

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET



Ilija V. Popadić

**PRIMENA TEHNIKE FORMIRANJA SLIKA
PROŠIRENOG DINAMIČKOG OPSEGA U
MONITORINGU LOŠE OSVETLJENE SCENE**

doktorska disertacija

Beograd, 2017.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING



Ilija V. Popadić

**HIGH DYNAMIC RANGE IMAGING
IMPLEMENTATION IN SCENE
MONITORING UNDER BAD
ILLUMINATION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2017.

Mentor

prof. dr Irini Reljin

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije

prof. dr Aleksandar Nešković

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

prof. dr Željko Trpovski

Univerzitet u Novom Sadu – Fakultet tehničkih nauka

doc. dr Marko Barjaktarović

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

prof. dr Vujo Drndarević

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Datum odbrane

ZAHVALNOST

Koristim ovu priliku da se zahvalim svima koji su na određeni način doprineli izradi doktorske disertacije.

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr Irini Reljin, na saradnji i podršci prilikom izrade doktorske disertacije. Takođe, zahvaljujem se i prof. dr Jovanu Elazaru za inicijalno vodjenje mentorstva, pre njegovog odlaska u penziju.

Veliku zahvalnost upućujem menadžmentu Instituta Vlatacom za pružanje finansijske podrške tokom trajanja doktorskih studija, kao i za stvaranje pozitivne radne atmosfere u kojoj je moguće ispoljiti ličnu kreativnost.

Prof. dr Miloradu Obradoviću zahvaljujem na neiscrpoj motivaciji i moralnoj podršci. Zahvaljujem se prof. dr Branislavu Todoroviću za saradnju i koautorstvo prilikom objavljivanja radova, kao i za sugestije i recenziju za vreme pisanja doktorske disertacije. Doc. dr Bobanu Bondžuliću sa Vojne akademije u Beogradu zahvaljujem na razmeni ideja i predlozima za prevazilaženje konkretnih problema. Prof. dr Hariju Kalvi sa Florida Atlantic University zahvaljujem na dodatnim smernicama u istraživačkom radu.

Svojim kolegama iz Instituta Vlatacom zahvaljujem na inspirativnom okruženju. Saši Vujiću, Mladenu Mirkoviću, Aleksandru Simiću i dr Miroslavu Periću zahvaljujem na veoma značajnim sugestijama tokom istraživačkog rada.

Zahvaljujem se svim prijateljima na pruženoj moralnoj podršci.

Najveću zahvalnost dugujem svojoj porodici. Zahvaljujem se svojim roditeljima, Milevi i Velimiru, kao i sestri Mileni na bezrezervnoj podršci. Zahvaljujem se svojoj ćerki Evi koja čini da sve ima smisao. Posebnu zahvalnost upućujem svojoj supruzi Daliborki na ljubavi, pomoći, podršci i razumevanju tokom svih godina koliko je trebalo da se jedna zahtevna priča uspešno privede kraju.

„We are what we repeatedly do“

Aristotle (384 - 322 BC)

PRIMENA TEHNIKE FORMIRANJA SLIKA PROŠIRENOG DINAMIČKOG OPSEGA U MONITORINGU LOŠE OSVETLJENE SCENE

Rezime

Unapređenje kvaliteta slike širenjem dinamičkog opsega u poslednje vreme se intenzivno koristi. Ovo za posledicu ima prisustvo znatno više detalja na slici, što je jako bitno u većini primena. Širenje dinamičkog opsega ima svoje granice i one su definisane fizičkim limitima senzora koji se koristi, tj. ograničenjima njegovog A/D konvertora. Kada je dinamički opseg scene značajno širi od dinamičkog opsega senzora, mnogi detalji neće biti adekvatno prikazani na slici. Međutim, ukoliko senzor inherentno podržava široki dinamički opseg, jasno se može uočiti da je snimljena slika kvalitetnija od one koja se dobija sa standardnog senzora.

Širenje dinamičkog opsega slike za sobom povlači i korišćenje novog formata koji je namenjen za čuvanje više informacija o svakom pikselu na slici. Sliku ili video sadržaj u ovom formatu moguće je integrisati u postojeće sisteme, ali rešenje može biti veoma skupo. Postoji način da se izbegne uvođenje novog formata, a da se pri tom poveća broj detalja na slici, tj. da se snimi scene koja ima široki dinamički opseg. Tada se koriste standardni senzori sa kojih se sekvencijalno uzima više slika iste scene sa različitim ekspozicijama i koriste tehnike fuzije snimljenih slika. Opisanim principom dobija se slika u standardnom formatu koja sa sobom nosi znatno više informacija. Bitno je napomenuti da se ovakva slika može koristiti u svim postojećim sistemima.

