiri kombinacije piksela  $(a, b) = \{0, 1\}$ . Za sva četiri slučaja rezultat interpolacije prikazan je na Slici 6.3 ilustrujući očuvanje integriteta ivica.



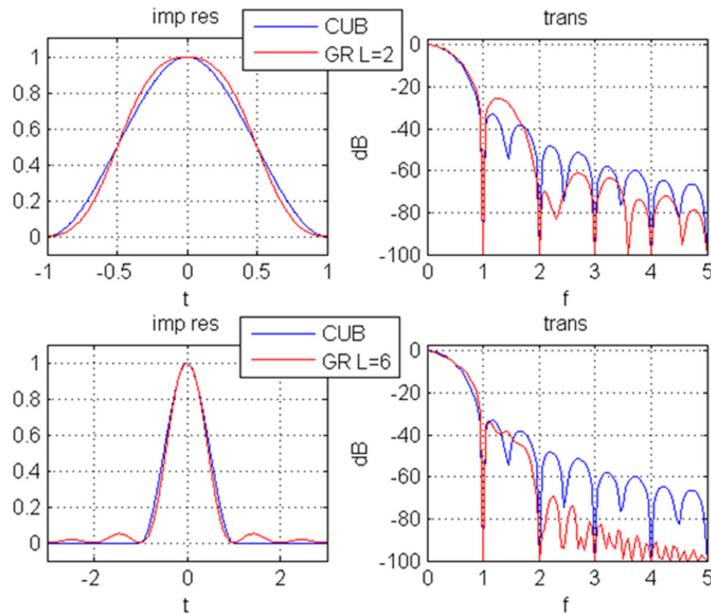
**Slika 6.3** Ilustracija očuvanja integriteta ivica na primeru za faktor skaliranja  $F = 20$

### 6.3 Impulsni odziv i prenosna funkcija

Za jednostavnu evaluaciju predloženog algoritma interesantno je analizirati impulsni odziv i prenosnu funkciju odgovarajućeg interpolacionog filtera.

### 6.3.1 1D slučaj

1D impulsni odziv i odgovarajuća prenosna funkcija (anti-aliasing NP filteri) prikazani su na Slici 6.3 za kubičnu (CUB) i gravitaciji-nalik (GR) interpolaciji korišćenjem dve dužine  $L = 2$  i  $L = 6$ .

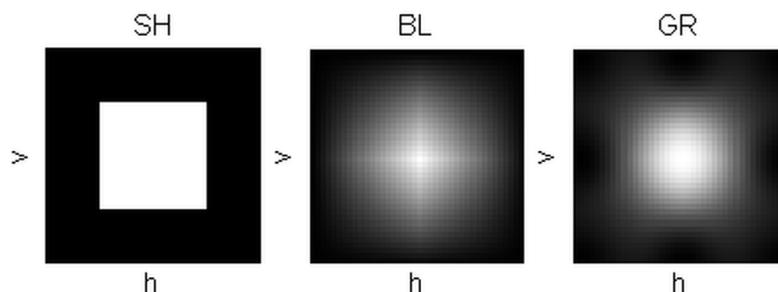


**Slika 6.4 Impulsni odziv i amplitudska prenosna funkcija za 1D kubičnu (CUB) i gravitaciji-nalik interpolaciju (GR)**

Kod korišćenja dve interpolacione tačke gravitaciji-nalik interpolacija pokazuje bolje potiskivanje aliasing kandidata na frekvencijama dva puta većim od frekvencije odabiranja. Imajući u vidu da gravitaciji-nalik interpolacija može biti primenjena i na većem broju tačaka potiskivanje aliasing kandidata može biti poboljšano na nižim frekvencijama.

### 6.3.2 2D slučaj

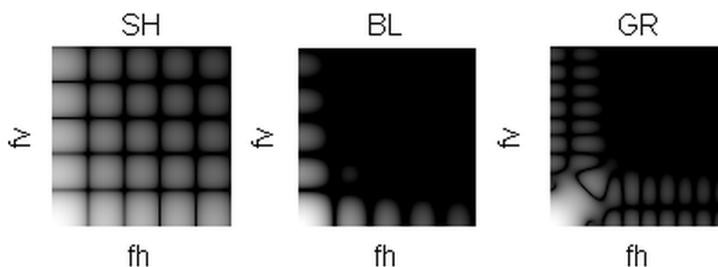
2D impulsni odziv sa odgovarajućom prenosnom funkcijom (anti-aliasing NP filter) prikazani su na Slici 6.4 za SH, BL i GR interpolacione algoritme. Ova dva jednostavna algoritma izabrana su da pokažu prednosti novog algoritma. Pretpostavićemo da su za GR algoritam korišćena sva 4 piksela ( $L_i = 4$ ), kao što je slučaj za SH i BL interpolaciju.



**Slika 6.5 Impulsni odziv interpolacionih filtera za SH, BL i GR interpolaciju; faktor skaliranja  $F = 20$  i veličinu odziva  $40 \times 40$  piksela.**

Impulsni odziv SH interpolacije je četvorougao oko impuls piksela. Impulsni odziv BL interpolacije je kružnog oblika sa izraženim vertikalnim i horizontalnim smerovima. Impulsni odziv gravitaciji-nalik interpolacije (GR) ima kružni oblik sa uniformnim vrednostima u svim smerovima.

Prenosna funkcija interpolacionog filtera je Furierova transformacija impulsnog odziva. Teoretski, to bi trebao biti nisko-propusni filter u svim smerovima sa graničnom frekvencijom od  $0.5/F$ , gde je  $F$  faktor skaliranja. U tom slučaju sve moguće aliasing komponente na višim frekvencijama bi bile potisnute, takođe i ivice bi bile razmazane. Prenosne funkcije tri evaluirana metoda prikazane su na Slici 6.6.



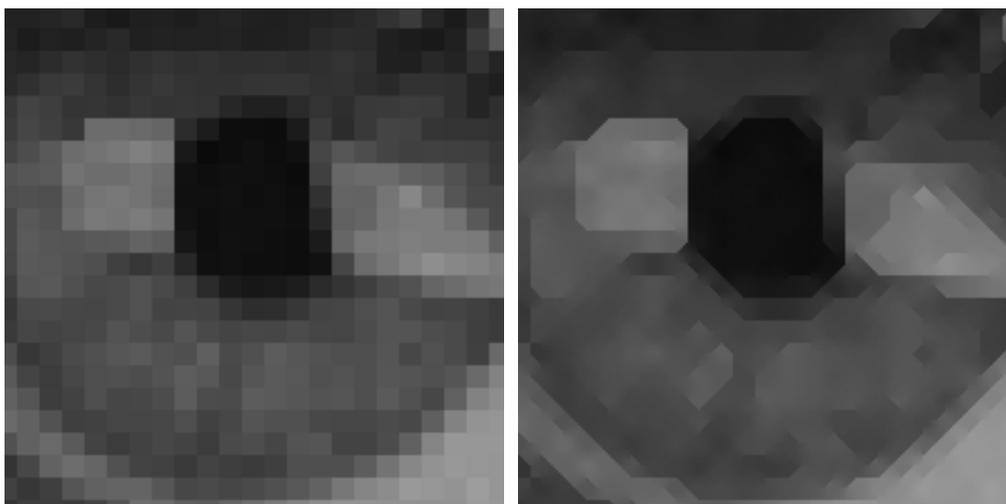
**Slika 6.6 Amplitudska prenosna funkcija (bela 1: 0 dB i crno 0: ispod -60 dB) interpolacionih filtera za SH, BL i GR interpolaciju; frekventni opsezi u obe dimenzije ( $f_v$  i  $f_h$ ) su između 0 i 0.25 (normalizovano).**

Prenosna funkcija SH metode blago opada, naročito oko vertikalne i horizontalne ose, što indicira znatno prisustvo aliasing komponenti. Kao posledica toga, ivice teže da budu dobro očuvane, dok se u teksturi pojavljuju artefakti nalik blokovskoj mustri. Prenosna funkcija BL metode potiskuje potencijalne aliasing komponente u gornjem delu spektra, naročito u dijagonalnom smeru. Posledično, intepolacija teksture je bolja, ali su ivice razmazane. Slično, i prenosna funkcija GR metode potiskuje

visokofrekventne komponente spektra. Ipak, to rezultuje u uniformo distribuiranim artifaktima, što vodi do poboljšane perceptualne kvalitete.

