

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAFIČKI FAKULTET

# ZAVRŠNI RAD

Luka Gamulin



Sveučilište u Zagrebu  
Grafički fakultet

Smjer: Dizajn grafičkih proizvoda

# ZAVRŠNI RAD

SUPER REZOLUCIJA

Mentor:  
v. pred. dr. sc., Miroslav Mikota

Student:  
Luka Gamulin

Zagreb, 2012

## Sažetak

U radu se govori o super rezoluciji, metodi dobivanja slika visoke rezolucije uz pomoć niza slika niske rezolucije koje se međusobno razlikuju malim pomacima. Na početku rada definirani su temeljni pojmovi bitni za razumijevanje super rezolucije. Te metode na osnovu kojih su napravljena mjerenja u eksperimentalnom dijelu. Uz to, u radu se objašnjavaju softverski postupci koji su olakšali mjerenja izbacivši veliku količinu nepotrebnog računanja. Kao npr. PSNR parametar koji sam koristio kao mjera kvalitete rekonstrukcije slika visoke rezolucije u odnosu na neku referentnu sliku.

Cilj ovog rada je usporediti razne metode dobivanja rezolucije te ih međusobno usporediti vizualnom inspekcijom te činjeničnim mjerenjima kako bi, na kraju rada dokučili koja je metoda najefektivnija.

U eksperimentalnom dijelu rada, dakle, uspoređuju se slike velike rezolucije dobivene iz niza niskih vizualnom inspekcijom te mjerenjima kvalitete rekonstrukcije slike. Na temelju tih informacija zaključio sam da Matlab-ov dodatak za dobivanje super rezolucije daje najbolje rezultate u generiranju slika visoke rezolucije.

Ključne riječi: Niz slika niske rezolucije, generirana slika visoke rezolucije, vizualna inspekcija, PSNR parametar

1. Uvod.....	1
2. Teorijski dio.....	2
2.1. Razlučivost.....	2
2.2. Razlučivost fotografija - DPI i PPI.....	2
2.2.1. DPI i PPI.....	5
2.3. Super rezolucija.....	6
2.3.1. Primjena super rezolucije .....	7
2.3.2. Koraci super rezolucije.....	8
2.4. Dekonvolucija.....	10
2.5. Peak signal-to-noise ratio (PSNR).....	11
3. Eksperimentalni dio.....	14
3.1. Postava pokusa.....	14
3.2. Programska podrška.....	15
3.2.1. Matlab dodatak za super rezoluciju.....	15
3.2.1.1 <i>Graphical user interface</i> .....	16
3.2.2. ImageJ dodatak.....	19
4. Rezultati i rasprava .....	21
4.2. Ovisnost kvalitete slike o metodi dekonvolucije i algoritmu za super rezoluciju.....	21
4.3. Usporedba slika s rezultatima primjera s Interneta.....	25
4.4. Ovisnost o broju slika u dodatku za ImageJ.....	26
4.5. Ovisnost o broju iteracija u dodatku za ImageJ.....	29
5. Zaključak.....	32
6. Literatura.....	33

## 1. UVOD

Super rezolucija je kolektivno ime za skupinu metoda obrade slika. Te sve metode imaju dva zajednička koraka nakon kojih slika, u teoriji, ima veću rezoluciju i veći broj vidljivih detalja.

U teorijskom dijelu ovog rada, prvo će se pričati o osnovnim razlučivosti. Kako se ona određuje analogno kod klasičnog fotografskog filma te kako se određuje digitalnom mediju. Što je DPI i PPI te do kakvih problema može doći pri odabiru digitalnog fotoaparata koji najkvalitetnije, odnosno najdetaljnije može prikazati neku sliku. Nakon razlučivosti, tj. rezolucije slijedi objašnjenje što stoji iza naziva super rezolucija. Metode dobivanja super rezolucije te temeljni koraci po kojima su prepoznatljive sve te metode. Razne metode, bez obzira na temeljne korake dobivanja super rezolucije, imaju određene načine stabiliziranja nizova slika, rekonstruiranja te generiranja slika visoke rezolucije. U radu se spominje dekonvolucija što je matematička operacija pomoću koje se obnavlja slika degradirana konvolucijom te *peak signal-to-noise ratio*, što je bio ključan parametar u usporedbi generiranih slika. Spomenuti će se vrlo široka primjenjivost super rezolucije u svakidašnjem svijetu. U radu se koriste dva programa tj. dva dodatka za program zvan ImageJ te za Matlab pomoću kojih je izvršen eksperiment. U teorijskom djelu, također, slijedi opis ta dva dodatka koji se mogu naći besplatno na webu zajedno sa informacijama potrebnim za njihovo korištenje .

U eksperimentalnom djelu, uz pomoć Matlab dodatka, proveden je pokus u kojem je generirano više slika visoke rezolucije raznim algoritmima tj. za svaku metodu super rezolucije napravljeno je po nekoliko slika kako bi dostupni podaci bili detaljno istraženi. Dobivene slike uspoređivane su vizualnom inspekcijom te uz pomoć PSNR (*Peak signal-to-noise ratio*) parametra u odnosu na neku referentnu sliku npr. sliku dobivenu bicubic (standardnim) algoritmom za povećanje rezolucije neke slike. Potom, pomoću dodatka za ImageJ program, ispitana je ovisnost kvalitete slika visoke rezolucije o broju upotrebljenih slika odnosno o broju iteracija kojima algoritam generira sliku visoke rezolucije. Slike su, kao i u prvom dijelu eksperimenta, uspoređivane vizualno i pomoću PSNR parametra.

## **2.TEORIJSKI DIO**

### **2.1. Razlučivost**

Razlučivost ili rezolucija je veličina kojom se definira mogućnost razdvajanja odnosno razaznavanja sitnih detalja, a kojom se opisuje kakvoća slike. Kod klasičnog fotografskog filma razlučivost se određuje brojem linija koje se mogu razaznati na dužni milimetar filma. U digitalnoj tehnici razlučivost se mjeri ovisno o mediju.

Za papirne dokumente razlučivost je broj točkica od kojih je sastavljena slika po kvadratnom inču (engl. dots per inch, DPI). Kvaliteta ispisane, odnosno očitane slike ne ovisi samo o razlučivosti uređaja, nego i o kvaliteti same slike na računalo, odnosno na papiru.

Za zaslone i digitalne fotografije razlučivost je broj piksela (sitnih kvadratića) od kojih je sastavljena slika po horizontali puta (x) broj piksela po vertikali u obliku 1600 x 1200. Broje se sve točkice (engl. piksel) od kojih se sastoji slika. Najčešće se izražava u milijunima piksela ili megapikselima (MP), npr. 7 MP. Što je veći broj točkica to je slika kvalitetnija, manje rasterizirana.

Veća razlučivost u pravilu omogućuje veća povećanja uz zadržavanje oštine prikaza. U digitalnoj tehnici veće razlučivosti zahtijevaju značajno povećanje memorijskih kapaciteta za pohranu materijala (fotografija, videozapisa).

### **2.2. Razlučivost fotografija - DPI i PPI**

Razlučivost je važna za digitalnu fotografiju. Vezana je prije svega za fotoaparate tj. senzore. Ovisno o razlučivosti, tj. broju piksela, fotoaparati mogu biti u različitim razredima. Danas smo svjedoci visokorazlučivih senzora koji mogu isporučiti razlučivost koja premašuje razlučivost objektivna. Postavlja se pitanje: na koji način odabrati broj megapiksela i o čemu ovisi pravilan odabir?

Razlučivost kod digitalne fotografije i grafike je ukupni broj piksela (engl. pixel = picture element) nekog uređaja ili medija (fotoaparata, monitora, fotografije...) kao i broj piksela po jedinici površine. Broj piksela po jedinici površine se izražava “pikselima po inču” ili PPI (engl. piksels per inch).

Razlučivost senzora je ukupni broj piksela – fotodioda koje bilježe dijelove prizora. Današnji digitalni fotoaparati imaju visoku razlučivost (10 i više milijuna piksela tj. MP – megapiksela. 35mm DSLR-i do 24,5 MP, a ima i profesionalnih sustava koji se penju do cca 40 MP). Najvažnije za sve sustave, bili to kompaktni, DSLR, srednje formatni ili bilo koji drugi, je kompatibilnost s optičkim dijelom tj. objektivima. Ako je razlučivost senzora viša od razlučivosti objektiva, fotografija neće biti tehnički kvalitetnija jer je svjetlost ta koja “piše” sliku, a objektiv je taj koji upravlja svjetlost ka senzoru.

Digitalni fotoaparat ima stvarnu razlučivost (ukupni broj fotodioda) i efektivnu razlučivost (razlučivost koju ima fotografija pošto je procesor fotoaparata obradio podatke iz senzora). Efektivna razlučivost je kod većina digitalnih fotoaparata manja od stvarne razlučivosti, jer se boja nekog piksela računa pomoću informacija okolnih piksela. Veći broj piksela daje digitalnoj fotografiji veći potencijal za bolju definiciju detalja tj. oštrinu. Istovremeno, rastom razlučivosti senzora raste i količina iskorištenog memorijskog prostora memorijskih kartica i računala.