Glavni cilj ove doktorske disertacije predstavlja razvoj metoda namenjenog za implementaciju u postojeće industrijske kamere sa namerom unapređenja njihove funkcionalnosti. Potreba za ovakvim unapređenjima postoji u situacijama kada se kamere koriste za snimanje nejednako osvetljenih scena, pa upotrebom standardnog načina akvizicije slike nije moguće videti sve detalje. Ideja vodilja prilikom projektovanja metoda bila je da se on izvršava potpuno automatski, bez ikakvog uticaja čoveka. Takodje, bilo je bitno da nema nikakvih izmena u postojećem softveru kamere, a da se hardver modifikuje tako što se samo umetne nova ploča sa implementiranim metodom između procesora i senzora, jednostavnim premošćavanjem postojećeg kabla koji ih povezuje. U ovoj disertaciji biće detaljno opisan postupak realizacije metoda, zajedno sa svim algoritmima od kojih je sastavljen. Za potrebe

evaluacije rezultata, pored sopstvene baze slika, korišćena je i baza slika grupe za multimedijalnu obradu signala sa EPFL u Lozani.

Ključne reči

Širok dinamički opseg, tehnike formiranja slike širokog dinamičkog opsega, operatori tonskog mapiranja, oponašanje širokog dinamičkog opsega, kvalitet slike, kvalitet ekspozicije slike, prostor boja, fuzija slika, poboljšanje slike, obrada slike u realnom vremenu

Naučna oblast

Elektrotehnika i računarstvo

Uža naučna oblast

Digitalna obrada slike i poboljšanje slike

UDK broj: 621.3

HIGH DYNAMIC RANGE IMAGING IMPLEMENTATION IN SCENE MONITORING UNDER BAD ILLUMINATION

Abstract

Improving image quality by expanding the dynamic range is extensively used recently. This results in the presence of significantly more details in the picture, which is very important for most applications. Expanding the dynamic range has its limits, and they are defined by the physical limits of sensor used, i.e. the limits of its A / D converter. When the dynamic range of the scene is significantly wider than the dynamic range of the sensor, many details will not be shown properly in the picture. However, if the sensor inherently supports wide dynamic range, it can be clearly noticed that the recorded image quality is higher than the one obtained with the standard sensors.

Expanding the dynamic range of the image means using of a new format that is designed to store more information about each pixel in the image. Image or video content in this format can be integrated into existing systems, but the solution can be very expensive. There is a way to avoid a new format introduction, and thereby to increase the amount of details in the image, i.e. to record the scene that has a wide dynamic range. In this case the standard sensors are used, by sequentially taking multiple images of the same scene at different exposures and applying the fusion to the images recorded. Described principle will produce an image in a standard format which carries significantly more information than capturing single image. It is important to note that this image can be used in all existing systems.

The main objective of this doctoral dissertation is the development of the method which will be used for implementation in existing industrial cameras with the intention of improving their functionality. The need for such improvements exists in situations where the camera is used to record unevenly lit scene, thus using a standard image acquisition techniques is not possible to see all details. The main idea in the designed method was that it runs completely automatically, without any human influence. Also, it is important to stress that there are no modifications in the existing camera software and hardware. It is only needed to insert a new board with the method implemented between processor and sensor, simply bypassing the existing cable that connects them. In this thesis will be described in detail the process of realization of the method, together with all the algorithms of which it is composed. For the purposes of the evaluation results the image database from multimedia signal processing group from the EPFL in Lausanne is used, in addition to our own database files.

Key words

High dynamic range, high dynamic range imaging, tone mapping operators, HDR-like, image quality, image exposure quality, color space, image fusion, image enhancement, real-time image processing

Research Area

Electrical Engineering and Computer Science

Specific Research Area

Digital Image Processing and Image Enhancement

UDC Number: 621.3

Sadržaj

<i>SPISAK KORIŠĆENIH SKRAĆENICA</i>	xi
<i>SPISAK SLIKA</i>	xii
<i>SPISAK TABELA</i>	xiv
1 Uvod	1
2 Ljudsko oko	5
2.1 Gradnja ljudskog oka	6
2.2 Princip formiranja slike u oku	8
2.3 Mogućnosti ljudskog vida i dinamički opseg	9
3 Objašnjenje pojmova HDR i HDR-like	12
3.1 Opšte osobine HDR-a	16
3.2 Primena HDR-a	18
3.3 HDR formati	22
3.4 Načini generisanja HDR slike	28
3.5 HDR oprema	31
3.5.1 Senzori	32
3.5.2 Optika	34
3.5.3 Kamere	35
3.5.4 Displeji	37
3.6 Tonsko mapiranje	38
3.7 Specifičnosti HDR-like slike	43
3.7.1 Algoritmi za formiranje HDR-like slike	45
4 Opis predloženog metoda	49
4.1 Algoritam za procenu kvaliteta ekspozicije	57
4.2 Algoritam za računanje ekspozicija dodatnih slika	64
4.3 Fuzija HDR-like slike	68
5 Rezultati	79
5.1 Rezultati generisanja HDR-like slika	81
5.2 Ocena rezultata	91
6 Zaključak	94
Literatura	98

