

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Studij računarstva
Zavod za elektroniku, mikroelektroniku, računalne i inteligentne sustave
Predmet: Raspoznavanje uzoraka
Mentor: prof.dr.sc.Slobodan Ribarić

DIPLOMSKI ZADATAK br. 1397
Postupci za poboljšanje kontrasta sivih slika

Vlasta Srebrić

Zagreb, 15. rujna 2003.

1.	Uvod.....	3
2.	Opis sustava za detekciju, raspoznavanje i automatski unos registarskih oznaka.....	5
2.1	Moduli sustava.....	5
2.2	Baza slika vozila.....	6
3.	Pregled postupaka za poboljšanje kontrasta sivih slika.....	8
3.1	Sive digitalne slike.....	8
3.2	Kontrast slika.....	9
3.3	Podjele postupaka za poboljšanje kontrasta sivih slika.....	11
3.3.1	Podjela s obzirom na susjedstvo.....	11
3.3.2	Podjela s obzirom na područje djelovanja.....	12
3.3.3	Podjela prema zasnovanosti na intenzitetu slikovnih elemenata odnosno obilježjima slike.....	13
4.	Postupci u vremenskom području.....	15
4.1	Histogram.....	15
4.2	Princip djelovanja postupaka za poboljšanje kontrasta u vremenskom području.....	17
4.3	Transformacije intenziteta.....	17
4.3.1	Rastezanje kontrasta.....	18
4.3.1.1	Osnovni tip rastezanja kontrasta.....	18
4.3.1.2	"End-in search" tip rastezanja kontrasta ("traženje od kraja").....	18
4.3.2	Gama korekcija.....	19
4.3.3	Tablice pretraživanja.....	21
4.4	Modeliranje histograma.....	21
4.4.1	Izjednačavanje histograma.....	21
4.4.1.1	Teorijska osnova postupka.....	22
4.4.1.2	Diskretizacija postupka.....	23
4.4.2	Modifikacija izjednačavanja histograma – korištenje praga.....	25
4.4.3	Specifikacija histograma.....	28
4.4.3.1	Teorijska osnova postupka.....	28
4.5	Lokalni postupci u vremenskom području.....	29
4.5.1	Lokalno izjednačavanje histograma.....	31
4.5.1.1	Teorijska osnova postupka.....	31
4.5.1.2	Varijacije lokalnog izjednačavanja histograma.....	34
4.5.2	CLHE.....	35
4.5.2.1	Teorijska osnova postupka.....	35
5.	Postupci u frekvencijskom području.....	39
5.1	Diskretna Fourierova transformacija.....	39
5.2	Frekvencijski filteri – prostorne maske.....	40
5.3	Višekanalno filtriranje.....	44
5.3.1	Trokanalno filtriranje uz nelinearno rastezanje kontrasta.....	44
5.3.2	Neoštro maskiranje.....	47
5.4	JGACE.....	48
5.4.1	Prilagodba karakteristikama ljudskog vidnog sustava.....	49
5.4.2	Teorijska osnova postupka.....	49
6.	Implementacija odabranih postupaka za poboljšanje kontrasta sivih slika.....	54
6.1	Globalni postupci.....	54
6.1.1	Gama korekcija.....	54
6.1.2	Rastezanje kontrasta.....	54
6.1.3	Izjednačavanje histograma.....	56

6.2	Lokalni postupci	57
6.2.1	Lokalno izjednačavanje histograma	57
6.2.2	Modificirani CLHE	58
6.3	Filtriranje	59
6.3.1	Neoštro maskiranje	60
6.3.2	Trokanalno filtriranje uz nelinearno rastezanje kontrasta	60
6.3.3	JGACE	61
7.	Usporedba rezultata dobivenih primjenom postupaka na slike vozila	65
7.1	Subjektivna ocjena poboljšanja kontrasta	65
7.2	Evaluacija na temelju rezultata detekcije registarske tablice	68
8.	Kratki opis programskog sustava	73
8.1	Klasa korištena za implementaciju postupaka za poboljšanje kontrasta sivih slika	73
8.2	Ilustracija korištenja programa za poboljšanje kontrasta sivih slika	76
9.	Primjer korištenja postupaka na bazi slika dlanova	80
9.1	Primjeri slika dlanova	80
9.2	Dobiveni rezultati	80
10.	Zaključak	83
11.	Literatura	86

Dodaci

Dodatak A: Primjeri uspješno lociranih registarskih tablica

Dodatak B: Primjeri djelomično lociranih registarskih tablica

Dodatak C: Primjeri nelociranih (ili pogrešno lociranih) registarskih tablica

CD: baza slika, programski sustav (izvršni program i izvorni kod), primjeri procesiranih slika, tekst diplomskog rada u pdf formatu, članci korišteni za literaturu koji su bili na raspolaganju u elektroničkom obliku

1. Uvod

U ovom diplomskom radu se obrađuju postupci za poboljšavanje kontrasta sivih slika. Cilj tih postupaka je, općenito govoreći, poboljšanje mogućnosti interpretacije informacija koje slike nose od strane ljudi - promatrača slika, ali i pružanje "boljeg ulaza" za neki drugi postupak obrade slike kada služe kao pretprocesni alat. Ili kratko rečeno, postupci za poboljšanje kontrasta trebaju poboljšati vidljivost slike.

Slike koje snimamo mogu biti vrlo različitog karaktera i namjene, od biomedicinskih, industrijskih, satelitskih do umjetničkih i onih za osobne albume. Isto tako, uvjeti u kojima snimamo su raznoliki (različiti vremenski uvjeti, različito osvjetljenje scene koja se snima i sl.) i uređaji koje koristimo za snimanje, npr. CCD kamere, rentgen, magnetska rezonancija, fotoaparat, teleskop i sl., se razlikuju po rezoluciji, šumu, osvjetljenju, kontrastu itd. Sve se to odražava na snimljenim slikama pa se slike razlikuju po kvaliteti zbog samih svojstava slike ili zbog korištene tehnike pri snimanju.

Kada se slike, bilo ručno bilo automatski, analiziraju, problemi nastaju kada slike nisu dovoljno kontrastne. Zato su razvijeni različiti postupci poboljšanja kontrasta slika. Svi ti postupci imaju isti cilj, ali se razlikuju po načinu djelovanja na originalnu sliku te produciraju različite poboljšane slike. Različiti postupci naglašavaju poboljšanje različitih svojstava ili komponenata slike. Međutim, ne postoji univerzalni kriterij po kojem bi se moglo reći koji je postupak bolji, a koji lošiji jer to uvelike ovisi o slikama na koje se postupak primjenjuje te o njihovoj namjeni. Zato se ocjena uspješnosti poboljšanja kontrasta pojedinog postupka, u praksi, mora uvijek donositi na temelju konkretnih rezultata primjene postupka u konkretnoj namjeni.

U ovom radu predmet interesa su slike stražnjih dijelova vozila, a cilj je poboljšanje izgleda registarskih tablica i naljepnica s oznakom države. Zato će se prvenstveno promatrati uspješnost pojedinih postupaka poboljšanja kontrasta primjenjenih na slike vozila. Cilj je odabrati postupak koji bi se uporabio u sustavu za detekciju, raspoznavanje i automatski unos registarskih tablica. Slikama bi se u fazi pretprocesiranja poboljšavao kontrast što bi trebalo povećati uspješnost raspoznavanja u nepovoljnim uvjetima (loše osvjetljenje, zaprljanost tablice i sl.).

Najprije je u 2. poglavlju opisan zamišljeni sustav za detekciju, raspoznavanje i automatski unos registarskih tablica te oblikovana baza slika vozila.

Zatim je u sljedećim poglavljima rada iznesena teorijska osnova postupaka za poboljšanje kontrasta slika. U 3. poglavlju je dana podjela postupaka za poboljšavanje kontrasta te kratki opisi i usporedbe pojedinih tipova postupaka (općenite sličnosti i razlike, prednosti i mane).

U 4. poglavlju opisani su postupci u vremenskom, a u 5. poglavlju postupci u frekvencijskom području. Obuhvaćeni su kako osnovni postupci, tako i njihove poznate modifikacije i prijedlozi za njihovo poboljšanje. Na primjerima slika iz oblikovane baze vozila su ilustrirani rezultati primjene pojedinih postupaka za poboljšanje kontrasta sivih slika.

6. poglavlje je posvećeno opisu implementacije odabranih postupaka za poboljšanje kontrasta, a 8. poglavlje opisuje sam program razvijen za poboljšanje kontrasta slika vozila.

U 7. poglavlju su izvedene usporedbe rezultata različitih postupaka poboljšanja kontrasta primjenjenih na ispitnim slikama stražnjih strana vozila (automobila, kombija i kamiona) koje su snimane u različitim uvjetima, i to po različitim kriterijima. Rezultirajuće slike se uspoređuju subjektivno, ocjenjujući koliko je poboljšana, ili nije, vidljivost registarske tablice i oznake države (ako je ima na slici). Izvedena je i vremenska analiza postupaka. Na kraju su postupci evaluirani na temelju rezultata programa za detekciju registarske tablice na ispitnim slikama.

Prije donošenja zaključka o najprikladnijem postupku u 10. poglavlju, u 9. je poglavlju prikazano djelovanje istih postupaka za poboljšanje kontrasta u drugoj primjeni – na bazi slika dlanova.

2. Opis sustava za detekciju, raspoznavanje i automatski unos registarskih oznaka

Diplomski rad je rađen u okviru studentskog projekta "Detekcija, raspoznavanje i automatski unos registarskih oznaka" [10] čiji je cilj bio oblikovati prototip sustava koji omogućava automatsku detekciju pločice s oznakom zemlje iz koje vozilo dolazi, detekciju registarske tablice vozila te na temelju raspoznavanja znakova na tablici automatski unos i pohranjivanje tih podataka s pridruženom informacijom (npr. vrijeme ulaska u zemlju, granični prijelaz i sl.).

Takav sustav imao bi svoju primjenu u automatskom nadzoru i praćenju podataka o kretanju vozila. Sustav bi se mogao koristiti na graničnim prijelazima, parkiralištima, autobusnim kolodvorima, u garažama i sličnim objektima.

Razvijeni su razni sustavi za raspoznavanje registarskih tablica (*engl. License Plate Recognition*). Npr. sustav opisan u [11] koji se sastoji od modula za segmentaciju, modula za izolaciju znakova, modula za raspoznavanje znakova te sintaksnog analizatora znakova registarskih tablica ili brojni primjeri koji se mogu naći na *Internetu* (npr. [17], [18], [19], [20], [21]). Međutim, većini tih sustava je zajedničko da se temelje na pravilima registarskih tablica konkretne zemlje, a ovdje je cilj ostvarivanje sustava koji bi bio primjenjiv na europske tablice i time prikladan za međunarodnu kontrolu prometa.

2.1 Moduli sustava

Sustav će sadržavati [10]:

- bazu slikovnih podataka osobnih i teretnih vozila ;
- modul za pretprocesiranje slika i detekciju oznake (ili) pločice zemlje;
- modul za automatsku detekciju položaja registarske tablice;
- bazu sa sintaktičkim pravilima vezanim za oznake na reg. tablicama u zavisnosti od države iz koje vozilo dolazi;
- modul za automatsko raspoznavanje (uporaba višeslojnog perceptrona) i pohranu registarskih oznaka;
- modul koji doprinosi robusnosti sustava i djeluje u slučajevima kao što promijenjeni svjetlosni uvjeti, zaprljanost registarske pločice i sl.;
- bazu podataka generiranu na temelju slikovne baze;

Sustav je zamišljen tako da se na temelju oblikovane baze slika vozila i izgrađene baze znanja automatski detektira oznaka države iz koje je vozilo, a zatim i registarska tablica vozila. U brzom detekciji oznake zemlje i registarske pločice je planirana uporaba elemenata aktivnog vida. Nakon određivanja položaja oznake i registarske tablice slijedi automatsko raspoznavanje registarskih tablica temeljeno na sintaksi sadržaja registarskih tablica, te pohrana informacija o vozilu (i odabranih dodatnih informacija o vremenu, graničnom prijelazu ili sl.) u bazu. Sustav treba dopustiti automatski unos i u slučajevima kada oznaka zemlje nije raspoloživa ili vidljiva.

Da bi sustav bio robustan i omogućavao raspoznavanje i unos registarskih oznaka i u nepovoljnijim uvjetima (zaprljanost reg. tablice, loši svjetlosni uvjeti i sl.), vrši se preprocesiranje slika kako bi se poboljšala kvaliteta slika. Upravo je to motivacija za uključivanje modula za poboljšanje kontrasta slika u sustav za detekciju, raspoznavanje i automatski unos registarskih tablica.

2.2 Baza slika vozila

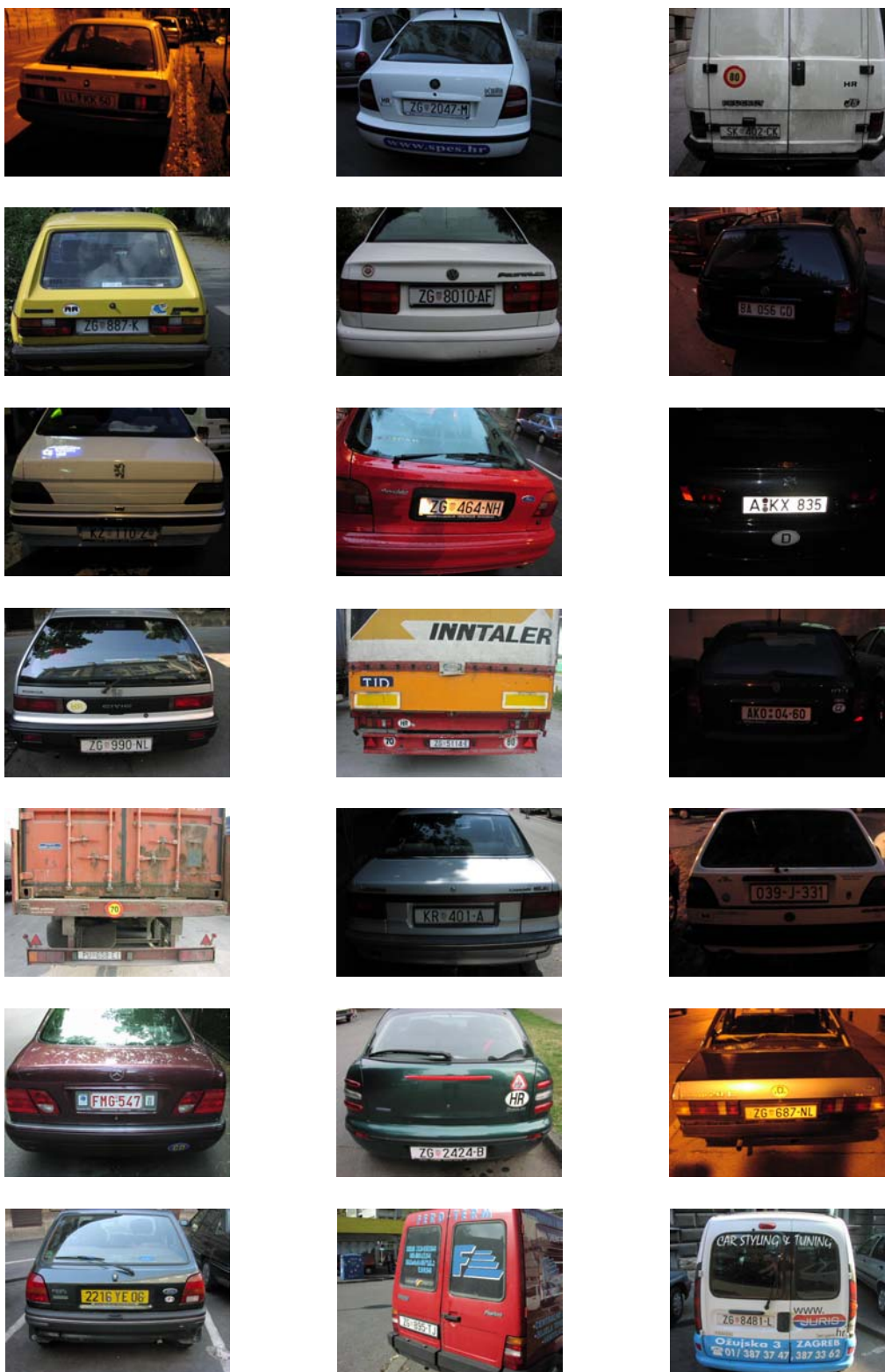
Baza slika sadrži snimke stražnjih strana vozila. Automobili, kombiji i kamioni su slikani digitalnim fotoaparatom Olympus Camedia 2040 Zoom u boji. Korištena je rezolucija 640×460. Slikano je u različitim vremenskim uvjetima (sunčano vrijeme, oblačno, kišovito) i u različita doba dana (jutro, poslijepodne, predvečer, noć) tako da baza sadrži slike različite kvalitete, različitog osvjetljenja, odnosno različitog kontrasta. Isto tako, vozila su slikana iz različitih kuteva. Neke slike su zato "idealne", a na nekima su registarske tablice i oznake država loše vidljive.

Baza sadrži slike vozila s domaćim tablicama, iz cijele Hrvatske, te vozila sa stranim registracijama. U bazi se pojavljuju slike vozila koja nemaju oznaku države, vozila sa standardnom oznakom države (bijela pozadina s crnim slovima), kao i ona koja imaju nestandardne oblike i boje oznaka države ili pak više različitih naljepnica na stražnjem dijelu. Registarske tablice se razlikuju po boji pozadine i znakova (slova i brojke) na njima, te po obliku.

Baza sadrži preko 500 slika, a na slici 2.1 su prikazani neki primjeri slika iz izgrađene baze.



Slika 2.1 Primjeri slika iz baze slika stražnjih strana vozila.

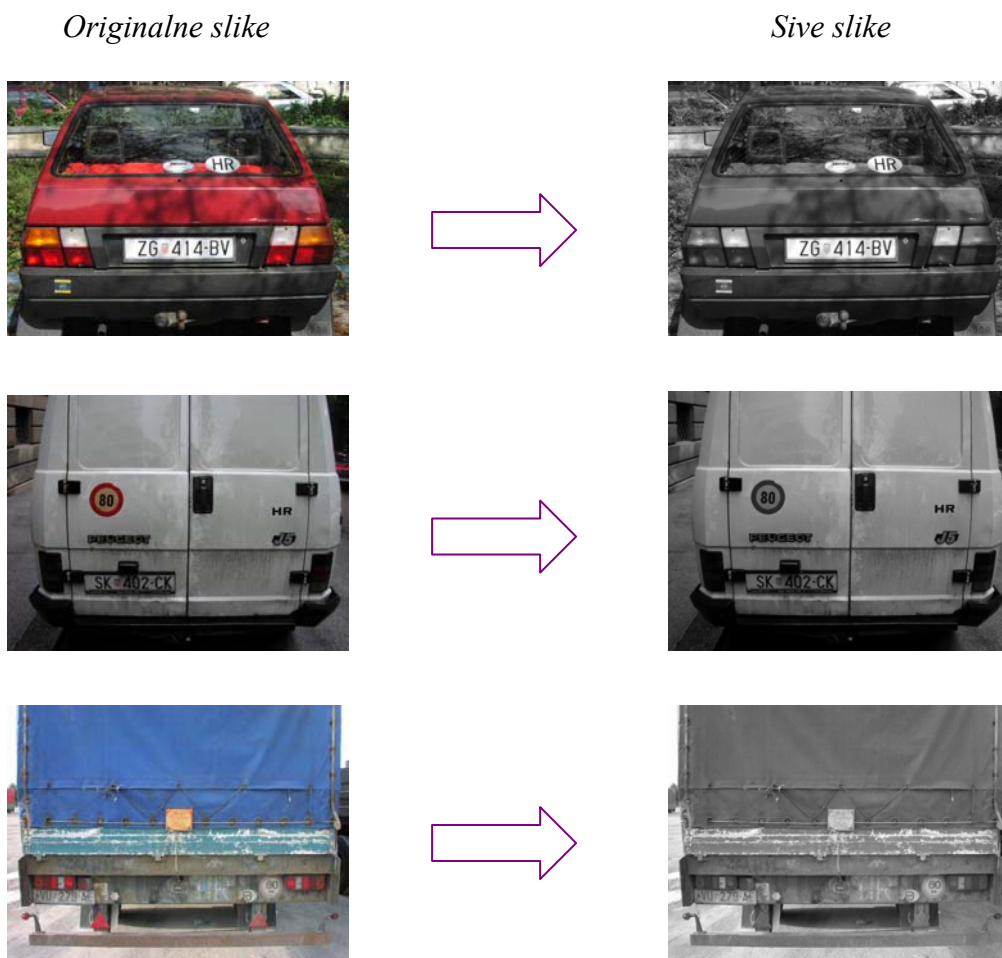


Slika 2.2(nastavak) Primjeri slika iz baze slika stražnjih strana vozila.

3. Pregled postupaka za poboljšanje kontrasta sivih slika

3.1 Sive digitalne slike

Digitalna slika je dvodimenzionalno polje malih kvadratnih područja koja se nazivaju slikovnim elementima ili pikselima (*engl. pixel*). Slika se u računalu može pohraniti u mnogo formata. Kada se radi o monokromnim, ili sivim ili crno-bijelim slikama sa sivim nijansama, svjetlina (ili intenzitet ili siva razina) svakog slikovnog elementa je predstavljena numeričkom vrijednošću. Sive slike tipično sadrže vrijednosti u rasponu od 0 do 255, pri čemu 0 predstavlja crnu, 255 bijelu boju, a vrijednosti između nijanse sivog. To je tzv. *8-bitni sivi format*. U tom formatu se slika pohranjuje kao dvodimenzionalna matrica čiji broj redaka i stupaca odgovaraju rezoluciji slike, a elementi matrice su 8-bitni brojevi bez predznaka (pomoću 8 bitova moguće je prikazati ukupno 256 nijansi sivog). Korištenjem sivih slika pojednostavljena je obrada slike jer se izbjegava zasebna obrada crvene, plave i zelene komponente.



Slika 3.1 Primjeri pretvorbe slika u boji u sive slike.

Slike vozila u boji iz baze slika su pretvorene u sive slike tako da se vrijednost pojedinog slikovnog elementa računa iz crvene, plave i zelene komponente prema sljedećoj formuli:

$$siva_razina = 0.30r + 0.59g + 0.11b, \quad (3.1)$$

gdje su r , g i b crvena, zelena i plava komponenta slike respektivno, a $siva_razina$ je rezultirajuća vrijednost slikovnog elementa u 8-bitnom sivom formatu (prema [1]).

Na slici 3.1 su prikazani primjeri slika prebačenih u 8-bitni sivi format.

3.2 Kontrast slika

Kontrast slike je raspon vrijednosti svjetlina prisutnih na slici, odnosno razlika između svijetlih i tamnih dijelova slike. Ako govorimo o niskom kontrastu onda se radi o maloj razlici između svijetlih i tamnih dijelova slike, a visoki kontrast znači da je razlika svijetlih i tamnih dijelova slike velika.

Postupci za poboljšanje kontrasta služe za procesiranje slika kako bi objekti na njima bili uočljiviji. To se ostvaruje optimalnim iskorištavanjem boja raspoloživih na prikaznom ili izlaznom uređaju. Dakle, u slučaju sivih slika se teži iskorištavanju cijelog raspona sivih razina.

Primjeri slikanja u dobrim, jednolikim svjetlosnim uvjetima što rezultira slikama s dobrim kontrastom prikazani su na slici 3.2. Vidi se da na ovim slikama imamo iskorišten čitav pojas sivih razina, od crne preko nijansi sivog do bijele boje. Na takvim slikama su vidljivi detalji, a za naše potrebe je posebno važno da su registarska tablica i oznaka države dobro vidljivi i s lakoćom čitljivi.



Slika 3.2 Primjeri slika sa zadovoljavajućim kontrastom.

Slike s visokim kontrastom imaju i svijetla i tamna područja koja se jako ističu. One iskorištavaju obično jedan pojas tamnih i jedan pojas svijetlih sivih nijansi. Primjer je slika 3.3. Radi se o tamnom automobilu slikanom po noći pri čemu je sama tablica osvijetljena. Na tamnoj pozadini se jako ističe bijela podloga tablice. Oznaka države je nešto slabije kontrastna.



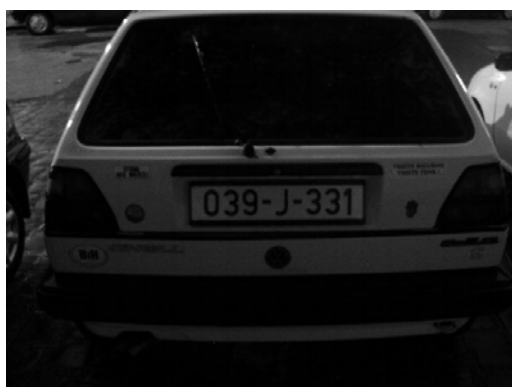
Slika 3.3 Slika s visokim kontrastom.

Sive slike niskog kontrasta su pretežno svijetle, pretežno tamne ili pak ujednačeno sive. Drugim riječima, sive slike s niskim kontrastom će imati iskorišten uski pojas mogućih sivih nijansi. Niski kontrast slika može nastati kao rezultat lošeg osvjetljenja scene koja se snima ili slabog dinamičkog opsega senzora (uređaja kojim se slika).

Primjeri slika s niskim kontrastom uslijed "lošeg" i nejednolikog osvjetljenja scene su prikazani na slici 3.4.

Slika 3.4a) je dobivena u uvjetima nedovoljnog osvjetljenja jer je slikana po noći uz slabu javnu rasvjetu. Na toj slici je niski kontrast, slika je vrlo tamna i očito je kakve probleme to stvara pri analizi slike: registarska tablica (koja u stvarnosti ima dobar kontrast crnih znakova na bijeloj podlozi) nije lako čitljiva, a oznaka države (naljepnica ispod stražnjeg lijevog svjetla automobila) je teško uočljiva i gotovo nečitljiva.

Slika 3.4b) je primjer kakve probleme stvara nejednoliko osvjetljenje. Preko lijeve strane automobila pada sjena te su lijevi dio tablice i oznaka zemlje, koja se nalazi na donjem lijevom dijelu stražnjeg stakla automobila, nečitki.



a)



b)

Slika 3.4 Primjeri slika s niskim kontrastom: a) rezultat slikanja po noći uz nedovoljno osvjetljenje – pretežito tamna slika; b) rezultat nejednolikog osvjetljenja (sjene).

Ove slike zorno pokazuju zašto su postupci za poboljšanje kontrasta potrebni u sustavu za detekciju, raspoznavanje i automatski unos registarskih oznaka u nepovoljnim uvjetima (slaba ili nejednolika osvjetljenost, zaprljanost tablice i sl.). Cilj primjene postupaka za poboljšanje kontrasta u ovom sustavu u fazi pretprocesiranja je poboljšanje vidljivosti registarske tablice i oznake države da bi i u takvim nepovoljnim uvjetima bilo moguće automatsko raspoznavanje i unos registarskih oznaka.

3.3 Podjele postupaka za poboljšanje kontrasta sivih slika

Razvijeni su različiti postupci poboljšanja kontrasta slika kako bi se poboljšala mogućnost interpretacije i analize slika koje su nedovoljno kontrastne.

Postoje različite klasifikacije postupaka za obradu slike u koje se ubrajaju i postupci za poboljšavanje kontrasta. To proizlazi iz želje da se naglasi kakvi se rezultati mogu očekivati primjenom postupka određenog tipa ili kakva se računarska složenost očekuje.

3.3.1 Podjela s obzirom na susjedstvo

Jedna od podjela se temelji na susjedstvu slikovnog elementa ulazne slike koje se u postupku koristi za izračunavanje izlazne vrijednosti tog istog slikovnog elementa [1]. Susjedstvo može biti različitog oblika i veličine.

Najjednostavniji slučaj je kada nema susjedstva, tj. kada neki operator T djeluje samo na tom slikovnom elementu. Tada govorimo o *operacijama na točki* kod kojih izlazna vrijednost slikovnog elementa poboljšane slike ovisi samo o ulaznoj vrijednosti istog slikovnog elementa originalne ulazne slike.

Operacije kod kojih izlazna vrijednost slikovnog elementa ovisi o vrijednostima slikovnih elemenata u nekom ograničenom susjedstvu tog slikovnog elementa, dimenzija $P \times P$, nazivamo *lokalnim operacijama*.

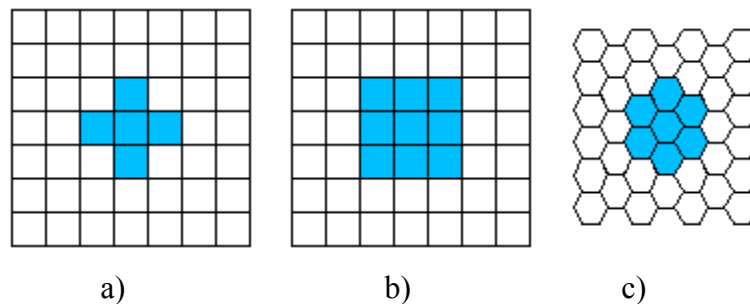
OPERACIJA	KARAKTERISTIKA	GENERIČKA KOMPLEKSNOŠT / SLIKOVNI ELEMENT
Na točki	izlazna vrijednost slikovnog elementa ovisi samo o vrijednosti istog slikovnog elementa	konst.
Lokalna	izlazna vrijednost slikovnog elementa ovisi o susjedstvu	P^2
Globalna	izlazna vrijednost slikovnog elementa ovisi o cijeloj slici	N^2

Tablica 3.1 Tipovi operacija na slikama. Veličina slike $N \times N$; veličina susjedstva $P \times P$.