#### 6.4 Korektna interpolacija teksture

Predloženi algoritam korektno interpolira teksturu kao što je prikazano na Slici 6.7. Primenom SH algoritma (Slika 6.7 levo) pojavljuju artifakti nalik blokovskoj mustri u delovima slike sa teksturom. Primenom GR (Slika 6.7 desno) algoritma tekstura je očuvana.



Slika 6.7 Korektna interpolacija teksture primer SH u odnosu na GR

#### 6.5 Jednostavna generalizacija za multi-dimenzionalnu interpolaciju

Uopštjeni oblik generisanja interpolacionih koeficijenata korišćenjem analogije sa zakonom gravitacije prikazan je sledećim izrazom:

$$I_{out}(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^L c_k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) \cdot I_{in}(\mathbf{x}_k) \quad c_k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) = \frac{\prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^L \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_m\|^2}{\sum_{p=1}^L \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq p}}^L \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_m\|^2}. \quad (6.1)$$

$I_{out}(\mathbf{x})$  je vrednosti interpoliranog piksela a  $I_{in}(\mathbf{x}_k)$  su poznati interpolacioni pikseli definisani koordinatama  $\mathbf{x}$  i  $\mathbf{x}_k$ , sukcesivno. U opštem slučaju,  $\mathbf{x}$  i  $\mathbf{x}_k$  mogu biti  $N$ -

dimenzionalni vektori u  $N$ -dimenzionalnom prostoru. Dakle, primena algoritma nije ograničena na jednu ili dve dimenzije.



## POGLAVLJE 7.

### EVALUACIJA

Predloženo rešenje će biti upoređeno sa pet drugih poznatih algoritama za interpolaciju: SH, BC, LAI, KI i SRCNN. Sledeća poređenja su razmatrana: objektivne mere (metrike) kvaliteta i subjektivan utisak o kvalitetu interpolirane slike.

#### **7.1 Baza referentnih slika (LIVE)**

Eksperimenti su obavljani na svih 29 referentnih slika iz referentne baze slika za procenu kvaliteta po ime LIVE [Sheikh 14]. Baza slika za procenu kvaliteta LIVE mnogo je korištena u evaluaciji raznih algoritama za obradu slike. Neke tipične slike iz ove baze slika prikazane su na Slici 7.1.. Slika Bikes je predstavnik složenih slika. Slika Womanhat je predstavnik slika sa portretima. Slika Cemetery sadrži slova i slika Sailing2 predstavlja slike sa velikim homogenim oblastima.



Slika 7.1 Primeri tipičnih slika iz baze referentnih slika LIVE

## 7.2 Mere za procenu kvaliteta slike

Procena kvaliteta slike je proces kojim je moguće oceniti da li slika zadovoljava potrebe korisnika. Merama za procenu kvaliteta slike pokušavamo da kvantifikujemo stepen zadovoljstva korisnika kvalitetom slike. Kad postoji referentna slika tad mere za procenu kvaliteta služe da utvrdimo verovatnoću da korisnik primeti razliku između originalne slike i izmenjene slike (u opštem slučaju nezavisno od načina kako je došlo do izmene originalne slike). U slučaju kad ne postoji referentna slika merama za procenu kvaliteta pokušavamo utvrditi verovatnoću da korisnik neće primetiti da je u pitanju veštački kreirana slika. Klasičnim merama za procenu kvaliteta pokušava se utvrditi razlika između piksela originalne i rekonstruisane slike ne uzimajući u obzir složenosti ljudskog vizuelnog sistema (HVS) što na što je ukazano u [Wang 02]. Imajući u vidu složenost ljudskog vizuelnog sistema s jedne strane i nesavršenost mera za procenu kvaliteta slike, koje uprkos ogromnom napretku i dalje predstavljaju pokušaj aproksimacije ljudskog vizuelnog sistema, nameće se potreba za korišćenjem nekoliko metrika za procenu kvaliteta slike sa nadom da će se njihovom kombinacijom smanjiti verovatnoća greške prilikom procene kvaliteta slike. Za procenu kvaliteta slike korištene su metrike: PSNR (vršni odnos signal šum) [Wang 09], SSIM (indeks mere strukturne sličnosti) [Wang 04], SM (mera oštine slike) [Hu 06], i BIQI (indeks kvaliteta slike bez reference) [Moorthy 09].

### 7.2.1 PSNR/MSE

Najjednostavnije metrike za procenu kvaliteta slike su srednja kvadratna greška – MSE (Mean Square Error) i vršni odnos signal šum – PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) [Wang 09]. Vršni odnos signal šum se češće koristi u obradi slike i prednost mu je ako se porede kvaliteta slika sa različitim dinamičkim opsegom, inače ne nosi novu informaciju u odnosu na MSE [Wang 09]. Korišćenje ovih metrika je široko rasprostranjeno zbog jednostavnog izračunavanja kao i jednostavnog razumevanja dobijenog rezultata merenja. MSE predstavlja nivo različitosti (greške, izobličenja), dok PSNR predstavlja stepen sličnosti (verodostojnosti) dve slike.

Pretpostavimo da se slike koje se upoređuju date sa  $\{ I_x(v, h); v = 1, \dots, V \text{ i } h = 1, \dots, H \}$  i  $\{ I_z(v, h); v = 1, \dots, V \text{ i } h = 1, \dots, H \}$  gde su  $V$  i  $H$  broj piksela u vertikalnoj i horizontalnoj dimenziji.

MSE je definisana kao:

$$MSE = \frac{1}{VH} \sum_{v=1}^V \sum_{h=1}^H (I_x(v, h) - I_y(v, h))^2. \quad (7.1)$$

PSNR je definisana kao:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{L^2}{MSE} \quad (7.2)$$

gde je  $L$  dinamički opseg dozvoljenog intenziteta vrednosti piksela. (najčešće se koriste slike predstavljene sa 8 bita po pikselu te je u tom slučaju  $L = 255$ ). Vrednost PSNR se uobičajeno iskazuje korišćenjem logaritamske skale u decibelima (dB).

Iako su ove metrike često korištene njihova korisnost za procenu kvaliteta slike je upitna što je i pokazano u [Wang 09].

## 7.2.2 SSIM

SSIM metod je široko rasprostranjen metod za procenu kvaliteta slike zbog veće korespondencije dobijenih rezultata sa subjektivnim ocenama. Rad u kom je predstavljen SSIM metod [Wang 04] je jedan od najčešće preuzimanih radova sa IEEE Xplore baze, a u 2015. godini bio je prvi po broju preuzimanja iz oblasti obrade slike [Gormish 16].

Pretpostavimo da se slike koje se upoređuju date sa  $\{ I_x(v, h); v = 1, \dots, V \text{ i } h = 1, \dots, H \}$  i  $\{ I_y(v, h); v = 1, \dots, V \text{ i } h = 1, \dots, H \}$  gde su  $V$  i  $H$  broj piksela u vertikalnoj i horizontalnoj dimenziji.

SSIM mera se zasniva na poređenju osvetljaja, kontrasta i strukture slika. Prvo se poredi osvetljaj obe slike. Procena srednjeg intenziteta osvetljaja računa se prema:

$$\mu_x = \frac{1}{VH} \sum_{v=1}^V \sum_{h=1}^H I_x(v, h). \quad (7.3)$$

Funkcija poređenja osvetljaja  $l(I_x, I_y)$  je funkcija  $\mu_x$  i  $\mu_y$ .

Za poređenje kontrasta koristi se standardna devijacija:

$$\sigma_x = \left( \frac{1}{VH-1} \sum_{v=1}^V \sum_{h=1}^H (I_x(v, h) - \mu_x)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (7.4)$$

Poređenje kontrasta  $c(I_x, I_y)$  se onda svodi na poređenje  $\sigma_x$  i  $\sigma_y$ .

Funkcija poređenja strukture  $s(I_x, I_y)$  je funkcija  $(I_x - \mu_x)/\sigma_x$  i  $(I_y - \mu_y)/\sigma_y$ .