SPISAK KORIŠĆENIH SKRAĆENICA

Skraćenica	Puni naziv (na engleskom)	Objašnjenje (na srpskom)
HDR	High Dynamic Range	Široki dinamički opseg
HDMI	High Dynamic Range Imaging	Snimanje scena širokog dinamičkog opsega
LDR	Low Dynamic Range	Standardni dinamički opseg
TMO	Tone mapping operator	Operator tonskog mapiranja
UHD	Ultra High Definition	Ultra visoka rezolucija
HVS	Human Visual System	Ljudski vizuelni sistem
BPP	Bits Per Pixel	Biti po pikselu
FPS	Frames per second	Frejmova u skeundi
RGB	Red Greeb Blue	Crvena Zelena Plava
JPEG	Joint Photographic Experts Group	Grupa eksperata za sliku
MPEG	Moving Picture Experts Group	Grupa eksperata za pokretnu sliku
HDTV	High Definition TV	Televizija visoke definicije
UHDTV	Ultra High Definition TV	Televizija ultra visoke definicije
WCG	Wide Color Gamut	Široka paleta boja
HFR	High frame rate	Visoki broj frejmova u sekundi
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers	Udruženje inženjera elektronike i elektrotehnike
PPM	Portable pixmap format	Prenosni format mape piksela
PFM	Portable FloatMap Image Format	Prenosni format mape piksela u aritmetici sa pokretnom tačkom
ASCII	American Standard Code for Information Interchange	Američki standardni kod za razmenu informacija
TIFF	Tagged Image File Format	Označeni format slike
CRF	Camera Response Function	Funkcija odziva kamere
CCD	Charge-coupled device	Uređaj sa spregnutim naelektrisanjem
MOS	Metal–oxide–semiconductor	Metal-oksid-poluprovodnik
CMOS	Complementary metal–oxide–semiconductor	Komplementarni metal-oksid-poluprovodnik
MP	Mega Pixel	Milioni piksela

SPISAK SLIKA

VERTIKALNI POPREČNI PRESEK OKA ODRAŠLOG ČOVEKA (KOLB, 2012)	6
FOTORECEPTORI - LEVO: STRUKTURA MREŽNJAČE (KOLB, 2012), DESNO: SPEKTRALNA OSETLJIVOST ČEPIĆA (WÖRDENWEBER ET AL., 2007)	8
POREĐENJE OSETLJIVOSTI OKA SA NIVOIMA OSVETLJAJA U FIZIČKOM OKRUŽENJU	9
PRIMER RAZLIČITIH EKSPOZICIJA ISTE SCENE	13
KORACI OD STVARANJA DO PRIKAZA HDR SLIKE	19
UHDTV EKOSISTEM (SMPTE)	21
TECHNICOLOR REŠENJE ZA PARALELNO KORIŠĆENJE HDR I LDR KAMERA.....	22
PRIKAZ 32 BITA PO KANALU	23
RGBE KODOVANJE	24
OPENXR FORMAT.....	26
SONY HDR SENZOR	33
HDR KAMERE: SPHERON LITE – GORE LEVO, PT GREY – GORE U SREDINI, BRINNO –GORE LEVO, PANASONIC – DOLE LEVO, BOSCH – DOLE DESNO	36
HDR TELEVIZORI	38
NAČINI GENERISANJA HDR-LIKE SLIKE.....	44
INDUSTRIJSKI MODULI.....	50
TIPIČNA VEZA IZMEĐU SENZORA I PROCESORA.....	51
POREĐENJE PREDLOŽENOG METODA SA POSTOJEĆIM.....	53
ARHITEKTURA METODA.....	53
PRIKAZ IZVRŠAVANJA KORAKA METODA	54
STRUKTURA IMPLEMENTACIJE METODA U „SMART SENSOR“ ARHITEKTURI IZMEĐU SENZORA I PROCESORA (CPU)	55
LANAC OBRADJE SLIKE.....	56
PRVI PRIMER PRESECANJA KRIVIH ZA PROCENU KVALITETA	59
DRUGI PRIMER PRESECANJA KRIVIH ZA PROCENU KVALITETA	59
SEGMENTI HISTOGRAMA SA 16 NAJVIŠIH I NAJNIŽIH KOMPONENATA	60
IZVORNE SLIKE A)-I) (GDE JE SLIKA A) SA NAJKRAĆIM, A SLIKA I) SA NAJDUŽIM VREMENOM EKSPOZICIJE); SLIKA J) PREDSTAVLJA KRIVE L16 I H16; SLIKA K) PREDSTAVLJA ODNOS R	61
IZVORNE SLIKE A)-I) (GDE JE SLIKA A) SA NAJKRAĆIM, A SLIKA I) SA NAJDUŽIM VREMENOM EKSPOZICIJE); SLIKA J) PREDSTAVLJA KRIVE L16 I H16; SLIKA K) PREDSTAVLJA ODNOS R	62
IZVORNE SLIKE A)-I) (GDE JE SLIKA A) SA NAJKRAĆIM, A SLIKA I) SA NAJDUŽIM VREMENOM EKSPOZICIJE); SLIKA J) PREDSTAVLJA KRIVE L16 I H16; SLIKA K) PREDSTAVLJA ODNOS R	63
UDALIENOST ZADATE AUTO-EKSPOZICIJE OD OPTIMALNE	65
ZONE PO KOJIMA SE ODREĐUJU VREMENA EKSPOZICIJA.....	66
DIJAGRAM TOKA IZVRŠAVANJA PRVA DVA ALGORITMA.....	67
JND KRIVA	70
PRVI SET ULAZNIH SLIKA	72
FUZIONISANE SLIKE PRVOG SETA SLIKA SA ODGOVARAJUĆIM HISTOGRAMIMA	73