Razlučivost je važna i za veličinu ispisa. Broj piksela određuje kvalitetu i veličinu ispisa. Ako je razlučivost viša možemo izraditi fotografije većeg formata bez da kvadratni oblik piksela postane zamjetljiv.

Fotoaparat koji snima fotografije razlučivosti 3,2 MP kreira digitalnu fotografiju koja je dovoljne kvalitete za ispis veličine 13 x 18 cm pri razlučivosti od 300 PPI. Za ispis/tisak odlične kvalitete fotografija u tiskovinama A4 formata (210 x 298 mm) dovoljna je 6 MP razlučivost senzora, a za fotografije formata A3 (298 x 420 mm) iste kvalitete, biti će

potrebno 12 MP. Prilikom odabira fotoaparata najvažnije je definirati namjenu fotografija i prema tome odabrati model. Današnji senzori su dostigli razlučivost objektivna (vezano uz formate tj. dimenzije senzora – 12 – 14 MP za APS-C senzore i 21 – 24 MP za full frame senzore) i svako daljnje povećanje razlučivosti senzora nema smisla ako se ne promijeni čitava ponuda objektivna (izuzetak su neki vrhunski objektivni koji su ionako nedostižni fotoamaterima, entuzijastima i mnogim profesionalcima). Razlučivost sama po sebi nije mjerilo tehničke kvalitete zabilježenih fotografija.

Zamjetne su razlike u kvaliteti između DSLR-a od 6MP i kompakta od 8MP (višu kvalitetu ima DSLR sa 6MP). Povećanje razlučivosti od 2MP nije faktor koji može značajno poboljšati kvalitetu fotografija. Više utjecaja imaju kvaliteta objektivna, obrada fotografija unutar fotoaparata (da se ne spominje obrada RAW datoteke koje mogu zabilježiti DSLR-i) itd. Pri nabavci fotoaparata ne bi se trebalo zaslijepiti brojkama koje označavaju megapiksele.

Optimalna količina PPI ovisna je o vrsti i formatu ispisa ili tiska fotografije. Ako se fotografija ispisa na ink-jet pisaču i papiru slabije kvalitete dovoljno je 150 – 200 PPI. Bolji pisači s kvalitetnim papirima zahtijevaju 300 – 360 PPI da pokažu sve što mogu. Za tiskane materijale se razlučivost fotografije određuje prema linijaturi rastera (novine 85 DPI- najmanje 130 PPI, časopisi 120 DPI – najmanje 180 PPI, 150 DPI – najmanje 225 PPI, tisak visoke kvalitete 300 DPI – 360 PPI).

Može se i pretjerati s brojem piksela. Previše piksela može pogoršati definiciju boja i oštrinu jer u većini ispisnih uređaja računalni program uzima srednju vrijednost više piksela da bi dobio jednu točku na ispisu. Suvremeni programi uglavnom uspješno rješavaju takve pojave. Ako je piksela premalo dobit ćemo vidljive piksele kvadratnog oblika, gubi se definicija i oštrina i tonalne nijanse. Broj piksela za pojedine dimenzije ispisanih fotografija ovisan je i o formatu – za veće formate možemo uporabiti manje PPI, jer se fotografija gleda iz veće udaljenosti. Naše oči su prijemčive na oštrinu od 300 PPI na udaljenosti od 30



cm. Poveća li se udaljenost fotografije od promatrača, sposobnost oka da razlučuje linije se smanjuje.

Sve što PPI radi je da utječe na veličinu ispisa fotografije. Veličinu ispisa možemo mijenjati na dva načina: s ponovnim uzorkovanjem (engl. resample) i bez ponovnog uzorkovanja. Mijenjanje veličine s ponovnim uzorkovanjem mijenja broj PPI, tj. ukupni broj piksela, a time se mijenja i veličina datoteke.

### **2.2.1. DPI i PPI**

DPI znači broj točaka po inču i odnosi se na broj točaka po inču kod ispisnih uređaja. Da bi se dobila neka boja pisač miješa bojila različite boje (njih 3 ili više) i za jedan piksel mora ispisati određeni broj točkica. Broj točkica ovisi o razlučivosti pisača. Danas možemo naći pisače s 4800 DPI. Veći broj DPI ne može povećati PPI. Ta dva parametra kvalitete nisu domena istih medija. PPI se odnosi na raspoložive piksele po inču koji grade fotografiju, a DPI na to koliko će točkica tinte pisač ispisati da bi ispisao piksele na jednom inču papirne plohe. Manji broj DPI može zamaskirati nedostatak PPI.

Da bi se dobila slika sa što vjernijim tonovima jedan piksel se mora ispisati s većim brojem točkica koje su, ovisno o tipu pisača, zapravo mnogo sitnije i od samog piksela. Kvaliteta boja i kvaliteta miješanja boja ovisna je o DPI broju. Ukupna kvaliteta ispisa ovisna je i o papiru koji koristimo. Na papirima visoke kvalitete može doći do izražaja veliki DPI. Na papirima slabije kvalitete tinta se jače razlijeva i visoki DPI nema smisla. Viši DPI usporava ispis i troši više tinte. Optimalna kvaliteta (potrebni DPI) određuju se eksperimentalno za svaki pisač tako da se ispiše fotografija sa najvišim DPI koji nam omogućuje pisač na kvalitetnom papiru. Zatim se DPI pisača smanjuje do razine pri kojoj se počinje primjećivati pad kvalitete. Ako smo to radili u npr. četiri koraka i kod četvrtoga primijetimo pad kvalitete – vraćamo se na DPI trećeg koraka i to koristimo kao optimum.

To je potrebno napraviti sa svakim papirom na kojem radimo jer svaki papir ima različite karakteristike.

Ono što se vidi na ispisanjoj fotografiji rezultat je optimalnog podešavanja niza parametara koji se određuju prema papiru i motivu, a to može izgledati bolje nego kada se postavje maksimalni parametri, a i ekonomičnije je za osobni budžet. U pisačima već postoje unaprijed definirani parametri koji daju optimalne rezultate, ali to vrijedi samo za papire i tinte koje preporučuje proizvođač pisača.

### **2.3. Super rezolucija**

Postoje različite metode kojima se pokušava povećati prostorna rezolucija digitalne slike. Neke od tih metoda koriste napredne tehnike uklanjanja zamućenja i statističke analize kako bi povećale rezoluciju jedne zadane slike no najuspješnije su metode koje za povećanje rezolucije koriste više uzastopnih slika iste scene. To znači da se na temelju niza slika niske rezolucije sastavlja jedna slika visoke rezolucije. Te tehnike obuhvaćene su jedinstvenim nazivom super rezolucija (SR).

Korištenje više uzastopnih slika iste scene pri povećanju rezolucije slike temelji se na činjenici da je svaka od uzastopnih slika pomaknuta u odnosu na ostale te stoga sadrži drugačiju informaciju o sceni od ostalih slika. Dodatne je informacije moguće iskoristiti pri stvaranju slike veće rezolucije. Kako bi dvije slike iste scene sadržavale različite informacije o toj sceni nužno je da one budu međusobno pomaknute za iznos manji od veličine jednog piksela (podpikslni pomak). U tom slučaju pikseli na slikama nisu bili jednako osvjetljeni pa to stvara nove i različite informacije. Ako pomak između dviju slika iznosi cijeli broj piksela, tada su pikseli na slikama bili jednako osvjetljeni pa nema novih informacija po pikselima, već oni sadrže samo pomak scene. Ako pomak iznosi nekoliko piksela tada postupak iskorištavanja novih informacija pri stvaranju slike veće rezolucije postaje iznimno kompliciran te se dodatne informacije ne mogu kvalitetno iskoristiti.

Pomaci između uzastopnih slika pri snimanju mogu biti izazvani namjerno ili se dogoditi slučajno. Kad su pomaci izazvani namjerno, u kontroliranim uvjetima, tada se točno zna koliko oni iznose, odnosno točno se zna koja slika je snimljena s kojim pomakom. U tom slučaju se inzistira da svaka slika ima drukčiji pomak jer se na taj način prikupi najviše novih informacija te je moguće kvalitetnije povećati rezoluciju slike. Izvedba ove metode uključuje postavljanje kamere na platformu koja kontrolirano vibrira. Kod slučajnih pomaka potrebno je na neki način procijeniti koliko iznose pomaci pojedinih slika i to je vrlo važan korak. Bez točnih procjena slučajnih pomaka nemoguće je iskoristiti dodatne informacije pohranjene u nizu uzastopnih slika. Slučajni pomaci statistički pokrivaju većinu pomaka u svim smjerovima, stoga je količina prikupljenih informacija za povećanje rezolucije izravno ovisna o točnosti metode kojom se procjenjuju slučajni pomaci.

### **2.3.1. Primjerna super rezolucije**

Metode super rezolucije mogu se primijeniti na bilo kakvu digitalnu sliku. Zato je možemo primijeniti vrlo velikom broju struka jer se danas, osim u umjetničke svrhe, koriste samo slike u digitalnom obliku zbog lakoće te veće mogućnosti baratanja s njima..