Kombinovanjem tri funkcije poređenja dobija se ukupna mera sličnosti:

$$s(I_x, I_y) = f(l(I_x, I_y), c(I_x, I_y), s(I_x, I_y)). \quad (7.5)$$

Za poređenje intenziteta osvetljaja definišemo:

$$l(I_x, I_y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \quad (7.6)$$

gde je  $C_1$  mala konstanta čija je svrha izbegavanje nestabilnosti izraza u slučaju da imenilac postane suviše mali.

Na sličan način definišemo poređenje kontrasta:

$$c(I_x, I_y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (7.7)$$

gde je  $C_2$  mala konstanta čija je svrha izbegavanje nestabilnosti izraza u slučaju da imenilac postane suviše mali.

Poređenje strukture definišemo kao:

$$s(I_x, I_y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (7.8)$$

gde je  $C_3$  mala konstanta čija je svrha izbegavanje nestabilnosti izraza u slučaju da imenilac postane suviše mali a  $\sigma_{xy}$  je definisano sa:

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{VH-1} \sum_{v=1}^V \sum_{h=1}^H (I_x(v, h) - \mu_x)(I_y(v, h) - \mu_y). \quad (7.9)$$

Konačno SSIM mera se definiše kao:

$$SSIM(I_x, I_y) = [l(I_x, I_y)]^\alpha \cdot [c(I_x, I_y)]^\beta \cdot [s(I_x, I_y)]^\gamma \quad (7.10)$$

gde su  $\alpha > 0$ ,  $\delta > 0$  i  $\gamma > 0$  parametri namenjeni regulisanju relativnog uticaja tri komponente. U cilju pojednostavljenja izraza koristi se  $\alpha = \delta = \gamma = 1$  i  $C_3 = C_2/2$  te se dobija:

$$SSIM(I_x, I_y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \frac{2\sigma_{xy} + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}. \quad (7.11)$$

Kako statistička svojstva slike obično nisu prostorno stacionarna a izobličenja takođe mogu biti prostorno ne stacionarna SSIM mera se obično računa na lokalnom prozoru a srednja vrednost izračunatih SSIM vrednosti (MSSIM) za sve prozore koristi se za procenu ukupnog kvaliteta slike:

$$MSSIM(I_x, I_y) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M SSIM(I_x^i, I_y^i) \quad (7.12)$$

gde je  $M$  ukupan broj lokalnih prozora a  $I_x^i$  i  $I_y^i$  su sadržaji slika koje se porede u  $i$ -tom lokalnom prozoru.

Vrednosti SSIM i MSSIM mera nalaze se u opsegu između -1 i 1, gde identičnim slikama odgovara vrednost 1.

Pored široke prihvaćenosti PSNR i SSIM metrika njihov veliki nedostatak je da ne uzimaju u obzir osetljivost ljudskog vizuelnog sistema na ivice u slici što je pokazano u [Junyao 11] i [Maksimović-Moićević 15]. Dobra demonstracija tog nedostatka je eksperiment iz [Junyao 11] u kom se sa obe metrike meri kvalitet dve slike, gde je prva slika zamućena (bez finih detalja u slici kao što su ivice) a drugoj slici je dodat šum (Slika 7.2).



**Slika 7.2** Poređenje slike „Lena“ sa različitim izobličenjima a) originalna slika, b) zamućena slika (PSNR = 28.9; SSIM = 0.3235), c) zašumljena slika (PSNR = 29; SSIM = 0.3143),

Prema dobijenim rezultatima PSNR i SSIM metrike moglo bi se zaključiti da su slike 7.2b i 7.2c veoma malo razlikuju, iako je subjektivni kvalitet zašumljene slike mnogo bolji u odnosu na zamućenu sliku. Iz ovoga možemo zaključiti da je pri proceni kvaliteta slike potrebno uzeti u obzir i metrike koje mere oštrinu slike.

### 7.2.3 SM

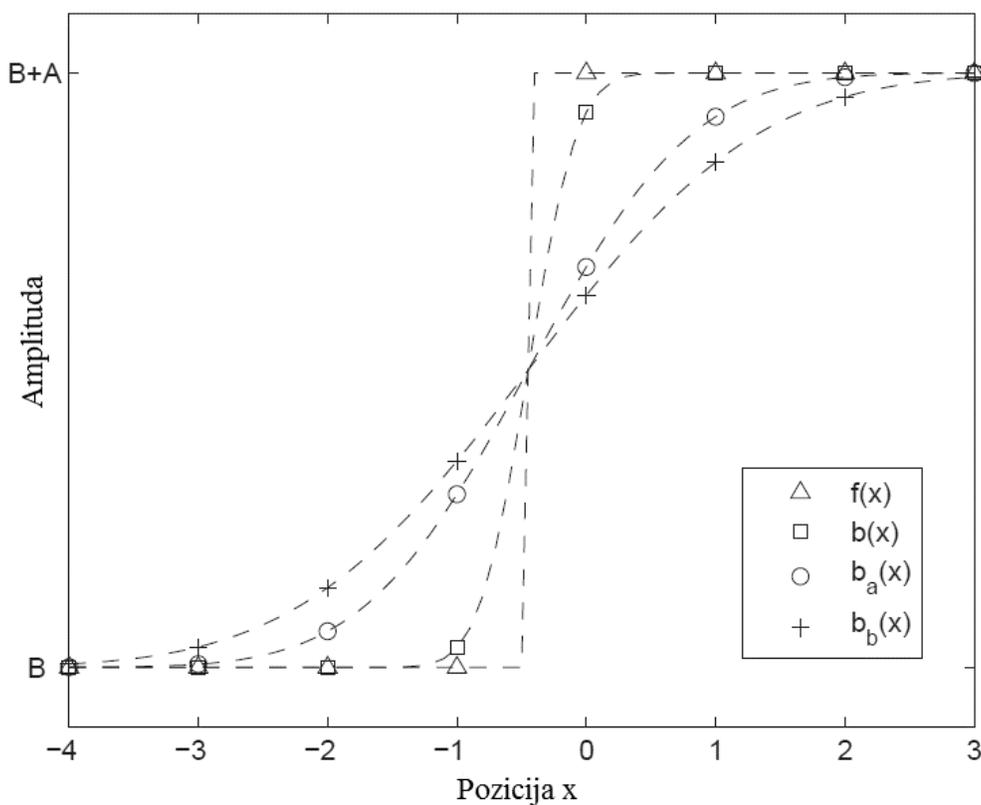
Za razliku od PSNR i SSIM metrika koje su namenjene procenjivanju sličnosti dvaju slika SM („sharpness measure“) metrika je namenjena proceni prisustva ivica u evaluiranoj slici. Pri proceni se koristi samo evaluirana slika, tako da procenjena vrednost ne daje informaciju o sličnosti/razlikama u odnosu na referentnu sliku - procenjena vrednost je karakteristika evaluirane slike.

Metoda je zasnovana na ideji da se u okolini ivice dešavaju velike promene intenziteta osvetljaja i da su ti delovi slike najosetljiviji na zamućivanje (engleski „blurring“) [Hu 06]. Na sliku se primenjuju dva različita nisko-frekventna filtera a zatim se detektuju oblasti gde je došlo do najveće promene nakon uklanjanja visokofrekventnih komponenti iz slike.

Ivica se modeluje kao funkcija skoka sa amplitudom  $A$  i ofsetom  $B$ . Za diskretan signal, ivica  $f(x)$  prikazana na Slici 7.3 data je sa:

$$f(x) = \begin{cases} A+B, & x \geq 0 \\ B, & x < 0 \end{cases}, x \in I \quad (7.13)$$

gde je  $x$  pozicija.