DRUGI SET ULAZNIH SLIKA.....	74
FUZIONISANE SLIKE DRUGOG SETA SLIKA SA ODGOVARAJUĆIM HISTOGRAMIMA.....	75
TREĆI SET ULAZNIH SLIKA	76
FUZIONISANE SLIKE TREĆEG SETA SLIKA SA ODGOVARAJUĆIM HISTOGRAMIMA	77
PRIMER REZULTATA ZA IZVORNE SLIKE SET 1 (JAVNO DOSTUPNA BAZA)	81
PRIMER REZULTATA ZA IZVORNE SLIKE SET 2 (JAVNO DOSTUPNA BAZA)	82
PRIMER REZULTATA ZA IZVORNE SLIKE SET 3 (JAVNO DOSTUPNA BAZA)	83
PRIMER REZULTATA ZA IZVORNE SLIKE SET 4 (JAVNO DOSTUPNA BAZA)	84
PRIMER REZULTATA ZA IZVORNE SLIKE SET 5 (JAVNO DOSTUPNA BAZA)	85
PRIMER REZULTATA ZA IZVORNE SLIKE SET 6 (SOPSTVENA BAZA)	86
PRIMER REZULTATA ZA IZVORNE SLIKE SET 7 (SOPSTVENA BAZA)	87
PRIMER REZULTATA ZA IZVORNE SLIKE SET 8 (SOPSTVENA BAZA)	88
PRIMER REZULTATA ZA IZVORNE SLIKE SET 9 (SOPSTVENA BAZA)	89
PRIMER REZULTATA ZA IZVORNE SLIKE SET 10 (SOPSTVENA BAZA)	90
POSTUPAK POREĐENJA REZULTATA	91
REZULTATI PREDLOŽENOG METODA I ALGORITAMA TONSKOG MAPIRANJA	92

SPISAK TABELA

TABELA 1. PRIMERI INTENZITETA OSVETLJAJA	15
TABELA 2. POREDZENJE KARAKTERISTIKA HDR FORMATA.....	27
TABELA 3. VREDNOSTI ENTROPIJE SLIKA IZ PRVOG PRIMERA.....	59
TABELA 4. VREDNOSTI ENTROPIJE SLIKA IZ DRUGOG PRIMERA	59
TABELA 5. POREĐENJE VREMENA IZVRŠAVANJA	93

1 Uvod

U današnje vreme izražen je brzi rast prodaje pametnih telefona i različitih kamera. Na ovo upućuju brojni izvori, a detalji statistike mogu se videti u (PetaPixel, 2015). Masovna ekspanzija ovih savremenih uređaja vodi ka mogućnosti upotrebe multimedijalnih signala koje oni proizvode u širokom spektru primena. Kao jedan od najčešće korišćenih signala u mnogim primenama izdvaja se signal slike. Upravo zbog najčešće upotrebe, stalno se podižu kriterijumi nametnuti od strane korisnika za sve višim nivoom kvaliteta koji slika treba da ispuni.

Istorijski gledano, kvalitet digitalne slike se poboljšavao uglavnom povećanjem rezolucije senzora u fazi akvizicije slike ili raznim algoritmima za poboljšanje slike u fazi postprocesiranja. Tako je povećavan broj detalja koji su uočljivi na slici, te je slika postajala informativnija. Međutim, najveće ograničenje kod većine savremenih senzora slike je dinamički opseg, koji tipično iznosi 50-60dB. Zbog navedenog razloga u uslovima loše, odnosno nejednake osvetljenosti scene, nije moguće istovremeno snimiti i jako osvetljene i nedovoljno osvetljene delove scene. Na ovaj način značajan broj detalja može ostati "nevidljiv" na snimljenoj slici. Dakle, do ovoga dolazi zato što je

dinamički opseg senzora značajno uži od dinamičkog opsega scene koja se snima. Tipičan primer ove pojave je scena koju predstavlja unutrašnji prostor nekog objekta sa prozorom kroz koji prodire dnevna svetlost. Čovek, kao posmatrač unutar ovog prostora, može videti i objekte koji ga neposredno okružuju, kao i one koje gleda kroz prozor. To je zato što oko poseduje mehanizme prilagođavanja kojih nismo ni svesni. Svaki pokušaj fotografisanja ovakve scene korišćenjem standardnih uređaja daće razočaravajuće rezultate – ili će prozor biti presvetljen pa se neće videti ništa što je napolju, ili će unutrašnjost biti nedovoljno eksponirana i sve će biti tamno (Ward Larson et al., 1997). Da bi se izbegla pomenuta situacija potrebno je primeniti način snimanja scena širokog dinamičkog opsega (*engl.* High Dynamic Range - HDR).

Snimanje scena koje imaju dinamički opseg preko 100dB podrazumeva korišćenje posebnih kamera sa HDR senzorima ili korišćenje specijalnih tehnika (*engl.* High Dynamic Range Imaging - HDRI) koje koriste slike sa kamera u koje su ugrađeni standardni senzori uskog dinamičkog opsega (*engl.* Low Dynamic Range - LDR). HDR sadržaj koji se snima na ovaj način ima poseban format jer nosi mnogo više informacija, zauzima dosta memorije, ali i pruža impresivno iskustvo gledanja. Zbog posebnog formata potrebno je imati i svu prateću infrastrukturu koja uključuje posedovanje barem uređaja za snimanje i prikaz HDR sadržaja.