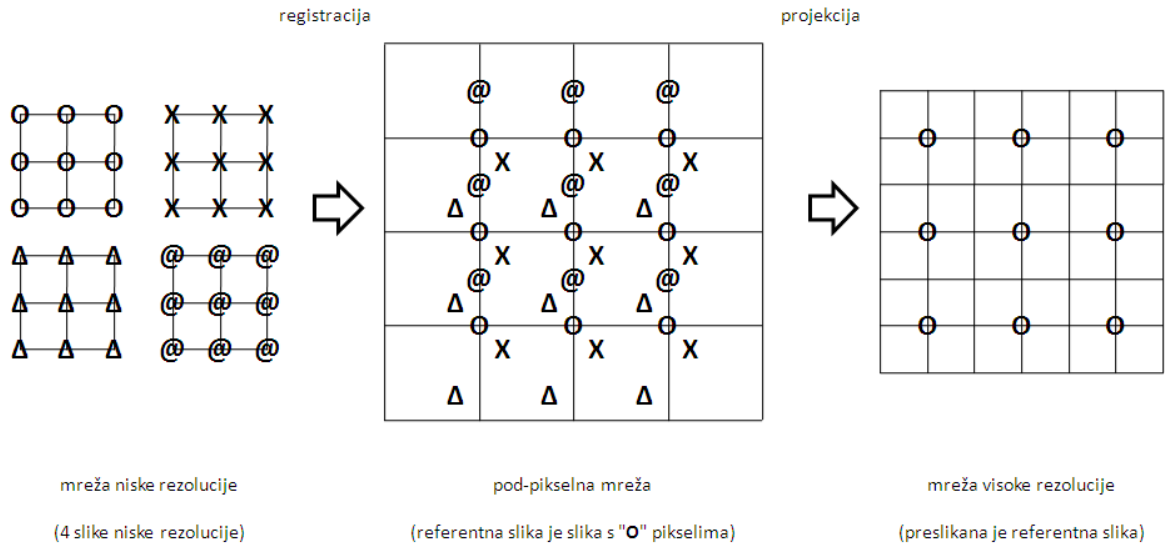
Primjena super rezolucije seže od osobnih projekata gdje, uz malu edukaciju koja se može besplatno naći na webu, korisnik može iz neke snimke dobiti sliku veće rezolucije i vidljivih detalja te iz nje izvući njemu potrebne informacije do profesionalnijih projekata kao npr. forenzički slučajevi gdje pomoću super rezolucije istražitelj ima mogućnost izvlačenja bitnih informacija koje bi na snimci bile prikazane samo kao zamućena ili pikselizirana pozadina. Uz pomoć tih metoda mogu se dobiti bolje snimke rendgena što ima značajne implikacije u medicini. Satelitske snimke mogu se poboljšati te olakšati potrage za ljudima izgubljenima na nekim nedostupnim mjestima ili se pomoću snimki nadzornih kamera mogu identificirati provalnici, ubojice ili odbjegli maloljetnici, i sprječavajući velike materijalne i nematerijalne štete. Također, super rezolucija može se iskoristiti i pri

promatranju nebeskih tijela i pojava otkrivajući detalje i informacije na temelju kojih možemo bolje razumjeti svemir i općenito zakonitosti u njemu.

### **2.3.2. Koraci super rezolucije**

Postoji više metoda dobivanja slika visoke rezolucije. Svaka metoda je zapravo algoritam namijenjen toj svrsi. Ono što je njima svima zajedničko je da procesiraju niz slika niske rezolucije iste scene s malim pomacima kadra u odnosu na jednu, referentnu, sliku. Algoritam sastavlja jednu sliku više rezolucije temeljem informacija dostupnim iz tog niza slika. Sve metode super rezolucije mogu se rastaviti na dva koraka: registracija slike niske rezolucije te rekonstrukcija slike visoke rezolucije.

Tijekom registracije slika niske rezolucije algoritam računa međusobne pomake između slika i referentne slike. Kao referentnu sliku bira se neka od slika iz niza slika niske rezolucije. Moguće je i posebno zadati pomake slika ako su oni poznati. Kako bi konačna slika dala najbolje rezultate potrebno je pobrinuti se da se pomak kadra odvija samo po osima paralelnim plohi kadra jer u suprotnom može doći do rotacije te promjene udaljenosti između snimanog objekta i kamere što će zbuniti algoritam. Nakon što su poznati pomaci između slika dolazi do preklapanja slika te do samog postupka registracije slika.



Slika 1: Registracija slika niske rezolucije [1]

Preklapanjem slika niske rezolucije dobiva se niz mreža pravilno raspoređenih piksela koji zajedno čine mrežu nepravilno raspoređenih piksela koje algoritam treba preslikati na jednu sliku visoke rezolucije kao na slici 1(slika 1). Tim preslikavanjem bavi se sljedeći korak metode super rezolucije.

Rekonstrukcija slike visoke rezolucije je korak u kojem se od prethodno spomenutog niza mreža piksela niske rezolucije pokušava dobiti najtočnija aproksimacija slika visoke rezolucije od informacija ponuđenih u nizu. Cilj ovog koraka je prikupiti podatke izgubljene pri snimanju i kompresiji slike iz malih razlika u slikama niske rezolucije te napraviti najbolju moguću procjenu o stvarnom snimanom kadru što se na kraju generira u mrežu slike velike rezolucije.

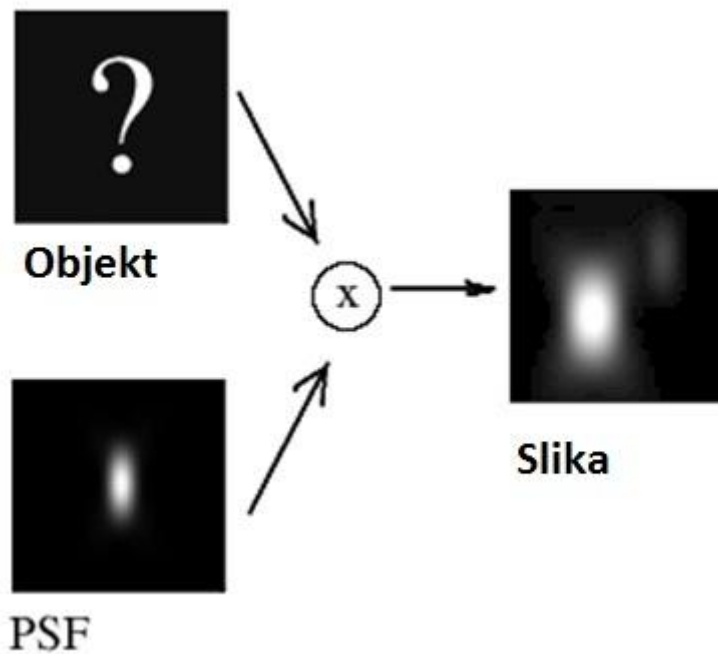
## 2.4. Dekonvolucija

Dekonvolucija je matematička operacija korištena pri obnovi slika degradiranih procesom zvanim konvolucija (npr. šum)[2].

Proces formacije slike je matematički opisan konvolucijskom jednačbom oblika

$$(I) \quad g = h \cdot f$$

gdje slika  $g$  proizlazi iz konvolucije stvarnog izvora svjetlosti  $f$  (objekt) i Point Spread Funkcije (PSF)  $h$ . Drugim riječima, mikroskop daje sliku  $g$ , koja je degradirana verzija objekta  $f$ . Degradacija je prouzročena zamućenjem (konvolucijom) PSF-a. Širi PSF vodi do više zamućenja. PSF može se izmjeriti, npr. snimanjem zrnaca, ili teoretskim optičkim izračunom baziranom na poznavanju mikroskopskih parametara. Ovo je prikazano na slici 2.(slika 2)



Slika 2:Zamućenje slike uzrokovano PSF-om

Cilj je oporaviti originalni objekt  $f$ , i to se radi dekonvolucijom.

## 2.5. Peak signal-to-noise ratio (PSNR)

Peak signal-to-noise ratio, skraćeno PSNR je inženjerski izraz za omjer između maksimalne moguće snage signala i snage buke koja kvari vjernost tog signala [3]. PSNR je obično izražen u logaritamskoj skali decibela zato što mnogi signali imaju vrlo širok dinamički raspon.

PSNR se najčešće koristi kao mjera kvalitete rekonstrukcije kodecima za sažimanje (npr. za sažimanje slika). U tom slučaju je signal originalni podatak, a šum je pogreška do koje je došlo sažimanjem. Pri uspoređivanju kodeka za sažimanje, PSNR je aproksimacija ljudske percepcije rekonstrukcijske kvalitete. Veći PSNR generalno ukazuje da je kvaliteta rekonstrukcije veća no u nekim slučajevima to ne mora biti istina. Potrebno je oprezno tumačiti vrijednost PSNR, a pouzdano je točan samo pri usporedbi rezultata istog kodeka (ili tipa kodeka) i istog sadržaja.