Slika 7.3 Ivica kao skok funkcija  $f(x)$ , razmazana ivica  $b(x)$  i njene dve dodatno zamućene verzije  $b_a(x)$  i  $b_b(x)$

Pretpostavka je da je idealna ivica (funkcija skoka) razmazana nepoznatim niskofrekventnim filterom. Niskofrekventni filter modeluje se normalizovanom Gausovom funkcijom:

$$g(n, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma^2}\right), n \in I \quad (7.14)$$

gde je  $\sigma$  nepoznati prečnik zamućenja (zona uticaja niskofrekventnog filtera) koji treba proceniti. Za normalizovanu Gausovu funkciju vredi:

$$\sum_{n \in I} g(n, \sigma) = \sum_{n \in I} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma^2}\right) = 1. \quad (7.15)$$

Tada će razmazana ivica  $f(x)$  biti:

$$b(x) = \sum_{n \in I} f(x-n)g(n, \sigma) = \begin{cases} \frac{A}{2} \left(1 + \sum_{n=-x}^x g(n, \sigma)\right) + B, & x \geq 0 \\ \frac{A}{2} \left(1 - \sum_{n=x+1}^{-x-1} g(n, \sigma)\right) + B, & x < 0 \end{cases}, x \in I. \quad (7.16)$$

Konvolucija dve funkcije sa Gausovom raspodelom sa prečnicima zamućenja (zonama uticaja niskofrekventnih filtera)  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$ :

$$g(n, \sigma_1) * g(n, \sigma_2) = g\left(n, \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}\right). \quad (7.17)$$

zamućivanje (filtriranje niskofrekventnim filterom) razmazane ivice korišćenjem Gausovog niskofrekventnog filtera sa prečnicima zamućenja  $\sigma_a$  i  $\sigma_b$  ( $\sigma_a > \sigma_b$ ), rezultuje u dve dodatno zamućene verzije ivice  $b_a(x)$  i  $b_b(x)$ :

$$b_a(x) = \begin{cases} \frac{A}{2} \left(1 + \sum_{n=-x}^x g\left(n, \sqrt{\sigma^2 + \sigma_a^2}\right)\right) + B, & x \geq 0 \\ \frac{A}{2} \left(1 - \sum_{n=x+1}^{-x-1} g\left(n, \sqrt{\sigma^2 + \sigma_a^2}\right)\right) + B, & x < 0 \end{cases}, x \in I, \quad (7.18)$$

$$b_b(x) = \begin{cases} \frac{A}{2} \left(1 + \sum_{n=-x}^x g\left(n, \sqrt{\sigma^2 + \sigma_b^2}\right)\right) + B, & x \geq 0 \\ \frac{A}{2} \left(1 - \sum_{n=x+1}^{-x-1} g\left(n, \sqrt{\sigma^2 + \sigma_b^2}\right)\right) + B, & x < 0 \end{cases}, x \in I. \quad (7.19)$$

Da bi procena zamućenja bila nezavisna od amplitude i ofseta ivica, računa se odnos  $r(x)$  razlika između originalne zamućene ivice i dve dodatno zamućene ivice za svaku poziciju  $x$ :

$$r(x) = \frac{b(x) - b_a(x)}{b_a(x) - b_b(x)}, x \in I. \quad (7.20)$$

Odnos razlika zamućenih slika nije zavisian od amplitude  $A$  i ofseta  $B$ . Identifikacija lokalnog maksimuma odnosa razlika  $r(x)_{\max}$  omogućuje lokaciju ivica u slici. Detektuju se lokalni maksimumi u okolinama od  $8 \times 8$  piksela koji su veći od predefinisano praga. Veća vrednost lokalnog maksimuma odgovara izraženijoj ivici. Sumiranjem svih detektovanih lokalnih maksimuma i deljenjem te sume sa njihovim brojem dobija se jedinstvena vrednost kojom se karakterizira oštrina slike – SH mera.

S obzirom da SH mera daje informaciju samo o oštrini slike, što nije dovoljna informacija za ocenu kvaliteta interpolirane slike, ona je korištena u kombinaciji sa PSNR i/ili SSIM metrikama.

#### **7.2.4 BIQI**

Kao i SM metrika BIQI metrika ne zahteva referentnu sliku [Moorthy 10]. Pri proceni se koristi samo evaluirana slika, i procenjena vrednost daje informaciju o kvalitetu same slike. Za razliku od SM metrike koja daje informaciju samo o oštrini slike BIQI metrika daje informaciju o ukupnom subjektivnom kvalitetu interpolirane slike. Za razliku od PSNR i SSIM metrike koje iskazuju sličnost piksela interpolirane slike sa pikselima referentne slike, BIQI metrika je više orijentisana na percepciju kvaliteta slike sa stanovišta ljudskog vizuelnog sistema (HVS) . Dodatna prednost u odnosu na PSNR i SSIM metrike je veća verodostojnost izmerene vrednosti. To je posledica metode za određivanje PSNR i SSIM metrike gde se originalna (referentna) slika smanjuje te se tako dobijena slika povećava interpolacionim metodama koje se evaluiraju. Smanjivanjem slike gube se bitne informacije o slici (uglavnom ivice) te je moguće da interpolacione metode koje očuvavaju ivice ne mogu da u potpunosti pokažu svoju vrednost (jer su ivice oštećene postupkom smanjivanja slike) pa je neophodno koristiti metrike koje ne zahtevaju referentnu sliku kao što je BIQI [Zeinali 14].

Objektivne metrike koje ne zahtevaju referentnu sliku pokušavaju da predvide kvalitet novodobijene slike bez ikakvog znanja o neobrađenoj referentnoj slici i taj pristup je korelisan sa ljudskom percepcijom kvaliteta. BIQI metrika je zasnovana na NSS („natural scene statistic“) modelu modelu slika [Srivastava 03] prema kome prirodne scene pokazuju određene statističke zakonitosti koje je moguće parametrizovati. Imajući u vidu da izobličenja u slici utiču na statističke osobine slike [Sheikh 05] računanje BIQI indeksa kvaliteta zasnovano je na određivanju izobličenja

koja su delovala na sliku i uticaja svakog od tih izobličenja na kvalitet slike. Posmatra se pet izobličenja (JPEG, JPEG2000, beli šum, zamućenje Gausovog tipa (engl. „Gaussian blur“) i brzi prelaz (engl. „fast fading“)) iz LIVE baze za ocenu kvaliteta slika [Sheikh 06].

Na osnovu slike koja se evaluira (slika sa izobličenjima) algoritam u prvom koraku procenjuje prisustvo pojedinih vrsta izobličenja u slici. Za svaku vrstu izobličenja određuje se iznos verovatnoće prisustva tog izobličenja u evaluiranoj slici. Iznosi verovatnoća prisustva pojedinih izobličenja u slici označavaju se sa  $p_i$ ,  $\{i = 1, \dots, 5\}$ . Prvi korak se može posmatrati kao klasifikacioni korak. U drugom koraku vrši se evaluacija kvaliteta slike za svako od izobličenja. Neka su sa  $q_i$ ,  $\{i = 1, \dots, 5\}$  predstavljene ocene kvaliteta za svaki od pet algoritama za procenu kvaliteta (po jedan za svako od pet izobličenja). Kvalitet slike se onda izražava kao verovatnoćom ponderisana suma

$$BIQI = \sum_{i=1}^5 p_i q_i . \quad (7.21)$$

Za klasifikaciju se koristi mašina potpornih vektora (engl. „support vector machine“) [Vapnik 00] obučena na slikama sa izobličenjima iz LIVE baze za procenu kvaliteta slika. Za određivanje indeksa kvaliteta koristi se regresija potpornih vektora [Vapnik 00] i  $v$ -mašina potpornih vektora [Schölkopf 00].

Rezultati BIQI metrike na slikama sa izobličenjima iz LIVE baze za procenu kvaliteta slika pokazuju veliki stepen korelacije sa ljudskom percepcijom kvaliteta (za svaku sliku sa izobličenjima iz LIVE baze postoje DMOS ocene) [Moorthy 10].