HDR tehnologija ima veoma perspektivnu budućnost. Efekti pojave HDR-a često se upoređuju sa efektima pojave slike u boji. Iako se ova tehnologija razvija u poslednjih dvadesetak godina, tek su u skorije vreme počeli da se pojavljuju proizvodi potrošačke elektronike koji je podržavaju, gde se pre svega misli na televizore. Ovo pruža mogućnost da se HDR rešenja koriste u brojnim primenama, počevši od snimanja filmova, pravljenja video igara, snimanja sportskih događaja, TV sadržaja itd. Na taj način se u implementiranje tehnologije aktivno uključuju kreatori HDR sadržaja, veliki distributeri sadržaja, kao i proizvođači potrošačke elektronike.

Međutim, i pored svih prednosti, HDR tehnologija nije primenljiva baš u svakoj infrastrukturi, naročito tamo gde njena implementacija zahteva izdvajanje značajnih finansijskih sredstava. Promena formata slike koju HDR nosi sa sobom podrazumeva niz sistemskih promena. Jedno od mogućih rešenja za delimično zadržavanje postojeće infrastrukture je korišćenje HDR kamera i odgovarajućih operatora tonskog mapiranja

čija je svrha da izvrše kompresiju HDR sadržaja i prevedu ga u neki od standardnih formata koji je podržan u postojećoj infrastrukturi. Ovo kompromisno rešenje može biti značajno jeftinije. Ipak, najefikasnije rešenje, koje ujedno donosi i najveću finansijsku uštedu ogleda se u modifikaciji postojećih kamera tako da oponašaju HDR tehnologiju. Primena tehnike formiranja HDR slike podrazumeva spajanje nekoliko snimljenih slika iste scene, sa različitim ekspozicijama, u jednu finalnu sliku. Slika dobijena na opisani način nosi mnogo više informacija, tj. prikazuje mnogo veći broj detalja koji nisu uočljivi kada se koristi samo jedna ekspozicija scene. Bitno je naglasiti da ovako dobijena finalna slika nema promenu u formatu, a termin koji se odomaćio u upotrebi za navedeni tip slika je HDR-like, upravo zato što se oponašaju tehnike dobijanja HDR slike. Naročito treba napomenuti da pojedini veliki proizvođači potrošačke elektronike ističu postojanje HDR funkcionalnosti u svojim uređajima, iako to nije istina. Formati koje oni koriste su upravo HDR-like.

Kod postojećih industrijskih digitalnih kamera mogu se uočiti nedostaci standardnog načina snimanja, naročito kada se kamere koriste u sistemima video nadzora. Prilikom monitoringa loše osvetljenih scena često nisu prikazani detalji u senci ili nekoj tamnoj zoni, kao i oni detalji koji se nalaze u najsvetlijim delovima scene. Dolazi se do zaključka da ima smisla izvršiti modifikaciju kamera i u njih implementirati funkcionalnost HDR-like, u cilju unapređenja. Shodno tome, kreiran je novi metod sa namerom implementacije u kamere.

Predloženi metod za generisanje HDR-like slike koristi maksimalno tri slike različitih ekspozicija. Cilj krajnje implementacije je da se bez značajnih izmena softvera i hardvera kamere doprinese poboljšanju kvaliteta slike kroz povećavanje broja detalja prikazanih tokom snimanja loše osvetljene scene. Metod je trenutno implementiran u programskom paketu Matlab i izvršena je njegova evaluacija, ali je namera da se implementira i na programabilnoj komponenti. Na taj način će se ostvariti potpuna interakcija sa kamerom. Metod je realizovan tako da se sastoji od tri algoritma koja se sukcesivno izvršavaju. Prvi algoritam na jedinstven način procenjuje kvalitet ekspozicije slike koja se standardno određuje unutar kamere, kada nema nikakvih izmena. Na osnovu ove informacije drugi algoritam u nizu određuje vremena

ekspozicije za maksimalno dve dodatne slike koje je potrebno snimiti. Treći algoritam realizuje fuziju snimljenih slika u jednu finalnu.

Treba napomenuti da je u okviru ove disertacije predložen metod primenjen za slučaj sa nepokretnim slikama koji algoritmom procenjuje da li su potrebne dodatne slike. Otuda nisu obrađeni efekti koji se javljaju kada na sceni postoje pokretni objekti. Tada se prilikom snimanja slika sa različitim ekspozicijama vide pomeraju objekata koji su na različitim mestima u prostoru, a na finalnoj slici se dešava nešto što se opisuje kao „pojava duhova“. Neki postojeći algoritmi predloženi u literaturi rade na otklanjanju pomenutih artefakata. U primenama gde je cilj da se implementira predloženi metod, imperativ je da se prikaže što više detalja u monitoringu određene scene.