PSNR je najjednostavnije definiran kao logaritam omjera najveće moguće vrijednosti piksela i srednje kvadratne pogreške (engl. mean square error, MSE). S obzirom na  $m \times n$  monokromatsku sliku i bez šuma te njezinu aproksimaciju  $K$  sa šumom, MSE je definiran kao:

$$(II) \text{MSE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2$$

PSNR je definiran kao:

$$\begin{aligned} (III) \text{PSNR} &= 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{\text{MAX}_I^2}{\text{MSE}} \right) \\ &= 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{\text{MAX}_I}{\sqrt{\text{MSE}}} \right) \\ &= 20 \cdot \log_{10}(\text{MAX}_I) - 10 \cdot \log_{10}(\text{MSE}) \end{aligned}$$

Gdje je  $\text{MAX}_I$  najveća moguća vrijednost piksela u slici.

Da bi izračunali PSNR na Internetu su pronađeni algoritmi za programski sustav Matlab koji računaju tu veličinu. Prvi algoritam koji računa PSNR prikazan je na listi 1 (lista 1). Taj algoritam učitava dvije slike, jednu referentnu koja se smješta u varijablu orgimg i drugu sliku koju uspoređujemo s prvom u varijablu mimg. Iz tih dviju veličina funkcija prvo se računa MSE, a potom i Peak signal-to-noise ratio [4].

```
function [out]=PSN(orgimg,mimg)
% PSN is PSNR of Image Peak signal to noise ratio.
% orgimg = Original Image
% mimg = Modified Image
% Size of two images must be same.

% Code Developed BY : Suraj Kamya
% kamyasuraj@yahoo.com

orgimg =im2double(orgimg);
mimg =im2double(mimg);

Mse=sum(sum((orgimg-mimg).^2))/(numel(orgimg)); %Mse = Mean square Error
out=10*log10(1/Mse);
```

Lista 1: Izlist funkcije za računanje Peak signal-to-noise ratio-a u MATLAB-u

Da bi ubrzali učitavanje i računanje slika i računanje PSNR pronašli smo drugi algoritam na Internetu koji učitava niz slika u programski sustav Matlab i za sve kombinacije slika računa PSNR (lista 2).

```
dirOutput = dir('*.*png');
% Učitaj sva imena slika koje želimo uspoređivati u polje.
fileNames = {dirOutput.name}';
```



```

numberOfImageFiles = numel(fileNames);
% Učitaj s diska prvu sliku s liste.
myImage = imread(fileNames{ 1 });
[rows cols numberOfColorchannels] = size(myImage);
% Prelociraj polje, bazirano na veličini prve slike.
sequence = zeros(rows, cols, numberOfImageFiles, class(myImage));
% Dodaj prvu sliku u seriju.
if numberOfColorchannels == 1
sequence(:, :, 1) = myImage;
end
% Kreiraj seriju sliku dodajući nove slike,
% ali samo ako su iste veličine kao prva slika.
for p = 2 : numberOfImageFiles
fprintf('Adding %s\n', fileNames{p});
myImage = imread(fileNames{p});
[rows2 cols2 numberOfColorchannels] = size(myImage);
if numberOfColorchannels == 1 && rows == rows2 && cols == cols2
sequence(:, :, p) = myImage;
end
end
% Izračunaj PSNR za sve kombinacije slika odabirući uvijek različitu kao referentnu.
for i=1:numberOfImageFiles
for j=1:numberOfImageFiles

a=sequence(:, :, i);
b=sequence(:, :, j);
ab(i,j)=PSN(a,b);

end
end

```

```
msgbox('Done!');
```

Lista 2: Izlist programa za učitavanje slika i računanje PSNR-a između dvije učitane slike.

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

#### 3.1. Postava pokusa

U ovom radu uspoređivati će se različite načine stvaranja slika super rezolucije. Za eksperiment koriste se slike koje se mogu naći na Internetu kao primjer super rezolucije. (slika 3)



Slika 3: Slika stanice raka u rezoluciji 32 x 32 piksela

Osim toga koristiti će se slike napravljene pomoću kamere na mobitelu, programa Virtual Dub i Fast Stone Image Viewer-a. Pomoću mobitela snima se kratak filmić (4 sekunde) nekog teksta držeći mobitel nefiksiran u ruci. Mobitel je nefiksiran zato što za izradu slika super rezolucije slike niske rezolucije pomoću kojih se to radi ne smiju biti iste, mora postojati pomak od nekoliko piksela. Snimljeni film učitava se u Virtual Dub te iz filma rezolucije 1280 x 720 izrezuje kvadratić površine 50 x 50 piksela. Iz tako reduciranog filmića opet pomoću programa Virtual Dub izlučuju se slike, dobiveni niz od gotovo

jednake 263 slike koristi se za stvaranje slika visoke rezolucije. Pošto dodatak napisanu ImageJ programu može koristiti samo crno bijele slike prije primjene programa za super rezoluciju svih 263 slika treba prebaciti u 8-bitne crno bijele slike (slika 4)



Slika 4: Slika dobivena pomoću mobitela u rezoluciji 50 x 50 piksela

Pomoću Matlab dodatka i slika napravljenih mobitelom uspoređuje se kvaliteta slika dobivenih različitim kombinacijama algoritama dostupnih u programu, a pomoću dodatka u ImageJ programu provjerava se ovisnost kvalitete dobivene slike visoke rezolucije o broju iteracija i broju slika niske rezolucije upotrijebljenih u pokusu.

## **3.2. Programska podrška**

### **3.2.1. Matlab dodatak za super rezoluciju**

Kao prvi program za dobivanje super rezolucije iskoristiti će se jedna aplikacija razvijena u Matlabu koja služi za implementaciju raznih SR algoritama opisanih u literaturi [5,6,7,8,9].

Program ima dva načina rada, realni i simulirani. U simuliranom možemo procijeniti kvalitetu krajnjih visokorezolucijskih slika (engl. high resolution, HR) i pogrešku u procijenjenim parametrima za svaku metodu. Realni način rada omogućuje primjenu SR metoda na stvarnim materijalima.

Ovisno o izabranom načinu rada i prije pokretanja određene metode, korisnik mora unijeti informacije potrebne za odabranu metodu.

GUI (engl. graphical user interface) je napravljen tako da se korisnik može relativno jednostavno i intuitivno snaći, ispuniti potrebne informacije te završiti proces SR metode

### 3.2.1.1. Graphical user interface

#### Instalacija

Aplikacija se ne mora instalirati. Da bi dobili pristup aplikaciji potrebno je samo raspakirati arhivirani paket. Aplikacija je razvijena u MATLABU-u verzije 7.9.0.529 (R2009b) te je testirana da radi samo na toj verziji

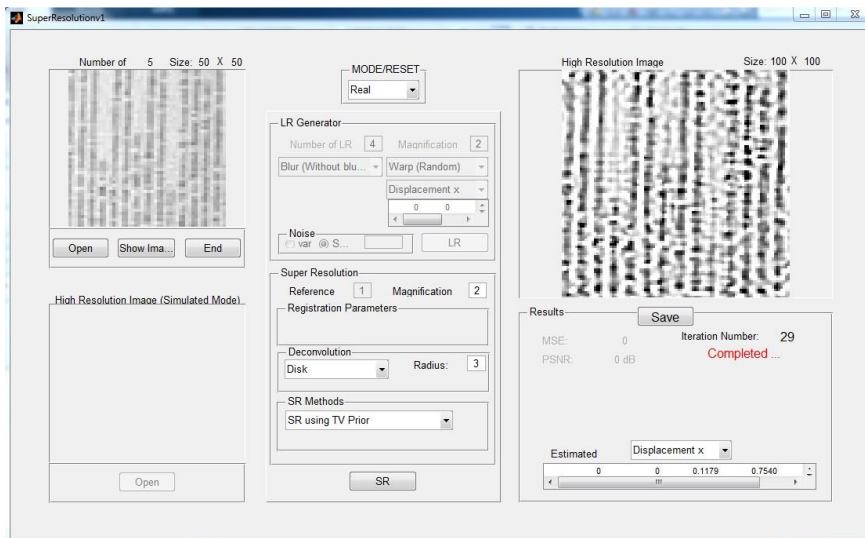
#### Interakcija s aplikacijom

Glavni koraci pokretanja aplikacije:

1. Pokrenuti aplikaciju
2. Odabrati način rada (realni ili simulirani)
3. Ispuniti početne informacije
4. Izabrati SR metodu
5. Promatranje izvršenja metode te opcije za spremanje

#### Pokretanje aplikacije

Potrebno je pokrenuti Matlab, promijeniti trenutni direktorij u mapu aplikacije te pokrenuti program *SuperResolution1.m*. Za nekoliko sekundi pojaviti će se GUI (slika 5).



Slika 5. GUI SuperResolution dodatka za Matlab

1. Mode/Reset: Omogućava korisniku da izabere između realnog i simuliranog načina rada te da resetira program.
2. Low Resolution Image: Taj prostor pokazuje korištene simulirane ili realne uzorke ovisno o načinu rada
3. High Resolution Image (simulated mode): Koristi se samo u simuliranom modu te služi za učitavanje i vizualiziranje HR slike od koje će nastati LR (engl. low resolution) uzorci
4. LR Generator: Aaktivan jedino u simuliranom načinu rada, a omogućava unos potrebnih informacija za generiranje LR uzoraka od slika učitanih u prethodnom polju
5. Super Resolution: Omogućuje korisniku da izabere koju SR metodu želi primijeniti na LR uzorke
6. High Resolution Image: Ovaj prostor prikazuje krajnju HR sliku za svaku iteraciju. Proces rekonstrukcije također se može ovdje promatrati
7. Results: U simuliranom načinu rada, ovdje se vidi mjera pogreške HR rekonstrukcije te vrijednost realnih i procijenjenih parametara. U realnom načinu rada, pokazuje procijenjene parametre registracije.