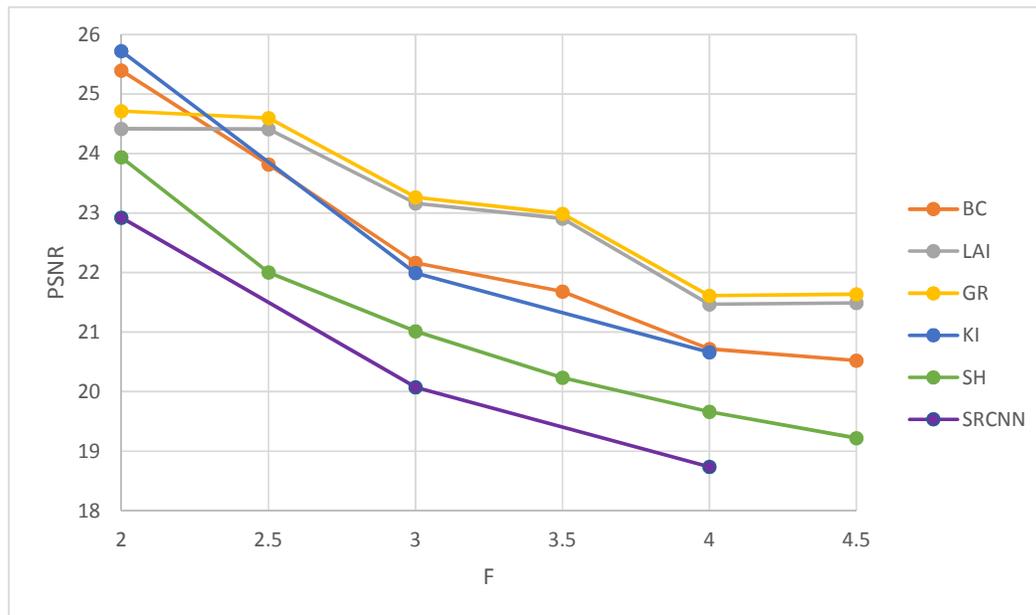
### **7.3 Poređenje korišćenjem objektivnih metoda**

Za objektivnu procenu kvaliteta interpolacije slike korišćene su dve etablirane mere: merenje kvaliteta slike sa težištem na teksturi i ivicama. Za obe mere potrebna je referenta uvećana slika. Dakle, originalna slika smanjena je  $F$  puta korišćenjem SH algoritma i takva smanjena slika uvećana je  $F$  puta korišćenjem evaluiranih algoritama. Rezultujuća slika upoređena je sa originalnom slikom pomoću dve veoma etablirane metrike: indeks mere strukturne sličnosti („the structured similarity index measure“) (SSIM) [Wang 04] i mera oštine slike („the sharpness measure“) (SM) [Hu 06]. Metrike SSIM i SM koriste se za kvantifikaciju kvaliteta interpolacije tekstone i ivica,

respektivno. Dodatno, tradicionalna metrika PSNR je takođe razmotrena imajući u vidu njene mane [Wang 09].

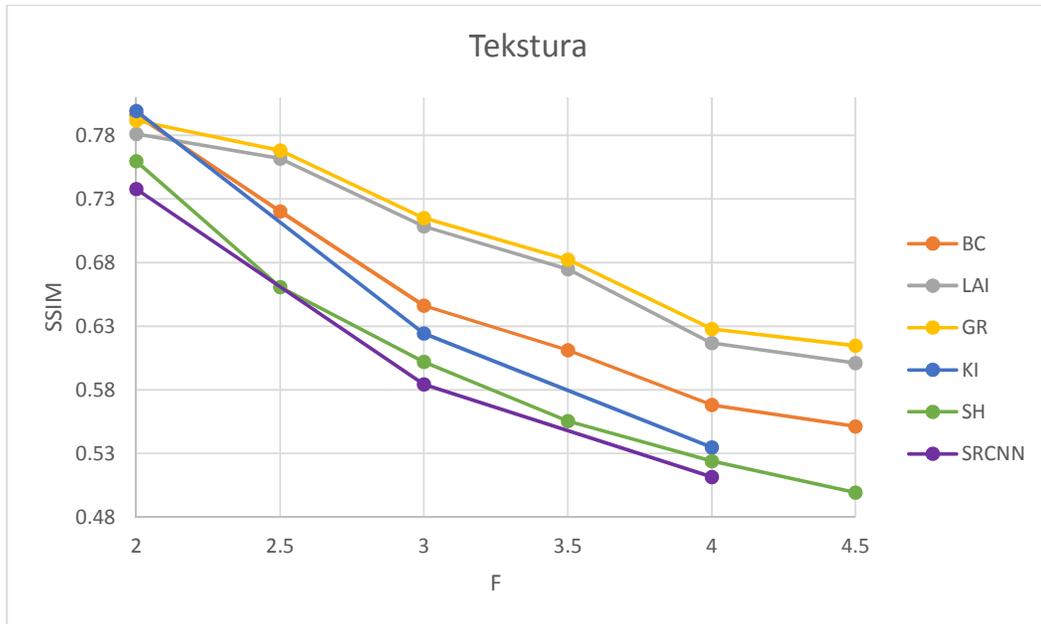
Originalne slike su konvertovane u 8-bitne monohromatske slike. Srednje vrednosti tri metrike (PSNR, SSIM i SM) za svih 29 referentnih slika iz LIVE baze izračunate su za različite faktore skaliranja za sve evaluirane algoritme za interpolaciju. Za KI i SRCNN algoritme prikazani su rezultati samo za celobrojne faktore skaliranja. Za ostale algoritme prikazani su rezultati i za necelobrojne faktore skaliranja.

Rezultati evaluacije bazirane na tradicionalnoj metrici PSNR prikazani su na Slici 7.4. Predložena metoda daje najbolje rezultate za sve faktore skaliranja osim dva, gde su algoritmi BC i KI pokazali nešto bolje rezultate. Ipak, korišćenje metrike PSNR za evaluaciju kvaliteta slike je upitno kao što je razmatrano u [Wang 09].



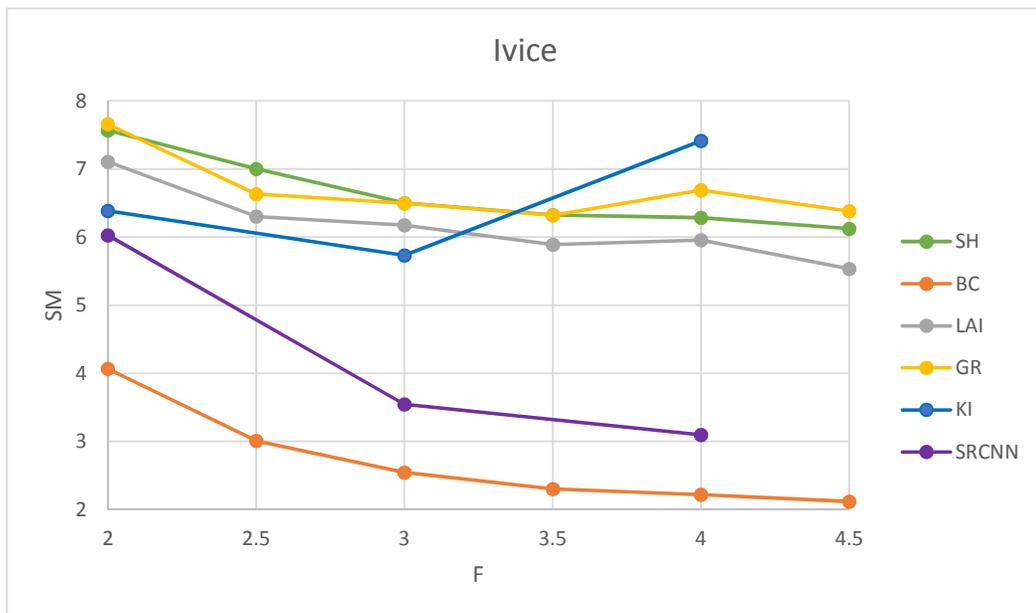
**Slika 7.4 PSNR metrika za različite faktore skaliranja – srednja vrednost za 29 slika iz LIVE referentne baze**

Novo ustanovljena mera strukture slike SSIM je takođe uzeta u obzir u evaluaciji predloženog metoda. Rezultati SSIM mere prikazani su na Slici 7.5 reflektujući prirodan izgled interpolirane slike (tekstura). Opet je predložena metoda pokazala najbolje rezultate za sve faktore skaliranja osim za dva, gde su algoritmi BC i KI pokazali nešto bolje rezultate.