Treća vrsta su operacije koje djeluju na cijeloj slici, odnosno izlazna vrijednost pojedinog slikovnog elementa ovisi o vrijednostima svih slikovnih elemenata slike. To su *globalne operacije*.

Tablica 3.1 (preuzeta s [1]) prikazuje ovu podjelu te kompleksnost operacija po slikovnom elementu.

U modernoj digitalnoj obradi slike veliku ulogu imaju lokalne operacije pa je važno znati kako se slike uzorkuju i kako je to povezano s različitim susjedstvima koja se mogu koristiti za metode poboljšavanja slika. Mogući načini uzorkovanja su pravokutno i heksagonalno uzorkovanje. Obje metode su moguće za periodično "oblaganje" kontinuiranog prostora slike, međutim, zbog karakteristika *hardwarea* i *softwarea*, prevladavajuće je pravokutno uzorkovanje. Zbog toga se najčešće za lokalne metode poboljšavanja slika koriste susjedstva prikazana na slici 3.5a) i 3.5b), a ako se koristi heksagonalno uzorkovanje, onda ono na slici 3.5c) (slika preuzeta s [1]). Pravokutna, odnosno danas uglavnom kvadratna susjedstva su najraširenije korištena zbog lakoće njihove implementacije.



Slika 3.5 a) Pravokutno 4-povezано susjedstvo; b) Pravokutno 8-povezано susjedstvo; c) Heksagonalno 6-povezано susjedstvo.

3.3.2 Podjela s obzirom na područje djelovanja

Po području u kojem djeluju, postupci za poboljšavanje kontrasta se mogu podijeliti u dvije široke skupine [3]:

1. *Postupci u vremenskom području*, i
2. *Postupci u frekvencijskom području*.

Postupci u vremenskom području djeluju direktno na slikovne elemente originalne slike i u njih se ubrajaju sljedeći postupci poboljšavanja kontrasta sivih slika: osnovne transformacije sivih razina, modeliranje histograma (izjednačavanje, specifikacija), aritmetičko/logičke operacije, maskiranje u vremenskom području.

Postupci poboljšavanja kontrasta u frekvencijskom području djeluju na Fourierovoj transformaciji slike i koriste naglašavanje visokih frekvencija. Osnovni koraci filtriranja u frekvencijskom području su Fourierova transformacija, filtriranje te inverzna Fourierova transformacija, a razlikuju se po korištenom filteru te opcionalnim koracima pretprocesiranja i postprocesiranja.

3.3.3 Podjela prema zasnovanosti na intenzitetu slikovnih elemenata odnosno obilježjima slike

S obzirom na to zasnivaju li se postupci na samom intenzitetu slikovnih elemenata ili pak na specifičnim obilježjima slike, razlikuju se [5]:

1. *Postupci zasnovani na intenzitetu slikovnih elemenata:*
 - a. *Globalni postupci zasnovani na intenzitetu sl. elemenata,*
 - b. *Lokalni postupci zasnovani na intenzitetu sl. elemenata, te*
2. *Postupci zasnovani na svojstvima/obilježju slike.*

Globalni postupci zasnovani na intenzitetu slikovnih elemenata se predstavljaju transformacijom sive razine:

$$I_0(x, y) = f(I(x, y)), \quad (3.2)$$

gdje je $I(x, y)$ originalna slika, $I_0(x, y)$ izlazna slika, a f transformacijska funkcija.

U ovim postupcima se transformacija sivih razina primjenjuje na cijeloj slici, što znači da će slikovni elementi s istom vrijednošću, tj. s istom sivom razinom na različitim pozicijama u originalnoj slici, imati iste sive razine i u izlaznoj slici. Metode ovog tipa preraspoređuju razine sivog kako bi se dobila kontrastnija slika i pri tome uzimaju u obzir samo distribuciju sivih razina, a zanemaruju sve ostale sadržaje. Zahtjev na transformacijsku funkciju je da bude monotono rastuća kako se ne bi narušio poredak sivih razina originalne slike, odnosno kako bi se održao izgled sličan originalnoj slici. Takvi postupci su rastezanje kontrasta, preslikavanje linearnim i nelinearnim funkcijama, izjednačavanje histograma, specifikacija histograma i sl.

Drugi tip u ovoj podjeli su lokalni postupci zasnovani na intenzitetu slikovnih elemenata izraženi kao:

$$I_0(x, y) = f(I(x, y), x, y), \quad (3.3)$$

što znači da se transformacijska funkcija mijenja ovisno o koordinatama slikovnog elementa koji se preslikava. Postupci ovog tipa rješavaju problem globalnih postupaka zasnovanih na intenzitetu, a taj je da globalni postupci poboljšavaju ukupnu vidljivost slike, ali ne mogu povećati ili mogu čak smanjiti lokalni kontrast na određenoj poziciji u slici i na taj način uzrokovati ignoriranje mnogih detalja slike. Tako na primjer ako slika ima tamno područje i svijetlo područje, globalni postupci ne mogu istovremeno poboljšati kontraste u oba ta područja. Za takve slučajeve su pogodni lokalni postupci zasnovani na intenzitetu koji pokušavaju imitirati ljudski vidni sustav koji se lokalno prilagođava. U ove postupke spadaju modifikacija lokalnog raspona (*engl. LRM - Local Range Modification*) koju su predložili Fahnestock i Schowengerdt*, a koja primjenjuje rastezanje kontrasta u ovisnosti o lokalnom minimumu i maksimumu sivih razina [5]. Izjednačavanje histograma je dobilo svoje lokalne inačice (*engl. AHE - Adaptive Histogram Equalization* ili *LHE - Local Histogram Equalization; CLHE - Constrained Local Histogram Equalization* i dr.).

*J.D.Fahnestock and R.A.Schowengerdt, *Spatially variant contrast enhancement using local range modification*, Optical Eng, vol.22, no.3, 1983.

Za razliku od postupaka zasnovanih na intenzitetu slikovnih elemenata, postupci zasnovani na obilježjima slike poboljšavaju određene komponente slike koje predstavljaju određena svojstva (sadržaje) slike. Matematički ih formuliramo kao:

$$I_0(x, y) = L_l(x, y) + G(x, y)H_l(x, y), \quad (3.4)$$

gdje L_l predstavlja komponente niske frekvencije koje sadržavaju osnovni izgled originalne slike, H_l komponente visoke frekvencije koje sadrže dotična svojstva, a G je faktor poboljšanja.

U usporedbi s postupcima zasnovanim na intenzitetu, postupci ovog tipa naglašavaju sadržaj slike. Općenito se sastoje od tri koraka. Prvi je dekompozicija slike i izvlačenje komponenata koje se poboljšavaju, drugi korak je poboljšavanje tih komponenata te treći rekonstrukcija slike. Izvlačenje komponenata od interesa u prvom koraku se mora temeljiti na znanju o njima pa se ovi postupci koriste u specifičnim aplikacijama za razliku od postupaka zasnovanih na intenzitetu koji su općenitiji i često korišteni u pretprocesiranju različitih slika.

Poboljšanje kontrasta temeljeno na obilježju slike se može provoditi u vremenskom području, npr. različitim neoštrim maskama, statističkim metodama, a isto tako i u frekvencijskom području. U današnje vrijeme poznate su i vremensko-frekvencijske metode koje kombiniraju operatore u vremenskom i frekvencijskom području.

4. Postupci u vremenskom području

4.1 Histogram

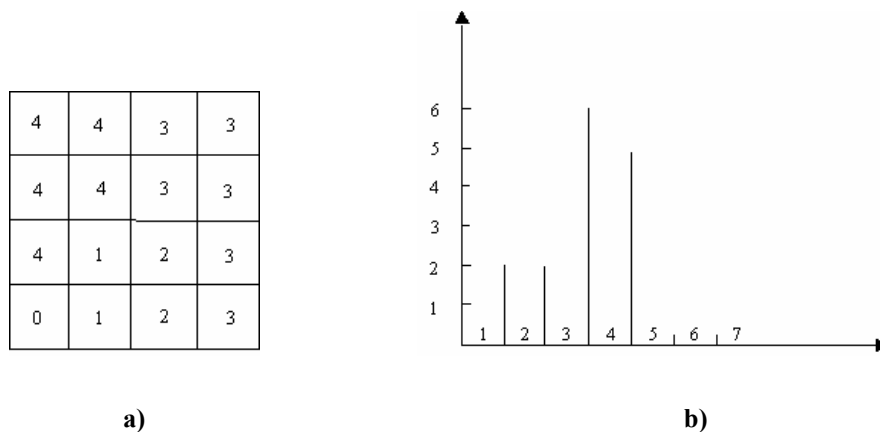
Histogram sive slike predstavlja relativnu frekvenciju pojave različitih nijansi sivog - intenziteta slikovnih elemenata u slici. Za digitalne slike sa sivim razinama u rasponu $[0, L-1]$ je normalizirani histogram diskretna funkcija:

$$p(r_k) = \frac{n_k}{N}, \quad (4.1)$$

gdje je r_k k-ta siva razina, n_k je broj slikovnih elemenata u slici s tom sivom razinom, N je ukupan broj slikovnih elemenata u slici, $k=0, 1, \dots, L-1$, tj. U našem slučaju $k=0, 1, 2, \dots, 255$.

Histogram se prikazuje grafom s intenzitetima slikovnih elemenata na apscisi i brojem pojave pojedinog intenziteta na slici na ordinati. Jedan takav histogram prikazuje slika 4.1 (preuzeta s [2]). Na ovom histogramu su prikazane apsolutne frekvencije pojave svake sive razine, a ne relativne (ne radi se o normaliziranom histogramu). To mijenja samo amplitude u histogramu, ne i oblik histograma.

Histogram pruža informaciju o kontrastu i distribuciji intenziteta slike, te daje općenit opis izgleda slike. Tako tamne slike imaju distribuciju intenziteta pomaknutu prema lijevoj (tamnoj - 0 je crno) strani grafa, a svijetle slike prema desnoj strani (svijetloj - 255 je bijelo). U "idealnoj" slici imali bismo uniformnu distribuciju slikovnih elemenata kroz cijeli histogram, podjednako bi bile zastupljene sve sive nijanse. Histogramom se koriste mnogi postupci poboljšanja kontrasta sivih slika u vremenskom području.

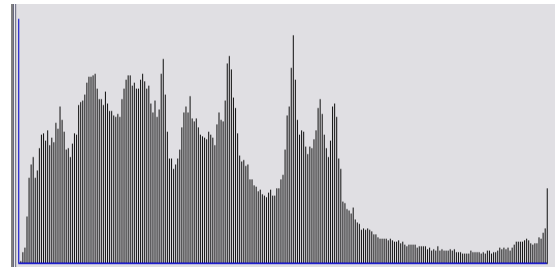


Slika 4.1 Primjer slike s naznačenim vrijednostima slikovnih elemenata a) i pripadnog histograma b).

Slika 4.2a) je primjer dobrog kontrasta. Histogram (slika 4.2b)) pokazuje da se ne radi baš o uniformnoj distribuciji, ali su iskorištene sve sive razine. Vidljiva je razlika u odnosu na izgled histograma slike s niskim kontrastom (slika 4.3). Kod ove tamne slike su iskorištene samo tamne sive nijanse u lijevom dijelu histograma.



a)



b)

Slika 4.2 Histogram slike s dobrim kontrastom.



a)



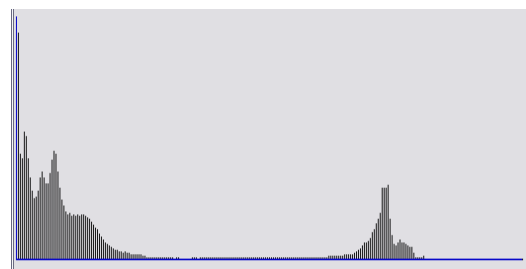
b)

Slika 4.3 Histogram tamne slike.

Tipičan izgled histograma slike s visokim kontrastom pokazuje slika 4.4. Vidljiva su dva brijega na histogramu (slika 4.4b)), jedan u donjem dijelu histograma – tamne nijanse koje odgovaraju pozadini i plastici na automobilu, drugi u predjelu svjetlijih nijansi sivog koje pak većinom odgovaraju površini lima automobila i tablici. Srednje nijanse sivog između ta dva brijega nisu baš iskorištene.



a)



b)

Slika 4.4 Histogram slike s visokim kontrastom.

4.2 Princip djelovanja postupaka za poboljšanje kontrasta u vremenskom području

Postupci za poboljšanje kontrasta sivih slika u vremenskom području se temelje na pretpostavci da dinamika slike ne iskorištava cijeli spektar sivih nijansi te pokušavaju nekim preslikavanjem sivih nijansi to popraviti.

To preslikavanje originalne slike u izlaznu se iskazuje jednadžbom:

$$I_0(x, y) = f(I(x, y)), \quad (4.2)$$

gdje je $I(x, y)$ originalna, a $I_0(x, y)$ izlazna slika.

Kontrast slike određuje distribucija njenih svijetlih i tamnih slikovnih elemenata. Kako je već rečeno, histogrami slika slabog kontrasta pokazuju da su im slikovni elementi koncentrirani desno, lijevo ili pak u sredini raspona sivih nijansi i iskorištavaju samo mali dio tog raspona. S druge strane, slike s vrlo velikim kontrastom imaju i tamna i svijetla područja te iskorištavaju cijeli raspon sivih nijansi. Međutim, problem slika s velikim kontrastom je što obično imaju velika tamna i velika svijetla područja. Histogrami takvih slika imaju dva brijega, jedan u lijevom, tamnom, a drugi u desnom, svijetlom području, kako je već pokazano na slici 4.4. Niti jedan od ovih slučajeva nije dobar u općem slučaju. "Idealan" slučaj bi bio histogram s uniformnom distribucijom vrijednosti slikovnih elemenata. Zato slike s dobrim kontrastom iskorištavaju širok raspon sivih nijansi i imaju histograme relativno uniformne distribucije bez velikih brijegova i udolina. Takvim histogramima se, uglavnom, teži prilikom poboljšavanja kontrasta. Ovisno o karakteristikama originalne slike kontrast se može rastezati, zbijati ili modificirati kako bi se dobila bolja distribucija.

4.3 Transformacije intenziteta

Postupci transformacije intenziteta su operacije na točki koje preslikavaju originalnu vrijednost slikovnog elementa - intenzitet u novu vrijednost prema unaprijed određenoj funkciji f :

$$s = f(r), \quad (4.3)$$

gdje r predstavlja intenzitet ili svjetlinu slikovnog elementa originalne slike, a s intenzitet izlaznih slikovnih elemenata poboljšane slike, pri čemu se pretpostavlja da su vrijednosti slikovnih elemenata normalizirane te leže u rasponu:

$$0 \leq r \leq 1, \quad (4.4)$$

0 predstavlja crnu, a 1 bijelu boju.

Funkcija preslikavanja f može biti linearna ili nelinearna, kao što su kvadratna, eksponencijalna i logaritamska, a treba zadovoljavati sljedeća dva uvjeta [3]:

- a) $f(r)$ je monotono rastuća na intervalu $0 \leq r \leq 1$, i

$$b) 0 \leq f(r) \leq 1 \text{ za } 0 \leq r \leq 1.$$

Uvjet a) zadržava red sivih razina originalne slike od crne do bijele, a uvjet b) osigurava preslikavanje u dozvoljeni raspon vrijednosti slikovnih elemenata (normalizirano na 0÷1). Međutim, pošto je ta funkcija preslikavanja f unaprijed određena, primjerena je samo za određene slike jer se ne može istom fiksnom funkcijom u svim slučajevima ostvariti poboljšanje kontrasta.

4.3.1 Rastezanje kontrasta

Jednostavni postupak koji se temelji na ideji da se nekom transformacijom razvuče uski pojas sivih nijansi slika niskog kontrasta u široki spektar je rastezanje kontrasta (*engl. contrast stretching*). Ovaj postupak je dokazano najpogodniji za slike koje imaju Gaussovu distribuciju vrijednosti slikovnih elemenata ili distribuciju koja je nalik Gaussovoj.

Najčešće verzije rastezanja kontrasta su osnovni tip rastezanja kontrasta te tzv. "*end-in-search*" ("traženje od kraja") [2].

4.3.1.1 Osnovni tip rastezanja kontrasta

Osnovni tip je pogodan za slike sa svim slikovnim elementima koncentriranim u jednom dijelu histograma. Rastezanje kontrasta osnovnog tipa će histogram takve slike proširiti preko cijelog raspona sivih nijansi. Pri tome se koriste minimalna i maksimalna vrijednost slikovnih elemenata na slici:

$$s = \frac{r - \min}{\max - \min} \times 255, \quad (4.5)$$

gdje je s nova vrijednost - siva razina u poboljšanoj slici, r stara vrijednost, \min je najmanja vrijednost tj. vrijednost najtamnijeg slikovnog elementa na slici, a \max najveća vrijednost tj. vrijednost najsvjetlijeg slikovnog elementa na slici. Sve vrijednosti su u rasponu 0÷255. Djelovanje ove formule na sliku je sljedeće: najprije se oduzimanjem minimalne vrijednosti histogram translata u ishodište da najmanja vrijednost bude 0, a zatim se svaki slikovni element skalira s $255/(\max - \min)$ kako bi se se iskoristio cjelokupan raspon od 0 do 255.

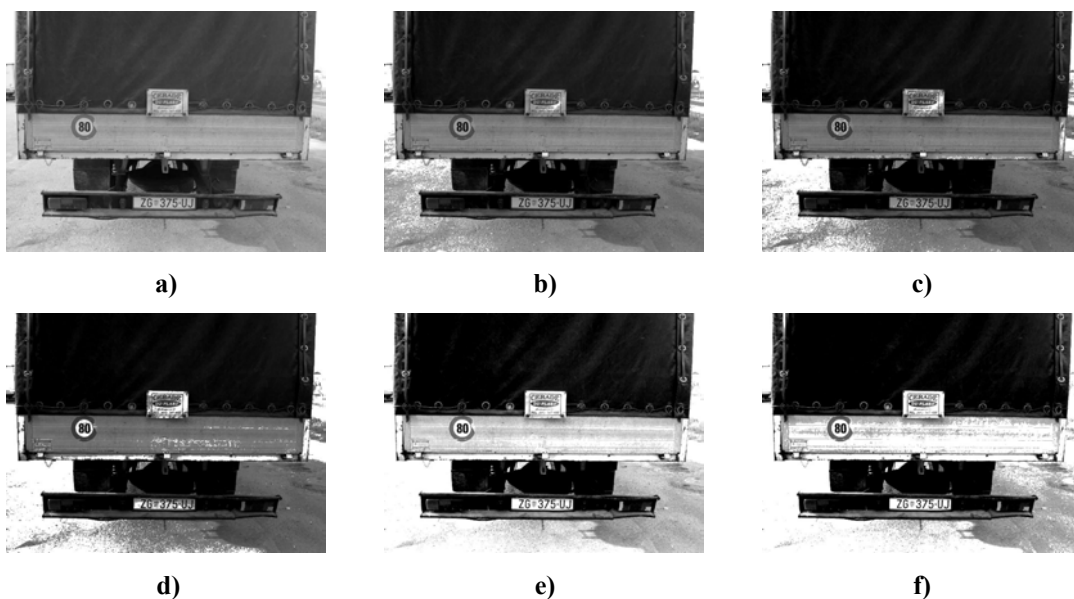
4.3.1.2 "End-in search" tip rastezanja kontrasta ("traženje od kraja")

"End-in-search" je drugi tip rastezanja kontrasta. Ovaj postupak je prikladan za slike koje imaju iskorišten cijeli raspon sivih nijansi, ali imaju koncentraciju slikovnih elemenata u jednom dijelu histograma. Ovaj postupak pretpostavlja da mora biti unaprijed određen neki postotak slikovnih elemenata koji će se preslikati u potpuno crno ili potpuno bijelo. Zatim se prolazi histogramom od 0 nagore da se nađe donji prag - vrijednost u histogramu kod koje je dostignut postotak za donje vrijednosti (*donja granica*) i isto tako od kraja histograma prema nižim vrijednostima apscise da se nađe gornji prag - vrijednost kod koje je dostignut postotak

gornjih vrijednosti (*gornja granica*). Kada se odrede ti pragovi, izlazne vrijednosti se računaju kao:

$$s = \begin{cases} 0 & \text{za } r \leq \text{donja} \\ 255 \times (r - \text{donja}) / (\text{gornja} - \text{donja}) & \text{za } \text{donja} < r < \text{gornja} \\ 255 & \text{za } r \geq \text{gornja} \end{cases} \quad (4.6)$$

Djelovanje ovog postupka ilustrirano je na slici 4.5. Postupak je implementiran tako da se isti postotak postavlja i za gornju i za donju granicu. Na slici 4.5a) je originalna siva slika, dok su na slikama 4.5b), c), d), e) i f) prikazane slike dobivene primjenom rastezanja kontrasta uz zadane granice od 5%, 10%, 15%, 20% i 30%, respektivno. Povećanjem granice se povećava i globalni kontrast jer se sve veći broj razina preslikava u crno odnosno u bijelo.



Slika 4.5 "End-in-search" tip rastezanja kontrasta: a) originalna slika; b) rezultat uz zadanu granicu 5%; c) rezultat uz zadanu granicu 10%; d) rezultat uz zadanu granicu 15%; e) rezultat uz zadanu granicu 20%; f) rezultat uz zadanu granicu 30%.

4.3.2 Gama korekcija

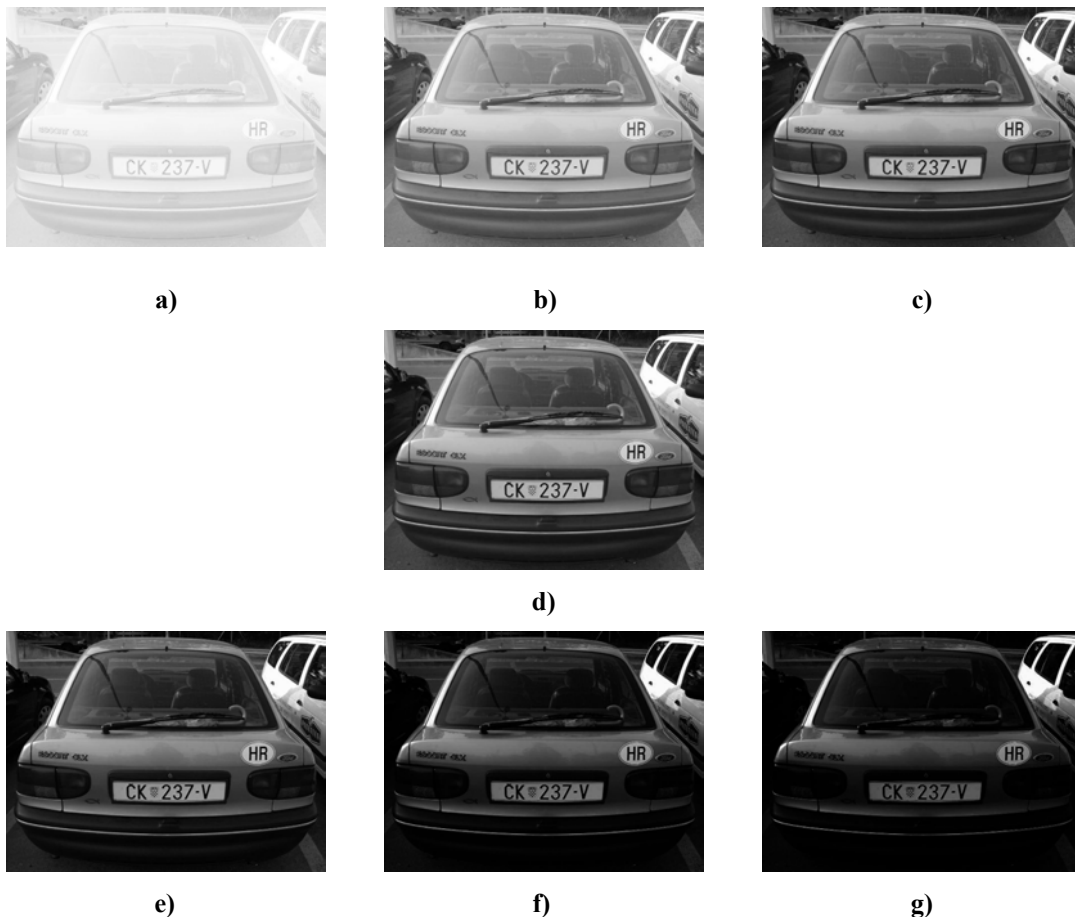
Gama korekcija (*engl. gamma correction*) je nelinearna transformacija koja koristi sljedeću funkciju preslikavanja:

$$s = f(r) = r^\gamma, \quad (4.7)$$

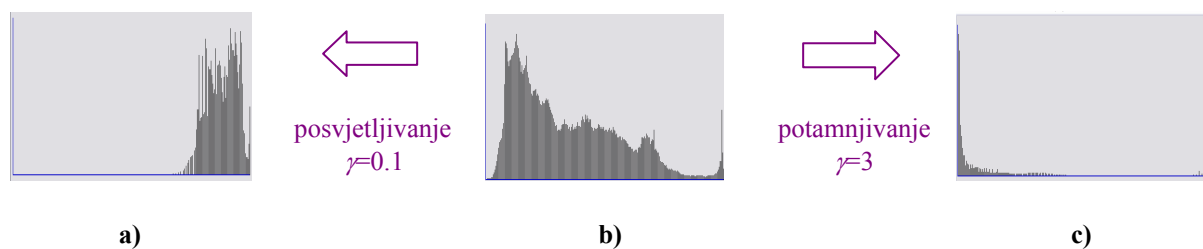
gdje r predstavlja normalizirane nijanse sivog u originalnoj slici, s normalizirane nijanse sivog u poboljšanoj slici, a γ je faktor korekcije. Gama korekcija se upotrebljava kada se želi cijelu sliku posvijetliti ili potamniti u cilju poboljšanja ukupnog izgleda slike. Za posvijetljivanje slika se koristi faktor $\gamma < 1$, a za potamnjivanje $\gamma > 1$.

Gama korekcija približno odgovara kontroli svjetline na CRT uređajima i često se koristi za kompenzaciju nelinearnog odziva senzora, prikaznih jedinica i filmova.

Djelovanje postupka s različitim faktorom γ na istu sliku je prikazano na slici 4.6. Originalna slika je slika 4.6d). U gornjem retku na slikama 4.6a), b) i c) se nalaze rezultati posvjetljivanja i to uz $\gamma=0.1$, $\gamma=0.5$ i $\gamma=0.9$. U donjem retku na slikama 4.6e), f) i g) se nalaze rezultati potamnjenja originalne slike i to uz $\gamma=1.5$, $\gamma=2.3$ te $\gamma=3$, respektivno. Očito je da se smanjivanjem faktora γ ispod vrijednosti 1 dobiva sve svjetlija slika, a njegovim povećavanjem iznad vrijednosti 1 sve tamnija slika. Razlike histograma slika prikazane su na slici 4.7: a) prikazuje histogram slike obrađene s $\gamma=0.1$, b) histogram originalne slike, a c) histogram slike obrađene s $\gamma=3$. Vidi se velik pomak distribucije udesno kod posvjetljivanja, odnosno ulijevo kod potamnjenja.



Slika 4.6 Gama korekcija: a) rezultat uz zadani $\gamma=0.1$; b) rezultat uz zadani $\gamma=0.5$; c) rezultat uz zadani $\gamma=0.9$; d) originalna slika; e) rezultat uz zadani $\gamma=1.5$; f) rezultat uz zadani $\gamma=2.3$; g) rezultat uz zadani $\gamma=3$

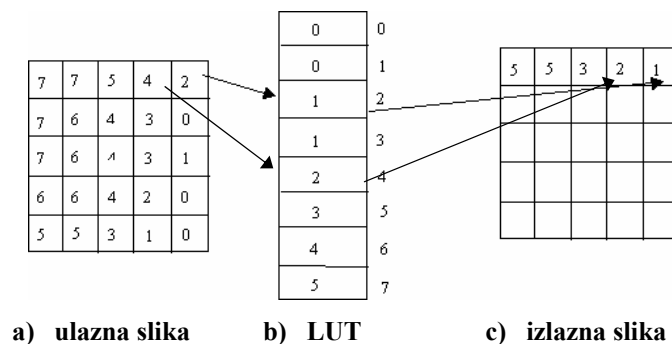


Slika 4.7 Promjene histograma slike uslijed gama korekcije: a) histogram slike 4.6a); b) histogram slike 4.6d); c) histogram slike 4.6g).

4.3.3 Tablice pretraživanja

Prethodne operacije je lako implementirati tzv. "look-up" tablicama (LUT) - tablicama pretraživanja [2]. "Look-up" tablice su polja koja kao indekse elemenata polja koriste ulazne, originalne vrijednosti slikovnih elemenata, a pojedini elementi polja su nove vrijednosti. Poboljšana se slika na ovaj način gradi ponavljanjem jednostavnog postupka traženja nove vrijednosti na način da se uzme element polja s indeksom koji odgovara ulaznoj vrijednosti slikovnog elementa, i tako za svaki slikovni element.

Ovakva implementacija je vrlo efikasna jer reducira ponavljajuća računanja. Naime, za 8-bitne sive slike potrebno je izračunati samo 256 izlaznih vrijednosti bez obzira na veličinu slike. Pri tome se provodi provjera granica pa se sve rezultirajuće vrijednosti veće od 255 fiksiraju na 255, a manje od 0 na 0. Dakle, ako se ulaznim vrijednostim treba npr. dodati neka vrijednost za sivu sliku dimenzije 512×512 trebalo bi obaviti 262 144 zbrajanja i onda još duplo toliko usporedbi za provjeru je li došlo do preljeva ili podljeva, dok je pri korištenju LUT-a dovoljno za sve moguće izlaze samo 256 zbrajanja plus usporedbe.