#### Simulirani način rada

Kada je odabran simulirani način, aktivirana je "Open" tipka u "High Resolution Image (Simulated Mode)" polju. Pritiskom na tipku otvara se upravitelj datoteka te od tamo možemo učitati HR sliku za simulirani eksperiment. Nakon učitavanja slike "LR Generator" postane omogućen.

Vrijednosti svih polja su podešene na početno stanje i moguće ih je mijenjati u bilo kojem trenutku.

Funkcija zamućenja je definirana izabranom stavkom. Za svaki tip zamućenja, aplikacija zatraži vrijednosti koeficijenata za matricu zamućenja.

Kada se izabere "Customized" opcija zamućenja, otvori se novi prozor u kojem su predstavljeni koeficijenti zamućenja. Dodatno, moguće je spremiti ili učitati prijašnje postavke.

Parametri registracije se mogu definirati u tri obrasca: Warp (Random), Customized i Example, ovisno o tome želimo li ih generirati nasumično posebno unijeti parametre (kut rotacije te vertikalne i horizontalne pomake) za svaki uzorak ili koristeći zadane parametre. Konačno, korisnik mora zadati nivo "zero-mean gaussian noise" koji se može definirati u dva oblika: unošenjem razlike šuma ili postavljanjem omjera "signal-to-noise" (SNR), oba na posebnim tipkama. Na početku je uključen SNR način sa vrijednosti od 30 dB.

LR tipka je aktivana kada su svi potrebni parametri zadani. Na kraju je potrebno spremiti generirane slike tako da upišemo neko ime u prozoru upravitelja datoteka.

Sljedeći korak je primijeniti SR metode softvera na dobivene generirane slike. Potrebno je odabrati SR metodu. U ovom trenutku aktivno je 5 polja: Low Resolution Image, Mode, High Resolution Image (Simulates Mode), LR Generator i Super Resolution.

#### Realni način rada

Polje za unos slika otvara se u realnom načinu rada. Pritiskom na tipku "Open", upravitelj datoteka omogućava pristup slikama na disku. Broj slika koje se mogu unijeti nije ograničen i u program se unose jedna po jedna. Na kraju unosa treba stisnuti "End" što aktivira panel za podešavanje parametara za izradu slika u super rezoluciji. Na tom panelu mogu se odabrati koja će slika od unesenih biti referentna, koliko će biti povećanje rezolucije, algoritam dekonvoluciju i algoritam za izračun visoke tj. super rezolucije.

Tablica 1: Algoritmi izrade slika izrade super rezolucije u SR softver dodatku za Matlab [5,6,7,8,9]

Oznaka metode	Metoda SR
1	SR using TV Prior
2	SR using Norm L1 Prior
3	SR using SAR Prior
4	SR using combination Norm L1 SAR
5	SR using combination TV SAR

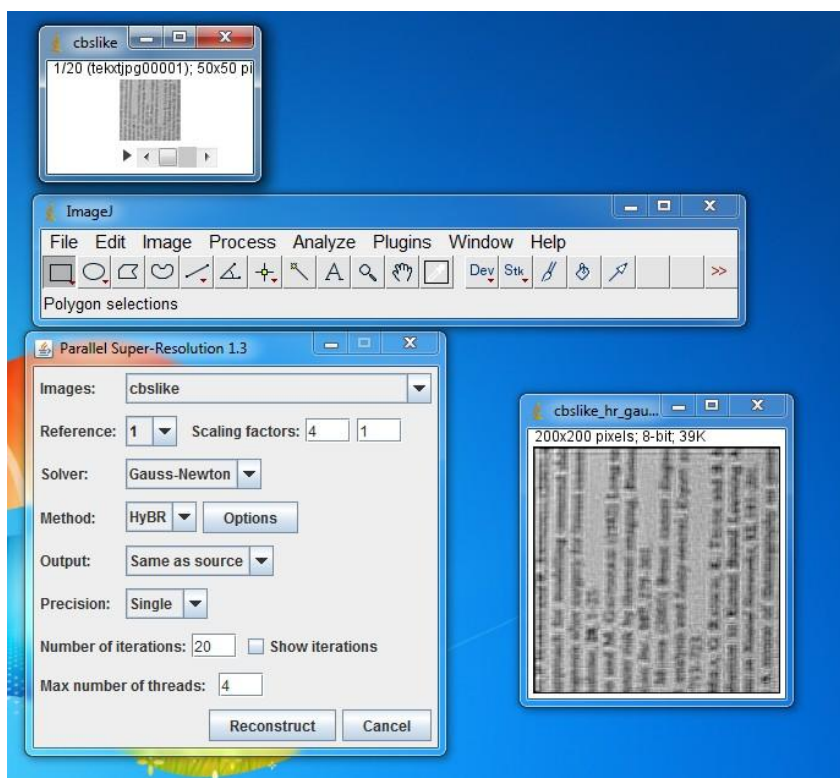
Postoje četiri algoritma za dekonvoluciju: blur, gaussian, average i disk. Postoji i mogućnost samostalnog unosa parametara. Super rezoluciju možemo izračunati pomoću pet predloženih algoritama.

### 3.2.2. ImageJ dodatak

Drugi program koji se koristi u ovom radu je Parallel super resolution dodatak za imageJ program [10]. ImageJ je otvoreni tip programa baziran na Java-i koji služi za procesiranje slika. Program je razvijen na Nacionalnom institutu za zdravlje Sjedinjenih Američkih Država. Dizajniran je javno dostupnim kodom što ga čini fleksibilnijim i omogućava stvaranje velikog broja dodataka. Prilagođene dodatke za stjecanje, analizu i procesiranje moguće je razviti koristeći ImageJ-ev ugrađeni Java kompajler. Dodacima koje su napisali korisnici moguće je riješiti vrlo velik broj problema kod obrade i analize slika, od trodimenzionalnog snimanja živih stanica do radioloških obrada slika, usporedbe podataka višestrukih sistema za slikanje te automatiziranih hematoloških sustava. ImageJ-ev sustav dodataka i okolina za razvijanje prilagođenih dodataka popularizirali su ga kao platformu za učenje obrade slika.

Parallel Super-Resolution višenitni je ImageJ dodatak za super-rezoluciju (slika 5). Super-rezolucija je problem fuzije i rekonstrukcije slike gdje se poboljšana rezolucija postiže iz nekoliko geometrijski deformiranih slika niže rezolucije. Krajnja slika nije samo slika veće rezolucije (kao kod interpolacije slike) nego na njoj ima više vidljivih detalja.

Dodatak podržava proizvoljne veličine snopova slika (2D slike za unošenje male rezolucije) i 4D "hiper-snopove" (3D slike male rezolucije). Korisnik može odabrati povećanje slike i referentnu sliku prema kojoj se radi registracija ostalih slika. Program koristi Gauss-Newton algoritam [11] za rješavanje nelinearnih problema te HyBR algoritam [12] algoritam za lineare probleme. Ima mogućnost različitih tipova izlaza (kao izvor, Byte, Short i Float), mogućnost jednostruke i dvostruke preciznosti, opciju za prikazivanje iteracija, nemodalni GUI te dodatak koji može biti pozvan iz ImageJ makroa.



Slika 5. GUI Parallel SuperResolution dodatka za ImageJ



Dodatak ima i određena ograničenja. Pri geometrijskom iskrivljavanju slika niske rezolucije, limitirano je na linearno povezane promjene te ne podržava slike u boji.

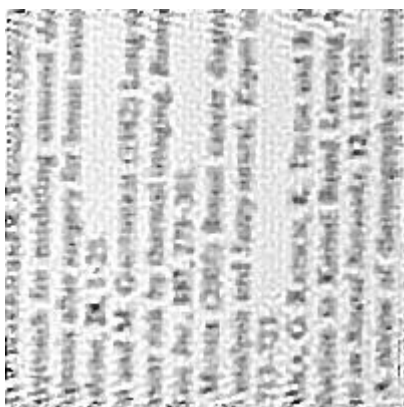
Primjer

Stanica raka iz prostate štakora. Referenca je prva slika, faktori povećanja su 8 i 1, korišteni su Gauss-Newton i HyBR algoritam, izlaz je u istom formatu kao i ulazne slike, a računa se sa jednostrukom preciznošću uz dvije iteracije.