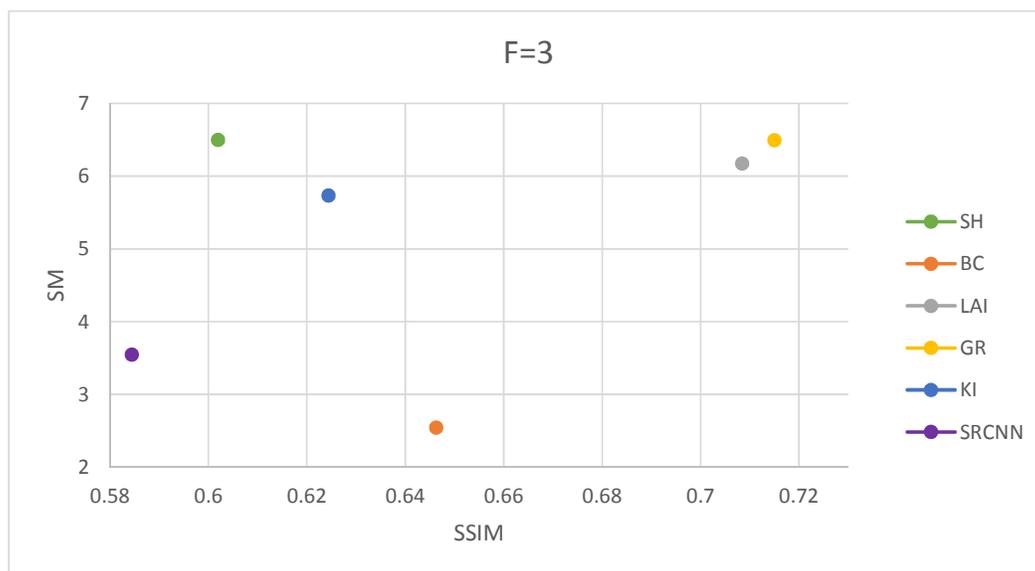
Slika 7.5 SSIM metrika za različite faktore skaliranja – srednja vrednost za 29 slika iz LIVE referentne baze

Za evaluaciju osobine očuvanja ivica korištena je SM mera i rezultati evaluacije prikazani su na Slici 7.6. Predložena metoda pokazala je bolje rezultate za skoro sve faktore skaliranja. Ipak, za faktor skaliranja  $F = 2.5$  SH metoda dala je nešto bolji rezultat kao što je za faktor skaliranja  $F = 4$  KI metoda bila bolja.



**Slika 7.6 SM metrika za različite faktore skaliranja – srednja vrednost za 29 slika iz LIVE referentne baze**

Performanse pojedinih algoritama varirale su uveliko za različite metrike. Na primer, SH interpolacija je imala skoro najbolji rezultate za SM meru, ali najgore rezultate za PSNR i SSIM meru. U cilju vizuelizacije obe karakteristike, očuvanja ivica i prirodne teksture, 2D prezentacija rezultata SSIM i SM metrika prikazana je na Slici 7.7 kao što je predloženo u [Maksimović-Moićević 15]. Prikazani rezultati odgovaraju usrednjenim vrednostima merenja za svih 29 referentnih slika za faktor skaliranja  $F = 3$ . Pri evaluaciji različitih metoda za interpolaciju najbolji balans u opštem kvalitetu odgovara desnom gornjem uglu, gde su locirani rezultati merenja za predloženi GR metod.

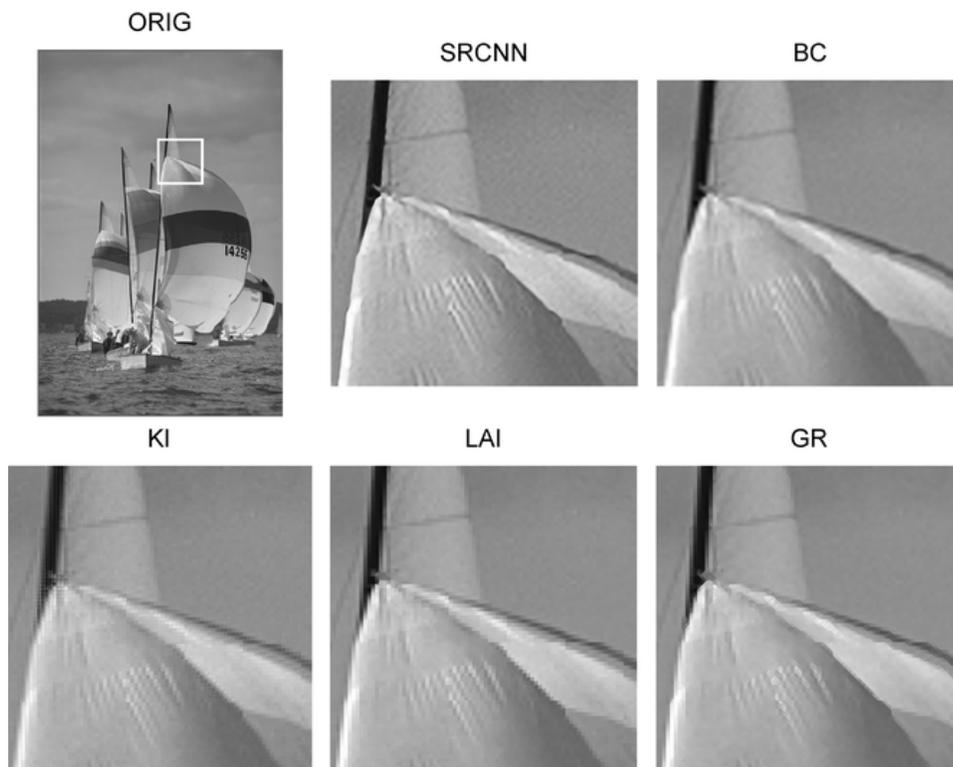


**Slika 7.7 2D vizuelizacija (SSIM / SM) za faktor skaliranja  $F = 3$  / srednja vrednost za 29 slika iz LIVE referentne baze**

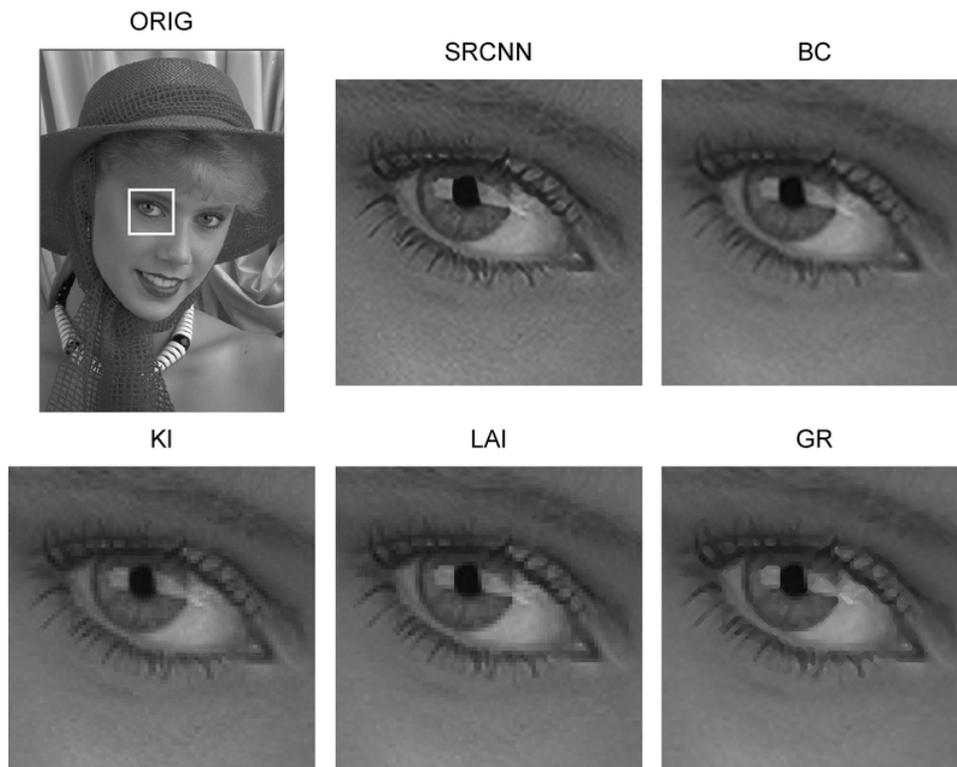
Ukratko, predloženi GR algoritam pruža odličan kompromis između kvaliteta slike po pitanje teksture i oblasti sa ivicama.

#### **7.4 Poređenje korištenjem subjektivnih metoda**

Sledeći izreku „slika vredi hiljadu reči“ subjektivno poređenje je takođe urađeno u ovom radu. Zumirani detalji za dve tipične slike Sailing2 (slika sa velikim homogenim oblastima) i Womanhat (tipičan portret) prikazani su na slikama 7.8 i 7.9 za faktor skaliranja  $F = 9$ .