Slika 4.8 Primjer djelovanja tablice pretraživanja za trobitnu sliku: a) slika s naznačenim vrijednostima slikovnih elemenata, te vrijednosti predstavljaju indekse tablice pretraživanja b), a vrijednost elementa tablice pretraživanja s određenim indeksom je nova vrijednost slikovnog elementa slike.

Na slici 4.8 je dan primjer LUT-a za 3-bitnu sliku (slika preuzeta s [2]).

Osim toga, može se štediti i memorija. Isti se spremnik može koristiti kao ulazni i kao izlazni. Svaka vrijednost slikovnog elementa u ulaznom spremniku se koristi kao indeks za LUT, a zamjenjuje se povratnom vrijednošću iz LUT-a.

4.4 Modeliranje histograma

Postupci modeliranja histograma se temelje na ideji da se slika mijenja tako da se dobije histogram željenog oblika. Vrsta i stupanj poboljšanja ovisi o prirodi traženog histograma. U ove postupke spada izjednačavanje histograma i specifikacija histograma [3].

4.4.1 Izjednačavanje histograma

Izjednačavanje histograma (*engl. histogram equalization*) [3] se zasniva na pretpostavci da je informacija koju slika nosi povezana s vjerojatnošću pojave svake nijanse sivog te da se za

maksimizaciju informacije treba koristiti funkcija koja redistribuira vjerojatnost pojave sivih nijansi tako da bude uniformna. Ovo je jedna od najpopularnijih metoda poboljšanja kontrasta.

Ovaj postupak se naziva i izravnavanje histograma, što može navesti na krivi trag. Naime, ovaj postupak ne izravnava doslovno histogram slike nego redistribuira sive razine pa će histogram slike koji je originalno imao brijegove i udoline i nakon primjene ovog postupka imati brijegove i udoline, samo će oni biti pomaknuti. Zato bi možda korektniji termin bilo "raširivanje" histograma, a ne izravnavanje.

4.4.1.1 Teorijska osnova postupka

Pretpostavimo da su originalne i transformirane vrijednosti slikovnih elemenata slike kontinuirane slučajne varijable r i s i da su normalizirane tako da imaju vrijednosti u intervalu $[0,1]$. Pretpostavimo dalje da je funkcija transformacije vrijednosti slikovnih elemenata $s=f(r)$ monotono rastuća te da vrijedi $0 \leq f(r) \leq 1$ za $0 \leq r \leq 1$.

Neka je i inverzna funkcija monotona na intervalu $[0,1]$:

$$r = f^{-1}(s) \quad 0 \leq s \leq 1. \quad (4.8)$$

Te slučajne varijable r i s se mogu opisati funkcijama gustoće vjerojatnosti $p_r(r)$ i $p_s(s)$.

Po teoriji vjerojatnosti vrijedi:

$$p_s(s) = \left[p_r(r) \frac{dr}{ds} \right]_{r=f^{-1}(s)}. \quad (4.9)$$

Funkcija gustoće vjerojatnosti $p_r(r)$ se može aproksimirati, uz gornje pretpostavke, normaliziranim histogramom originalne slike. Cilj izjednačavanja histograma je poboljšana slika s uniformnom distribucijom (histogramom). Dakle, želi se dobiti $p_s(s)=1$ i traži transformacijska funkcija koja to osigurava.

Pretpostavimo da je transformacijska funkcija definirana s:

$$s = f(r) = \int_0^r p_r(w)dw. \quad (4.10)$$

To je funkcija distribucije slučajne varijable r . Tada je derivacija varijable s po r :

$$\frac{ds}{dr} = p_r(r). \quad (4.11)$$

Kada se (4.11) uvrsti u (4.9), dobije se za $p_s(s)$:

$$\begin{aligned} p_s(s) &= \left[p_r(r) \frac{1}{p_r(r)} \right]_{r=f^{-1}(s)} \\ &= [1]_{r=f^{-1}(s)} \\ &= 1 \end{aligned} \quad (4.12)$$

Ovaj rezultat je neovisan o inverznoj transformacijskoj funkciji $f^{-1}(s)$ što je važno naglasiti jer nije uvijek lako niti moguće analitički izraziti $f^{-1}(s)$.

Dakle, ako se želi dobiti poboljšana slika s uniformnom distribucijom, za transformacijsku funkciju se koristi funkcija distribucije slučajne varijable r . Time se povećava dinamički raspon slikovnih elemenata što ima za posljedicu promjenu izgleda i kontrasta slike.

4.4.1.2 Diskretizacija postupka

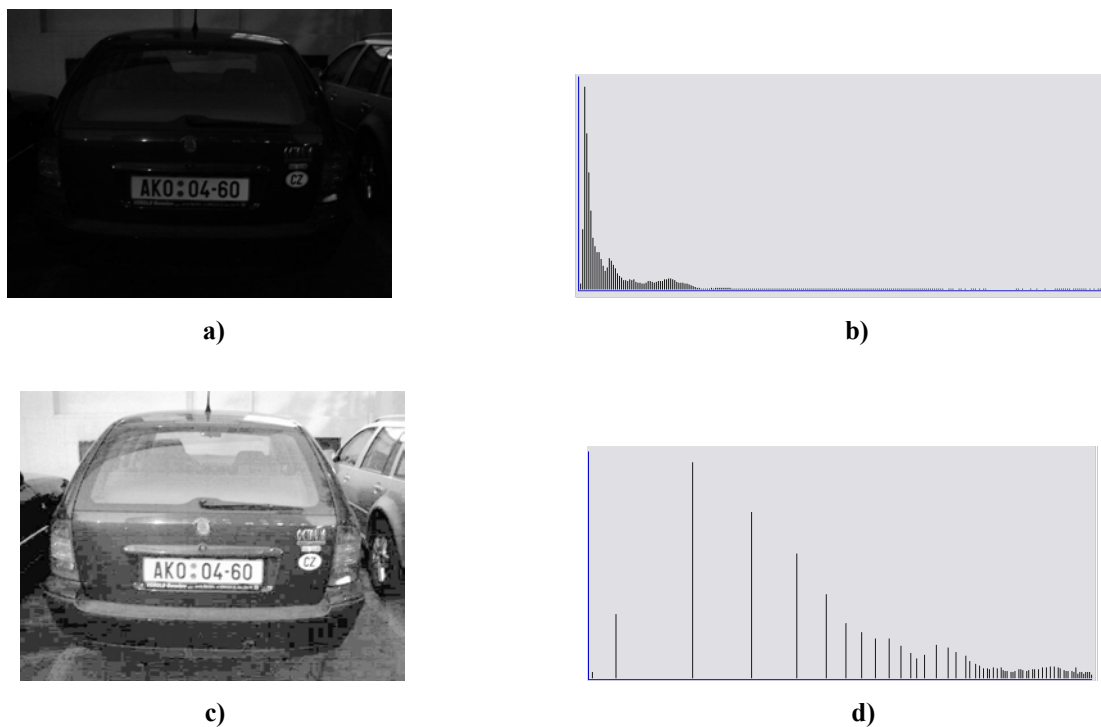
Gornja funkcija (4.10) je dana u kontinuiranom obliku. U obradi digitalnih slika se koristi njena diskretna inačica. Funkcija gustoće vjerojatnosti u diskretnom obliku je dana s:

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{N}, \quad (4.13)$$

gdje je $0 \leq r_k \leq I$ normalizirana vrijednost slikovnog elementa, indeks $k=0,1,2,\dots,255$, n_k je broj slikovnih elemenata koji imaju sivu razinu k , a N je ukupni broj slikovnih elemenata na slici. Dakle, $p_r(r_k)$ je vrijednost normaliziranog histograma za sivu razinu k . Transformacijska funkcija postaje:

$$s_k = f(r_k) = \sum_{i=0}^k p_r(r_i) = \sum_{i=0}^k \frac{n_i}{N}. \quad (4.14)$$

Vrijednosti s_k , $0 \leq s_k \leq 1$, se trebaju skalirati do 255 i zaokružiti do najbližeg cijelog broja da izlazne vrijednosti budu u rasponu 0 do 255. Zbog diskretizacije i zaokruživanja s_k izlazna slika neće imati savršeno uniformnu distribuciju, ali za potrebe poboljšanja kontrasta približno uniformna distribucija je zadovoljavajuća.



Slika 4.9 Djelovanje izjednačavanja histograma: a) originalna slika; b) originalni histogram; c) poboljšana slika; d) izjednačeni histogram.

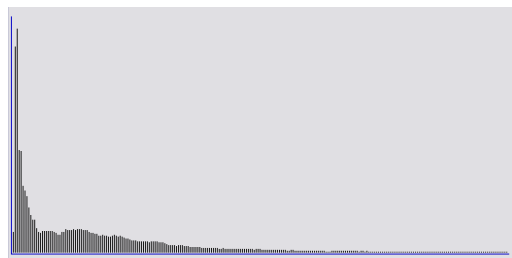
Izjednačavanje histograma je vrlo prikladno za slike koje imaju detalje "skrивene" u tamnim dijelovima. Velika prednost izjednačavanja histograma je automatizam izvođenja jer se ne trebaju ručno zadavati nikakvi parametri. Kako je ovo vrlo popularni postupak neki ga provode prije pokušaja s drugim operacijama što nije uvijek dobro rješenje jer se može srozati kvaliteta slika s dobrim kontrastom.

Slika 4.9 je dobar primjer "izvlačenja detalja". Na obrađenoj slici (slika 4.9c)) su vidljivi detalji koji se ne uočavaju na originalu (slika 4.9a)). Npr. oznaka tipa automobila je jedva vidljiva, antena na sredini automobila se jedva zamjećuje, obrisi susjednih automobila s lijeve i desne strane se samo naznačuju, a na obrađenoj slici je to sve puno vidljivije.

Moć izjednačavanja histograma da uvelike poboljša vidljivost detalja u tamnim područjima slike je očita i na slici 4.10, posebno ako se obrati pažnja na desnu stranu slike – ogradu i vegetaciju ili na unutašnjost automobila vidljivu kroz stražnje staklo. Istovremeno su nestali neki detalji koji su na originalnoj slici prisutni. Nestala je sjena s tablice, a isto tako igra svjetla i sjene na karoseriji automobila nije više tako izražajna (krov i lijeva strana automobila) jer su neke različite sive razine preslikane u istu izlaznu sivu razinu (na prikazu se ne vidi najbolje, ali histogram na slici 4.10d) ima manje iskorištenih sivih razina nego onaj na slici 4.10b)).



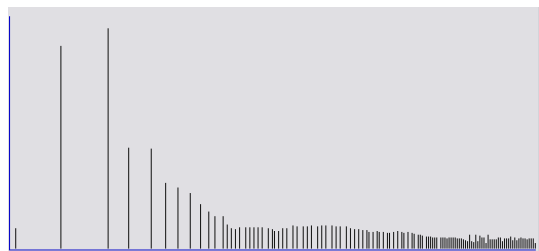
a)



b)



c)



d)

Slika 4.10 Djelovanje izjednačavanja histograma: a) originalna slika; b) originalni histogram; c) poboljšana slika; d) izjednačeni histogram.

U članku [12] se predlaže drugi pristup izjednačavanju histograma. Kako bi se izbjeglo računanje kumulativne distribucijske funkcije za svaku pojedinu sliku, u slučajevima kada treba obraditi puno slika u nizu, predlaže se uporaba 1-K-1 ograničene neuronske mreže za aproksimaciju te funkcije. Mreža adaptivno prilagođava svoje parametre i kombinira K monotono rastućih transformacijskih funkcija što dovodi do rezultatne transformacijske funkcije koja je vrlo slična kumulativnoj distribucijskoj funkciji preslikavanja kod izjednačavanja histograma. Razvoj ovakvog postupka se temelji na principu maksimizacije entropije izlaza (poboljšane slike), a to se dobiva upravo za kumulativnu funkciju distribucije.

4.4.2 Modifikacija izjednačavanja histograma – korištenje praga

Postupak poboljšanja kontrasta izjednačavanjem histograma uz korištenje praga (*engl. Thresholding Histogram Equalization - TGHE*) opisano je u [13]. Postupak je predviđen za tzv. tamne slike - slike koje imaju veliku tamnu pozadinu. Izjednačavanje histograma kod takvih slika daje blijede rezultate.

Kod ovakvih slika je potrebno spriječiti preslikavanje tamnih slikovnih elemenata u svjetlije sive razine. To se može postići ručnom specifikacijom željenog histograma (postupak će biti opisan u poglavlju 4.4.3), ali se onda gubi automatizam izvođenja. Zato je predložen ovaj postupak koji se može izvoditi automatski, a koji rješava problem tamnih pozadina na slikama.

Postupak djeluje tako da se sive nijanse do određenog praga ostavljaju nedirnutima, a nad ostalima se provodi izjednačavanje histograma. Uz zadani prag T_{HE} transformacijska funkcija glasi:

$$s_k = f(r_k) = \begin{cases} r_k & r_k \leq T_{HE} \\ \sum_{j=T_{HE}+1}^k \frac{n_j}{N - n_T} & r_k > T_{HE} \end{cases}, \quad (4.15)$$

gdje N označava ukupan broj slikovnih elemenata, a n_T označava broj slikovnih elemenata u tamnim područjima slike:

$$n_T = \sum_{n=0}^{T_{HE}} n_j. \quad (4.16)$$

Ako se pretpostavi da siva razina 0 odgovara pozadini, T_{HE} se može postaviti na 1 ili neku malu veću vrijednost (npr. 8). Međutim, prag se ne mora postaviti na fiksiranu vrijednost, nego se može implementirati jednostavan algoritam za njegovo određivanje. Npr. sive razine se mogu pretraživati, krenuvši od razine 0, do prve razine koja u histogramu ima veću vrijednost i ta se razina može postaviti kao prag. Time se sačuva automatsko izvođenje postupka.

Dobar primjer kako korištenje praga može poboljšati kvalitetu izlazne slike kada ulazna slika ima velike tamne površine se vidi na slici 4.11. Slika 4.11b) je rezultat izjednačavanja histograma. Dobivena je vrlo blijeda slika. Uz uvođenje praga $T_{HE}=1$ rezultat je već bolji kontrast (slika 4.11c)), a uz prag $T_{HE}=8$ (slika 4.11d)) se tamni automobil najbolje izdvaja i ono što je nama najzanimljivije jest da je na ovoj slici tablica najbolje vidljiva, a isto tako poboljšana je vidljivost oznake zemlje u odnosu na izjednačavanje histograma bez praga i s pragom 1. Razlike u histogramima se mogu pratiti na slici 4.12.



a)



b)

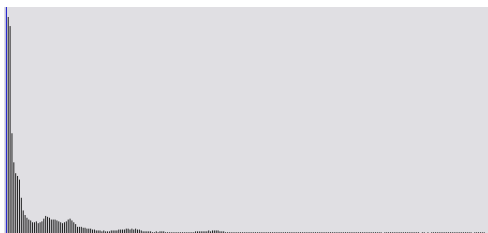


c)

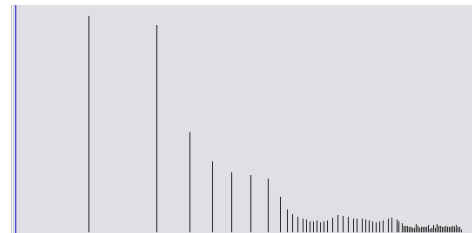


d)

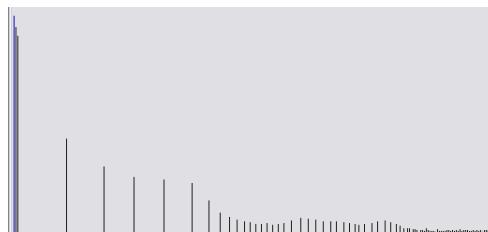
Slika 4.11 Usporedba izjednačavanja histograma i izjednačavanja histograma s pragom na slici s velikim tamnim površinama: a) originalna slika; b) rezultat izjednačavanja histograma, c) rezultat izjednačavanja histograma s pragom $T_{HE}=1$; d) rezultat izjednačavanja histograma s pragom $T_{HE}=8$.



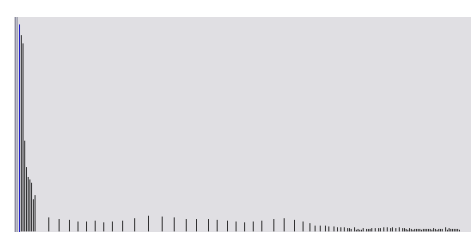
a)



b)



c)



d)

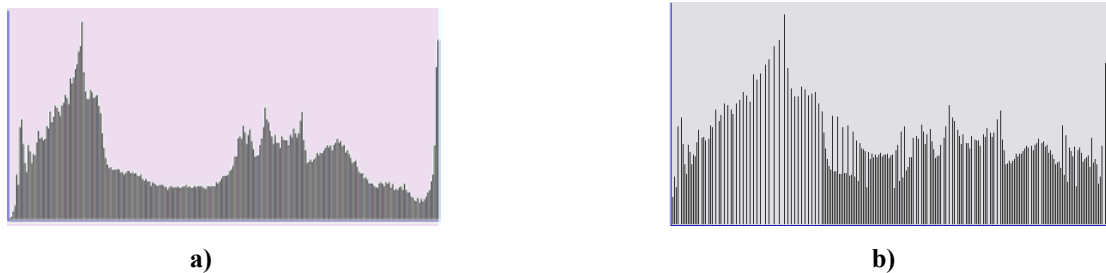
Slika 4.12 Usporedba izjednačavanja histograma i izjednačavanja histograma s pragom : a) originalni histogram; b) izjednačeni histogram; c) histogram izjednačen uz prag $T_{HE}=1$; d) histogram izjednačen uz prag $T_{HE}=8$.

S druge strane, slika 4.13 je primjer kako izjednačavanje histograma s korištenjem praga ne postiže bitno drugačije rezultate od osnovnog izjednačavanja histograma kada se primjenjuje na slike koje nemaju velikih tamnih područja jer doprinos slikovnih elemenata s malom vrijednošću (tamni slikovni elementi) u histogramu nije velik.

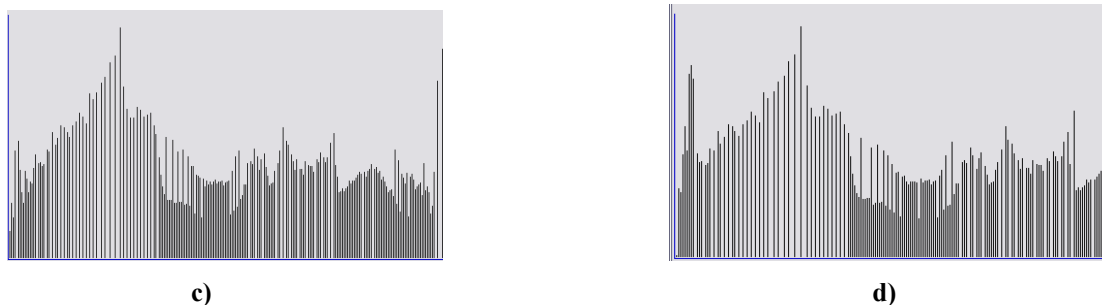
Rezultirajuće slike imaju gotovo iste histograme, što je vidljivo na slici 4.14.



Slika 4.13 Usporedba izjednačavanja histograma i izjednačavanja histograma s pragom na slici sa zadovoljavajućim kontrastom: a) originalna slika; b) rezultat izjednačavanja histograma; c) rezultat izjednačavanja histograma s pragom $T_{HE}=1$; d) rezultat izjednačavanja histograma s pragom $T_{HE}=8$.



Slika 4.14 Usporedba izjednačavanja histograma i izjednačavanja histograma s pragom : a) originalni histogram; b) izjednačeni histogram ...



Slika 4.14(nastavak) Usporedba izjednačavanja histograma i izjednačavanja histograma s pragom: c) histogram izjednačen uz prag $T_{HE}=1$; d) histogram izjednačen uz prag $T_{HE}=8$.

4.4.3 Specifikacija histograma

Osim uniformne distribucije, može se specificirati neka druga željena distribucija koja će naglasiti određene razine sivog. Postupke koji transformiraju originalnu sliku u sliku sa specificiranom distribucijom slikovnih elemenata, koristeći kao međukorak izjednačeni histogram originalne slike, nazivamo specifikacijom histograma [3].

Osnovni problem primjene ovog postupka je upravo određivanje traženog oblika histograma koji će poboljšati kontrast slike. Za rješavanje tog problema se primjenjuju dva pristupa:

- specificira se određena (poznata) funkcija gustoće vjerojatnosti kao što su Gaussova, Rayleigh, log-normalna, hiperbolna (Frei* je predložio da distribucija bude hiperbolna s obzirom da ljudski vidni sustav pokazuje logaritamski odziv na podražaj [5]) ili sl., a zatim se histogram gradi digitalizacijom te funkcije; ili
- histogram se specificira prema svojstvima prikaznog uređaja.

4.4.3.1 Teorijska osnova postupka

Neka kontinuirane slučajne varijable r i s predstavljaju sive nijanse originalne slike te konačne slike, respektivno. Znamo da slučajna varijabla t dobivena transformacijom :

$$t = \int_0^r p_r(w)dw = F(r) \quad (4.17)$$

ima uniformnu distribuciju. Da imamo na raspolaganju konačnu sliku, i njen histogram bi se mogao izjednačiti:

$$v = \int_0^s p_s(w)dw = G(s). \quad (4.18)$$

Dakle, tražena slika bi se mogla dobiti inverznom transformacijom varijable v , $s=G^{-1}(v)$. Međutim, to je samo hipotetska formulacija pošto upravo tražimo sive razine opisane varijablom s te nemamo rezultat izjednačavanja histograma v .

*W.Frei, *Image enhancement by image hyperbolization*, Comput. Graphics Image Process. 6, 1977.

Iz formula (4.17) i (4.18) proizlazi da bi $p_t(t)$ i $p_v(v)$ bile jednake uniformne gustoće vjerojatnosti s obzirom na to da je krajnji rezultat formule (4.10) neovisan o funkciji gustoće vjerojatnosti ispod integrala. Zato možemo koristiti sive razine t dobivene izjednačavanjem histograma originalne slike:

$$s = G^{-1}(t) = G^{-1}(F(r)). \quad (4.19)$$

Pod pretpostavkom da je $G^{-1}(t)$ singularna funkcija, postupak se provodi u sljedećim koracima [3]:

1. provodi se izjednačavanje histograma originalne slike;
2. specificira se željena funkcija gustoće vjerojatnosti $p_s(s)$ te prema formuli (4.18) određuje funkcija transformacije $G(s)$, treba se odrediti transformacija $G(s)$ koja daje uniformnu distribuciju;
3. primjenjuje se inverzna transformacija $s=G^{-1}(t)$ nad sivim razinama dobivenim u 1. koraku.

Međutim, kako pokazuje formula (4.19), nije potrebno eksplicitno provođenje izjednačavanja histograma originalne slike. Dovoljno je odrediti potrebnu transformaciju $F(r)$ te kombinaciju sa inverznom transformacijom G^{-1} da se dobije izravna veza konačnih sivih razina s s originalnim sivim razinama r . Problem nastaje kada se inverzna transformacija treba odrediti analitički. S kontinuiranim varijablama to može biti vrlo teško, ali u diskretnom slučaju se problem smanjuje pošto se radi o ograničenom broju mogućih sivih nijansi pa je izračun moguć.

Kao i kod izjednačavanja histograma, rezultirajući histogram će kod obrade digitalnih slika odstupati od specificiranog zbog diskretizacije i zaokruživanja pri preslikavanju. Oba postupka bi dala "savršene", odnosno točno specificirane histograme kada bi se radilo s kontinuiranim varijablama, a smanjivanjem broja mogućih vrijednosti varijabla, točnost se smanjuje.

Osim toga, u praksi inverzna transformacija $s=G^{-1}(t)$ često nije singularna, npr. kada nisu sve sive razine u histogramu popunjene pa funkcija distribucije ostaje konstantna preko tih nepopunjenih razina. Rješenje se sastoji u tome da se rezultirajući histogram pokuša "namjestiti" da bude što sličniji specificiranom.

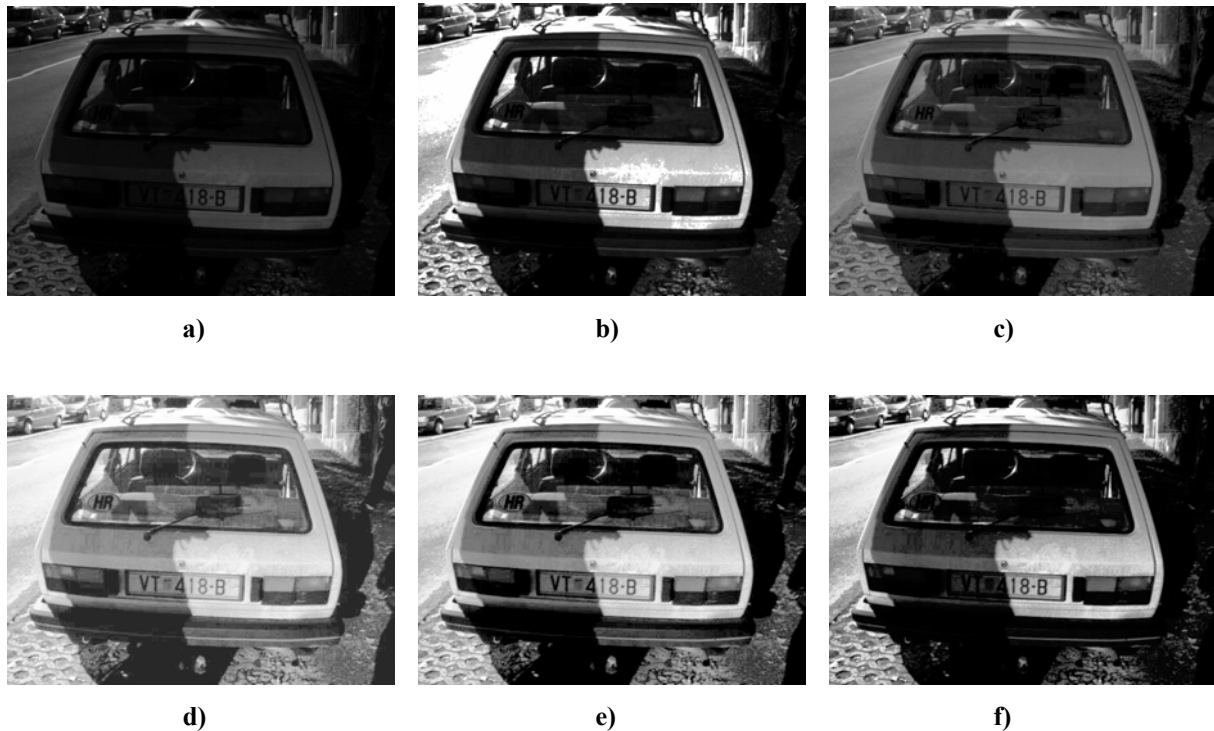
Specifikacija histograma je fleksibilnija od izjednačavanja histograma, koji sve slike tretira na isti način, pa može dati u nekim slučajevima bolje rezultate. Ovaj postupak je zapravo općenitiji od izjednačavanja histograma jer se uz $G^{-1}(F(r))=F(r)$ dobiva upravo izjednačavanje histograma.

4.5 Lokalni postupci u vremenskom području

Prethodno opisani postupci koji modificiraju histogram slike su globalni, preslikavanje sivih nijansi se izračunava na temelju vrijednosti slikovnih elemenata cijele slike. Oni imaju sposobnost poboljšanja ukupnog kontrasta i dinamičkog raspona slike i na taj način povećanja vidljivosti nekih detalja. Međutim, oni nisu uspješni kada kontrastne karakteristike variraju preko slike, odnosno kada slika ima neka područja izrazito tamna, a neka izrazito svijetla i

kada je potrebno poboljšanje detalja u manjim područjima slike. U takvim slučajevima, slikovni elementi u tim manjih područjima slike imaju mali ili zanemariv utjecaj na izračun transformacijske funkcije globalnih postupaka pa ne se ne može garantirati zadovoljavajući lokalni kontrast.

Kao primjer može poslužiti slika 4.15. Vidi se da problem predstavlja sjena drveta koja pada preko lijevog dijela automobila. Niti jedan od globalnih postupaka poboljšanja kontrasta ne može jednoliko poboljšati kontrast u tom dijelu slike gdje je sjena i u dijelu slike koji je bolje osvjetljen, tj. u kojem sjene nema.



Slika 4.15 Djelovanje globalnih postupaka na sliku s nejednolikim osvjetljenjem; a) originalna siva slika; b) rezultat "end-in search" rastezanja kontrasta (postotak=10%); c) rezultat gama korekcije ($\gamma=0.5$); d) rezultat izjednačavanja histograma; e) rezultat izjednačavanja histograma uz prag 1; f) rezultat izjednačavanja histograma uz prag 8.

Rješenje za takve slučajeve su lokalne metode koje uzimaju u obzir lokalne karakteristike slike.