## 4. REZULTATI I RASPRAVA

### 4.2. Ovisnost kvalitete slike o metodi dekonvolucije i algoritmu za super rezoluciju

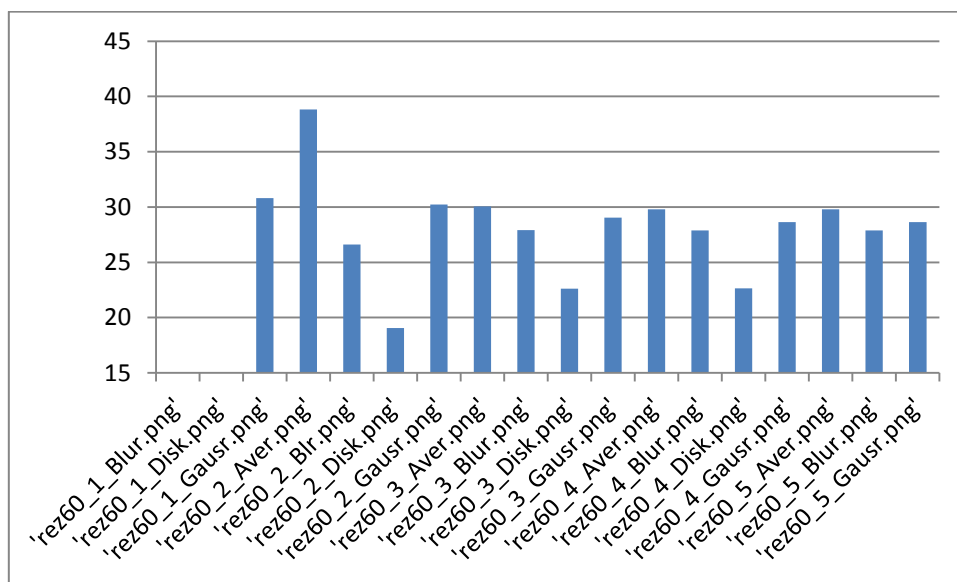
Pokus se sastoji od dva djela. U prvom djelu promatrati će se koja od ponuđenih metoda u dodatku SR softvera stvara najbolje slike super rezolucije. Kao kriterij za kvalitetu uzima se čitljivost slike visoke rezolucije, a slike se uspoređuju *peak signal-to-noise ratio*-om. Dodatak SR softver za Matlab omogućava četiri metode dekonvolucije i pet metodota stvaranja slike visoke rezolucije što znači da se u radu generira dvadeset slika visoke rezolucije. Sve slike koje se rade pomoću ovog programa četiri su puta veće od početne slike niske rezolucije odnosno imaju rezoluciju 200 x 200. (slika 6)



Slika 6: Dobivena slika visoke rezolucije

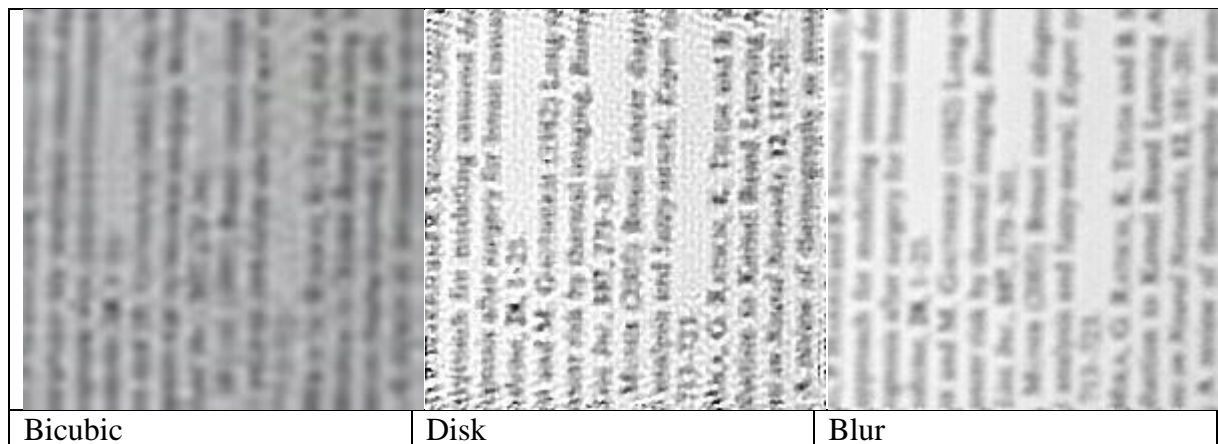


su na slici 7 (slika 7), a vidljivo je da su najčistkije slike dobivene pomoću disk metode dekonvolucije dok promjena metode super rezolucije nije značajno poboljšala rezultat.



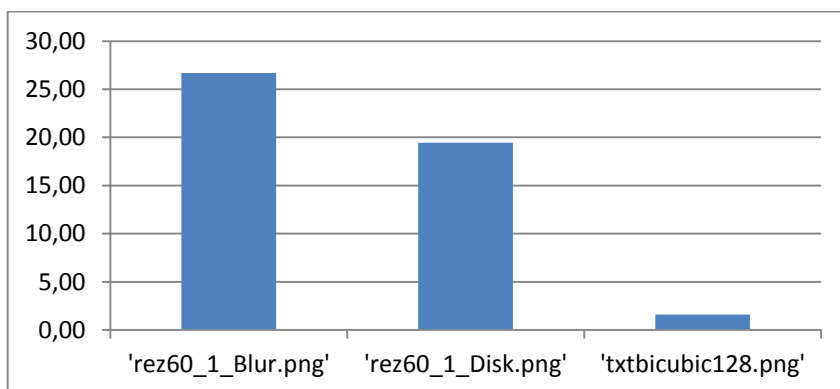
Slika 8: Usporedba metoda generiranja slika super rezolucije PSNR

Dobivene slike uspoređuju se izračunavši PSNR parametar. PSNR parametar mora imati referentnu sliku, pa se za nju odabire slika visoke rezolucije dobivena iz 60 sličica niske rezolucije pomoću blur dekonvolucije i SR metode 1 (tablica 1) u dodatku za Matlab. Usporedba pokazuje da su najveće razlike između referentne slike i promatrane slike nastale kod slika dobivenih disk metodom dekonvolucije što se poklapa s vizualnim zaključkom slike 7 (slika 7). Slika 8 (slika 8) pokazuje, unatoč vizualnoj sličnosti slika dobivenih ostalim metodama, da razlike među njima ipak postoje. Slike dobivene disk dekonvolucijom različitim SR metodama nisu jednake; slike dobivene metodom 1 i 2 značajno su drugačije od referentne slike, za razliku od slika dobivenih metodama 3 i 4. Slike dobivene ostalim metodama dekonvolucije za metode SR 3,4 i 5 prema PSNR parametru su jako slične.



Slika 9: Usporedba slika dobivenih metodama super rezolucije i klasičnom bicubic metodom povećanja rezolucije



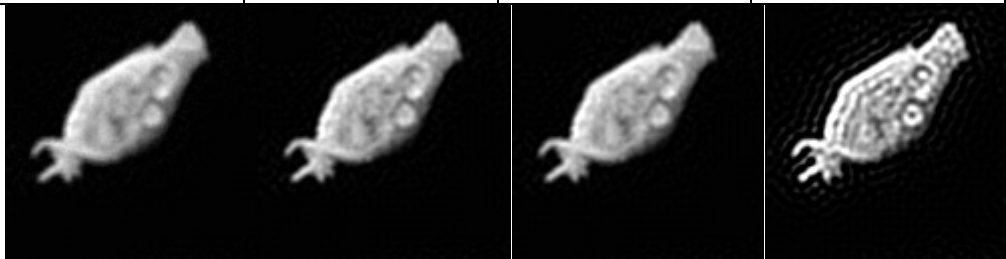
Usporedbom slika povećane rezolucije dobivene metodama super rezolucije odnosno klasičnom bicubic metodom, vidimo da bicubic metoda ima najveću količinu nepotrebnog šuma. Vizualnom usporedbom na slici 9 (slika 9) vidimo da najviše informacije nosi slika dobivena disk metodom dekonvolucije. Na isti zaključak ukazuje i slika 10 (slika 10) na kojoj je prikazan PSNR za iste slike koje su prikazane i na slici 9 (slika 9). PSNR je opet izračunat pomoću iste referentne slike kao i u slučaju slike 8 (slika 8). Najveća razlika u odnosu na referentnu sliku je između slike dobivene bicubic metodom, a to se može objasniti velikom količinom šuma na toj slici.