Slika 7.8 Uvećani detalji interpolirane slike Sailing2 za faktor skaliranja  $F = 9$  korišćenjem algoritama za interpolaciju: a.) original, b.) SRCNN, c.) BC, d.) KI, e.) LAI, f.) GR



**Slika 7.9** Uvećani detalji interpolirane slike Womanhat za faktor skaliranja  $F = 9$  korišćenjem algoritama za interpolaciju: a.) original, b.) SRCNN, c.) BC, d.) KI, e.) LAI, f.) GR

Pored zumiranih detalja za ocenu subjektivnog kvaliteta korišćen je indeks kvaliteta slike bez reference („Blind Image Quality Index“) (BIQI) [Moorthy 09], [Moorthy 10]. Prikazane su usrednjene BIQI vrednosti za svih 29 referentnih slika iz LIVE baze. Vrednosti BIQI mere su u opsegu od 0 do 100 gde manja vrednosti BIQI mere predstavlja bolji kvalitet slike.

**Tabela 7.1** BIQI vrednosti – srednje vrednosti za svih 29 slika iz LIVE baze referentnih slika

Algoritam	Faktor skaliranja $F = 2$	Faktor skaliranja $F = 3$	Faktor skaliranja $F = 4$
SRCNN	31.16	35.60	38.76
BC	31.83	37.85	44.57
LAI	39.00	46.52	36.01
KI	32.69	36.50	38.73
GR	27.01	28.16	30.22

BC algoritam bitno razmazuje ivice. KI algoritam je pravi oštrije ivice sa artifaktima koji liče na bloking efekat/pixelizaciju koji se takođe mog primetiti u

oblastima sa teksturom u blizini ivica. LAI algoritam takođe pravi oštrije ivice nego BC algoritam sa vidljivim bloking efektom oko nekih ivica. SRCNN algoritam daje oštre ivice i pomalo granularnu teksturu. Granularna tekstura je prikladna za ljudsku kožu, ali izgleda čudno na više homogenim oblastima kao što su oblaci ili jedra. Oba slučaja se mogu primetiti na Slikama 7.8. i 7.9.

Predloženi GR algoritam je sačuvao oštrinu ivica uz očuvanje prirodnog izgleda teksture.

Subjektivni utisak zumiranih detalja sa Slika 7.8 i 7.9 je takođe potvrđen vrednostima BIQI merenja (Tabela 7.1). Predloženi metod ima najmanji srednji BIQI rezultat (na 29 referentnih slika) i praćen je SRCNN metodom.

## 7.5 Poređenje vremena potrebnog za interpolaciju

U cilju poređenja kompleksnosti evaluiranih algoritama, vremena potrebna za izvršenje interpolacionih algoritama za slike različitih veličina predstavljena su u Tabeli 7.2:

**Tabela 7.2 Vremena u sekundama potrebna za interpolaciju za razne veličine slika za faktor interpolacije  $F = 2$**

Algoritam	Veličina slike 128x128	Veličina slike 256x256	Veličina slike 512x512	Veličina slike 750x750
BL	0.766	2.938	8.719	23.594
BC	0.734	2.948	11.063	22.438
SH	0.750	2.965	11.609	24.578
GR	1.469	5.798	20.156	41.250
KI	1.609	6.450	23.391	46.078
LAI	4.359	17.055	61.469	133.516
SRCNN	24.208	77.790	253.498	476.267
RLLR	121.719	469.078	1193.900	3997.000
ASDS	368.406	1925.641	6785.100	15367.950

\*Matlab simulacija je korištena za sve algoritme. Merenja su rađena na personalnom računaru sa Intel® Core™ i7 procesorom @2.5Gz sa 8GB memorije i SSD diskom.

Eksperimentalni rezultati su u skladu sa početnim očekivanjima. Prva grupa algoritama (SH, BL i BC algoritmi) pokazala je najmanju složenost što je i očekivano od algoritama kod kojih interpolacija ne zavisi od sadržaja interpolirane slike. Lokalno adaptivni algoritmi (GR, KI i LAI) zahtevaju veći broj operacija. Zahvaljujući

lokalizaciji ekstrakcije osobina slike na najmanju okolinu interpolirane tačke (2 x 2 piksela) njihova složenost nije mnogo veća u poređenju sa najjednostavnijim algoritmima (potvrđeno eksperimentalnim rezultatima). Globalno adaptivni algoritmi (SRCNN, RLLR i ASDS) izdvajaju informacije o strukturi slike na osnovu veće oblasti slike i koriste sofisticiranije algoritme što rezultuje većim računarskim zahtevima. Na osnovu eksperimentalnih rezultata (dobijenih Matlab implementacijama algoritama dobijenih od autora algoritama) jasno je da najveći potencijal za algoritamsku optimizaciju postoji kod algoritama iz treće grupe.

## POGLAVLJE 8.

### **ZAKLJUČAK**

U ovom radu predložen je novi algoritam za interpolaciju slike sa naglaskom na očuvanje ivica uz čuvanje prirodnog izgleda teksture. Predloženi algoritam primenjiv je za bilo koji faktor skaliranja. Osnovni algoritamski koraci su sledeći: Prvo se originalni pikseli grupišu u dva regiona sličnosti i samo pikseli iz jedene grupe piksela se odabiraju za interpolaciju; Zatim se gravitaciji-nalik interpolacija primenjuje na izabrane piksele.

Kao što je pokazano, predloženi algoritam za interpolaciju slike čuva ne samo horizontalne i vertikalne ivice, nego takođe i dijagonalne ivice. Integritet ivica je garantovan predloženim setom interpolacionih pravila. Ovo može biti naročito korisno za slike sa tekstem. Dodatno, gravitaciji-nalik interpolacija pruža prirodan izgled regiona sa teksturom.

Po pitanju kvaliteta ivica i teksture, predloženi algoritam je u skoro svim slučajevima bolji od konkurentskih algoritama. Posmatrajući potrebne računarske resurse (prvenstveno vreme izvršenja) predloženi algoritam je uporediv sa drugim jednostavnim algoritmima i može biti identifikovan kao optimalno rešenje u mnogim aplikacijama na platformama sa ograničenim resursima. Stoga, predloženi algoritam pruža optimalan balans između kvaliteta slike i složenosti izračunavanja.

Predloženo rešenje je zaštićeno patentnom prijavom „METOD ZA INTERPOLACIJU BEZ PROMENE IVICA SA PROMENLJIVIM FAKTOROM SKALIRANJA

THE METHOD OF INTERPOLATION WITHOUT CHANGING THE EDGES WITH VARIABLE SCALING FACTOR“; prijava broj P-2012/0574.

Očekuje se primena realizovanog patenta u okviru komercijalnih sistema koji se realizuju na Odseku za računarsku tehniku i računarske komunikacije i istraživačkom razvojnom institutu RT-RK, sa primenom u digitalnim TV prijemnicima. Saradnja istraživačko razvojnog instituta RT-RK sa svetski priznatim proizvođačima uređaja i komponenti potrošačke elektronike omogućuje plasman na tržišta Evrope i sveta.