Doktorska disertacija organizovana je tako da posle uvoda sledi glava koja detaljno opisuje princip funkcionisanja i karakteristike ljudskog oka, kako bi mogao da se razume značaj adekvatnog snimanja scene. U trećoj glavi su objašnjeni pojmovi HDR i HDR-like, izložene njihove opšte osobine i primena. Četvrta glava detaljno opisuje predloženi metod sa algoritmima od kojih je sastavljen. Peta glava predstavlja rezultate i njihovu analizu. Posle šeste glava koja predstavlja zaključak, navedene su korišćene reference po abecednom redu.

2 Ljudsko oko

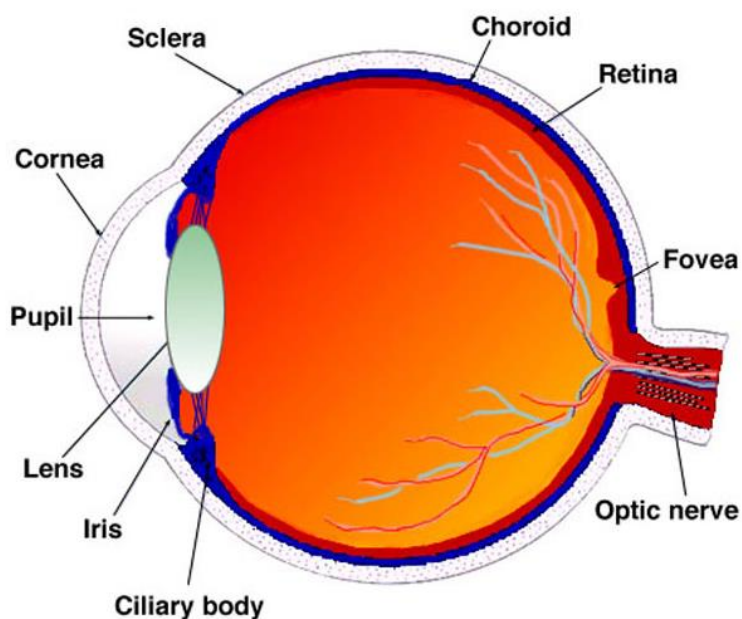
U cilju boljeg razumevanja HDR tehnologije važno je upoznati se sa građom, principom funkcionisanja i mogućnostima ljudskog oka. Potrebno je razumeti karakteristike i princip funkcionisanja oka, naročito njegovih mehanizama adaptacije sa svim prednostima i nedostacima. Pojediniosti će biti izložene u kratkim crtama, zbog izuzetne kompleksnosti sistema koji predstavlja ljudski vid.

Ljudsko oko je sofisticirani senzorski organ kroz koji se obradi 80% informacija koje primimo. Predstavlja najvažniju vezu sa spoljašnjim svetom, pa samim tim kvalitet vida utiče na kvalitet života (Kaschke et al., 2014).

Na principu funkcionisanja ljudskog oka napravljeni su mnogi optički sistemi za snimanje slike. Tokom procesa formiranja slike optičke komponente oka fokusiraju svetlosne zrake na fotoosetljivu površinu. Pre nego što se optičke informacije proslede mozgu na finalnu analizu, one se „preprocesiraju“ u fotoosetljivom i neuronskom tkivu. Količina informacija koje oko šalje skoro 10 puta je veća od ukupne količine informacija koju šalju svi ostali senzorski organi. Da bi se obradila ogromna količina informacija, 30 različitih delova mozga uključuje se u proces paralelnog procesiranja slike, a relevantne informacije se filtriraju prepoznavanjem poznatih oblika (Kaschke et al., 2014).

2.1 Gradja ljudskog oka

Prednost ljudskog oka ogleda se u činjenici da ima mrežnjaču, koja predstavlja zaobljeni senzor, tako da ima jednostavan optički dizajn. Veoma jednostavan optički sistem oka može da projektuje sliku skoro bez izobličenja na ravan senzora (Darmont, 2012). Slika 2.1 predstavlja gradju ljudskog oka i na njoj su predstavljeni osnovni elementi gradje.



Slika 2.1 Vertikalni poprečni presek oka odraslog čoveka (Kolb, 2012)

Zid ljudskog oka sastavljen je od tri sloja (Ng et al., 2012):

- Spoljni omotač,
- Srednji omotač,
- Unutrašnji omotač.

Unutrašnjost oka ispunjena je fluidima kako bi zidovi bili učvršćeni i održao se oblik oka.

Spoljni omotač čine rožnjača (*lat. cornea*) i beonjača (*lat. sclera*). Rožnjača je prozirno ispučenje na prednjem delu očne jabučice iza kog se nalazi šupljina ispunjena tečnošću. Rožnjača omogućava prolaz svetlosnih zraka u unutrašnjost oka. Njena