Ove metode koriste preslikavanja prema sljedećoj jednadžbi:

$$I_0(x, y) = f(I(x, y), x, y), \quad (4.20)$$

što znači da transformacijska funkcija ne ovisi samo o sivoj nijansi promatranog slikovnog elementa, nego i o njegovoj poziciji u slici, o koordinatama x i y . To se postiže tako da se u izračunu u obzir uzima lokalno susjedstvo, najčešće kvadratni prozor. U općem slučaju, globalni postupci se modificiraju u lokalne na način da se odredi susjedstvo i njegov centar pomiče redom od jednog do drugog slikovnog elementa. U svakoj lokaciji se zatim računa histogram samo u tom susjedstvu na temelju kojeg se određuje transformacijska funkcija i

zatim se ona primjeni na centralni slikovni element. Nakon toga se susjedstvo pomiče u sljedeći slikovni element i procedura se ponavlja.

Fahnestock i Schowengerdt (* na stranici 13) su predložili postupak koji je lokalna inačica rastezanja kontrasta, a koji su nazvali lokalna modifikacija raspona (*engl. LRM - Local Range Modification*) [5]. U tom postupku se linearno rastezanje primjenjuje u ovisnosti o lokalnom minimumu i maksimumu sive nijanse, odnosno minimalnoj i maksimalnoj vrijednosti slikovnih elemenata u zadanom susjedstvu.

Pošto je izjednačavanje histograma najpopularniji i široko primjenjivani postupak, postoje razne modifikacije i prijedlozi poboljšanja od kojih su neki opisani u nastavku.

4.5.1 Lokalno izjednačavanje histograma

Lokalno ili adaptivno izjednačavanje histograma (*engl. LHE - Local Histogram Equalization ili AHE - Adaptive Histogram Equalization*) se razlikuje od osnovnog tipa izjednačavanja histograma, koji se naziva i globalim izjednačavanjem histograma (*engl. Global Histogram Equalization – GHE*) jer uzima u obzir cjelokupnu razdiobu sivih nijansi, po tome što se histogram ne računa iz cijele slike, nego se za svaki slikovni element, kao centar, odredi prozor i u tom susjedstvu se izračuna lokalni histogram i primjeni izjednačavanje histograma na centralni slikovni element.

4.5.1.1 Teorijska osnova postupka

AHE se može opisati pomoću nekoliko jednadžbi [6].

Pretpostavimo da ulazna slika I ima razine sivog r normalizirane između $-1/2$ i $1/2$. Prvi korak *AHE*-a je izračunavanje lokalnog histograma pri čemu je susjedstvo kvadratno - prozor f_w širine w koja je neparne vrijednosti (da bi slikovni element za koji se računa transformacijska funkcija bio točno središnji slikovni element u zadanom prozoru).

Lokalni histogram se u ovom slučaju računa kao konvolucija :

$$\hat{h}(x, y, r) = \delta(r, I(x, y)) *_{x,y} f_w(x, y), \quad (4.21)$$

gdje je $\delta(r, I(x, y))$ Kroneckerova funkcija :

$$\delta(r, I(x, y)) = \begin{cases} 1 & \text{ako } r = I(x, y) \\ 0 & \text{ako } r \neq I(x, y) \end{cases}, \quad (4.22)$$

a težinska funkcija f_w je dana s:

$$f_w(x, y) = \begin{cases} w^{-2} & |x| \leq (w-1)/2, \quad |y| \leq (w-1)/2 \\ 0 & \text{inače} \end{cases}. \quad (4.23)$$

Transformacijska funkcija lokalnog izjednačavanja histograma je:

$$\begin{aligned} f(x,y,r) &= -\frac{1}{2} + \sum_{\gamma < r} \hat{h}(x,y,\gamma) - \frac{1}{2} \hat{h}(x,y,r) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{\gamma < r} \hat{h}(x,y,\gamma) - \frac{1}{2} \sum_{\gamma > r} \hat{h}(x,y,\gamma) \end{aligned} \quad (4.24)$$

Prvi član je "offset" da bi i izlazne vrijednosti bile u rasponu -1/2 do 1/2, drugi je kumulativni histogram, a treći je dodan kako bi negiranje ulaznih vrijednosti slikovnih elemenata rezultiralo negiranjem izlaza [6]. Ako bi radili s vrijednostima slikovnih elemenata u rasponu 0÷1, funkcija bi se sastojala samo od središnjeg člana. Gornji izraz se može generalizirati koristeći tzv. kumulativnu funkciju f_c :

$$f_c(u,v) = f_0(u-v), \quad (4.25)$$

uz

$$f_0(d) = \begin{cases} 1/2 & B > d > 0 \\ 0 & d = 0 \\ -1/2 & 0 > d > -B \end{cases}, \quad (4.26)$$

pri čemu je B veći ili jednak maksimalnoj razlici vrijednosti slikovnih elemenata. Sada (4.24) postaje:

$$f(x,y,r) = \sum_{\gamma} \hat{h}(x,y,r) f_c(r,\gamma), \quad (4.27)$$

ili alternativno prikazano pomoću konvolucije:

$$f(x,y,r) = \hat{h}(x,y,r) * f_0(r). \quad (4.28)$$

Slika 4.16 prikazuje rezultate dobivene primjenom lokalnog izjednačavanja histograma na sliku 4.15a) i to redom uz zadanu širinu prozora: a) 9, b) 27, c) 39, d) 55, e) 77 i f) 101. Dobro se vidi kako *AHE* narušava ukupan dojam slike i stvara tzv. dojam šahovske ploče (mozaik). Taj je utjecaj veći što je prozor manji, tj. što se traži veća lokalnost postupka. Uz zadavanje većeg prozora se dobiva i "izglađenija" slika jer se bolje očuva ukupan dojam slike. Rezultat *AHE-a* sa zadanim prozorom 9×9 na slici 4.16a) pokazuje da uz male dimenzije prozora slika postaje toliko narušena da je teško uopće razlikovati neke detalje slike (npr. automobile na lijevoj, ogradu na desnoj strani slike, popločenje ispod automobila i dr.). Uz veće dimenzije prozora je sadržaj slike prepoznatljiviji i očito je da je subjektivno lakše ocjenjivati kontrast slika dobivenih lokalnim izjednačavanjem histograma s većim prozorima. Međutim, na svim slikama je očita prednost ovog postupka pred globalnim postupcima u mogućnosti poboljšavanja kontrasta i u tamnim i u svijetlijim dijelovima slike. Dovoljno je pogledati registarsku tablicu automobila i usporediti s rezultatima globalnih postupaka na slici 4.15. Za razliku od tih postupaka, lokalno izjednačavanje histograma producira podjednak kontrast u dijelu tablice prekrivene sjenom i u dijelu koji sjena ne pokriva.



a)



b)



c)



d)



e)



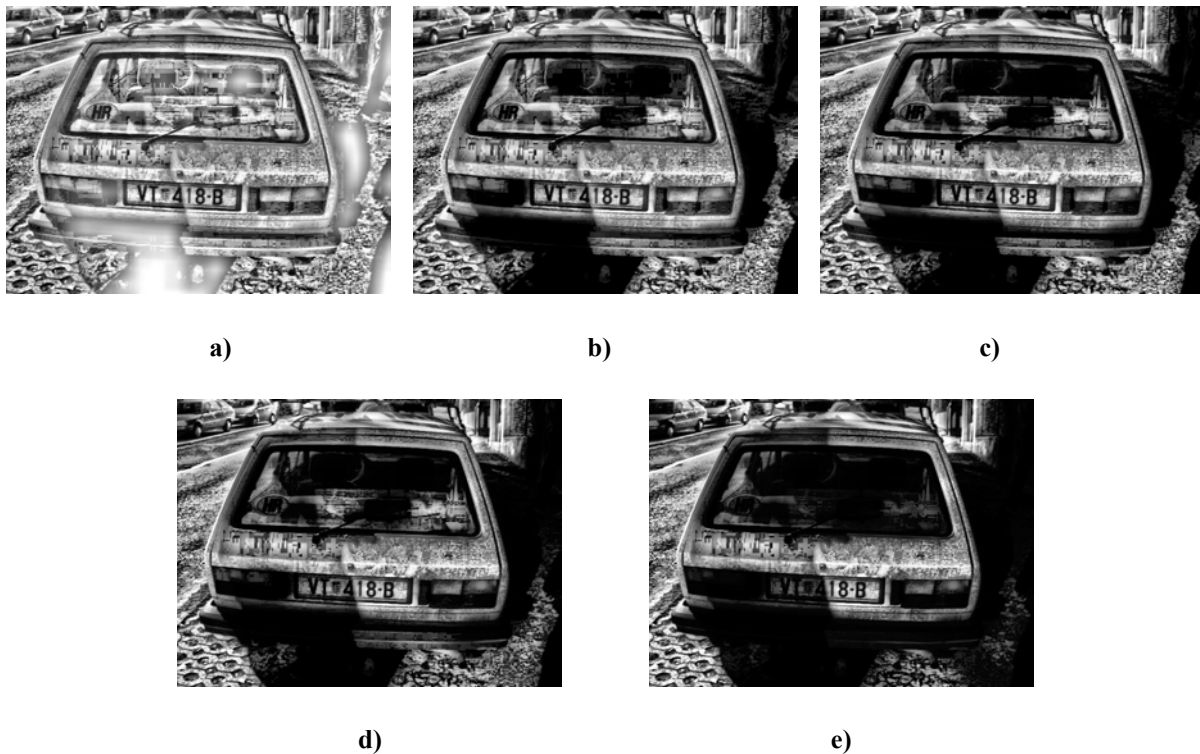
f)

Slika 4.16 Rezultati dobiveni primjenom lokalnog izjednačavanja histograma na sliku 4.15a) uz zadane različite veličine prozora: a) 9×9 ; b) 27×27 ; c) 39×39 ; d) 55×55 ; e) 77×77 ; f) 101×101 .

4.5.1.2 Varijacije lokalnog izjednačavanja histograma

Lokalno izjednačavanje histograma ima manu da mijenja ukupni dojam slike jer određena područja slike koja bi trebala biti svjetlija od drugih postaju tamnija, što je posljedica izjednačavanja različitim histogramima. Taj problem se može najjednostavnije riješiti korištenjem većeg prozora. Međutim, postoje i različite varijacije lokalnog izjednačavanja histograma koje se uglavnom koncentriraju na jedan od dva ključna elementa lokalnog izjednačavanja histograma, a to su procjena histograma (4.21) te kumulacija (4.27) koja prevodi histogram u preslikavanje [6]. Tako su predlagani različiti oblici težinske funkcije f_w , od jednostavnog kvadratnog prozora koji se koristi u osnovnom obliku *AHE*-a, do koničnih funkcija te cirkularnih Gaussovih funkcija koje daju veću težinu slikovnim elementima koji su bliži promatranom slikovnom elementu. Prijedlozi su bili da se dimenzije prozora mijenjaju kroz sliku, da se oko svakog slikovnog elementa gradi posebno susjedstvo ili da se koristi matematička morfologija u odabiru spojenih komponenti na koje se primjenjuje izjednačavanje. Drugi prijedlozi se odnose na modifikaciju kumulativne funkcije f_c .

I u slučaju *AHE*-a se može uvesti prag na isti način kao kod globalnog izjednačavanja histograma (poglavlje 4.4.2). Dakle, sive razine manje ili jednake zadanom pragu se ostavljaju nepromijenjenim, a nad ostalima se provodi lokalno izjednačavanje histograma. Međutim, ovdje to ima manje smisla nego kod globalnog izjednačavanja histograma jer se upravo cilja na lokalno poboljšanje kontrasta i to ponajviše u ograničenim tamnim dijelovima slike, a na ovaj način se te tamne sive nijanse ostavljaju iste kao što su na originalnoj slici. Na slici 4.17 se može usporediti rezultat *AHE*-a i *TAHE*-a uz korištenje praga te vidjeti potvrda ovog zaključka (već kod $T_{HE}=3$ (slika 4.17c) je puno manje poboljšanje kontrasta oznake države, a povećanjem praga je sve lošiji i kontrast sjenovitog dijela registrarske tablice).

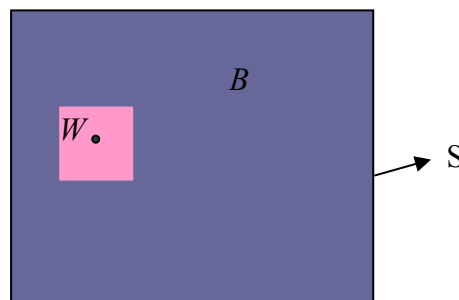


Slika 4.17 Uvođenje praga u postupak lokalnog izjednačavanja histograma: a) rezultat *AHE*-a uz veličinu prozora 45×45 ; b) rezultat *TAHE*-a uz veličinu prozora 45×45 i $T_{HE}=1$; c) rezultat *TAHE*-a uz veličinu prozora 45×45 i $T_{HE}=3$; d) rezultat *TAHE*-a uz veličinu prozora 45×45 i $T_{HE}=5$; e) rezultat *TAHE*-a uz veličinu prozora 45×45 i $T_{HE}=8$.

4.5.2 CLHE

Jedna od vrlo zanimljivih modifikacija lokalnog izjednačavanja histograma je ograničeno lokalno izjednačavanje histograma (*engl. CLHE-Constrained Local Histogram Equalization*) [5]. Cilj te metode je da se uravnoteži poboljšanje lokalnog kontrasta i održavanje ukupnog dojma slike na način da se ograniči promjena transformacijske funkcije lokalnog izjednačavanja histograma tako da bude kontinuirana. Naime, kada se provodi izjednačavanje histograma za svaki slikovni element posebno, u slučaju da postoje velike razlike između lokalnih histograma koji su blizu i transformacijska funkcija sivih razina će se skokovito mijenjati što dovodi do narušavanja izgleda slike.

4.5.2.1 Teorijska osnova postupka



Slika 4.18 Područje unutar prozora W (rozi kvadratić) i područje izvan prozora B (ljubičasti ostatak slike S).

Ovaj postupak uvodi novi način računanja lokalnog histograma:

$$h_L(r) = \alpha h_W(r) + (1 - \alpha) h_B(r), \quad (4.29)$$

gdje je h_W normalizirani histogram u prozoru, h_B normalizirani histogram ostatka slike (vidi sliku 4.18), te $0 \leq \alpha \leq 1$. Faktor α simulira utjecaj okoline samog područja interesa. Na taj se način pokušava simulirati svojstvo ljudskog vidnog sustava da se mijenja prilagođavajući se području interesa, ali i da okolina područja interesa utječe na njega. Ako A_W i A_S predstavljaju područja prozora W i slike S , vidimo da uz $\alpha = A_W/A_S$ imamo globalno izjednačavanje histograma, a uz $\alpha = 1$ lokalno izjednačavanje histograma. Kada se lokalni histogrami računaju na ovaj način, svi će imati iste razine sivog kao globalni histogram slike, ali s drugim amplitudama za pojedine razine, a upravo to naglašava lokalne karakteristike.

Osim toga, ova je metoda zanimljiva jer pristupa izjednačavanju histograma kao problemu optimizacije funkcionala. Izjednačavanje histograma se može promatrati kao da se histogram želi redistribuirati preko cijelog raspona sivih razina na način da se minimizira prostor između iskorištenih razina. Zato se izjednačavanje histograma može iskazati kao općeniti minimizacijski problem. Pretpostavimo da je $v[f(r)]$ funkcional transformacijske funkcije f . Vrijedi:

$$v[f(r)] = \int F(r, f, f_r) dr = \int \frac{1}{h(r)} f_r^2 dr, \quad (4.30)$$

gdje je $h(r)$ histogram slike (globalni), a f_r je prva derivacija transformacijske funkcije f_r po r .

Traži se funkcija f koja minimizira funkcional v . Rješavamo Eulerovu diferencijalnu jednačinu:

$$F_f - \frac{d}{dr} F_{f_r} = 0. \quad (4.31)$$

Dakle,

$$-\frac{d}{dr} \left(\frac{1}{h(r)} 2f_r \right) = 0. \quad (4.32)$$

Integriranjem po r dobivamo:

$$f_r = Ch(r), \quad (4.33)$$

gdje je C konstanta. Još jednim integriranjem po r dobivamo:

$$f(r) = f(0) + \int_0^r h(w)dw. \quad (4.34)$$

Pošto vrijedi $f(0)=0$ i $f(1)=1$, konstanta $C=1$ te dobivamo:

$$f(r) = \int_0^r h(w)dw, \quad (4.35)$$

odnosno (4.10) jer je normalizirani histogram ekvivalencija za funkciju gustoće vjerojatnosti.

Dakle, izjednačavanje histograma se može postići integralom (4.10) ili rješavanjem diferencijalne jednačine (4.31).

Za potrebe lokalnog izjednačavanja histograma koristi se transformacijska funkcija $f(x,y,r)$ pa se minimizira funkcional:

$$v[f(x, y, r)] = \int \frac{1}{h_w(x, y, r)} f_r^2 dr. \quad (4.36)$$

Sada se radi s lokalnim histogramom $h_w(r)$ unutar prozora. To je ekvivalentno minimiziranju funkcionala:

$$v[f(x, y, r)] = \iiint \frac{1}{h_w(x, y, r)} f_r^2 dr dx dy. \quad (4.37)$$

Time je opisano lokalno izjednačavanje histograma.

Sada se uvodi u gornji funkcional izgladujući izraz i lokalni histogram $h_L(r)$ izračunan prema (4.29):

$$v[f(x, y, r)] = \iiint \left[\frac{1}{h_L(x, y, r)} f_r^2 + \lambda(f_x^2 + f_y^2) \right] dr dx dy, \quad (4.38)$$

gdje drugi izraz pod integralom pokušava održati transformaciju sivih razina kontinuiranom, a $\lambda > 0$ je ravnotežni faktor. Odgovarajuća diferencijska jednačba je:

$$f_{xx} + f_{yy} + \frac{f_{rr}}{\lambda h_L} - \frac{h_{Lr} f_r}{\lambda h_L} = 0. \quad (4.39)$$

Postupak *CLHE* se provodi konstrukcijom histograma prema jednačbi (4.29) te rješavanjem diferencijske jednačbe (4.39) korištenjem "*successive over-relaxation*" (*SOR*) metode.

Najprije se f_{xx} , f_{yy} , f_{rr} , f_r i h_r prikažu kao :

$$f_{xx} = f_{i+1,j,k} + f_{i-1,j,k} - 2f_{i,j,k}, \quad (4.40)$$

$$f_{yy} = f_{i,j+1,k} + f_{i,j-1,k} - 2f_{i,j,k}, \quad (4.41)$$

$$f_{rr} = f_{i,j,k+1} + f_{i,j,k-1} - 2f_{i,j,k}, \quad (4.42)$$

$$f_r = \frac{f_{i,j,k+1} - f_{i,j,k-1}}{2}, \quad (4.43)$$

$$h_{Lr} = \frac{h_{Li,j,k+1} - h_{Li,j,k-1}}{2}. \quad (4.44)$$

Zatim se rješenje traži *SOR* metodom:

$$f_{i,j,k}^{n+1} = f_{i,j,k}^n + \frac{\omega}{a} \xi_{i,j,k}^n, \quad (4.45)$$

gdje je $\xi_{i,j,k} = (f_{xx} + f_{yy} + f_{rr}/\lambda h_L - h_{Lr} f_r / \lambda h_L^2)^n_{i,j,k}$, $a = 4 + 2/\lambda h_L^n_{i,j,k}$, ω je parametar pre-relaksacije i on je $1 < \omega < 2$.

Za sve početne transformacije $f_{i,j,k}^0$ predloženo je uzeti transformacijsku funkciju linearnog rastezanja kontrasta. Uvjet zaustavljanja iteracija je da $\sum_{i,j,k} \xi_{i,j,k}^n$ bude manji od zadane konstante ili da mu promjena bude vrlo mala.

Na slici 4.19 u zadnjem retku su slike dobivene primjenom modificiranog postupka *CLHE* uz različite faktore α . Postupak je modificiran od prethodno opisanog u tome što se izjednačavanje histograma ne izračunava *SOR* metodom nego se lokalni histogram izračunava po formuli (4.29), a zatim se vrši lokalno izjednačavanje histograma kao kod postupka *AHE*. Može se vidjeti kako faktor α utječe na rezultate. S najvećim zadanim faktorom $\alpha = 0.8$ (slika 4.19f)) rezultat je najsličniji onom dobivenom primjenom postupka *AHE* (slika 4.19c)). Smanjenjem faktora α se smanjuje i utjecaj lokalnog histograma unutar prozora na ukupni lokalni histogram pa se dobiva rezultat sve sličniji rezultatu *GHE* (slika 4.19b)). Vidi se da je uz $\alpha = 0.2$ (4.19d)) rezultat već vrlo blizak slici dobivenoj primjenom *GHE-a*. U slučaju $\alpha = 0.5$ (slika 4.19e)) je uravnotežen lokalni i globalni utjecaj. Uz manji α dobiva se izgladenija slika manje narušenog ukupnog dojma.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Slika 4.19 Rezultati modificiranog *CLHE* postupka: a) originalna slika; b) rezultat *GHE-a*; c) rezultat *AHE-a*; d) rezultat *CLHE-a* s $\alpha=0.2$; e) rezultat *CLHE-a* s $\alpha=0.5$; f) rezultat *CLHE-a* s $\alpha=0.8$;

5. Postupci u frekvencijskom području

Slika se iz vremenskog područja u frekvencijsko područje prevodi Fourierovom transformacijom, te obrnuto iz frekvencijskog u vremensko inverznom Fourierovom transformacijom [3]. Prostorna frekvencija slike (*engl. spatial frequency*) se odnosi na periodičnost s kojom se mijenjaju vrijednosti intenziteta slike [2]. Oni dijelovi slike koji imaju visoku prostornu frekvenciju, kao što su rubovi, imaju veliku promjenu intenziteta na maloj udaljenosti u slici. Svaka točka slike u frekvencijskom području predstavlja određenu frekvenciju koju sadrži slika u vremenskom području, te vrijednost točke F slike u frekvencijskom području govori koliko se mijenja vrijednost intenziteta u slici preko određene udaljenosti povezane s tom točkom F . Frekvencijsko područje je zanimljivo jer može iskazati periodične odnose iz vremenskog područja te stoga što su neki operatori obrade slika efikasniji i praktičniji samo ako se primjene u frekvencijskom području.

5.1 Diskretna Fourierova transformacija

Fourierova transformacija sliku rastavlja na njezine sinus i kosinus dijelove. Za digitalne slike koristi se diskretna Fourierova transformacija (*DFT*) te transformirana slika neće sadržavati sve frekvencije koje tvore sliku, nego samo skup uzoraka koji je dovoljno velik da u potpunosti opiše sliku iz vremenskog područja. Slika u frekvencijskom području je iste veličine kao i ona u vremenskom jer broj frekvencija odgovara broju slikovnih elemenata u vremenskom području.

2-D *DFT* za sliku dimenzija $M \times N$ je dana s [3]:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(ux/M + vy/N)}, \quad (5.1)$$

gdje $f(x, y)$ predstavlja sliku u vremenskom području, a eksponencijalni član je bazna funkcija koja odgovara svakoj točki $F(u, v)$ u frekvencijskom području. Bazne funkcije su sinusni i kosinusni valovi sa rastućim frekvencijama pa $F(0, 0)$ predstavlja istosmjernu komponentu slike koja odgovara prosječnom intenzitetu, a $F(M, N)$ predstavlja najvišu frekvenciju.

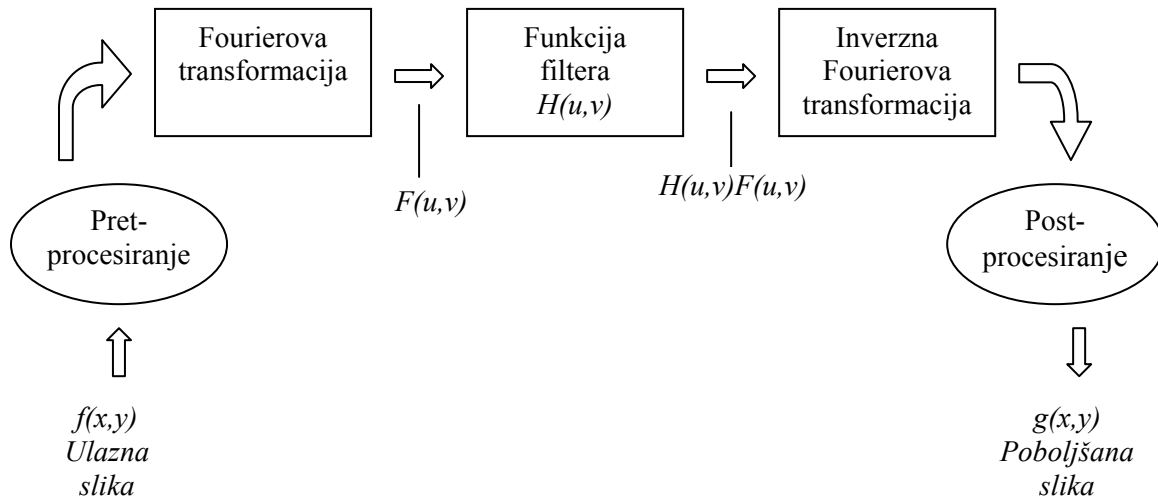
Inverzna diskretna Fourierova transformacija za prevođenje slike iz frekvencijskog u vremensko područje je:

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi(ux/M + vy/N)}. \quad (5.2)$$

Fourierovom transformacijom se dobije izlazna slika s kompleksnim vrijednostima što se može prikazati s realnim i imaginarnim dijelovima ili pak s amplitudom i fazom. Obično se prikazuje samo amplituda koja sadrži većinu informacije o slici iz vremenskog područja, ali je za povratak u vremensko područje važno sačuvati informaciju i o fazi kako bi inverzna Fourierova transformacija dala pravilnu sliku u vremenskom području.

5.2 Frekvencijski filteri – prostorne maske

Frekvencijski filteri se koriste za obradu slike u frekvencijskoj domeni. Nakon što se slika transformira DFT -om, jednostavno se pomnoži s funkcijom filtera i zatim vrati u vremensko područje inverznom DFT -om. Proces je prikazan na slici 5.1 (slika preuzeta s [4]).



Slika 5.1 Koraci filtriranja u frekvencijskom području

Dakle, rezultirajuća filtrirana slika $g(x,y)$ se dobije transformacijom:

$$g(x, y) = \mathfrak{F}^{-1}[H(u, v)F(u, v)], \quad (5.3)$$

gdje je $F(u,v)$ originalna slika u frekvencijskoj domeni, a $H(u,v)$ je funkcija filtera koja se naziva transfernom funkcijom (*engl. transfer function*).

Svi frekvencijski filteri se teoretski mogu implementirati i u vremenskoj domeni, jer je množenje u frekvencijskoj domeni ekvivalentno konvoluciji u vremenskoj domeni. Vrijedi konvolucijski teorem:

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) \Leftrightarrow g(x, y) = h(x, y) * f(x, y), \quad (5.4)$$

gdje je $G(u,v)$ filtrirana slika u frekvencijskoj domeni, $h(x,y)$ je prostorna konvolucijska maska, a $f(x,y)$ originalna slika u vremenskoj domeni.

Dvodimenzionalna diskretna konvolucija je dana s:

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n)h(x - m, y - n), \quad (5.5)$$

pa se uz kvadratnu konvolucijsku masku dimenzija $W \times W$ (pretpostavka je da je W neparan) izlazna slika računa na sljedeći način:

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) = \sum_{m=-(W-1)/2}^{(W-1)/2} \sum_{n=-(W-1)/2}^{(W-1)/2} f(m, n) h(x - m, y - n). \quad (5.6)$$

Filtriranje je računarski manje zahtjevno u vremenskom području ako se radi o malim konvolucijskim maskama, te se u takvim slučajevima uglavnom provodi sa prostornim konvolucijskim maskama.

Za cilj prevođenja frekvencijskih filtera u konvolucijske maske može se postaviti da se dobije aproksimacija s najmanjom kvadratnom greškom [3]. Pošto je $H(u, v)$ Fourierova transformacija maske $h(x, y)$ vrijedi:

$$H(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} h(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)/N}, \quad (5.7)$$

$$h(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} H(u, v) e^{j2\pi(ux+vy)/N}, \quad (5.8)$$

uz pretpostavku da se radi s kvadratnim slikama dimenzija $N \times N$. Ako se $h(x, y)$ ograniči te zada da iznosi 0 za $x > n$ i $y > n$, gdje je $n < N$, dobit ćemo masku \hat{h} dimenzija $n \times n$ s Fourierovm transformacijom:

$$\hat{H}(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{n-1} \hat{h}(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)/N}. \quad (5.9)$$

Trebamo naći koeficijente od $\hat{h}(x, y)$ koji minimiziraju grešku:

$$e^2 = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} \left| \hat{H}(u, v) - H(u, v) \right|^2. \quad (5.10)$$

Uvođenjem kompleksnih matrica, tj. vektora $\hat{\mathbf{H}}$ i $\hat{\mathbf{h}}$:

$$\hat{H}(u, v) \Rightarrow \hat{\mathbf{H}}(i) \quad (5.11)$$

za $i = uN + v$, te

$$\hat{h}(u, v) \Rightarrow \hat{\mathbf{h}}(k) \quad (5.12)$$

za $k = xN + y$,

formula (5.9) se može pisati kao:

$$\hat{\mathbf{H}} = \mathbf{C} \hat{\mathbf{h}}, \quad (5.13)$$

gdje je $\hat{\mathbf{H}}$ vektor reda N^2 , $\hat{\mathbf{h}}$ vektor reda n^2 , a \mathbf{C} matrica s eksponencijalnim članovima dimenzija $N^2 \times n^2$:

$$\frac{1}{N} e^{(-j2\pi(ux+vy)/N)} \Rightarrow \mathbf{C}(i,k). \quad (5.14)$$

Uz uvođenje matrice \mathbf{H} za $H(u,v)$ na ekvivalentan način kao što je učinjeno s $\hat{H}(u,v)$, kvadratna greška se može iskazati kao:

$$\begin{aligned} e^2 &= (\hat{\mathbf{H}} - \mathbf{H})^* (\hat{\mathbf{H}} - \mathbf{H}) \\ &= \|\hat{\mathbf{H}} - \mathbf{H}\|^2 \\ &= \|\mathbf{C}\hat{\mathbf{h}} - \mathbf{H}\|^2 \end{aligned} \quad (5.15)$$

Izjednačavanjem parcijalne derivacije s nulom:

$$\frac{\partial e^2}{\partial \hat{\mathbf{h}}} = 2\mathbf{C}^* (\mathbf{C}\hat{\mathbf{h}} - \mathbf{H}) = 0 \quad (5.16)$$

dobijemo formulu za izračun $\hat{\mathbf{h}}$:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{h}} &= (\mathbf{C}^* \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^* \mathbf{H} \\ &= \mathbf{C}^\# \mathbf{H} \end{aligned} \quad (5.17)$$

gdje se matrica $\mathbf{C}^\# = (\mathbf{C}^* \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^*$ naziva *Moore-Penrose-ovim generaliziranim inverzom*.