Slika 10: Usporedba PSNR slika dobivenih klasičnom metodom i metodama SR

### 4.3. Usporedba slika s rezultatima primjera s Interneta

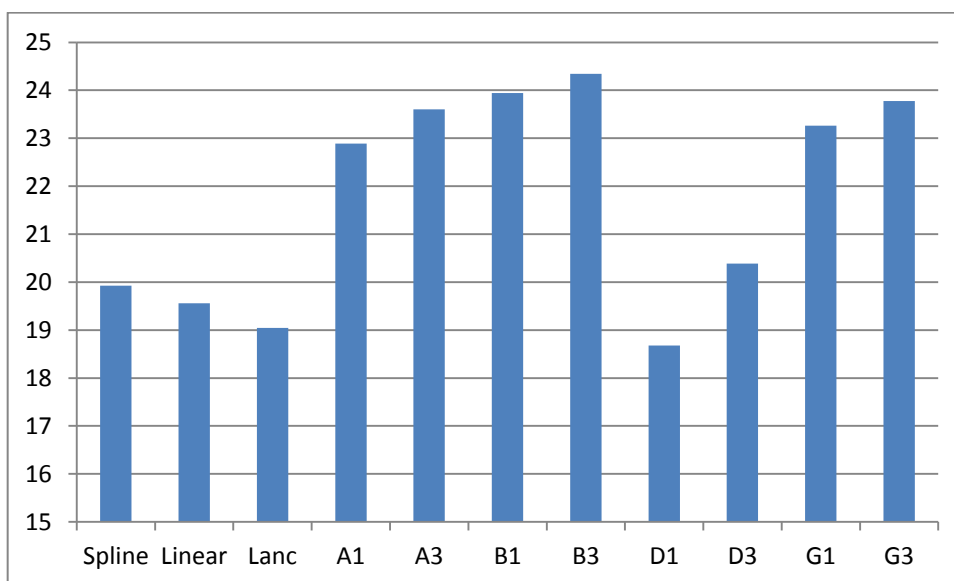
Sličan pokus napravljen je sa slikama koje kao primjer dolaze s drugim programom, dodatkom za ImageJ za super rezoluciju. Pokus je ponovljen za sva četiri tipa dekonvolucije i tri algoritma za super rezoluciju. Osim toga slika visoke rezolucije generirana je s četiri klasična algoritma za promjenu rezolucije slike. Sve generirane slike povećane su četiri puta u odnosu na početnu sliku niske rezolucije.

Klasična metoda				
	Bicubic	Lanc	Spline	Linear
Metoda 1				
Metoda 2				
Dekonvolucija	Blur	Average	Gaussian	Disk

Slika 11: Vizualna usporedba slika visoke rezolucije pomoću primjera pronađenih na Internetu za različite metode stvaranja slike visoke rezolucije.

Rezultati prikazani na slici 11 (slika 11) dobiveni iz slika ponuđenih kao primjer na Internetu ponašaju se na isti način kao i slike visoke rezolucije dobivene iz slika niske

rezolucije koje su snimane na početku eksperimenta. Vizualna inspekcija pokazuje da na slikama dobivenih metodom super rezolucije broj detalja vidljivih na slici je veći. Slike dobivene pomoću disk metode dekonvolucije naizgled su oštrije od drugih, međutim, moguće je da su detalji uočljivi na toj slici stvoreni samom generacijom slike visoke rezolucije, a da u stvarnosti ne postoje. Rezultati su također uspoređeni pomoću PSNR-a i prikazani na slici 12 (slika 12). Kao referentnu sliku uzeta je slika dobivena sa klasičnom bicubic metodom.



Slika 12: PSNR slika visoke rezolucije dobivene različitim metodama. Referentna slika dobivena je pomoću bicubic metode.

#### 4.4. Ovisnost o broju slika u dodatku za ImageJ

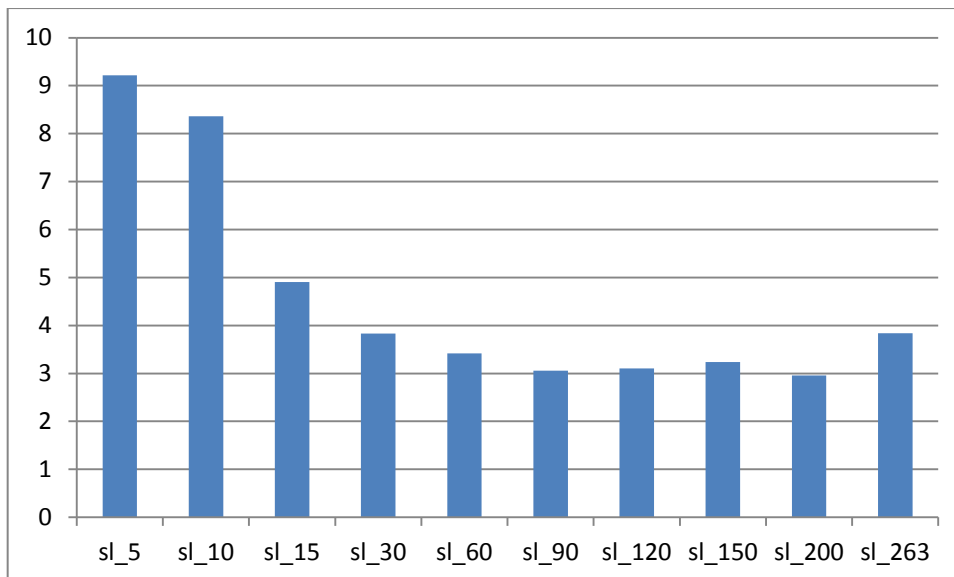
Drugi dio eksperimenta napravljen je pomoću dodatka za super rezoluciju programa ImageJ. Tu je uspoređivana kvaliteta dobivene slike u ovisnosti o broju iteracija i broju slika upotrijebljenih za SR. Za istraživanje ovisnosti kvalitete dobivene slike o broju upotrijebljenih slika niske rezolucije, broj upotrijebljenih slika mijenjan je od 5 od

maksimalnog broja 263 uz 20 iteracija. Sve kombinacije parametara za proučavanje ovisnosti kvalitete slike o broju upotrijebljenih slika prikazan je u tablici 2. (tablica 2)

Tablica 2: Kombinacija parametara za stvaranje slika visoke rezolucije – ovisnost o broju slika

Slika	Broj upotrijebljenih slika	Broj iteracija
sl_5	5	20
sl_10	10	20
sl_15	15	20
sl_30	30	20
sl_60	60	20
sl_90	90	20
sl_120	120	20
sl_150	150	20
sl_200	200	20
sl_263	263	20

Dobiveni rezultati uspoređeni su pomoću PSNR parametra. Rezultati su prikazani na slici 13. (slika 13)



Slika 13: PSNR vrijednosti za slike visoke rezolucije dobivene s kombinacijom različitog broja slika niske rezolucije

Sa slike 13 (slika 13) vidljivo je da se kombinacijom različitog broja slika niske rezolucije stvara drugačija slika super rezolucije. Sve slike su uspoređivane sa slikom dobivenom pomoću bicubic algoritma i programa Faststone Image Viewer. Sa slike 12 također je vidljivo da se s povećanjem broja iskorištenih slika povećava razlika između referentne i generiranih slika do broja od 90 upotrjebljenih slika, a tada se razlika ponovno počinje smanjivati. Rezultat ovog eksperimenta ukazuje s jedne strane na očekivani zaključak da slika visoke rezolucije dobivena metodom super rezolucije ovisi o broju upotrjebljenih slika, ali je neočekivano smanjivanje te razlike nakon određenog broja slika. To ponašanje možemo objasniti velikim pomacima između slika nastalih zbog nefiksirane kamere koju smo upotrijebili za njihovo snimanje. Mogu pretpostaviti da povećani broj slika donosi dodatne informacije koje umjesto da popravljaju sliku visoke rezolucije u rezultatnu sliku unose dodatni šum. Zbog toga slika postaje mutna i slična referentnoj slici dobivenoj bicubic metodom što rezultira povećanjem PSNR-a.



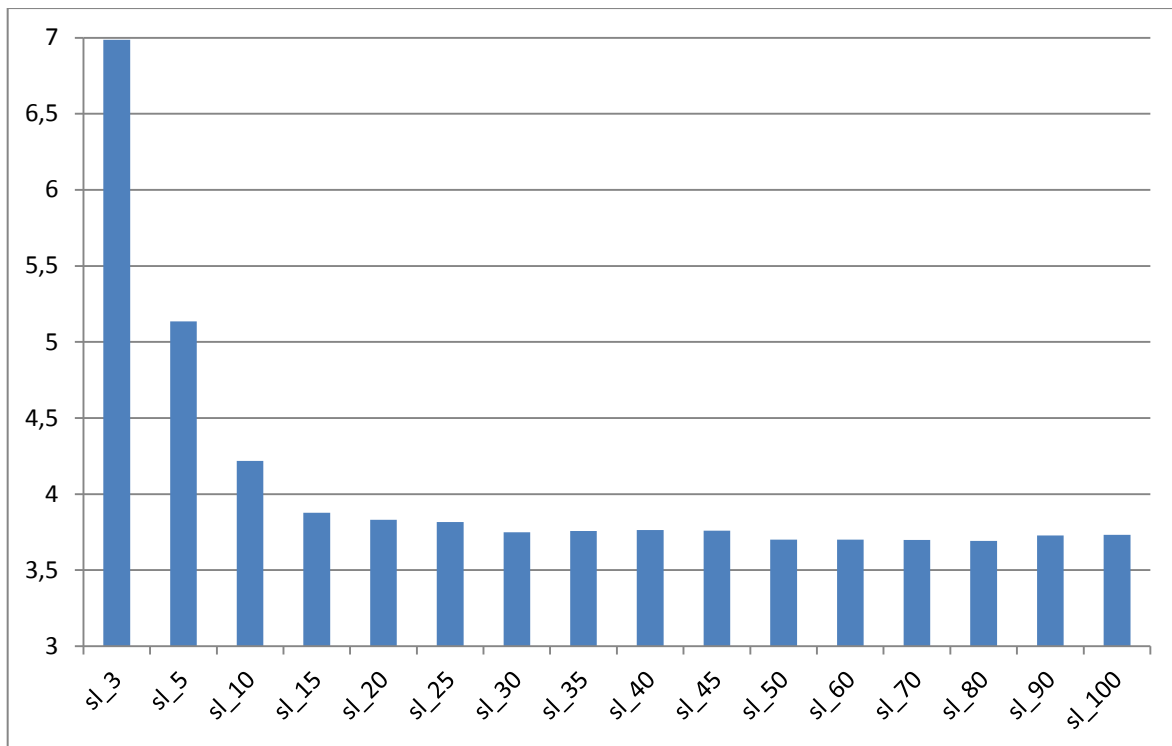
#### 4.5. Ovisnost o broju iteracija u dodatku za ImageJ