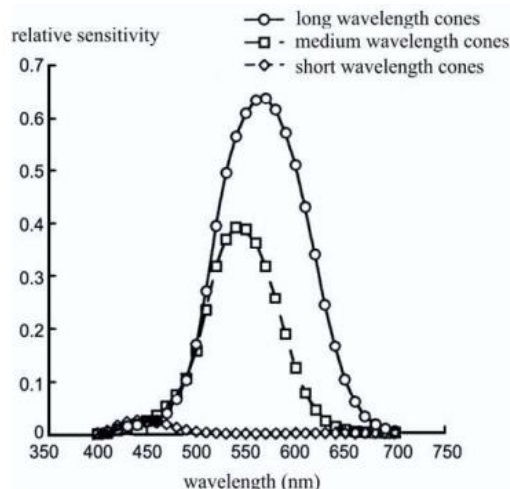
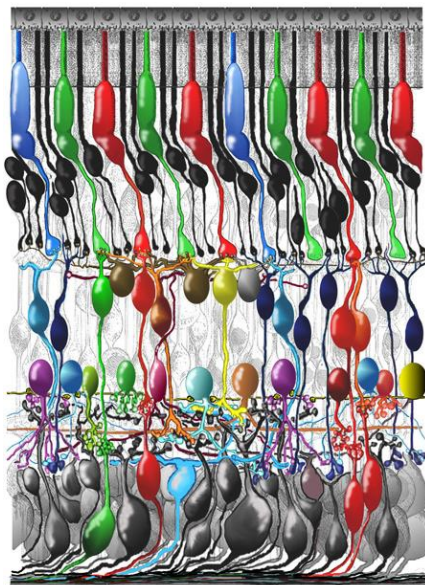
transparentnost potiče od odsustva krvnih i limfnih sudova. Neophodne hranljive materije dobija preko suznog filma, a kiseonik direktno iz vazduha. Beonjača je beli omotač oka i služi za zaštitu oka od negativnih mehaničkih uticaja.

Srednji omotač čine sočivo, dužica, cilijarni mišić i horoidea. Sočivo je deo dioptrijskog sistema oka i postavljeno iza dužice (iris) koja daje oku spoljašnju boju. Osnovna funkcija sočiva je da fokusira svetlosne zrake koji prolaze kroz rožnjaču i usmeri ih na mrežnjaču (retinu). Ima sposobnost da menja svoju prelomnu moć tako što menja zakrivljenost površine, usled kontrakcija cilijarnog mišića. Horoidea se nalazi između retine i beonjače, a u prednjem delu horoidea prerasta u dužicu. Ona sprečava prolazak svetla spolja i refleksiju svetlosnih zraka unutar oka.

Unutrašnji omotač koji čine mrežnjača, papila i optički nerv. Mrežnjača predstavlja tanki sloj neuralnih ćelija koji prekriva unutrašnju stranu oka. Osetljiva je na svetlost i apsorbuje je, pretvarajući svetlosne signale u električne. Vizuelna informacija se optičkim nervima prenosi iz fotoreceptora retine do mozga. Mesto na mrežnjači na kome optički nerv izlazi iz očne jabučice nazivamo papila.

Mrežnjača se sastoji od dve vrste fotoreceptora: čepića i štapića. Fotoreceptori pretvaraju fotone u električne impulse i šalju ih u mozak. Struktura mrežnjače prikazana je na slici 2.2 (levo). Štapići su izuzetno osetljivi na svetlost, ima ih oko 120 miliona i rasprostranjeni su po čitavoj mrežnjači, osim u njenom centru. Ovi fotoreceptori su odgovorni za vid u uslovima niskih osvetljaja, što znači da oni učestvuju u stvaranju crno-bele slike. Čepići su osetljivi na boje i svetlost jačeg intenziteta, te su oni odgovorni za stvaranje slike u boji. Manje su brojni od čepića, veći su i ima ih oko 8 miliona.

Svi štapići su isti, sadrže isti fotopigment i imaju istu spektralnu osetljivost (Wördenweber et al., 2007). Čepići su međusobno drugačiji i razlikuju se tri tipa u zavisnosti od fotopigmenta. Na slici 2.2. (desno) Slika 2.2. Fotoreceptori - Levo: Struktura mrežnjače, Desno: Spektralna osetljivost čepića prikazana je relativna spektralna osetljivost tri tipa čepića, koji su nazvani S (*eng.* short), M (*eng.* medium) i L (*eng.* long) po talasnim dužinama regiona za koje imaju najveću osetljivost.



Slika 2.2. Fotoreceptori - Levo: Struktura mrežnjače (Kolb, 2012), Desno: Spektralna osetljivost čepića (Wördenweber et al., 2007)

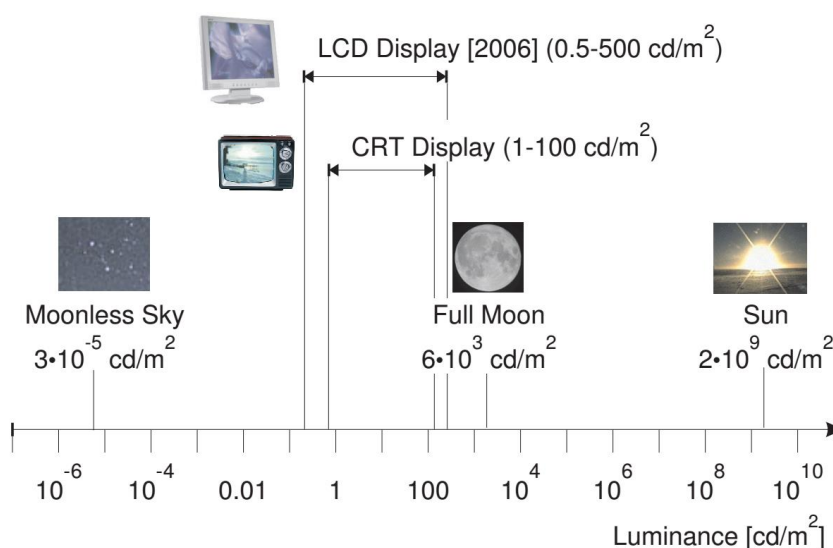
Čepići i štapići su raspoređeni različito unutar mrežnjače. Čepići su skoncentrisani u maloj oblasti koja leži u vizuelnoj osi oka koja se naziva fovea (odgovorna za centralnu vidnu oštrinu). U ostatku mrežnjače gustina čepića je mala. Takođe, raspoređena čepića unutar mrežnjače nije ista. Raspoređena L i M čepića je najgušća unutar fovee, dok u ovoj oblasti S čepića skoro i da nema.