## POGLAVLJE 9.

### LITERATURA

- [AADSP1] V. Kovačević, M. Popović, M. Temerinac, N. Teslić, "Arhitekture i algoritmi digitalnih signal procesora I", FTN, Novi Sad, 2005.
- [Amanatiadis 08] A. Amanatiadis, I. Andreadis, "Performance evaluation techniques for image scaling algorithms," IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques, 2008
- [Amanatiadis 09] A. Amanatiadis, I. Andreadis, "A survey on evaluation methods for image interpolation," Meas. Sci. Technol., 20(10), 104015–104023 (2009)
- [Battiato 02] S. Battiato, G. Gallo, F. Stanco, "A locally-adaptive zooming algorithm for digital images," Image Vis. Comput., vol. 20, no. 11, pp.805 -812 2002
- [Battiato 07] S. Battiato, F. Stanco, "ALZ: Adaptive learning for zooming digital images," Proc. IEEE Int. Conf. Consumer Electron., pp.1 -2 2007
- [Blu] T. Blu, P. Thévenaz, M. Unser, "Linear interpolation revitalized," IEEE Trans. on Image Processing, vol. 13, no. 5, pp. 710-719, May 2004.
- [Carrato] S. Carrato, G. Ramponi, S. Marsi, "A simple edge-sensitive image interpolation filter," in Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing, vol. 3, 1996, pp. 711-714.
- [Dong 11] W. Dong, L. Zhang, G. Shi, X. Wu, "Image Deblurring and Super-Resolution by Adaptive Sparse Domain Selection and

- 
- Adaptive Regularization," IEEE Transactions on Image Processing 20(7): 1838-1857 (2011)
- [Dong 14] C. Dong, C. C. Loy, K. He, X. Tang, "Learning a deep convolutional network for image super-resolution," Proc. Eur. Conf. Comput. Vis., pp. 184-199, 2014
- [Dong IEEE16] C. Dong, C. Loy, K. He, X. Tang, "Image super-resolution using deep convolutional networks," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 38, no. 2, pp. 295-307, 2016
- [Dong DemoCode16] C. Dong, Matlab demo code for "Learning a Deep Convolutional Network for Image Super-Resolution" and "Image Super-Resolution Using Deep Convolutional Networks", 2015, Accessed Mart 08, 2016 <[http://mmlab.ie.cuhk.edu.hk/projects/SRCNN/SRCNN\\_v1.zip](http://mmlab.ie.cuhk.edu.hk/projects/SRCNN/SRCNN_v1.zip)>
- [Giachetti 11] A. Giachetti, N. Asuni, "Real-Time Artifact-Free Image Upscaling," Image Processing, IEEE Transactions on, On page(s): 2760 - 2768 Volume: 20, Issue: 10, Oct. 2011
- [Gormish 16] M. Gormish, "Top Downloads in IEEE Xplore [Reader's Choice]," IEEE Signal Processing Magazine, pp. 11 – 12, Volume: 33, Issue: 2, March 2016
- [Hou 78] H. Hou, H. Andrews, "Cubic splines for image interpolation and digital filtering," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process., vol. ASSP-26, no. 6, pp.508 -517 1978
- [Hu 06] H. Hu, G. de Haan, "Low cost robust blur estimator," Proc. IEEE Int. Conf. Image Process., pp.617 -620, 2006
- [Jensen 95] K. Jensen, D. Anastassiou, "Subpixel edge localization and the interpolation of still images," IEEE Trans. Image Process., vol. 4, no. 3, pp.285 -295 1995
- [Jing 13] M. Jing, J. Wu, "Fast image interpolation using directional inverse distance weighting for real-time applications," Optics Communications, Volume 286, pp 111–116, Jan. 2013
- [Jurio 11] A. Jurio , M. Pagola , R. Mesiar, G. Beliakov, H. Bustince, "Image magnification using interval information," IEEE Trans. Image Process., vol. 20, no. 11, pp.3112 - 3123 , 2011.
- [Junyao 11] L. Junyao, W. Huijing, "Image Quality Assessment Based on Structure and Edge Similarity," Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2011 International Conference on, vol. 2, pp. 1105 – 1108, March 2011.
- [Keys 81] R. G. Keys, "Cubic convolution interpolation for digital image processing," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process., vol. ASSP-29, no. 6, pp.1153 -1160 1981

- 
- [Lai 10] Y. Lai, C. Tzeng, H. Wu, "Adaptive image scaling based on local edge directions," Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), 2010 International Conference on
- [Li 01] X. Li, M. T. Orchard, "New edge-directed interpolation," IEEE Trans. Image Process., vol. 10, no. 10, pp.1521 -1527 2001
- [Liu 11] X. Liu, D. Zhao, R. Xiong, S. Ma, W. Gao, H. Sun, "Image Interpolation via Regularized Local Linear Regression," IEEE Transaction on Image Processing, Vol. 20, No. 12, pp. 3455-3469, Dec. 2011.
- [Liu 14] X. Liu, D. Zhao, J. Zhou, W. Gao, H. Sun, "Image Interpolation via Graph-based Bayesian Label Propagation," IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 23, No. 3, pp. 1084-1096, March 2014
- [Maksimović-Moićević 15] S. Maksimović-Moićević, Ž. Lukač, M. Temerinac, "Edge-texture 2D image quality metrics suitable for evaluation of image interpolation algorithms," Computer Science and Information Systems, Vol. 12, No. 2, 405-425. (2015)
- [Moorthy 09] A. K. Moorthy, A. C. Bovik, BIQI Software Release, 2009, Accessed November 17, 2015 <<http://live.ece.utexas.edu/research/quality/biqi.zip>>
- [Moorthy 10] A. K. Moorthy, A. C. Bovik, "A Two-Step Framework for Constructing Blind Image Quality Indices," IEEE Signal Processing Letters , pp. 513-516, vol. 17, no. 5, May 2010.
- [OASDSP1 14] M. Temerinac, S. Berber, Ž. Lukač, "Osnovi algoritama i struktura DSP 1", FTN, Novi Sad, 2014.
- [OASDSP2 16] M. Temerinac, Ž. Lukač, I. Kaštelan, "Osnovi algoritama i struktura DSP 2", FTN, Novi Sad, 2016.
- [Schölkopf 00] B. Schölkopf, A. Smola, R. Williamson, and P. Bartlett, " New Support Vector Algorithms," *Neural Computation*, vol. 12, no. 5, pp. 1207-1245, 2000
- [Shi 02] H. Shi, R. Ward, "Canny edge based image expansion," Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst. (ISCAS)1, pp.785 -788 2002
- [Sheikh 05] H. R. Sheikh , A. C. Bovik and L. Cormack, "No-reference quality assessment using natural scene statistics: JPEG2000", IEEE Trans. Image Process., vol. 14, no. 11, pp. 1918-1927, 2005
- [Sheikh 06] H. R. Sheikh , M. F. Sabir and A. C. Bovik, "A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms", IEEE Trans. Image Process., vol. 15, no. 11, pp. 3440-3451, 2006
- [Sheikh 14] H. R. Sheikh, Z. Wang, L. Cormack, A. C. Bovik, "LIVE Image Quality Assessment Database Release 2", 2014, Accessed
-

- 
- November 21, 2014, <  
<http://live.ece.utexas.edu/research/quality>>.
- [Srivastava 03] A. Srivastava, A. Lee, E. Simoncelli, and S. Zhu, "On advances in statistical modeling of natural images," *J. Math. Imag. Vis.*, vol. 18, no. 1, pp. 17–33, 2003.
- [Vapnik 00] V. Vapnik, *The Nature of Statistical Learning Theory*. Berlin, Germany: Springer Verlag, 2000
- [Zeinali 14] M. Zeinali, H. Ghassemian, M.N. Moghaddasi, "A New Magnification Method for RGB Color Images Based on Subpixels Decomposition," *Signal Processing Letters, IEEE* (Volume:21, Issue: 5), 577 – 580 (2014)
- [Zhang 06] L. Zhang, X. Wu, "An edge-guided image interpolation algorithm via directional filtering and data fusion," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 15, no. 8, pp.2226 -2238 2006
- [Zhang 08] X. Zhang, X. Wu, "Image Interpolation by Adaptive 2-D Autoregressive Modeling and Soft-Decision Estimation," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol.17, No. 6, pp.887-896, 2008.
- [Zhang 11] L. Zhang, L. Zhang, X. Mou and D. Zhang, "FSIM: A Feature Similarity Index for Image Quality Assessment," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 20, no. 8, pp. 2378-2386, 2011.
- [Wang 02] Z. Wang, A.C. Bovik, L. Lu, "Why is image quality assessment so difficult?, Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), 2002 IEEE International Conference on (vol. 4), pp. 3313-3316, May 2002.
- [Wang 04] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: From error visibility to structural similarity," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 13, no. 4, pp.600 -612 2004
- [Wang 09] Z. Wang, A.C. Bovik, "Mean squared error: Love it or leave it? - A new look at signal fidelity measures," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 26, no. 1, pp. 98-117, Jan. 2009.
- [Wang 14] L. Wang, H. Wu, C. Pan, "Fast Image Upsampling via the Displacement Field," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 23, No. 12, pp. 5123 - 5135, Dec. 2014