Ovisnost generirane slike visoke rezolucije o broju iteracija napravljeno je također pomoću ImageJ dodatka Parallel super resolution jer on omogućava definiranje broja iteracija. Broj slika niske rezolucije fiksirano je na 30 jer se to pokazalo kao optimalan broj u prvom djelu ovog eksperimenta, a broj iteracija mijenjan je od 3 do 100. Točna distribucija broja iteracija prikazana je u tablici 3. (tablica 3)

Tablica 3: Kombinacija parametara za stvaranje slika visoke rezolucije – ovisnost o broju iteracija


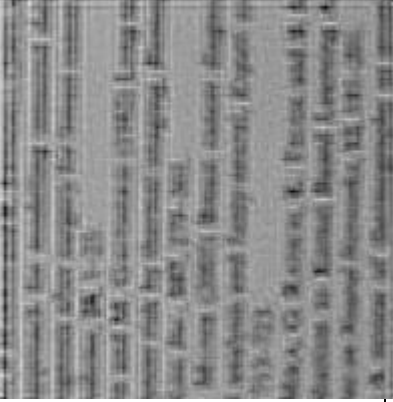
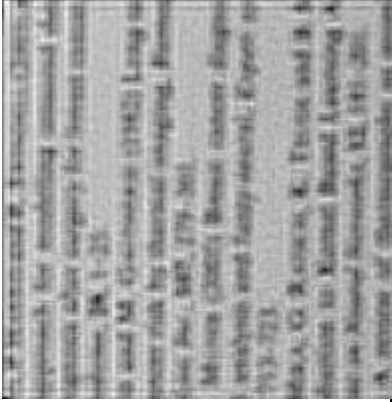
Slika	Broj iteracija	Broj slika
sl_3	3	30
sl_5	5	30
sl_10	10	30
sl_15	15	30
sl_20	20	30
sl_25	25	30
sl_30	30	30
sl_35	35	30
sl_40	40	30
sl_45	45	30
sl_50	50	30
sl_60	60	30
sl_70	70	30
sl_80	80	30
sl_90	90	30
sl_100	100	30

Rezultati generiranja slika visoke rezolucije u ovisnosti o broju iteracija uspoređeni su pomoću PSNR parametra. Rezultati su prikazani na slici 14. (slika 14)



Slika 14: Promjena PSNR-a u ovisnosti o broju iteracija. Broj iteracija prikazan je brojkom na x-osi

Slike dobivene varijacijom broja iteracija uspoređene su s referentnom slikom visoke rezolucije dobivene bicubic metodom pomoću PSNR-a. PSNR mjeri razliku između referentne i promatrane slike pa sa slike 15 vidi se da se povećanjem broja iteracija PSNR smanjuje odnosno razlika između referentne i promatrane slike raste.

		
Bicubic	5 iteracija	30 iteracija

Slika 16 Usporedba slika visoke rezolucije dobivenih različitim brojem iteracija s slikom dobivene bicubic algoritmom.

Vizualnom inspekcijom slika prikazanih na slici 16 vidi se da subjektivna procjena kvalitete slike ukazuje na povećanje kvalitete slika povećanjem broja iteracija. Tekst na slici dobivenoj bicubic metodom potpuno je nečitljiv dok je tekst dobiven metodom SR u programu ImageJ s 30 iteracija donekle čitljiv. Neka slova mogu se prepoznati. Taj subjektivni rezultat poklapa se s vrijednostima PSNR-a prikazanih na slici 15 gdje se PSNR smanjivao povećanjem broja iteracija. To znači da se razlika između referentne slike dobivene klasičnom bicubic metodom i slika visoke rezolucije dobivenih SR metodom povećava.

## 5. ZAKLJUČAK

Super rezolucija je, dakle metoda kojom se generiraju slike visoke rezolucije na temelju sitnih pomaka između pojedinačnih slika iz niza slika niske rezolucije. Pri snimanju slika niske rezolucije treba paziti da pomaci budu pravilni jer će se algoritam za registraciju pomaka zbuniti i rezultati neće biti toliko kvalitetni kao što se dogodilo u dijelu eksperimenta u kojem sam uz stalan broj iteracija dodavao više slika na niz niske rezolucije. Nakon nekog vremena se razlika između referentne slike te generirane slike počela opet povećavati što je bilo očigledno iz PSNR parametra.

Od korištenih programa, vizualna inspekcija ukazuje je da je dodatak za Matlab najkvalitetniji besplatni algoritam za super rezoluciju. Neki elementi slike, npr. neka velika slova, bili su prepoznatljivi nakon korištenja disk dekonvolucije. Ostale metode nisu davale toliko kvalitetne rezultate, neke dobivene slike su prostim okom bile jednako zamućene kao i slika dobivena najobičnijom *bicubic* metodom.

Kod dodatka za ImageJ postojala je mogućnost kontrole iteracija što je davalo kvalitetnije generirane slika samo do 15 – 20 iteracija. Zanimljivost kod dodatka za ImageJ je bila kod usporedbe generiranih slika jednakog broja iteracija sa većim nizom slika niske rezolucije jer se nakon određenog vremena počinje gubiti na kvalitete generirane slike. To najvjerojatnije proizlazi iz činjenice da se kamera previše tresla te je to zbunilo algoritam ukazujući na nerazvijenost tehnologije i algoritma za registraciju pomaka te generiranja slika visoke rezolucije.

Primjena ove metode povećanja rezolucije i samih detalja slike je vrlo široka te bi bilo kakav pomak prema razvijanju ove tehnologije mogao biti značajan i imati praktičnu primjenu na vrlo različitim područjima: od spašavanja života u medicinskim salama, sigurnosti ljudi na ulicama zbog nadzornih kamera boljih karakteristika, pa do istraživanja nebeskih tijela u dalekim svemirskim prostranstvima.

Dobiveni rezultati su definitivno vidljivi čak i pomoću algoritama dostupnih besplatno svima na Internetu, ali vjerujem da su ovo tek početne faze iznimno moćne metode obrade slika.

## 6. LITERATURA

1. Sočec I, (2012). *FPGA implementacija metode povećanja originalne rezolucije slike korištenjem više snimki*, Diplomski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilište u Zagrebu
2. \*\*\* <http://www.svi.nl/DeConvolution>, *Scientific Volume Imaging, Deconvolution*, 12.08.2014.
3. \*\*\* [http://en.wikipedia.org/wiki/Peak\\_signal-to-noise\\_ratio](http://en.wikipedia.org/wiki/Peak_signal-to-noise_ratio), *Wikipedia, Peak signal-to-noise ratio*, 11.08.2014
4. \*\*\* <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/41329-psnr--peak-signal-to-noise-ratio>, *Matlab Central, PSNR, Peak Signal to Noise Ratio*, 11.08.2014.
- 5 Villena S. (2011) *Superresolucion y Reconstruccion Bayesiana de Imagenes a Partir de Imagenes de Baja Resolucion Rotadas y Desplazadas. Combinacion de Modelos*, Doktorska disertacija, Universidad de Granada
6. Villena S., Vega M., Molina R., and Katsaggelos A. K. (2009). *Bayesian super-resolution image reconstruction using an l1 prior*. In 6th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA 2009), 152 -157, Salzburg, Austria
7. Villena S., Vega M., Babacan D., Molina R., and Katsaggelos A. (2012), *Digital Signal Processing*, Bayesian combination of sparse and non sparse priors in image superresolution,
8. Villena S., Vega M., Babacan D., Molina R. and Katsaggelos A. (2010) *Using the Kullback-Leibler divergence to combine image priors in superresolution image*

*reconstruction*, In IEEE International Conference on Image Processing, 809 -812, Hong-Kong (China) .

9. Babacan S. D., Molina R., and Katsaggelos A.K.(2011), *IEEE Transactions on Image Processing*, 20(4), 984-999, Variational Bayesian super resolution

10. \*\*\* <https://sites.google.com/site/piotrwendykier/software/parallelsuperresolution> , *Piotr Wendykier, Parallel Super-Resolution*, 02.08.2014

11. \*\*\* [http://en.wikipedia.org/wiki/Gauss-Newton\\_algorithm](http://en.wikipedia.org/wiki/Gauss-Newton_algorithm), *Wikipedia, Gauss–Newton algorithm*, 10.08.2014

12. \*\*\* <http://www.mathcs.emory.edu/~nagy/WGCV/>, *Hybrid Bidiagonalization Regularization*, 10.08.2014