Gornja formula (5.17) daje koeficijente s najmanjom kvadratnom greškom za konstrukciju konvolucijske maske $\hat{h}(x,y)$ dimenzija $n \times n$ iz zadane funkcije filtera $H(u,v)$ dimenzija $N \times N$.

U općem slučaju su članovi $\hat{h}(x,y)$ kompleksni, ali ako je frekvencijski filter realan i simetričan, onda će i konvolucijska maska biti takva.

Međutim, pošto se radi samo o aproksimaciji, u praksi se ne može uvijek odrediti dovoljno dobra maska za reprezentaciju filtera. U tom slučaju, ili ako aproksimacija filtera rezultira velikom konvolucijskom maskom, provodi se filtriranje u frekvencijskom području. Razvijen je algoritam brze Fourierove transformacije (*eng. Fast Fourier Transform (FFT) algorithm*) koji smanjuje broj operacija prilikom transformacije pa se time dobiva ubrzanje [3].

Filteri se dijele u tri skupine: niskopropusni, visokopropusni i pojasno-propusni.

Niskopropusni filter prigušuje visoke frekvencije, a niske ostavlja nepromijenjenim. Rezultat u vremenskom području je ekvivalentan uporabi izgladujuće maske (*engl. smoothing mask*):

$$I'(x_0, y_0) = \frac{1}{W^2} \sum_{x=x_0-(W-1)/2}^{x_0+(W-1)/2} \sum_{y=y_0-(W-1)/2}^{y_0+(W-1)/2} I(x, y), \quad (5.18)$$

jer, kao što je već rečeno, visoke frekvencije odgovaraju ostrim promjenama intenziteta, dakle rubovima, detaljima i šumu u vremenskom području. Slika (5.2) prikazuje takvu masku dimenzija 3×3 . Frekvencija iznad koje se reže (*engl. cutoff frequency*) je određena veličinom

maske – veća dimenzija maske znači nižu frekvenciju rezanja. Niskopropusnim filtriranjem se dobiva slika koja sadrži samo postepeno promjenjivu pozadinu originalne slike.

$\frac{1}{9}$ $(x-1, y-1)$	$\frac{1}{9}$ $(x-1, y)$	$\frac{1}{9}$ $(x-1, y+1)$
$\frac{1}{9}$ $(x, y-1)$	$\frac{1}{9}$ (x, y)	$\frac{1}{9}$ $(x, y+1)$
$\frac{1}{9}$ $(x+1, y-1)$	$\frac{1}{9}$ $(x+1, y)$	$\frac{1}{9}$ $(x+1, y+1)$

Slika 5.2 Izgladujuća maska veličine 3×3

Visokopropusni filter prigušuje niske frekvencije i time potiskuje područja slike s pretežno konstantnim intenzitetom, a poboljšava rubove i detekciju rubova u vremenskoj domeni. Maska u vremenskoj domeni može biti npr. oblika (za susjedstvo 3×3 prikazana na slici 5.3):

$$I'(x_0, y_0) = I(x_0, y_0) - \frac{1}{W^2} \sum_{x=x_0-(W-1)/2}^{x_0+(W-1)/2} \sum_{y=y_0-(W-1)/2}^{y_0+(W-1)/2} I(x, y). \quad (5.19)$$

$\frac{-1}{9}$ $(x-1, y-1)$	$\frac{-1}{9}$ $(x-1, y)$	$\frac{-1}{9}$ $(x-1, y+1)$
$\frac{-1}{9}$ $(x, y-1)$	$\frac{8}{9}$ (x, y)	$\frac{-1}{9}$ $(x, y+1)$
$\frac{-1}{9}$ $(x+1, y-1)$	$\frac{-1}{9}$ $(x+1, y)$	$\frac{-1}{9}$ $(x+1, y+1)$

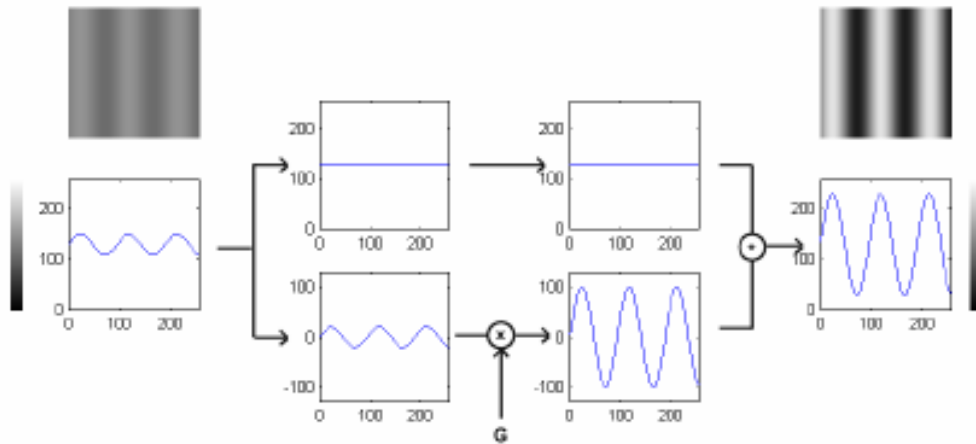
Slika 5.3 Maska za poboljšavanje visokih frekvencija

Pojasnopropusni filter prigušuje vrlo visoke i vrlo niske frekvencije, a ostavlja srednji pojas frekvencija nepromijenjenim. Taj se filter može upotrijebiti za poboljšanje rubova (prigušenje niskih) uz istovremeno smanjivanje šuma (prigušenje visokih frekvencija).

Sljedeći postupci bit će opisani pomoću adekvatnih prostornih maski za filtere u frekvencijskom području.

5.3 Višekanalno filtriranje

Za poboljšanje kontrasta slike se u frekvencijskom području koristi postupak višekanalnog filtriranja (*engl. multi-channel filtering*) [8]. Cjelokupni raspon frekvencija se podijeli u nekoliko pojaseva i zatim se srednje do visoke frekvencije pojačavaju relativno prema niskima. Na slici 5.4 (preuzeta sa [7]) je prikazan princip višekanalnog filtriranja (u ovom slučaju se slika dijeli samo na 2 pojasa).



Slika 5.4 Princip višekanalnog filtriranja – slika se dijeli na niskofrekventne i visokofrekventne komponente, više frekvencije se pojačavaju i konačna slika se dobiva ponovnim zbrajanjem tih komponenti.

5.3.1 Trokanalno filtriranje uz nelinearno rastezanje kontrasta

Tahoces et al. [9] opisali su trokanalno filtriranje (slika se dijeli na niske, srednje i visoke frekvencije) uz uporabu nelinearnog rastezanja kontrasta.

Postupak započinje filtriranjem slike kako bi se dobile dvije izgladene slike $I_1(x,y)$ i $I_2(x,y)$. U drugom koraku se gradi linearna kombinacija originalne slike $I(x,y)$ te dobivenih slika $I_1(x,y)$ i $I_2(x,y)$:

$$I_p(x,y) = K_0 I(x,y) + K_1 I_1(x,y) + K_2 I_2(x,y). \quad (5.20)$$

Iz tako dobivene slike $I_p(x,y)$ se računa nelinearna funkcija rastezanja kontrasta $F=F(k)$ sa k sivih razina:

- 1) Izračunaju se maksimum (*MAX*) i minimum (*MIN*) sivih razina u I_p .
- 2) Primjeni se niskopropusno filtriranje na sliku I_p , te izračunaju maksimum (*MAXS*) i minimum (*MINS*) tako dobivene slike I'_p . Zatim se računa pomoćna funkcija $F'=F'(k)$:

$$F'(k) = \begin{cases} BLOW \frac{k - MIN}{MINSN - MINN} & \text{za } 0 < k < MINSN \\ BLOW + \frac{(BHI - BLOW)(k - MINSN)}{MAXN - MAXSN} & \text{za } MINSN < k < MAXSN, \\ BHI + \frac{(255 - BHI)(k - MAXSN)}{MAXN - MAXSN} & \text{za } MAXSN < k < MAXN \end{cases} \quad (5.21)$$

gdje je $MAXN=MAX-MIN$, $MAXSN=MAXS-MIN$, $MINSN=MINS-MIN$, $MINN=0$ te $BLOW$, $BHI \in [0,255]$.

3) Konačnu funkciju preslikavanja $F=F(k)$ dobijemo kao:

$$F(k) = \frac{1}{W} \sum_{k-l}^{k+l} F'(m), \quad (5.22)$$

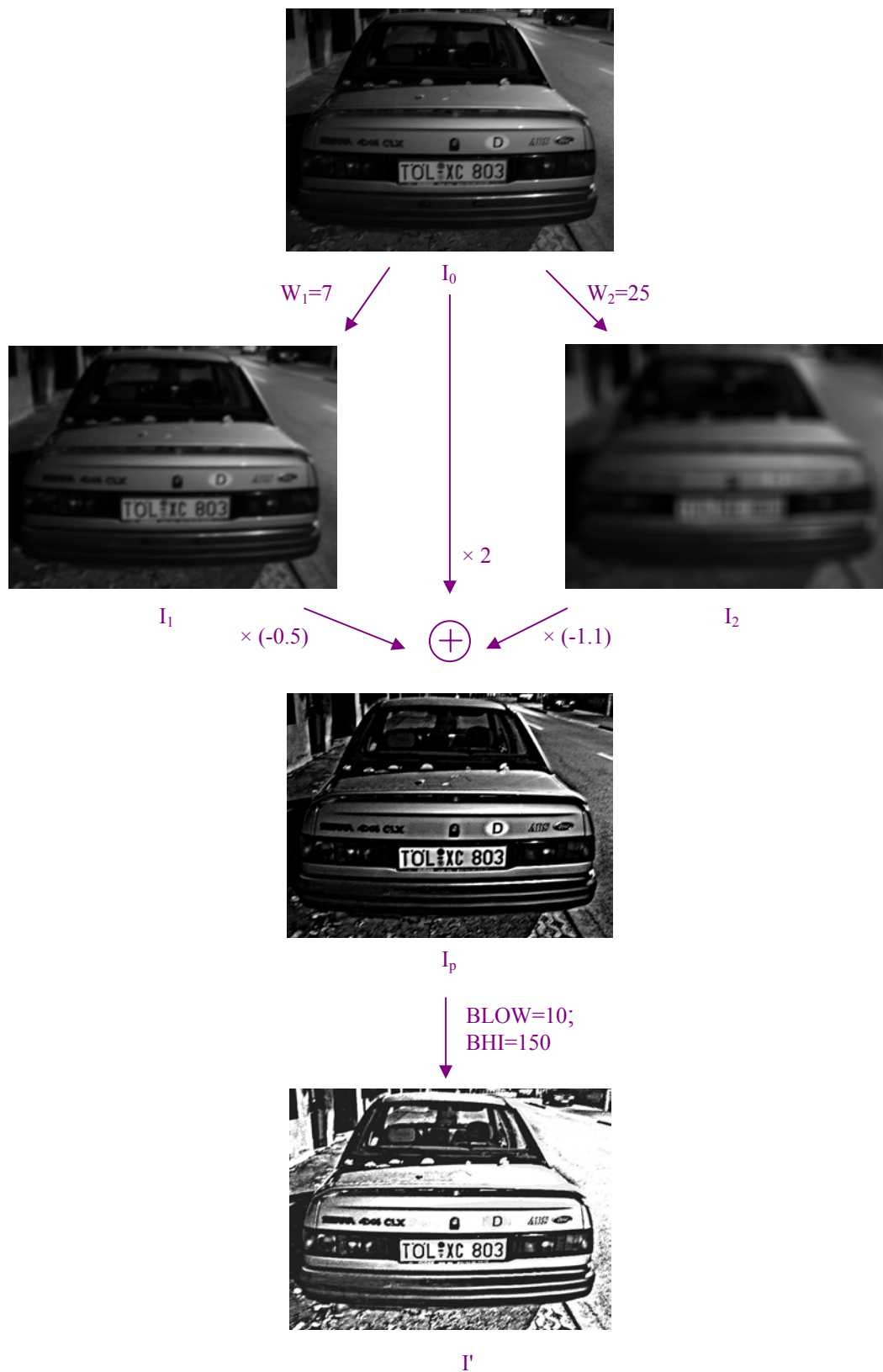
gdje je W dimenzija prozora, te $l=(W-1)/2$.

U posljednjem koraku postupka se izlazna slika $I'(x,y)$ dobije preslikavanjem F :

$$I'(x, y) = F(I_p'(x, y)), \quad (5.23)$$

Ovim postupkom pojačavaju se visoke i srednje frekvencije i dobije dobro poboljšanje rubova i kontrasta uz minimalno pojačanje šuma što je inače zajednički problem postupaka za poboljšanje kontrasta u frekvencijskom području jer se pojačavanjem viših frekvencija pojačava i šum. Međutim, pošto se radi o globalnom postupku, nije toliko uspješan kada imamo neravnomjerno osvjetljenje.

Na slici 5.5 je ilustrirano kako se izvodi opisano trokanalno filtriranje s prikazanim međurezultatima (izgladene slike i slika nakon kombinacije originalne s izgladenim slikama) i konačnim rezultatom nakon nelinearnog preslikavanja. Na rezultirajućoj slici je očito dobro poboljšanje vidljivosti registarske tablice i oznake države, što je prvenstveno cilj obrade slike.



Slika 5.5 Proces trokanalnog filtriranja: iz originalne slike I_0 (u prvom redu) se filtriranjem dobivaju izgladene slike I_1 (u drugom redu lijevo) - maskom veličine 7×7 , te I_2 (u drugom redu desno) - maskom veličine 25×25 ; linearnom kombinacijom tih triju slika uz faktore $K_0=2$ za I_0 , $K_1=-0.5$ za I_1 i $K_2=-1.1$ za I_2 se dobije slika I_p (u trećem redu); konačna slika I' (u najdonjem redu) nakon preslikavanja nelinearnom funkcijom rastezanja kontrasta uz zadane $BLOW=10$ i $BHI=150$.

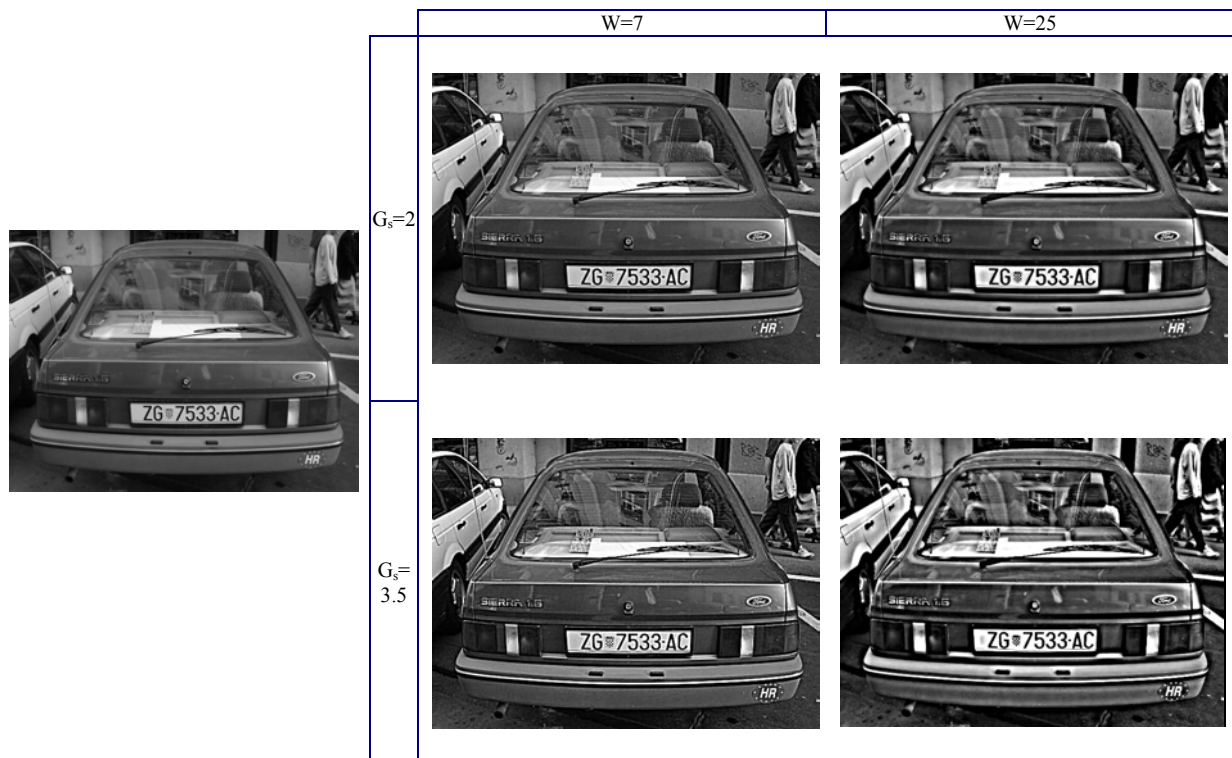
5.3.2 Neoštro maskiranje

Poseban oblik višekanalnog filtriranja je neoštro maskiranje (*engl. unsharp masking*) [8]. U tom postupku se ulazna slika filtrira niskopropusnim filterom da se dobije vrlo izgladena slika $I_B(x,y)$ koja se zatim oduzima od ulazne. Time se dobije strukturalna slika $I_S(x,y)$ koja sadrži srednje do visoke frekvencije. Izlazna poboljšana slika se dobije kao:

$$I'(x,y) = G_S I_S(x,y) + I_B(x,y) \quad (5.24)$$

gdje je G_S faktor pojačanja kontrasta. U izvornom postupku taj je faktor konstantan za cijelu sliku što opet može dovesti do problema prevelikog pojačanja dijelova slika koji su već dovoljno kontrastni, a isto tako taj faktor može biti premali da bi dobro poboljšao niskokontrastne dijelove slike. Zato su razvijeni postupci koji se temelje na neoštroj maskiranju, a u kojima faktor pojačanja G_S varira preko slike u ovisnosti o nekim lokalnim karakteristikama [8].

Na slici 5.6 vide se rezultati neoštro maskiranja dobiveni zadavanjem različitih veličina maski ($W=7$ i $W=25$) i faktora pojačanja viših frekvencija ($G_S=2$ i $G_S=3.5$). Može se primijetiti da se na ovoj slici kontrast registarske tablice i oznake države (na desnoj strani branika automobila) pojačava s uporabom veće maske (time se filtriraju niže frekvencije) te većeg faktora pojačanja (više se naglašava razlika).

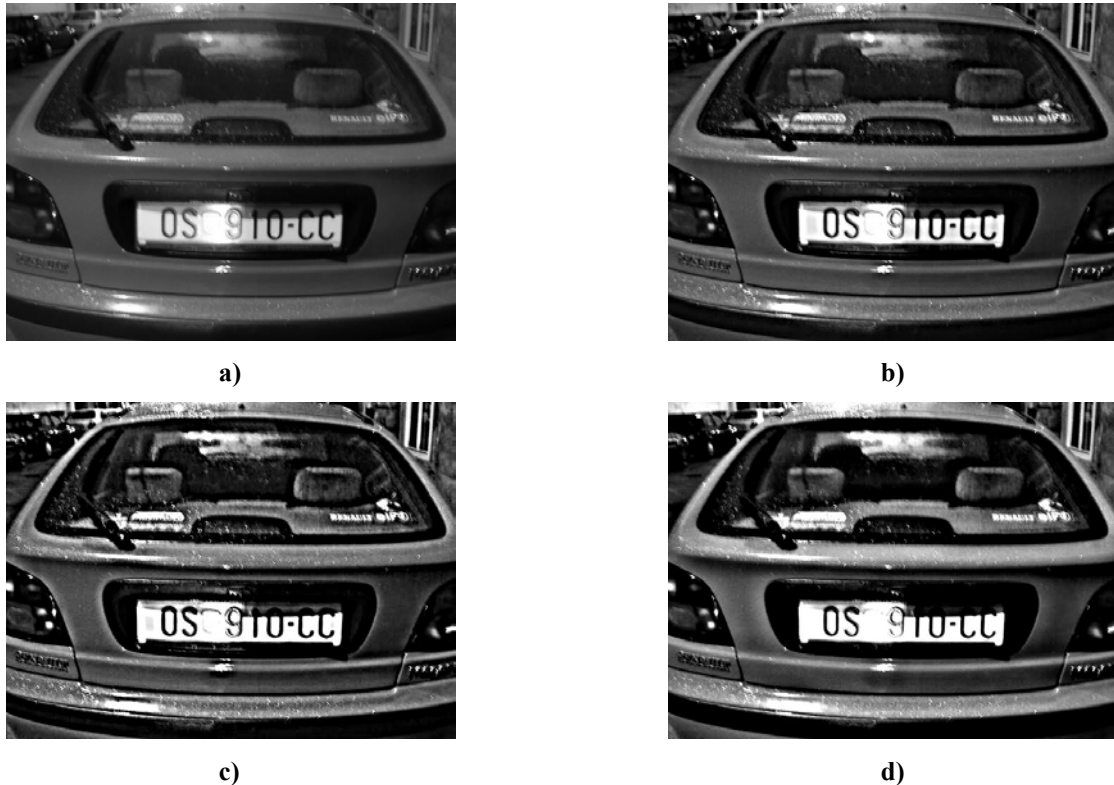


a)

b)

Slika 5.6 Neoštro maskiranje: a) originalna slika; b) rezultati neoštro maskiranja prikazani tablično uz naznačene veličine maski ($W=7$ lijevi stupac, $W=25$ desni stupac) i faktore pojačanja ($G_S=2$ gornji redak, $G_S=3.5$ donji redak).

Nemogućnost postupka da jednoliko poboljša kontrast cijele registarske tablice kada je ona djelomično prekrivena sjenom može se vidjeti na slici 5.7. Kontrast znakova i pozadine tablice je vidljivo poboljšan u svim slučajevima (slika 5.7b) $G_s=2$, $W=25$; slika 5.7c) $G_s=4$, $W=25$; slika 5.7d) $G_s=3$, $W=55$), osim u gornjem desnom dijelu gdje preko gornjih dijelova znakova tablice pada sjena. To je očekivani nedostatak pošto se radi o globalom postupku pa se ne može dobiti jednoliko poboljšanje lokalnog kontrasta.



Slika 5.7 Neošto maskiranje: a) originalna slika; b) rezultat s maskom $W=25$ i $G_s=2$; c) rezultat s maskom $W=25$ i $G_s=4$; d) rezultat s maskom $W=55$ i $G_s=3$.

U području filtriranja postoje također različiti prijedlozi operatora. Jedan je dan u [14], a radi se o operatoru umnoška linearnih filtera (*engl. product of linear filters*). Princip je sličan kao kod neoštrog maskiranja, izlazna se slika dobiva zbrajanjem ulazne slike sa svojom procesiranom verzijom u kojoj su visoke frekvencije nelinearno pojačane uporabom umnoška linearnih filtera. Naglašava se da taj ovakav operator upravo zbog nelinearnosti izbjegava pojačavanje šuma, a istovremeno je u stanju izoštriti male detalje.

5.4 JGACE

Svi dosad opisani postupci imaju zajedničku karakteristiku da u obzir uzimaju samo svojstva slike koja se obrađuje, isključujući bilo kakvo razmatranje karakteristika promatrača slika. Ji et al.[8] su predložili novi adaptivni postupak poboljšanja kontrasta slika koji su nazvali *Just-Noticable-Difference Guided Contrast Enhancement (JGACE)*, a koji u obzir uzima i karakteristike ljudskog vidnog sustava.

5.4.1 Prilagodba karakteristikama ljudskog vidnog sustava

Ljudski vidni sustav je nelinearni sustav koji ima vrlo veliki dinamički raspon i ponaša se kao pojasnopropusni filter što se karakterizira funkcijom kontrastne osjetljivosti (*engl. contrast sensitivity*) koja je recipročna vrijednost praga kontrasta (*engl. threshold contrast*) C_T koji pak ovisi o svjetlini pozadine L i o prostornoj frekvenciji u . Najmanja razlika u svjetlini koju čovjek može zamjetiti kada se objekt određene veličine prikazuje na pozadini određene osvijetljenosti se naziva najmanjom primjetnom razlikom (*eng. Just-Noticable-Difference ili JND*). JND je dan s:

$$JND = LC_T. \quad (5.25)$$

JND i prag kontrasta se mogu odrediti psihofizičkim eksperimentima.

Odnos izlazne svjetline uređaja za prikazivanje i ulaznih sivih razina slike je također nelinearan pa se primjenjuje postupak perceptualne linearizacije da bi jednake promjene sivih razina izazvale perceptualno jednake promjene u cijelom rasponu uređaja za prikazivanje. To se može aproksimirati na sljedeći način [8]: ako je najniža razina svjetline uređaja za prikazivanje L_0 i na toj razini JND iznosi $JND(L_0)$, sljedeća zamjetljiva razina je $L_1=L_0+JND(L_0)$, a JND na toj razini je $JND(L_1)$. To ponavljamo za sve razine do najviše svjetline uređaja $L_{max}=L_n=L_{n-1} + JND(L_{n-1})$. Sada normaliziramo raspon $[0,n]$ na maksimalni broj sivih razina i dobijemo aproksimaciju perceptualno linearizirane funkcije prikazivanja. Ovime JND sive razine, koji odgovara JND -u u domeni osvijetljenja, a označava se s JND_{GL} postaje konstantan u cijelom rasponu sivih razina i ima jednaku funkcijsku ovisnost o frekvenciji kao i kontrastni prag C_T .

Ljudski vidni sustav ima karakteristiku da je osjetljiviji na šum u glatkim (*engl. smooth*) područjima u kojima nema velike prostorne aktivnosti, a to je mjera promjene intenziteta slike od slikovnog elementa do slikovnog elementa, nego u dinamičnim područjima s puno detalja. Pokazuje se da vidljivost šuma monotono pada s povećanjem aktivnosti. Tu karakteristiku iskorištava $JGACE$ te dijeli sliku na male kontinuirane blokove koji se klasificiraju u glatka ili dinamična (*engl. detail region*) područja. Ideja je da se kontrast poboljšava samo u dinamičnim područjima u kojima prevladava signal jer bi se u glatkim samo povećao šum.

5.4.2 Teorijska osnova postupka

Prvi korak postupka je niskopropusno filtriranje koje se provodi u vremenskom području "izglađujućom" maskom. Već je rečeno da veličina prostorne maske određuje frekvenciju rezanja. Autori postupka su, vodeći se eksperimentima, odabrali masku veličine $w/16$, gdje je w širina slike. Naime, eksperimenti su pokazali da je upravo frekvencija rezanja od 16 ciklusa po širini slike dovoljno visoka da se pokaže osnovni oblik objekta na slici, a istovremeno dovoljno niska da isključi sve detaljne strukture.

U *drugom koraku* postupka originalna slika se dijeli na kontinuirane blokove čija je veličina jednaka veličini maske korištene za filtriranje u prethodnom koraku. Na temelju prostorne aktivnosti (*engl. spatial activity*) pojedinog bloka, određuje se pripada li on glatkom ili dinamičnom području. Za to se koristi gradijentna slika $I_g(x,y)$ dobivena primjenom dvaju ortogonalnih Prewit operatora (koji imaju efekt izglađivanja šuma, a istovremeno su jednostavni):

$$I_g = \begin{cases} \Delta_x / 3 & \text{za } |\Delta_x| \geq |\Delta_y| \\ \Delta_y / 3 & \text{za } |\Delta_x| < |\Delta_y| \end{cases}, \quad (5.26)$$

gdje je

$$\Delta_x = I(x+1, y-1) + I(x+1, y) + I(x+1, y+1) - I(x-1, y-1) - I(x-1, y) - I(x-1, y+1), \quad (5.27)$$

te

$$\Delta_y = I(x-1, y-1) + I(x, y-1) + I(x+1, y-1) - I(x-1, y+1) - I(x, y+1) - I(x+1, y+1). \quad (5.28)$$

Dakle, vrši se konvolucija originalne slike s dvije maske prikazane na slici 5.8.

1	1	1
0	0	0
-1	-1	-1

a)

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

b)

Slika 5.8 a) Prewitt operator za gradijent u smjeru y; b) Prewitt operator za gradijent u smjeru x.

Amplituda $I_g(x,y)$ u glatkim područjima je vrlo mala prema dinamičnim. Da se odredi granična vrijednost $I_g(x,y)$ koja će odijeliti glatke od dinamičkih blokova, računa se prosječna amplituda $I_g(x,y)$ za svaki blok. Te će se prosječne vrijednosti grupirati oko nižih vrijednosti za glatke blokove, a oko viših za dinamičke. Zato bi se prva udolina u distribuciji tih prosječnih vrijednosti μ_T mogla uzeti kao granična za klasifikaciju, ali to može dovesti do greške. To se rješava tako da se blokovi s prosječnom $|I_g(x,y)| < \mu_T$ klasificiraju kao glatki, a zatim se računa srednja vrijednost μ_g i standardna devijacija σ_g za sve te blokove. μ_g i σ_g predstavljaju prosječnu fluktuaciju u glatkim blokovima. Za konačni gradijentni prag se uzima (prema prijedlogu Ji et al.):

$$T_g = \mu_g + k_g \sigma_g, \quad (5.29)$$

pri čemu je $k_g=3.5$. Tako odabrani faktor k_g osigurava da više od 99% fluktuacija šuma u glatkim područjima bude ispod T_g (uz pretpostavku Gaussovog ili sličnog šuma).

Zatim se obavlja klasifikacija blokova na sljedeći način. Odredi se indeks relativne prostorne aktivnosti p_k :

$$p_k = \frac{N_k}{N_{\max}}, \quad (5.30)$$

gdje je N_k broj slikovnih elemenata za koje je $I_g(x,y) \geq T_g$ u k -tom bloku, a $N_{max} = \max\{N_1, N_2, \dots, N_K\}$. Blok je gladak ako je $p_k < p_T$, pri čemu se p_T odabire tako da se uzme u obzir kompromis tolerancije na šum u pozadini (što traži povećanje faktora p_T) i želje za uključivanjem samo niskih prostornih aktivnosti (što pak traži manji faktor p_T). Autori postupka predlažu $p_T = 0.1$.

Nakon razdvajanja glatkih i dinamičkih blokova slijedi *treći korak* postupka: izračun lokalne frekvencije i kontrasta samo za dinamičke blokove. Koristi se $I_g(x,y)$ za izračun omjera broja prijelaza nule (*engl. zero-crossings*) uzduž retka (ili stupca) i broja slikovnih elemenata u tom retku (ili stupcu). Taj omjer aproksimira lokalnu prostornu frekvenciju za pojedini redak ili stupac. Normalizirana lokalna prostorna frekvencija je $f_R = \max(f_H, f_V)$, pri čemu $f_R = 1$ odgovara frekvenciji od 0.5 ciklusa po slikovnom elementu. f_H i f_V su horizontalna odnosno vertikalna frekvencija za n redaka i m stupaca bloka dane sa:

$$f_H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \quad (5.31)$$

$$f_V = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m f_j. \quad (5.32)$$

Radialnu frekvenciju u (u jedinici ciklus/stupanj) dobijemo kao:

$$u = \frac{\pi d}{180 \cdot (2\Delta x)} f_R, \quad (5.33)$$

gdje je d udaljenost promatranja (uzima se 50cm za uobičajene uvjete), a Δx je razmak slikovnih elemenata.

Slijedi računanje lokalnog kontrasta. On se izražava devijacijom lokalne prosječne sive razine koja se računa za strukturnu sliku $I_S(x,y)$ dobivenu oduzimanjem slike $I_B(x,y)$ (koja je dobivena niskopropusnim filtriranjem) od originalne slike - kao kod neoštrog maskiranja. Ako P označava skup slikovnih elemenata (x,y) za koje je $|I_S(x,y)| > \varepsilon$, gdje je ε prag šuma koji se može postaviti na $\varepsilon = T_g$, a n_R označava broj slikovnih elemenata u skupu P , onda je tražena devijacija Δ_R dana s:

$$\Delta_R = \frac{1}{n_R} \sum_{(x,y) \in P} |I_S(x,y)|. \quad (5.34)$$

Sljedeći, *četvrti korak* je izračunavanje povećanja kontrasta. Kao i kod neoštrog maskiranja se strukturna slika $I_S(x,y)$ množi s faktorom povećanja kontrasta G i zatim zbraja s filtriranom slikom $I_B(x,y)$, ali taj faktor nije jednak za cijelu sliku nego se određuje na temelju lokalnih karakteristika slike i svojstava ljudskog vidnog sustava.

Za glatke blokove je faktor povećanja kontrasta G dan s:

$$G = G_1 + \frac{G_2}{1 + (\mu_g / \mu_{g,0})^4}, \quad (5.35)$$

gdje je $G_1 < 1$, $(G_1 + G_2) > 1$, μ_g predstavlja razinu šuma u glatkim blokovima (to je srednja vrijednost gradijenta), a $\mu_{g,0}$ je konstanta za koju se uzima 1 ili 2% raspona prikaznog uređaja GL_{max} (autori za 8-bitne slike predlažu $\mu_{g,0} = 3.5$).

Prije je rečeno da se slika razdvaja na dinamična i glatka područja te da se kontrast poboljšava samo u dinamičnim područjima slike. To bi značilo da faktor pojačanja kontrasta G u glatkim područjima iznosi 1, no ovdje je dana formula za njegovo izračunavanje. To je iz razloga što je ponekad poželjno da on ipak bude veći ili manji od 1. Naime, u slučajevima velikog pozadinskog šuma, prikladan je $G < 1$ u glatkim područjima, a u slikama koje nemaju šuma, odnosno imaju vrlo veliki omjer signal-šum, poželjan je $G > 1$ kako bi se mogle poboljšati neke fine strukture u glatkim područjima bez bojazni da će šum biti pojačan.

Za dinamične blokove se G određuje s obzirom na aktualni lokalni kontrast C_A i kontrastni prag C_T . Traži se da nakon poboljšanja kontrast bude nekoliko puta veći od C_T , tj. $GC_A \geq \gamma C_T$, uz $\gamma > 1$. Poboljšanje se obavlja samo ako je C_A manji od γC_T tako da se ne obavljaju nepotrebna poboljšanja, a time se eliminira efekt "zvonjenja" (*engl. ringing*) oko rubova što je inače pojava kod drugih lokalnih postupaka. G se dobiva usporedbom devijacije lokalne sive razine Δ_R sa JND_{GL} koji ima isti oblik kao $C_T(u)$. Za srednje i visoke frekvencije vrijedi aproksimacija $C_T(u) = c_0 e^{0.166u}$ te je:

$$JND_{GL} = JND_0 e^{0.166u} . \quad (5.36)$$

JND_0 je JND sivih razina pri niskim prostornim frekvencijama i može se za pojedini prikazni uređaj odrediti psihofizičkim eksperimentima, te se smatrati poznatom konstantom. Faktor pojačanja kontrasta G je:

$$G = \begin{cases} 1 & \text{za } \Delta_R \geq \gamma JND_{GL} \\ \frac{\gamma JND_{GL}}{\Delta_R} & \text{za } \Delta_R < \gamma JND_{GL} \end{cases} , \quad (5.37)$$

pri čemu konstantu $\gamma > 1$ može određivati korisnik.

Autori *JGACE*-a prije svih ovih koraka predlažu transformaciju originalne slike koja ima cilj osigurati dovoljan globalni kontrast, ako on nije već dovoljan. Traži se rastezanje većeg dijela histograma i istovremeno potiskivanje sivih razina gdje je vrijednost histograma mala. To se postiže tako da se odredi maksimalna visina iznad koje se histogram "reže" (*engl. clipping*):

$$H_{max} = \frac{N_p}{GL_{max}} G_C , \quad (5.38)$$

gdje je N_p broj slikovnih elemenata slike, GL_{max} raspon prikazivanja, a G_C granica povećanja kontrasta koji ovisi o željenom globalnom kontrastu, a može se uzeti takva da vrijedi $G_C \sigma = GL_{max}/5$, gdje je σ standardna devijacija slike, jer je poslije "rezajućeg" izjednačavanja histograma devijacija upravo približno $G_C \sigma$. Zatim se koristi uniformna redistribucija da se "odrezani" slikovni elementi raspodijele po sivim razinama i to se iterativno ponavlja sve dok histogram prelazi visinu H_{max} .

Postupak je pokazao dobre rezultate u medicinskim primjenama. Osnovna mu je prednost što ne izaziva pretjerana poboljšanja već dovoljno kontrastnih dijelova slika (ne izaziva "zvonjenje" oko rubova), izbjegava pretjerano poboljšavanje pozadine i garantira da će razina kontrasta biti zadovoljavajuća s obzirom na karakteristike promatratelja, tj. ljudi. Međutim, problem je velika ovisnost o parametrima koji se vrlo pažljivo moraju odabrati [5], odnosno trebaju se provesti psihofizički eksperimenti da bi se utvrdili parametri za svaki pojedini prikazni uređaj. To čini postupak prilično kompliciranim za primjenu i svakako manje općenitim upravo zbog specifičnosti prikaznog uređaja koji se koristi za prikazivanje slika. Postupak je prvenstveno namijenjen za poboljšavanje slika koje se prikazuju ljudima, a ne kao što je u našem slučaju potrebno za produciranje slika koje se dalje digitalno obrađuju.



a)



b)

Slika 5.9 JGACE postupak: a) originalna slika; b) rezultat JGACE postupka

Na slici 5.9 se vidi djelovanje JGACE postupka. Nije postignuto značajno poboljšanje. S parametrima koje predlažu autori, gotovo cijela slika je dovoljno "dinamična" pa ispada da gotovo ne treba poboljšavati kontrast. To na ovoj slici i odgovara istini, ali se slično dobije i za slike puno lošijeg početnog izgleda i kontrasta. Problem je u odabiru mnogih parametara postupka što je dosta kompliciran posao.

6. Implementacija odabranih postupaka za poboljšanje kontrasta sivih slika

6.1 Globalni postupci

Svi globalni postupci su realizirani uporabom tablice pretraživanja (LUT) kako je objašnjeno u odjeljku 4.3.3. Dakle, prema zadanoj funkciji transformacije se izračunavaju vrijednosti LUT-a, a zatim se ulazne vrijednosti slikovnih elemenata preslikavaju u izlazne prema LUT-u. U sljedećim opisima k označava sivu razinu, $0 \leq k \leq 255$, $I(x,y)$ i $I_0(x,y)$ vrijednosti slikovnih elemenata ulazne slike, te izlazne slike s koordinatama (x,y) respektivno, te LUT tablicu pretraživanja – tablicu preslikavanja realiziranu kao polje s 256 elemenata (256 sivih razina).

6.1.1 Gama korekcija

Gama korekcija je jednostavni postupak koji se može prikazati sljedećim pseudokodom:

$faktor = 255^{\gamma} / 255;$

za svaki $k=0$ do $k=255$

$LUT[k] = k^{\gamma} / faktor;$

za svaki (x,y)

$I_0(x,y) = LUT[I(x,y)];$

Dijeljenje vrijednosti u LUT-u s $faktor$ je potrebno kako bi izlazne vrijednosti bile skalirane na vrijednosti od 0 do 255.

6.1.2 Rastezanje kontrasta

Implementiran je “end-in-search” tip rastezanja kontrasta. Postupak ima ulazni parametar - postotak slikovnih elemenata koji se preslikavaju u 0 odnosno u 255 (*postotak*) – isti se postotak koristi za obje granice. Postupak koristi histogram koji se realizira kao polje s 256 elemenata, $histogram[256]$. Postupak se izvodi u sljedećim koracima:

1) inicijalizacija i izračunavanje histograma:

za svaki $k=0$ do 255

$histogram[k] = 0;$

za svaki (x,y)

$histogram[I(x,y)] = histogram[I(x,y)] + 1;$

2) nalaženje gornje (*gornja*) i donje (*donja*) granice:

$broj = veličina_slike \times postotak;$

$pom = 0;$

$k = 0;$

dok pom < broj

$pom = pom + histogram[k];$

$k = k + 1;$

$donja = k;$

$pom = 0;$

$k = 255;$

dok pom < broj

$pom = pom + histogram[k];$

$k = k - 1;$

$gornja = k;$

3) izračunavanje tablice preslikavanja:

$faktor = (gornja - donja) / 255;$

za svaki k=0 do donja

$LUT[k] = 0;$

za svaki k=donja+1 do gornja-1

$LUT[k] = (k - donja) / faktor;$

za svaki k=gornja do 255

$LUT[k] = 255;$

4) transformacija ulazne u izlaznu sliku:

za svaki (x,y)

$I_0(x,y) = LUT[I(x,y)];$

Ako se želi štediti memorija, za realizaciju histograma i tablice pretraživanja (*LUT*) se može koristiti jedno polje od 256 elemenata jer nakon što se izračunaju donja i gornja granica, informacije iz histograma više nisu potrebne.

6.1.3 Izjednačavanje histograma

Izjednačavanje histograma se sastoji od 3 koraka:

- 1) izračunavanje histograma (kao 1. korak kod rastezanja kontrasta)
- 2) izračunavanje normalizirane sume histograma i skaliranje na raspon 0 do 255:

$$LUT[0]=\text{histogram}[0];$$

za svaki $k=1$ do 255

$$LUT[k]=LUT[k-1]+\text{histogram}[k];$$

$$\text{faktor}=255/LUT[255];$$

za svaki $k=0$ do 255

$$LUT[k]=LUT[k] \times \text{faktor};$$

- 3) transformacija originalne slike u izlaznu (kao 4. korak rastezanja kontrasta).

Faktor skaliranja *faktor* je jednak $255/\text{veličina slike}$ jer će vrijednost $LUT[255]$ biti upravo jednaka ukupnom broju slikovnih elemenata u slici.

Ako se uvede prag T_{HE} kao što je opisano u poglavlju 4.4.2, a koji se zadaje kao parametar, mijenja se samo dugi korak postupka koji sada glasi:

za svaki $k=0$ do T_{HE}

$$LUT[k]=k;$$

$$LUT[T_{HE}+1]=\text{histogram}[T_{HE}+1];$$

za $k=T_{HE}+2$ do 255

$$LUT[k]=LUT[k-1]+\text{histogram}[k];$$

$$\text{faktor}=255/LUT[255];$$

za svaki $k=T_{HE}$ do 255

$LUT[k]=LUT[k] \times faktor;$

Vrijedi ista opaska o štednji memorije i jednom polju za histogram i tablicu pretraživanja.

6.2 Lokalni postupci

Lokalni postupci poboljšavanja kontrasta su općenito gledajući zahtjevniji za implementaciju od globalnih.

6.2.1 Lokalno izjednačavanje histograma

Adaptivno ili lokalno izjednačavanje histograma se provodi tako da se za svaki slikovni element ulazne slike izračuna histogram u susjedstvu dotičnog slikovnog elementa, unutar kvadratnog prozora dimenzija $W \times W$, pri čemu se W zadaje kao ulazni parametar i treba biti neparan broj. Zatim se primjeni izjednačavanje histograma na dotični slikovni element.

$faktor=W \times W / 255;$

za svaki (x,y)

za svaki $k=0$ do 255

$lokalni_histogram[k]=0;$

za svaki $y1=y-(W-1)/2$ do $y+(W-1)/2$

za svaki $x1=x-(W-1)/2$ do $x+(W-1)/2$

$lokalni_histogram[I(x1,y1)]=lokalni_histogram[I(x1,y1)]+1;$

za svaki $k=1$ do $I(x,y)$

$lokalni_histogram[k]=lokalni_histogram[k]+lokalni_histogram[k-1];$

$I_0(x,y)=lokalni_histogram[I(x,y)] / faktor;$

Rubovi slike se posebno obrađuju jer se oko njih ne može izgraditi cijelo susjedstvo. U obzir se uzimaju oni slikovni elementi koji se nalaze unutar zadanog prozora oko slikovnog elementa za koji se računa preslikavanje, što znači da se normalizacija ne provodi s $faktor=W \times W/255$ već s $faktor=broj_sl.elementata_unutar_prozora/255$.

Postupak se može ubrzati jer je očito da se pomakom s jedne pozicije na drugu (recimo po x osi) ne promijeni cijelo susjedstvo, nego samo manji dio, a većina ostane jednaka (primjer slika 6.1). Zato se ne mora računati ponovno cijeli histogram nego se samo prebroje razlike od prethodne pozicije.

Pomakom s pozicije (x,y) na $(x+1,y)$ je promjena histograma dana s:

```

ažuriraj_x    {
za svaki  $(j = y - (W-1)/2$  do  $y + (W-1)/2)$ 
    lokalni_histogram[I(x - (W-1)/2, j)] = lokalni_histogram[I(x - (W-1)/2 + 1, j)] - 1;
    lokalni_histogram[I(x + (W-1)/2, j)] = lokalni_histogram[I(x + (W-1)/2 + 1, j)] + 1;
}

```

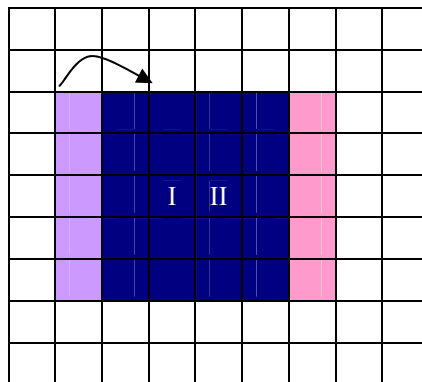
Isto vrijedi i za pomak po osi y (s pozicije (x,y) na $(x,y+1)$):

```

ažuriraj_y    {
za svaki  $(i = x - (W-1)/2$  do  $x + (W-1)/2)$ 
    lokalni_histogram[I(i, y - (W-1)/2)] = lokalni_histogram[I(i, y - (W-1)/2 + 1)] - 1;
    lokalni_histogram[I(i, y + (W-1)/2)] = lokalni_histogram[I(i, y + (W-1)/2 + 1)] + 1;
}

```

Znači, nakon što se izračuna lokalni histogram za prvu lokaciju, uz pretpostavku da se prolazi slikom duž svakog retka s lijeva nadesno do kraja slike, i pri tome koristi *ažuriraj_x*, pa onda prelazi u novi redak, može se pamtiti prvi lokalni histogram u svakom retku pa se prelaskom u novi redak vrši samo ažuriranje lokalnog histograma prema *ažuriraj_y*.



Slika 6.1 Pomak prozora kod lokalnih postupaka: ako se prozor pomakne iz pozicije kada mu je centralni slikovni element onaj označen s I u smjeru x osi u poziciju oko centralnog slikovnog elementa II , veći dio susjedstva ostaje isti (slikovni elementi označeni plavom bojom), a manji se mijenja (slikovni elementi označeni ljubičastom više nisu u susjedstvu, a oni označeni rozom se pridodaju u novo susjedstvo).

6.2.2 Modificirani CLHE

CLHE postupak nije implementiran na način opisan u odjeljku 4.5.2. Naime, izjednačavanje histograma se ne provodi *SOR* metodom rješavanja diferencijalne jednadžbe (4.39) (formule (4.40) do (4.45)) već na jednak način kao kod prethodno opisane implementacije postupka *AHE* (poglavlje 6.2.1.). Održavanju ukupnog dojma slike služi konstrukcija lokalnog histograma prema formuli (4.29), dakle lokalni histogram (*histogramL*) se izračunava kao težinska suma histograma unutar prozora (*histogramW*) i histograma izvan prozora. U

pretkoraku postupka se izračuna globalni histogram ulazne slike (*histogram*) koji se koristiti za izračunavanje histograma izvan prozora (vrijednosti histograma za sivu razinu k izvan prozora su dane s $histogram[k]-histogramW[k]$). Faktor α se zadaje kao ulazni parametar postupka.

```
faktor=W×W ;
faktor1=(veličina_slike-(W×W) );
za svaki (x,y)
    za svaki k=0 do 255
        histogramL[k]=0;
        histogramW[k]=0;
    za svaki y1= y-(W-1)/2 do y+(W-1)/2
        za svaki x1= x-(W-1)/2 do x+(W-1)/2
            histogramW[I(x1,y1)]= histogramW[I(x1,y1)]+1;
    za svaki k=0 do 255
        histogramL[k] = α × (histogramW[k] / faktor) +
            (1-α) × ((histogram[k]-histogramW[k]) / faktor1);
    za svaki k=1 do 255
        histogramL[k]= histogramL[k]+histogramL[k-1];
I0(x,y)= histogramL[I(x,y)]×255;
```

Za lokalni histogram i za histogram unutar prozora se može koristiti samo jedno polje, ali je ovdje uzeto kao da se koriste dva (*histogramL* i *histogramW*) radi jasnoće pseudokoda.

Postupak se može ubrzati na isti način kao *AHE*, računajući samo promjene lokalnog histograma.

6.3 Filtriranje

Filtriranje slika je provedeno u vremenskom području, koristeći konvolucijske maske. Korištene su maske koje odgovaraju niskopropusnim filtrima u frekvencijskom području. Funkcija niskopropusnog filtriranja je dana pseudokodom (zadaje se dimenzija maske W):

```
niskopropusno_filtriranje(W)
    za svaki (x,y)
        IB(x,y)=0;
```


$$\begin{aligned} &\text{za svaki } y1 = y - (W-1)/2 \text{ do } y + (W-1)/2 \\ &\quad \text{za svaki } x1 = x - (W-1)/2 \text{ do } x + (W-1)/2 \\ &\quad I_B(x,y) = I_B(x,y) + I(x1,y1); \\ &I_B(x,y) = I_B(x,y) / (W \times W); \end{aligned}$$

vrati I_B ;

Ubrzanje funkcije *niskopropusno_filtriranje* je moguće realizirati na način ekvivalentan načinu kako je realizirano ubrzanje izračunavanja lokalnog histograma (poglavlje 6.2.1). Naime, pomakom maske se ukupnom zbroju vrijednosti slikovnih elemenata koje maska obuhvaća samo dodaju vrijednosti onih slikovnih elemenata koji nisu bili pokriveni maskom na prethodnoj poziciji, a oduzimaju vrijednosti onih slikovnih elemenata koji su pomakom ostali izvan područja koje maska pokriva na novoj poziciji.

6.3.1 Neoštro maskiranje

Za neoštro maskiranje se koristi kvadratna maska dimenzija $W \times W$, a taj se W , kao i faktor pojačanja kontrasta G_S zadaje kao ulazni parametar postupka. Neoštro maskiranje je dano s:

$$\begin{aligned} I_B &= \text{niskopropusno_filtriranje}(W); \\ &\text{za svaki } (x,y) \\ I_S(x,y) &= G_S \times (I(x,y) - I_B(x,y)); \\ I_0(x,y) &= I_S(x,y) + I_B(x,y); \end{aligned}$$

6.3.2 Trokanalno filtriranje uz nelinearno rastezanje kontrasta

Implementirano je trokanalno filtriranje opisano u odjeljku 5.3.1. Ulazni parametri su faktori pojačanja za visoke, srednje i niske frekvencije: K_0 , K_1 i K_2 , a veličine maski za niskopropusna filtriranja su fiksirane na 7 i 25 (prema [9]):

$$\begin{aligned} I_1 &= \text{niskopropusno_filtriranje}(7); \\ I_2 &= \text{niskopropusno_filtriranje}(25); \\ &\text{za svaki } (x,y) \\ I_p(x,y) &= K_0 \times I(x,y) + K_1 \times I_1(x,y) + K_2 \times I_2(x,y); \end{aligned}$$

ako (rastegni)

$$\begin{aligned} LUT &= \text{izračunaj_funkciju_preslikavanja}; \\ &\text{za svaki } (x,y) \\ I_0(x,y) &= LUT[I_p(x,y)]; \end{aligned}$$

Pri tome funkcija *izračunaj_funkciju_preslikavanja* izračunava nelinearnu funkciju rastezanja kontrasta na način opisan u odjeljku 5.3.1 (formule (5.21) i (5.22)), pri čemu se za tu funkciju $F(k)$ koristi tablica pretraživanja *LUT*. Parametar *rastegni* se zadaje kao ulazni parametar postupka i omogućuje izbor hoće li se završno preslikavanje nelinearnom funkcijom obaviti ili ne.

6.3.3 JGACE

JGACE je implementiran na način opisan u poglavlju 5.4. Što pojedina funkcija izračunava je jasno iz samih naziva funkcija u pseudokodu pa neće biti raspisivana svaka pojedina funkcija.

$W = \text{širina_slike} / 16;$

$I_B = \text{niskopropusno_filtriranje}(W);$

$I_S = I - I_B;$

$\text{podijeli_sliku_na_blokove}(W);$

$I_G = \text{gradijent}(I);$

za svaki blok B

$IG_{SV}[B] = \text{izračunaj_srednju_vrijednost_}I_G;$

$\text{histogramSVG} = \text{izračunaj_frekvenciju_pojedine_SVG};$

$mT = \text{prva_udolina_u_histogramuSVG};$

za svaki blok B

ako $(|IG_{SV}[B]| < mT)$

$\text{glatki}[B] = \text{true};$

inače $\text{glatki}[B] = \text{false};$

$mG = \text{izračunaj_srednju_vrijednost_glatkih_blokova};$

$dG = \text{izračunaj_standardnu_devijaciju_glatkih_blokova};$

$Tg = mG + kg \times dG;$

za svaki blok B

$$pK[B]=0;$$

za svaki (x,y) u bloku

$$\text{ako } |I_G(x,y)| < Tg$$

$$pK[B]++;$$

Nmax=nađi_maksimalni_element_u_polju_pK;

za svaki blok B

$$\text{ako}(pK[B]/Nmax < pT)$$

$$\text{glatki}[B]=\text{true};$$

$$\text{inače } \text{glatki}[B]=\text{false};$$

za svaki blok B

$$\text{ako}(\text{glatki}[B]=\text{true})$$

$$GS[B]=G1+(G2/(1+(mG+mG0)^4));$$

inače

$$fH=\text{izračunaj_horizontalnu_prosječnu_prostornu_aktivnost};$$

$$fV=\text{izračunaj_vertikalnu_prosječnu_prostornu_aktivnost};$$

$$fR=\text{max}(fH,fV);$$

$$dx=\text{razmak_slikovnih_elemenata_na_uređaju};$$

$$u=\pi \times d \times fR / (180 \times 2 \times dx);$$

$$JND=JND0 \times e^{0.166 \times u};$$

$$nR=0;$$

$$dR=0;$$

za svaki (x,y) u bloku

$$\text{ako } (|I_s(x,y)| > Tg)$$

$$nR++;$$

$$dR_+ = |I_S(x,y)|;$$

$$dR_+ = nR_+;$$

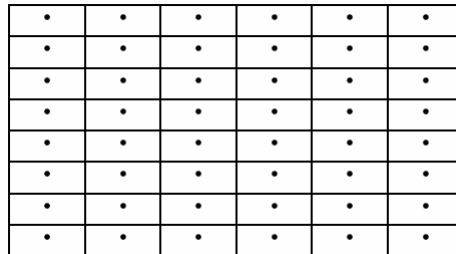
ako ($dR_+ \geq \text{gamma} \times JND$)

$$GS[B] = \text{gamma} \times JND / dR_+;$$

inače $GS[B] = 1$;

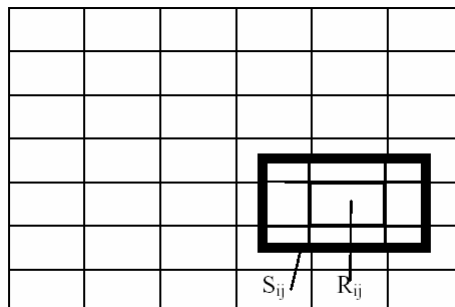
Time je izračunan faktor pojačavanja za svaki blok, tj. za centralni slikovni element svakog bloka. Sada se, prema prijedlogu autora postupka, vrši bilinearna interpolacija za ostale slikovne elemente. Bilinearnu interpolaciju su uveli Pizer et al. [15], a opis i slike su preuzete sa [16].

Slika se podijeli na blokove, kao na slici 6.2. s označenim centralnim slikovnim elementima u svakom bloku.

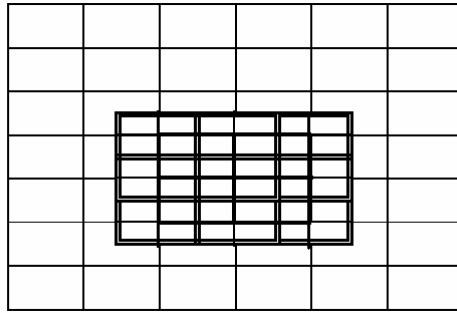


Slika 6.2 Podjela slike na blokove

Na slici 6.3. se vidi da jedan blok R_{ij} utječe na područje S_{ij} duplo veće od sebe. Za četiri susjedna bloka se dobiju područja na slici 6.4 na kojoj je vidljivo da postoji područje na koje utječu četiri okolna bloka, a koje se nalazi između centralnih slikovnih elemenata četiri susjedna bloka.



Slika 6.3 Utjecaj bloka S_{ij} na područje R_{ij}



Slika 6.4 Preklapanje područja utjecaja

Ako je izračunata funkcija preslikavanja $F(x_0, y_0)$, $F(x_1, y_0)$, $F(x_0, y_1)$ i $F(x_1, y_1)$ za centralni slikovni element svakog bloka, onda se za sve slikovne elemente u području između njih može primjeniti bilinearna interpolacija:

$$F(x, y) = a \times [b \times F(x_0, y_0) + (b-1) \times F(x_1, y_0)] + (1-a) \times [b \times F(x_0, y_1) + (1-b) \times F(x_1, y_1)], \quad (6.1)$$

gdje funkcije preslikavanja $F(x_0, y_0)$, $F(x_1, y_0)$, $F(x_0, y_1)$ i $F(x_1, y_1)$ pripadaju okolnim blokovima kao što je prikazano na slici 6.5, a faktori a i b su:

$$a = (y_1 - y) / (y_1 - y_0) \quad (6.2)$$

i

$$b = (x_1 - x) / (x_1 - x_0). \quad (6.3)$$

(x₀,y₀)	(x₁,y₀)
(x₀,y₁)	(x₁,y₁)

Slika 6.5 Četiri susjedna bloka sa pripadnim centralnim slikovnim elementima.

Rubovi slika se posebno obrađuju jer na njima ne utječu četiri bloka.

7. Usporedba rezultata dobivenih primjenom postupaka na slike vozila

7.1 Subjektivna ocjena poboljšanja kontrasta

Rezultati dobiveni primjenom implementiranih postupaka za poboljšanje kontrasta sivih slika na slike iz oblikovane baze slika vozila, mogu se subjektivno ocjenjivati. Uspoređuje se koji postupak daje poboljšanje vidljivosti. Postupak treba poboljšati robusnost sustava za automatsku detekciju, raspoznavanje i pohranu registarskih oznaka pa se posebna pozornost pridaje zamjetljivosti i izgledu registarskih tablica i oznaka države (tamo gdje je raspoloživa). Važno je imati na umu da je cilj poboljšanje kontrasta u nepovoljnim uvjetima, ali se istovremeno ne smije srozati kontrast onih slika koje su snimljene u dobrim uvjetima i koje već same po sebi imaju dobar, tj. zadovoljavajući kontrast, što je u našoj bazi slika vozila slučaj s većinom slika.

U nastavku su dani zaključci o prikladnosti implementiranih postupaka doneseni na temelju subjektivne ocjene rezultata postupaka dobivenih na našoj bazi slika stražnjih strana vozila.

Gama korekcija se može unaprijed eliminirati iz skupa prikladnih postupaka. Naime, slike u bazi su različite kvalitete, snimane u različitim uvjetima. Neke bi od njih trebalo stoga posvijetliti, a neke potamniti i to s različitim faktorom γ . Pošto je ovdje potrebna automatska obrada slike, treba se svakako izbjeći ručno zadavanje i podešavanje parametara pa gama korekcija otpada jer nema efikasnog algoritma koji bi na temelju karakteristika svake pojedine slike izračunavao faktor γ , a čak i da se takav algoritam razvije, gama korekcija u većini slučajeva na ispitnim slikama nije dala dovoljno dobre rezultate.

Rastezanje kontrasta daje rezultate koji se uglavnom mogu subjektivno ocjeniti kao zadovoljavajući, a na mnogim primjerima čak i jako dobri. Slike iz baze većinom imaju prilično dobar kontrast, posebno u područjima registarskih tablica koji se ovim postupkom još bolje naglašava (slika 7.1). Kao prikladan postotak koji se zadaje za preslikavanje u crno, odnosno u bijelo se pokazalo 10÷15%. Međutim, rezultati nisu uvijek dobri. Na nekim slikama se ovim postupkom pogorša kontrast upravo u područjima tablica i oznaka država, a ponekad postupak uz zadani postotak u gornje spomenutom rasponu uzrokuje da znakovi na registarskim tablicama izbljedu (slika 7.2). Isto tako postupak ne može riješiti potrebu poboljšanja lokalnog kontrasta pa ne postiže dobre rezultate na "problematičnim" slikama sa sjenama (primjer se može vidjeti na slici 4.15 b)).



a)



b)

Slika 7.1 Poboljšanje kontrasta registarske tablice rastezanjem kontrasta: a) original, b) rezultat uz zadanih 10%.



a)



b)

Slika 7.2 Izbljedjeli znakovi tablice kao rezultat rastezanja kontrasta uz granicu od 15%: a) original, b) rezultatna slika

Globalno izjednačavanje histograma na mnogo slika daje dobre rezultate. Jedino je problematičan kada se primjeni na vrlo tamne slike jer tada rezultira presvijetlim izlaznim slikama, što proizlazi iz načina na koji se konstruira transformacijska funkcija za ovaj postupak. To bi mogao biti problem u daljnoj obradi slika (segmentaciji, binarizaciji, izdvajanju znakova). Naravno, kao globalni postupak ne daje zadovoljavajuće rezultate u slučajevima nejednolikog osvjetljenja scene. Inačica izjednačavanja histograma s pragom daje ukupno gledajući bolje rezultate. U većini slučajeva i nema velike razlike od klasičnog izjednačavanja histograma, ali pokazuje poboljšanja u slučajevima pretežito tamnih slika (primjer se može vidjeti na slici 4.11).

Lokalno izjednačavanje histograma manje narušava izgled slike kada se zada veća dimenzija prozora, odnosno susjedstva u kojem se računa lokalni histogram za pojedini slikovni element (manji je "checkboard" efekt jer se transformacijska funkcija manje naglo mijenja pomakom na novu poziciju). Uspoređivanjem rezultata, zaključila sam da se sa prozorima veličina od $45 \div 55$ mogu postići dobri rezultati. Najveći dobitak u odnosu na globalne postupke je poboljšanje kontrasta slika sa sjenama, tj. nejednolikim osvjetljenjem. U našoj bazi su takve slike uglavnom ujedno i pretežito tamne. U ostalim slučajevima se ne može reći da ovaj postupak ima prednost pred globalnim postupcima. Uvođenjem praga se kod lokalnog izjednačavanja ne postižu bolji rezultati na našim slikama. Kako je već rečeno, ciljane slike sa sjenama su uglavnom i pretežito tamne te imaju vrlo tamne tablice pa u predjelima gdje je najpotrebnije lokalno poboljšanje, prag ostavlja iste tamne razine (primjer je slika 4.17).

Postupak *CLHE* već daje rezultate koji se subjektivno smatraju boljima upravo zbog izgladenijeg izgleda slike. To bi trebala biti prednost ovog postupka pred klasičnim *AHE-om* i s obzirom na daljnju automatsku obradu slika jer bolje očuva rubove. Za veličinu prozora vrijedi isto što i za klasično lokalno izjednačavanje histograma, a što se tiče faktora α , promatranjem sam zaključila da bi bio odgovarajući u rasponu $0.6 \div 0.8$. Nikako manji ako se želi zadržati prednost lokalnog postupka, a ni veći da bude dovoljan utjecaj globalnog izgleda slika.

Trokanalno filtriranje pokazuje vrlo dobro naglašavanje rubova i to u inačici kada se ne koristi predloženo nelinearno rastezanje kontrasta. Za to nelinearno rastezanje je teško naći faktore koji bi zadovoljili različite slike iz baze (slika 7.3. je primjer gdje se vidi da s istim faktorima $BLOW=30$ i $BHI=100$ u jednom slučaju nelinearno rastezanje kontrasta daje dobar, a u drugom vrlo loš rezultat). Slike obrađene trokanalnim filtriranjem bez tog završnog

preslikavanja povećanjem razlike između faktora K_0 te K_1 i K_2 dobivaju sve "jači" dojam u smislu da se dosta istaknu tamne, crne površine. Zadovoljavajući rezultati, subjektivno gledajući su uz faktore K oko vrijednosti 2, K_1 oko vrijednost -0.6 i K_2 oko vrijednosti -1 (općenito treba zadavati $K_2 < K_1 < 0$). U usporedbi s ostalim postupcima, trokanalno filtriranje daje prilično dobre rezultate na većini testnih slika. Rezultati su često slični onim dobivenim primjenom rastezanja kontrasta, osim što ovaj postupak bolje naglasi rubove i ne istanji znakove u slučajevima kao rastezanje kontrasta (slika 7.2). Lokalni postupci svakako daju lošije rezultate što se tiče rubova, ali zato su bolji od trokanalnog filtriranja u slučajevima nejednolikog osvjetljenja.



Slika 7.3 Nelinearno preslikavanje nakon trokanalnog filtriranja sa zadnim Blow=30 i Bhi =100; gornji redak – original i poboljšani rezultat; donji redak – original i pogoršani rezultat.

Neoštro maskiranje se pokazalo prilično uspješnim postupkom za poboljšanje kontrasta na ispitnim slikama iz baze slika vozila. Ono producira slike na kojima su jasno vidljivi rubovi. Promatranjem rezultata dobivenih s različitim zadanim faktorima primjetila sam da slike imaju bolji izgled kada se zada veća maska (recimo oko 25÷40) i faktor poboljšanja oko 2. Rezultati nisu puno različiti od trokanalnog filtriranja, a puno slika je usporedivo i s rastezanjem kontrasta, samo što su ovdje "finiji" prijelazi sivih razina.

JGACE ne pokazuje znatna poboljšanja. Teško je odrediti faktore koji se zadaju kao ulazni parametri. Naime nisu provedeni psihofizički eksperimenti za određivanje praga kontrasta i $JND-a$ nego se umnožak γJND_0 promatrao kao jedan parametar (vidi formule (5.36) i (5.37)) i eksperimentalno se pokušalo naći njegovu odgovarajuću vrijednost.

7.2 Evaluacija na temelju rezultata detekcije registarske tablice

Odabrani ispitni skup slika iz baze slika vozila je poslužio kao ulaz u program koji locira registarsku tablicu*, a koji je razvijen u okviru projekta "Detekcija, raspoznavanje i automatski unos registarskih oznaka" [10]. Za pronalaženje lokacije registarskih tablica je korišten postupak koji koristi morfološke operatore.

Nasumično je izabrano 80 slika za evaluaciju, jedino se pazilo da u ispitnom skupu bude dovoljno "problematičnih" slika, tj. tamnih i onih sa sjenom. U tablici 7.1. su prikazani postoci uspješnosti lociranja registarske tablice na neobrađenim sivim slikama i na slikama obrađenim nekim prethodno opisanim postupcima za poboljšavanje kontrasta sivih slika. Postupci su birani prema subjektivnoj ocjeni uspješnosti poboljšanja kontrasta, tj. izabrani su oni za koje se promatranjem ustanovilo da su dobiveni dobri rezultati.

Postupak	Postotak ispravno lociranih registarskih tablica	Postotak djelomično lociranih tablica
Neobrađene sive slike	55%	15%
Rastezanje kontrasta sa zadanim parametrom 10%	48.75%	18.75%
Globalno izjednačavanje kontrasta	56.25%	18.75%
CLHE sa zadanim prozorom 55 i faktorom $\alpha=0.7$	62.5%	20%
Neoštro maskiranje sa zadanom maskom 35 i faktorom pojačanja 2	60 %	17.5%
Trokanalno filtriranje s faktorima: $K_0=2, K_1=-0.2, K_2=-0.4$	67.5%	8.75%

Tablica 7.1 Uspješnost lociranja registarske tablice na originalnim i slikama obrađenim odabranim postupcima.

Primjeri djelomično lociranih registarskih tablica se mogu vidjeti na slici 7.4. Radi se o tablicama na kojima nakon segmentacije nisu vidljivi svi znakovi ili pak nisu vidljivi cijeli znakovi (tj. znakovi nedostaju ili su odrezani).

*U okviru projekta razvio student Fakulteta elektrotehnike i računarstva Danijel Zrno



a)



b)



c)



c)

Slika 7.4 Djelomično locirane registrarske tablice: a) i b) siva slika i rezultat segmentacije na kojem nedostaju znakovi (oznaka grada ZG nedostaje); c) i d) siva slika i rezultat segmentacije na kojemu su neki (gotovo svi) znakovi odrezani.

Promatranjem postotaka u tablici 7.1 može se zaključiti da ukupno najbolje poboljšanje daje trokanalno filtriranje, ali da niti jedan postupak ne možemo nazvati "pravim rješenjem". Na rezultatnim slikama i lociranim registracijama primjetno je da su postupci bili uglavnom neuspješni u poboljšavanju slika tamnih slika. Zato sam te slike izdvojila i posebno uspoređivala rezultate pojedinih postupaka na njima. Došla sam do zaključka da na tim slikama uspijevaju TGHE(10) i CLHE(55,0.7), što je i očekivano s obzirom na sve prethodno kazano o tim postupcima. Na ostalim slikama se trokanalno filtriranje pokazalo najuspješnijim među ispitanim postupcima.

Na temelju tih zaključaka je pokušano naći algoritam koji bi između odabranih postupaka procijenio koji je za pojedinu sliku najpogodniji. Testirane su različite kombinacije postupaka.

Posebno se izdvajaju slike koje su pretežito tamne, a to se određuje na temelju histograma slika. Uvjeti koji slike, tj. njihovi histogrami trebaju zadovoljiti da bi bile svrstane u tamne su sljedeći:

- a) više od 70% slikovnih elemenata slike je tamnije od sive razine 80 i

b) manje od 10% slikovnih elemenata je svjetlije od sive razine 155.

Uvjet b) je uveden da se tamnima ne bi proglasile i slike koje imaju i zamjetan postotak svijetlih slikovnih elemenata (i time visoki kontrast) kao što je npr. slika 7.5. Na slici 7.6 su prikazane neke od slika koje se prema ovim uvjetima izdvajaju kao tamne. Ove granice su određene na temelju eksperimentiranja s različitim pragovima i postocima na ispitnim slikama.



Slika 7.5 Primjer slike koja bi bez uvjeta na gornji dio histograma bila klasificirana kao tamna, a vidi se da se radi o slici s dobrim kontrastom.

Za poboljšavanje tamnih slika je odabran postupak TGHE s pragom 10 jer su rezultati dobiveni njime na izdvojenim tamnim slikama pokazali da se segmentacija uspješno obavlja. Lokalni postupak CLHE također pokazuje dobre rezultate nakon segmentacije tamnih slika obrađenih njime, ali zbog (višestruko) veće konzumacije vremena (tablica 7.2) je odabran postupak TGHE.

U tablici 7.2 su navedena prosječna trajanja pojedinih postupaka primjenjenih na slikama iz baze vozila dimenzija 640×480. Postupci su se izvodili na računalu s procesorom *Mobile Intel Pentium 4 2.20GHz* pod operacijskim sustavom *Microsoft Windows XP*. U tablici se vidi da su vremenski najzahtjevniji lokani postupci i da oni jako ovise o veličini zadanog prozora. Veličina maske utječe na trajanje postupka i kod neoštrog filtriranja, ali taj postupak ipak zahtjeva znatno manje vremena od lokalnih postupaka kada se usporede vremena lokalnih postupaka i neoštrog maskiranja uz zadane iste dimenzije maske odnosno prozora.



Slika 7.6 Primjeri slika koje se izdvajaju kao tamne.

Postupak	Prosječno vremensko trajanje [s]
GHE	0.020
TGHE	0.018
AHE (prozor 25)	0.801
AHE (prozor 55)	3.173
CLHE (prozor 25)	0.901
CLHE (prozor 45)	3.230
Neošto maskiranje (maska 25)	0.291
Neošto maskiranje (maska 35)	0.395
Trokanalno maskiranje	0.298
Trokanalno maskiranje s nelinearnim rastezanjem kontrasta	0.555

Tablica 7.2 Trajanje pojedinih postupaka za poboljšanje kontrasta sivih slika uz naznačene vrijednosti parametara koji igraju ulogu u trajanju.

Za ostale slike je je pokušano uspoređivanje neoštrog maskiranja i trokanalnog filtriranja jer su se ti postupci pokazali kao najuspješniji na ispitnim slikama. Provedeni su eksperimenti sa trokanalnim filtriranjem i različitim zadanim faktorima K_0 , K_1 , K_2 od kojih su se zadovoljavajućim pokazali $K_0=2$, $K_1=-0.2$, $K_2=-0.4$. Za neošto maskiranje su odabrani parametri: maska dimenzija 35×35 i faktor pojačanja 1.5. U tablici 7.3 su prikazani ukupni rezultati dobiveni primjenom TGHE postupka na tamne slike te mijenjanjem načina obrade za ostale slike (segmentacija bez prethodnog procesiranja, segmentacija nakon trokanalnog filtriranja i segmentacija nakon neoštrog maskiranja).

Eksperimentirano je i s uvođenjem odabira hoće li se koristiti originalna siva ili obrađena slika. Način odabira između sive slike i obrađene se temelji na odstupanjima tih slika od srednje vrijednosti koja se dobije zbrajanjem te dvije slike. Ako je $s(x,y)$ srednja vrijednost originalne slike $I(x,y)$ i obrađene $IO(x,y)$ odabir se vrši na način:

- 1) $\min \{ (I-s)^2, (IO-s)^2 \}$ i
- 2) $\min \{ (s^2-I^2), (s^2-IO^2) \}$.

U tablici 7.3 se nalaze rezultati segmentacije za postupke koji kombiniraju prethodne uvjete i postupke.

Obrada tamnih slika	Obrada ostalih slika	Postotak ispravno lociranih registarskih tablica	Postotak djelomično lociranih tablica
TGHE	Originalne sive slike	63.75%	16.25%
TGHE	Trokanalno filtriranje	76.25%	10%
TGHE	Neoštro maskiranje	68.75%	18.75%
TGHE	Odabir između originalnih sivih slika i trokanalnog filtriranja prema uvjetu 2)	76.25%	10%

Tablica 7.3 Uspješnost lociranja registarskih tablica uz razne kombinacije postupaka i uvjeta

Vidi se da su najbolji rezultati postignuti uz trokanalno filtriranje. Uvođenje odabira između originalnih sivih i slika procesiranih trokanalnim filtriranjem prema uvjetu 2) se nije pokazalo poboljšanjem jer se dobiju isti postoci. Kada se koristio uvjet 1) pogoršan je postotak ispravno lociranih registarskih tablica, a i s korištenjem neoštrog maskiranja su rezultati lošiji.

Može se zaključiti da tamne slike treba svakako izdvojiti i obraditi postupkom TGHE (od 80 ispitnih slika je izdvojeno 9 tamnih prema zadanom uvjetu i od njih je samo jedna registarska tablica ostala nelocirana - i to ona na slici 4.15a)), a na ostalima primjeniti trokanalno filtriranje jer se to pokazala kao najuspješnija kombinacija na ispitnim slikama.

Možda bi se moglo poboljšati lociranje s obzirom na ove djelomično locirane tablice (kojima ili nedostaje dio znakova tablice ili su ti znakovi odrezani) kada bi segmentacija imala informaciju kojim je postupkom poboljšana slika i to uzela u obzir pri obradi (jer primjerice TGHE daje redovito svjetlije rezultate od trokanalnog). Dio tih djelomično lociranih tablica su one koje su velikih dimenzija ili dosta nakošene pa se vjerojatno bolji rezultati dobiju sa slikama koje ispunjavaju ograničenja na zakrenutost i veličinu tablice.

U *Dodatku A* se mogu vidjeti neki primjeri ispravno lociranih tablica. U *Dodatku B* su prikazani primjeri za djelomično locirane tablice, a u *Dodatku C* za nelocirane registarske tablice. U sva tri dodatka su prikazane originalne slike u boji, sive slike nakon pretprocesiranja gore objašnjenom kombinacijom postupaka (TGHE za tamne i trokanalno filtriranje za ostale slike) te rezultat segmentacije, odnosno lociranja tablice, ako ga ima.

8. Kratki opis programskog sustava

Program je razvijen u *Microsoft Visual C++ 6.0* programskom okruženju korištenjem ugrađene biblioteke *MFC (Microsoft Foundation Class Library)*. Iskorištena je klasa *cBitmap* koja enkapsulira *Windows graphics device interface (GDI)* bitmape. Funkcije potrebne za obradu slike, tj. za implementaciju postupaka poboljšanja kontrasta su ostvarene u klasi *cImage* koja je dana u nastavku.

8.1 Klasa korištena za implementaciju postupaka za poboljšanje kontrasta sivih slika

```
class cImage
{
public:
    cImage();           //default konstruktor
    //konstruktor koji stvara sliku zadane širine i visine, te preuzima vrijednost slikovnih
    //elemenata iz zadanog polja
    cImage(int Width, int Height, BYTE * Bits);
    //destruktor
    virtual ~cImage();

    //funkcija za učitavanje slika (unutar nje se odmah pretvara slika u 8-bitni sivi format
    BOOL LoadImage(LPCTSTR szImagePath);
    //funkcija za spremanje slika u 8-bitnom sivom formatu
    BOOL Save8(LPCTSTR szFile);
    //funkcija za iscertavanje slike na ekran
    BOOL Draw(CDC* pDC, const RECT& rect, BOOL m_Stretch);

    //pretvaranje slike iz RGB u 8-bitni sivi format
    BOOL GrayScale();
    //izračunavanje histograma slike
    BOOL Histogram();
    //kopiranje slika
    BOOL Copy(cImage &Copy);

    //dohvat širine, visine i ukupne veličine slike
```

```

long GetWidth()          { return m_Width; }
long GetHeight()        { return m_Height; }
long GetSize()          { return (m_Width*m_Height); }

//dohvat histograma slike
long * GetHist()        { Histogram(); return m_Hist; }
//dohvat vrijednosti pojedinog slikovnog elementa slike
BYTE GetPixelColor(long x, long y);
//provjera je li slika u 8-bitnom sivom formatu
BOOL Is8bit();

//postavljanje vrijednosti slikovnih elemenata
void SetBits8(BYTE * B);

//sljede funkcije kojima su ostvareni opisani postupci poboljšanja kontrasta:
//globalni postupci:
//gama korekcija, zadaje se faktor korekcije gama
BOOL Gamma(float Gamma);
//rastezanje kontrasta, zadaje se postotak
BOOL ContrastStretch(int Percent);
//izjednačavanje histograma
BOOL GHE();
//izjednačavanje histograma s pragom, zadaje se siva razina do koje se tamni slikovni
//elementi ostavljaju kao u originalu
BOOL TGHE(BYTE Level);

//lokalni postupci:
//lokalno izjednačavaje histograma, zadaje se veličina susjedstva
BOOL AHE(int Window);
// lokalno izjednačavaje histograma s prago, zadaje se veličina susjedstva i siva razina
//do koje se tamni slikovni elementi ostavljaju kao u originalu
BOOL TAHE(int Window, BYTE Level);

//ograničeno lokalno izjednačavanje histograma – modificirani CLHE, zadaje se
//veličina susjedstva i faktor alpha koji uravnotežuje globalni i lokalni histogram
BOOL CLHE(int Window, float Alpha);

```

```

//filtriranja:
    //niskopropusno filtriranje, zadaje se veličina konvolucijske make
    BYTE * LowPass(int Mask);

    //trokanalno filtriranje, zadaju se parametri za lin. kombinaciju slika –  $K$ ,  $K1$  i  $K2$ , te
    //kontrolna varijabla stretch koja određuje hoće li se izvesti nelinearno preslikavanje s
    //parametrima Blow i Bhi;
    BOOL ThreeChannel(float K, float K1, float K2, BOOL stretch, BYTE Blow=0,
        BYTE Bhi=0);

    //neoštro maskiranje, zadaje se veličina konvolucijske maske za niskopropusno
    //filtriranje i faktor pojačanja
    BOOL Unsharp(int Mask,float Gain);

    //postupak JGACE, zadaje se daljina promatranja (u mm), minimalni JND0 i faktor
    //pojačanja
    BOOL JGACE(int d, int JND0, float gamma);

private:
    CBitmap *m_Bitmap;        //pokazivač na MFC klasu koja drži sliku
    BYTE *m_Bits8;           //8-bitne vrijednosti slikovnih elementa slike - direktno
    long m_Width;            //širina slike
    long m_Height;           //visina slike

    long *m_Hist;            //polje za histogram slike
    BYTE m_Max;              //maksimalni intenzitet u slici
    BYTE m_Min;              //minimalni intenzitet u slici

    //postavljanje prethodna dva člana
    void SetMinMax();

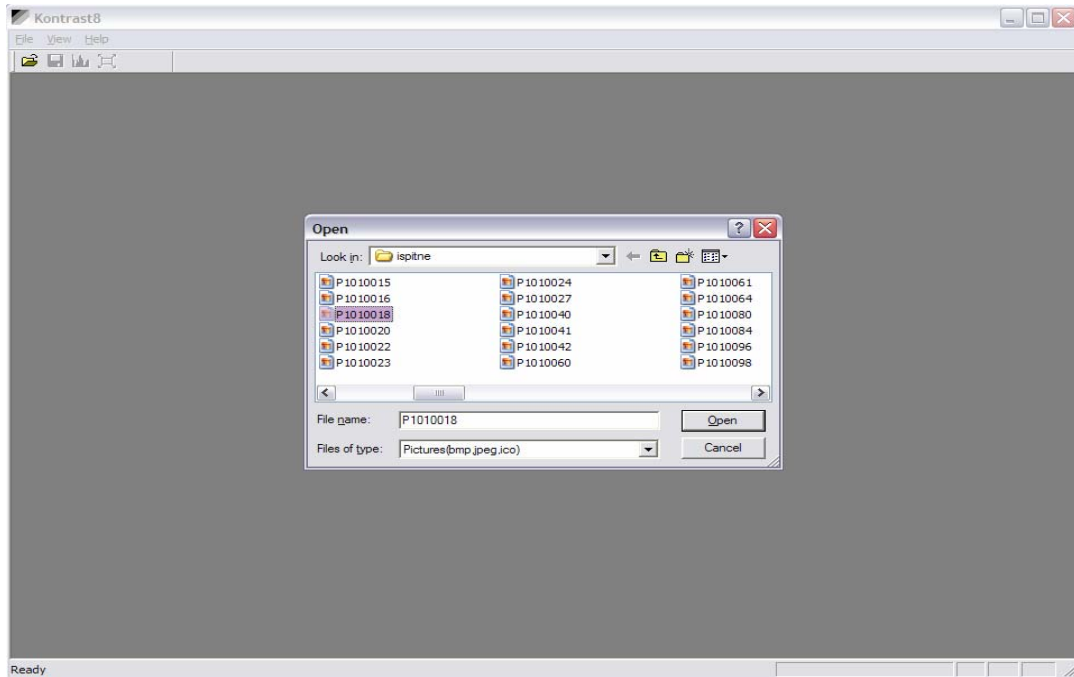
//pomoćne funkcije za učitavanje slike
    BOOL Attach(IPicture* pPicture);
    static IPicture* LoadFromBuffer(BYTE* pBuff, int nSize);

    //funkcija koja računa gradijent slike
    float * Gradient();
};

```

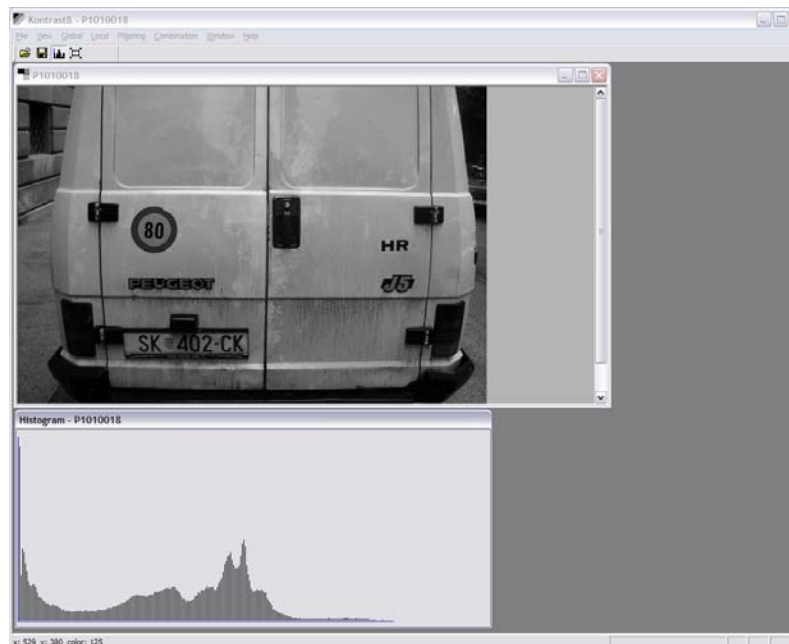

8.2 Ilustracija korištenja programa za poboljšanje kontrasta sivih slika

Nakon pokretanja programa za poboljšanje kontrasta slika, otvara se glavni prozor koji nudi opciju učitavanja (*File->Open*) slike iz datoteke (slika 8.1).



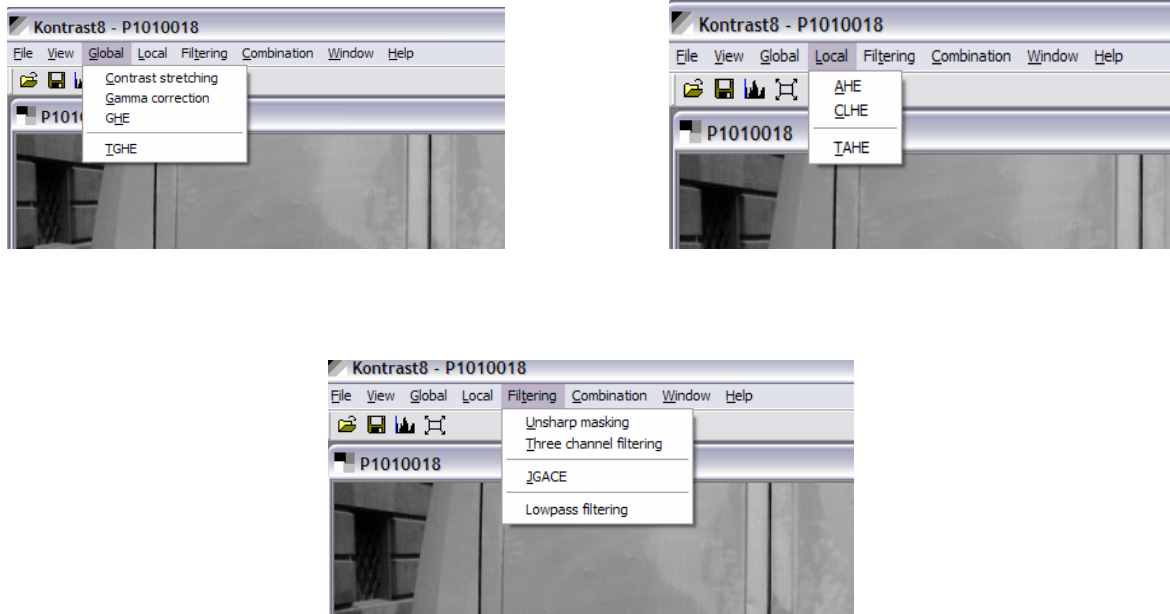
Slika 8.1 Učitavanje slike iz datoteke.

Nakon što je slika učitana, može se pogledati grafički prikaz njezinog histograma (odabirom opcije *View->Histogram*) (slika 8.2).

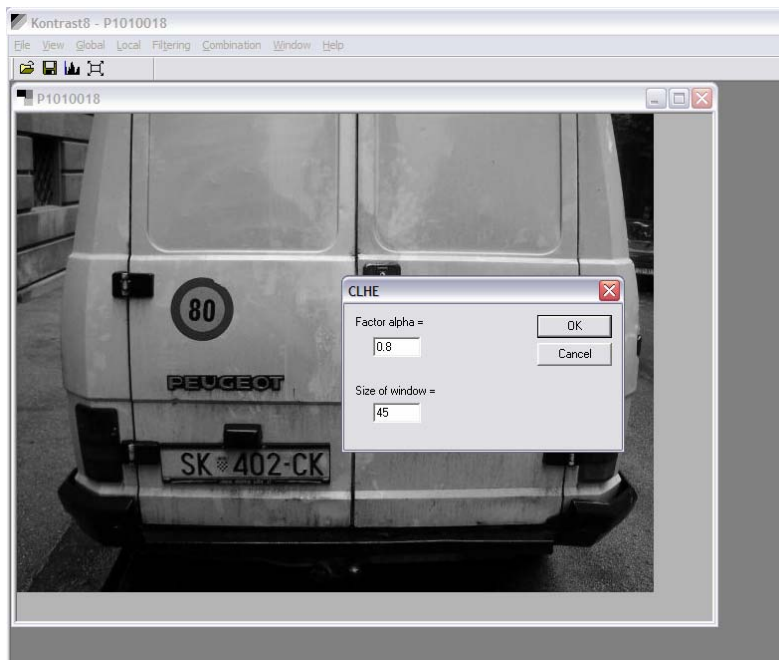


Slika 8.2 Prikaz histograma slike.

Postupci za poboljšanje kontrasta su sortirani pod opcijama menua na globalne, lokalne i filtriranje (slika 8.3). Kada se odabere neki postupak koji traži zadavanje ulaznih parametara, otvara se dijalog u koji se upisuju ti parametri (primjer na slici 8.4).

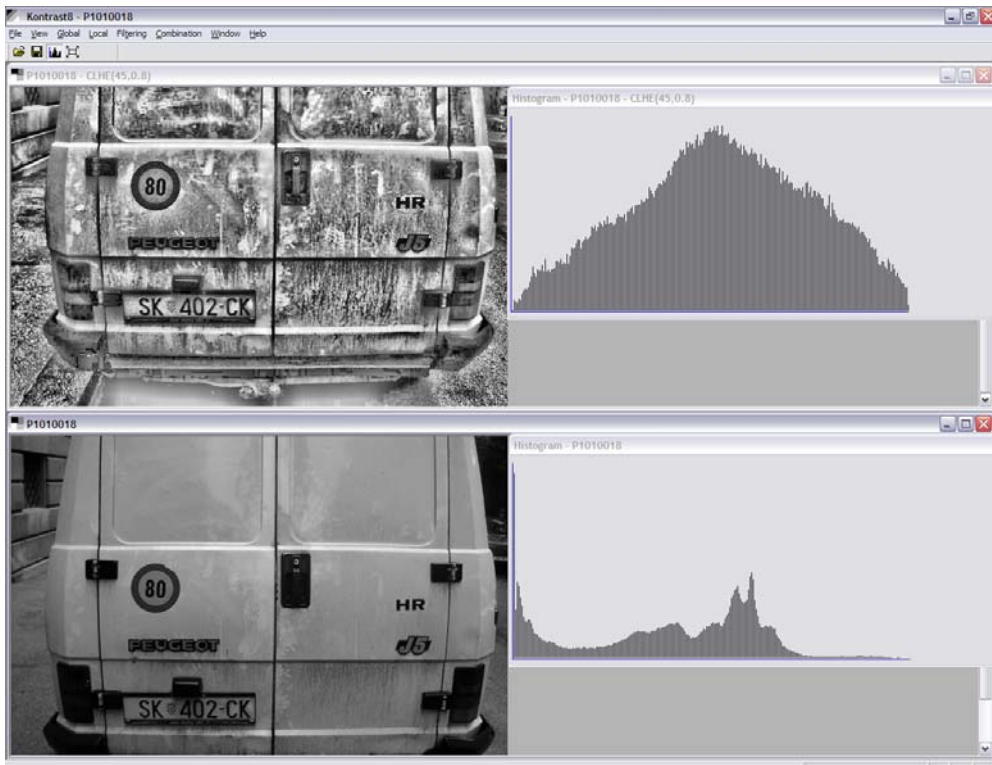


Slika 8.3 Odabir postupaka za poboljšanje kontrasta slike.



Slika 8.4 Primjer zadavanja parametara za odabrani postupak.

Nakon provođenja postupka rezultat se prikazuje na ekranu i prozor u kojem se prikazuje rezultat dobiva naziv po provedenom postupku (vidi sliku 8.5). Moguće je paralelno gledanje slika i njihovo međusobno uspoređivanje ili pak uspoređivanje histograma (kada se ista slika obrađuje različitim postupcima za poboljšanje kontrasta slika), kao što se vidi na slici 8.5.



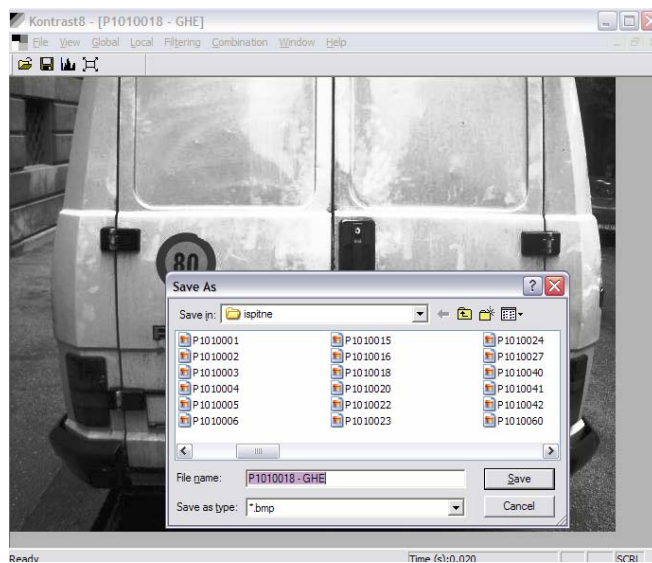
Slika 8.5 Paralelno prikazivanje slika i histograma.

U statusnoj liniji se može pratiti vrijednost pojedinog slikovnog elementa i vrijeme trajanja postupka (slika 8.6 u dnu).



Slika 8.6. U statusnoj liniji je prikazana vrijednost slikovnog elementa na koji pokazuje kursor (na lijevoj strani), te vrijeme potrebno za izvođenje postupka (u ovom slučaju globalnog izjednačavanja histograma).

Slike se spremaju u *.bmp* formatu (*Windows bitmap*) kao 8-bitne sive slike (slika 8.7).

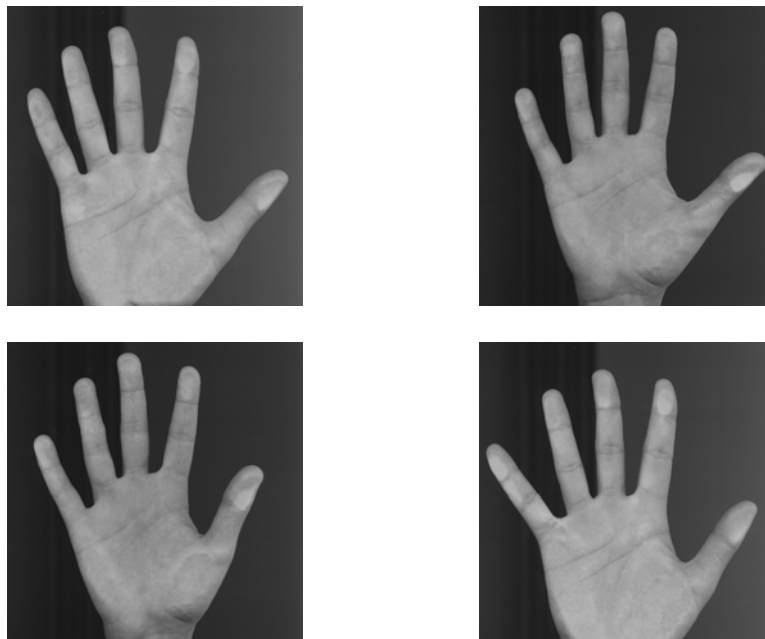


Slika 8.7 Spremanje slika na disk u *.bmp* formatu

9. Primjer korištenja postupaka na bazi slika dlanova

9.1 Primjeri slika dlanova

Prethodno opisani postupci poboljšanja kontrasta primjenjeni su i na slikama drugačijeg sadržaja i namjene. Radi se o slikama dlanova prikazanim na slici 9.1.

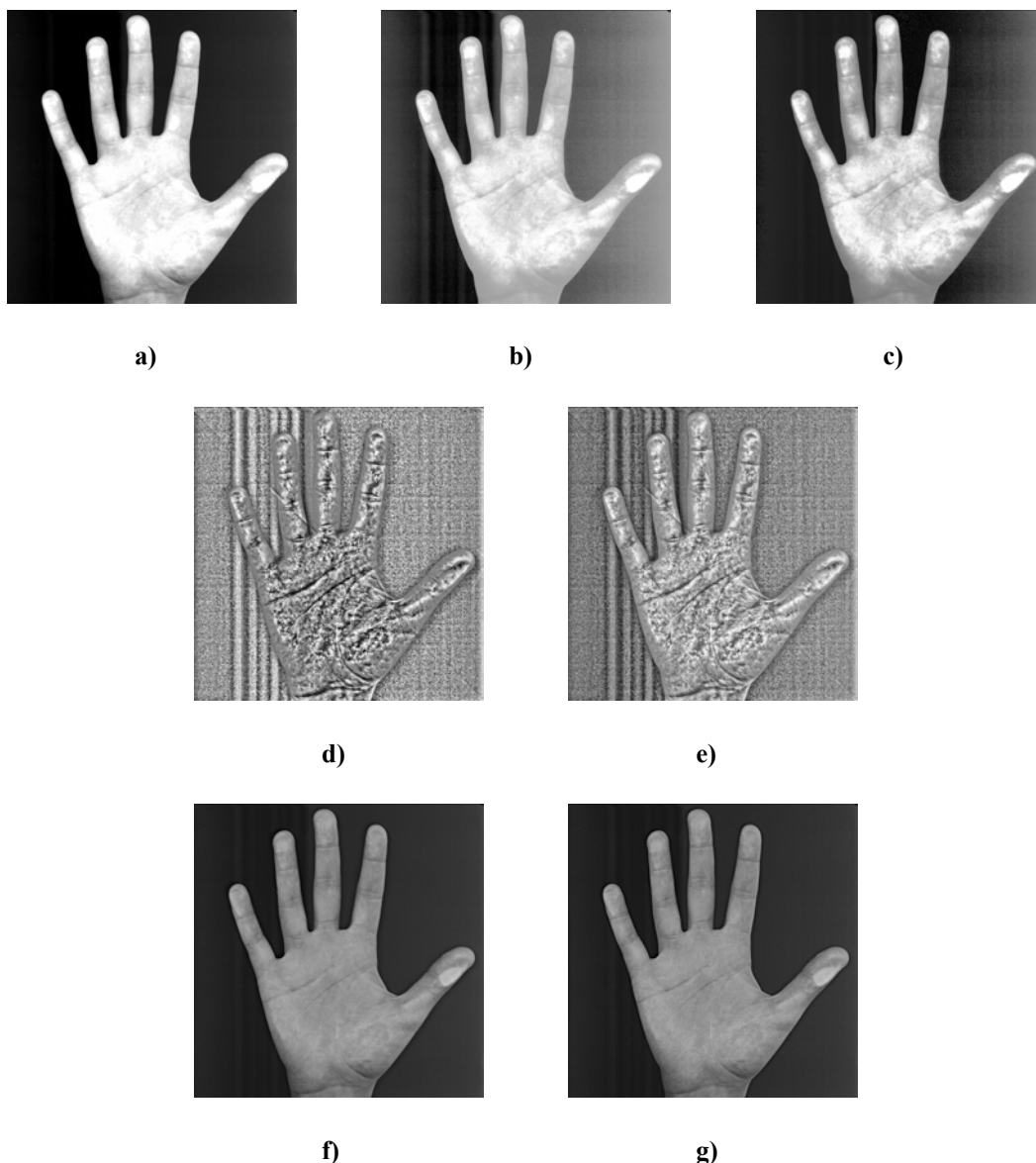


Slika 9.1 Četiri primjera slika dlanova

9.2 Dobiveni rezultati

Slika 9.2 prikazuje rezultate nekih od postupaka za poboljšanje kontrasta sivih slika primjenjenih na prvu sliku dlana (slika 9.1 lijevo gore). Zanimljivo je usporediti uspješnost pojedinih postupaka u odnosu na rezultate koje su ti postupci postigli na slikama iz baze slika vozila. Vidi se da se rastezanjem kontrasta sa zadanih 10% (slika 9.2a)) gube neke linije dlanova (posebno uočljivo na vrhovima prstiju - jagodicama). Slika 9.2b) je rezultat globalnog izjednačavanja histograma. Tu je i dalje prisutan isti problem. Na slici 9.2c) je prikazan rezultat globalnog izjednačavanja histograma sa zadanim pragom 40. Taj prag je odabran jer se pokazalo da je veliki dio tamne pozadine upravo tamniji od te granice. Vidi se razlika naspram izjednačavanja histograma. Rezultat je ukupno manje posvjetljena slika i manje je "finih" linija dlanova izgubljeno.

U srednjem retku se nalaze slike dobivene lokalnim postupcima. Slika 9.2d) je rezultat lokalnog izjednačavanja histograma a slika 9.2e) modificiranog *CLHE* postupka. Očito je narušavanje izgleda slike u oba slučaja (neka područja na dlanu su sad postala tamnija od pozadine), s tim da je nešto manji taj efekt u slučaju postupka *CLHE*. Vidi se dobro pojačanje šuma na pozadini koja je na originalnoj slici dosta "glatka". Zbog lokalnog karaktera ova dva postupka, na rezultatnim slikama se puno bolje nego kod globalnih postupaka vidi "naboranost" pozadine u lijevoj polovici slike.



Slika 9.2 Rezultati postupaka poboljšanja kontrasta: a) rastezanje kontrasta (10%); b) *GHE*; c) *TGHE* (prag=40); d) *AHE* (prozor=45); e) *CLHE* (prozor=45, $\alpha=0.7$); f) neoštro maskiranje (maska=35, faktor pojačanja=1.5) g) trokanalno filtriranje ($K_0=2, K_1=-0.4, K_2=-0.6$).

Na kraju su prikazani i rezultati filtriranja koji su se kod slika vozila pokazali prilično zadovoljavajućima. Neoštro maskiranje uz zadanu veličinu maske 35 i faktora pojačanja 1.5 daje sliku koja je dosta slična originalnoj, uz naglašenije rubove, tj. linije dlanova. Još izoštrenu sliku dobivamo trokanalnim filtriranjem sa zadanim faktorima $K_0=2, K_1=-0.4, K_2=-0.6$.

Iz prikazanih rezultata i originalnih slika dlanova može se zaključiti da su slike dovoljno dobre kvalitete i kontrasta. Ne očekuju se posebni problemi u daljnjem procesiranju tih slika, recimo u svrhu automatskog raspoznavanja dlanova i identifikacije osoba. Jedino bi u obzir došli postupci filtriranja koji naglašavaju rubove, odnosno na ovim slikama linije na dlanovima.

Isto tako, može se potvrditi ono što se često naglašava u literaturi, a to je da se postupci poboljšanja kontrasta trebaju birati ovisno o slikama na kojima se primjenjuju i ovisno o namjeni poboljšanih slika. Isti postupci s istim zadanim parametrima ne postižu podjednako dobre rezultate na slikama vozila i slikama dlanova (npr. postupak *TGHE* traži puno viši prag kada se primjenjuje na slike dlanova). Lokalne postupke bih ocijenila uspješnijim na slikama vozila, a filtriranja na slikama dlanova.

10. Zaključak

U današnjem tehnološki razvijenom i "digitaliziranom" svijetu, obrada slike je vrlo raširena. Primjenjuje se u čitavom spektru namjena. Posebnu ulogu obrada slika ima u različitim sustavima automatskog raspoznavanja, bilo da se radi o raspoznavanju lica, dlanova, rukopisa ili, kao što je u našem projektu riječ, o raspoznavanju automobilskih registarskih tablica i oznaka države.

Sustavi za automatsko raspoznavanje registarskih tablica su već razvijani i implementirani u svrhu provođenja nadzora prometa ili nadzora pristupa različitim parkiralištima. Takvi sustavi obično nemaju izdvojen modul za poboljšavanje kontrasta slika koji ima ulogu da povećava robusnost sustava u nepovoljnim uvjetima, nego se odmah prelazi na segmentaciju slike, a pri tome vodi računa o nekim tipičnim vrijednostima i povezanosti slikovnih elemenata originalnih slika, kao što je to slučaj s *VIPUR-om* (engl. *Vehicle Identification on Public Roads*) opisanom u [11].

U našem sustavu za detekciju, raspoznavanje i automatski unos registarskih oznaka je predviđen modul za poboljšavanje kontrasta slika koji se koristi u fazi pretprocesiranja slika. Taj modul treba osigurati raspoznavanje i u uvjetima nedovoljnog ili neravnomjernog osvjetljenja, zaprljanih ili izbljedjelih registracija.

Poboljšanje kontrasta slika, posebice sivih slika, je vrlo razvijeno područje obrade slike. Razvijeni su mnogi postupci za poboljšanje kontrasta sivih slika. Sudeći prema literaturi, najživlje područje u smislu smišljanja novih ili modificiranja poznatih postupaka je obrada medicinskih slika. Međutim, to je i najbolji primjer kako se uspješnost postupka ne može generalno utvrđivati na temelju rezultata u jednoj namjeni. Primjer su postupci JGACE ili trokanalno filtriranje s nelinearnim rastezanjem kontrasta opisani u ovom radu. Naime, ti su postupci razvijeni u svrhu poboljšavanja medicinskih slika, prije svega radioloških snimaka, koje su karakteristične po velikim tamnim pozadinama. Ti se postupci, koji pokazuju vrlo dobre rezultate kada se primjene na ciljane medicinske slike, nisu pokazali toliko uspješnima na ispitnim slikama iz naše baze slika vozila.

Promatranjem rezultata primjene različitih postupaka za poboljšanje kontrasta sivih slika, dobila sam potvrdu karakteristika pojedinih postupaka koje se naglašavaju u literaturi. Tako je na slikama iz baze koje imaju izrazito nejednoliko osvjetljenu scenu očito da globalni postupci ne mogu riješiti problem velike varijacije lokalnog kontrasta u slici. Za lokalne postupke se može zaključiti da će upravo u takvim slučajevima dati najbolje rezultate, dok će njihova primjena na slike koje originalno imaju dobar kontrast uglavnom samo narušiti izgled slika. Kod postupaka filtriranja, koji su izvedeni konvolucijom u vremenskom prostoru da se izbjegne pretvaranje u slike frekvencijskog područja, a što je opravdano manjim dimenzijama konvolucijskih maski i brzim izvođenjem, pokazuje se dobro naglašavanje rubova uz ponegdje nepotrebno pojačavanje šuma u glatkim površinama u slici kao što su bijele pozadine registarskih tablica.

Statistički rezultati iz poglavlja 7.2 pokazuju da niti jedan postupak, kada se primjenio sam na sve ispitne slike nije dao izrazito poboljšanje uspješnosti detekcije registarske tablice vozila. Zato je pokušano uspoređivanjem doći do zaključka u kojim slučajevima je koji postupak uspješan. Tako sam zaključila da su "najproblematičnije" slike uglavnom one koje su snimane u sumrak ili već po noći uz slabu javnu rasvjetu. U tim slučajevima se često javljaju i sjene preko tablica i oznaka država pa najbolje poboljšanje vidljivosti daje TGHE. Taj postupak je

odabran najprije na temelju subjektivne ocjene i vremena potrebnog za izvođenje, a i rezultati segmentacije su pokazali da je prikladan u slučajevima tamnih slika.

Za slike koje nisu tamne, nego uravnoteženo sive i dobro osvijetljenje se pokazalo da su rezultati detekcije registarske tablice dobri i ako se na njih ne primjene postupci poboljšavanja kontrasta, te je pokušao razviti algoritam koji bi određivao hoće li se slika poboljšavati ili ne. Kombinirajući različite kombinacije i uvjete pokazalo se da je na ispitnim slikama najprikladnije korištenje trokanalnog filtriranja.

Algoritam specifičan za ovu namjenu, najprije odvaja tamne slike (na temelju histograma jer tamne slike imaju koncentraciju vrijednosti slikovnih elemenata oko manjih iznosa), njih obrađuje postupkom TGHE, a zatim ostale slike obrađuje trokanalnim filtriranjem. Algoritam pokazuje poboljšanje uspješnosti lociranja registarske tablice. Najveći dobitak je uspješno lociranje registarskih tablica u uvjetima lošeg osvjetljenja u kojima ne uspijeva detekcija tablica na originalnim slikama i u slučajevima kada su vozila, tj. njihove registarske tablice i oznake država prašnjave.

Rezultati nisu spektakularni, ali treba uzeti u obzir da su ispitne slike birane nasumično, te da su na nekima prikazana vozila s malim tablicama u odnosu na veličinu slike, na nekima su vozila prilično ukošena, na nekima su vozila slikana vrlo blizu pa to sve može utjecati na lošiju detekciju lokacije registarske tablice (takve tablice se uglavnom djelomično točno lociraju). Trebalo bi odrediti dozvoljene kutove i udaljenosti snimanja pa bi se na temelju slika koje zadovoljavaju te uvjete mogli donijeti kvalitetniji zaključci. To je opravdano ako se uzme u obzir da se u praksi mogu postaviti takva ograničenja na kameru uz korištenje aktivnog vida.

S obzirom na planiranu namjenu sustava, može se zaključiti da slike iz baze ne odgovaraju u potpunosti onima koje bi bile snimljene u praksi. Naime, u bazi se nalaze slike parkiranih vozila. Pošto je sustav namijenjen kontroli prometa, ponajprije na granicama, ulazima parkirališta i sl. u stvarnosti bi imali snimke upaljenih vozila. Zato bi se možda mogli izbjeći neki problemi. Npr. vozila, najviše novija, imaju uglavnom osvjetljenje registarskih tablica što bi moglo značiti manje problema s izrazitim sjenama preko znakova tablice po noći i u sumrak. Osim toga, mislim da se može slobodno zaključiti da je slika 4.15a) (koja po zadanom algoritmu ne daje dovoljno dobar rezultat da bi tablica bila detektirana) primjer koji se ne bi često susretao u praksi. S druge strane, mogli bi se dogoditi drugi problemi sa stvarnim slikama uslijed kretanja i, ono što je posebno zanimljivo s aspekta kontrasta slika, zbog zapaljenih svjetala vozila po noći.

Nisu dobiveni dobri rezultati za sve slučajeve. Primjećen je problem s tablicama koje nemaju klasične boje – bijelu pozadinu i crne znakove, kao što su recimo diplomatske registarske tablice s plavom pozadinom i žutim znakovima koje nakon pretvaranja slike u boji u sivu sliku imaju vrlo malu razliku pozadine i znakova.

Ukupni zaključak je da ovakva implementacija ipak povećava robusnost sustava za detekciju, raspoznavanje i automatski unos registarskih tablica jer se postižu bolji rezultati u nepovoljnim uvjetima osvjetljenja, ali i zaprljanosti i izbljedjelosti registarskih oznaka.

Da bi se dalje poboljšao sustav i odabir prikladnih postupaka za poboljšanje, trebalo bi tješnije povezati poboljšanje kontrasta s načinom segmentacije slike, a i binarizacije u daljnjem

koraku obrade jer bi se poznavajući kojim je postupkom poboljšanja kontrast slika obrađena mogli prilagoditi neki pragovi.

Ovdje je objektivna ocjena uspješnosti postupaka za poboljšanje kontrasta donesena samo na temelju koraka koji neposredno slijedi – lociranje registarske tablice, a za konačnu ocjenu bi trebalo obraditi rezultate koje daje cijeli sustav, dakle one koje daje višeslojni perceptron koji se koristi za raspoznavanje znakova.

11. Literatura

- [1] www.ph.tn.tudelft.nl/Courses/FIP – An Interactive Course in Image Processing, Pattern Recognition Group, Delft University of Technology
- [2] www.netnam.vn/unescocourse/computervision/comp_frm.htm – UNESCO Training Course, Computer Vision, Imaging
- [3] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1992
- [4] www.imageprocessingbook.com – Gonzalez, Woods: Digital Image Processing – Home Page
- [5] H. Zhu et al., *Image Contrast Enhancement by Constrained Local Histogram Equalization*, Computer Vision and Image Understanding, Vol. 73, No. 2, February 1999
- [6] J. A. Stark, *Adaptive Image Contrast Enhancement using Generalizations of Histogram Equalization*, IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 20, No. Y, 1999
- [7] M. Tkalčić et al., *Primerjava postopkov za izboljšanje kontrasta sivih slik*, 21.-23. september 2000, Portorož, slovenija, Zbornik devete elektrotehniške in računalniške konference ERK 2000, september 2000
- [8] T.-L. Ji et al., *Adaptive Image Contrast Enhancement based on Human Visual Properties*, IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol. 13, No. 4, December 1994
- [9] P.G. Tahoces et al., *Enhancement of Chest and Breast Radiographs by Automatic Spatial filtering*, IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol. 10, No 3. September 1991
- [10] www.zemris.fer.hr/projects/LicensePlates - stranice studentskog projekta "Detekcija, raspoznavanje i automatski unos registarskih oznaka" (FER-ZEMRIS)
- [11] M. H. ter Brugge et al., *License Plate Recognition*, "Knowledge-based Intelligent Techniques in Character Recognition", Edited by L.C. Jain, B. Lazzerini, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, 1999
- [12] I. King, L. Xu, *Adaptive Contrast Enhancement by Entropy Maximization with a 1-K-1 Constrained Network*, Department of Computer Science, The Chinese University of Hong Kong, Satin, New Territories, Hong Kong (preuzeto s www.cse.cuhk.edu.hk/~king/PUB/Teomp95.pdf)
- [13] Y. Zheng et al., *Improves Histogram Equalization Algorithms for Enhancement of Dark and Color Images (Manuscript)*, Dept. of Computer Science and Engineering, University of Louisville, Louisville, Kentucky 40292, USA
- [14] G. Ramponi, *Contrast Enhancement in Images via the Product of Linear Filters*, Signal Processing, Vol. 77, No. 3, September 1999
- [15] S. M. Pizer et al., *Adaptive histogram equalization and its variations*, Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol 39, 1987

- [16] Carlos J. Vicente Peña, *AHE (ECUALIZACIÓN DEL HISTOGRAMA ADAPTATIVO)*, Dpto. Física aplicada e Ingeniería de Sistemas, Grupo de Control e Informática Industrial, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Madrid, c/ Ronda de Valencia, 3, 28012 Madrid, España
- [17] www.licenseplaterecognition.com – LPR- A Tutorial
- [18] www.ivsdirect.com/solutions/6.htm - INTELLIGENT VIDEO SYSTEMS:Solutions:Car License Plate Recognition
- [19] www.citysync.co.uk/pagedef.htm - Jet Automatic Number Plate Recognition Systems
- [20] www.acumensoft.com/acutag.htm - Acuman Systems - AcuTag™
- [21] www.arhungary.hu – Automatic Number Plate Recognition and Passport Reading by Adaptive Recognition Hungary

Dodatak A

Primjeri uspješno lociranih registarskih tablica

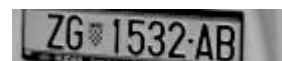
Originalne slike



Procesirane slike



Rezultat segmentacije



Originalne slike

Procesirane slike

Rezultat segmentacije



032-A-163



KZ 386-L



SK 180-BM



SI 124-BP

Originalne slike

Procesirane slike

Rezultat segmentacije



010-K-414



DU 748-BH



819KXH 75

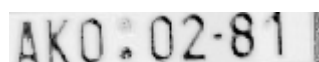
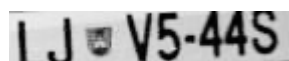


171 NVX 75

Originalne slike

Procesirane slike

Rezultat segmentacije



Dodatak B

Primjeri djelomično lociranih registarskih tablica

Originalne slike

Procesirane slike

Rezultat segmentacije



Dodatak C

Primjeri nelociranih (ili pogrešno lociranih) registarskih tablica

Originalne slike

Procesirane slike

Rezultat segmentacije



TAPETARIJA