2.2 Princip formiranja slike u oku

Oko sakuplja svetlost koja se reflektuje sa različitih površina u realnom svetu i fokusira je u čistu sliku u pozadini očne jabučice (Čadík, 2008). U toku procesa formiranja slike svetlost prvo pada na rožnjaču, zatim prolazi kroz zenicu (pupil), otvor promenljivog prečnika. Otvor zenice kontroliše se neprozirnom dužicom. Iza dužice svetlost prolazi kroz sočivo, čiji oblik kontrolišu cilijarni mišići. Fotoni zatim putuju kroz čistu tečnost koja ispunjava očnu jabučicu i konačno stižu do zakrivljene površine mrežnjače, gde preko 100 miliona fotoreceptora osetljivih na svetlost konvertuju svetlost u neuralnu aktivnost.

2.3 Mogućnosti ljudskog vida i dinamički opseg

Oko ima sposobnost da održi visoku osetljivost na male promene u intenzitetu osvetljaja u širokom opsegu nivoa ambijentalnih osvetljaja (Kaschke et al., 2014). Potpuna funkcionalnost ljudskog vida moguća je u opsegu osvetljaja od 10^{-6} do 10^8 cd/m^2 . Opseg osetljivosti ljudskog oka upoređen sa postojećim nivoima osvetljaja u našem fizičkom okruženju je na slici 2.3 (Mantiuk et al., 2016).



Slika 2.3. Poređenje osetljivosti oka sa nivoima osvetljaja u fizičkom okruženju

U cilju ostvarivanja mogućnosti detekcije 10^{14} nivoa osvetljaja, oko poseduje dva mehanizma:

- Promena prečnika dužice prilikom promene ambijentalnog osvetljaja: ovaj mehanizam predstavlja prvi stepen u regulaciji osetljivosti. Promena prečnika dužice može regulisati količinu svetlosti koja ulazi u oko, ali samo unutar jednog reda veličina amplituda, što nije dovoljno za svih 14 redova veličina koje može detektovati oko. Zbog ovoga je promena prečnika dužice odgovorna samo za prvi korak adaptacije, pre nego što fotoreceptori podese svoju osetljivost.
- Korišćenje dva tipa fotoreceptora kod različitih nivoa osvetljaja: za nivoe osvetljaja koji su iznad 3 cd/m^2 dominantni su čepići, pa vidimo sliku u boji i ova zona predstavlja fotopični opseg (Smith, 2000). Za niske nivoe osvetljaja svetlosti, one koji su ispod $3 \cdot 10^{-5} \text{ cd/m}^2$, dominantni su štapići, te vidimo crno-

belu sliku i ovu zonu nazivamo skotopični opseg. Zona koja se nalazi između dva pomenuta praga naziva se mezopni opseg i tu se aktivnosti čepića i štapića preklapaju. Kada se računa i mezopni opseg, štapići su „zaduženi“ za 8 redova veličina amplituda osvetljaja, dok se kod čepića ova oblast prostire na čak 11 redova veličina. Operativni opseg svakog tipa fotoreceptora reguliše se biohemijskim i neuronskim procesima (Kaschke et al., 2014). Pošto su ovi procesi relativno spori, adaptacija fotoreceptora može potrajati i po nekoliko minuta.

Ljudsko oko je osetljivo u uskom opsegu elektromagnetnog zračenja – u intervalu od 400nm do 700nm talasne dužine. Poznato je da usled postojanja četiri vrste receptora u mrežnjači, nakon sedenja u sobi bez svetla i izvršenog procesa adaptacije od sat vremena, ljudsko oko može da detektuje blic koji emituje samo 4 do 6 fotona (Hecht et al., 1942). Sneg sa vrha planine emituje oko 100 miliona puta više fotona. Bitna informacija je da ljudski vizuelni receptori mogu da odgovore na opseg svetlosti veći od 10 logaritamskih jedinica (McCann & Rizzi, 2012).

U situacijama kada nivo osvetljaja postaje nizak, smanjuje se prečnik dužice, aktiviraju se štapići i mozak povećava vreme neuralne detekcije fotoreceptora (Kaschke et al., 2014). Vreme adaptacije traje skoro 40 minuta. U prvoj fazi, koja traje oko 7 minuta, povećava se prag detektovanja čepića za 50 puta i na taj način se umanjuje njihov uticaj. U toku sledećih 30 minuta povećava se osetljivost štapića za oko 1000 puta. Na niskim nivoima osvetljaja visoka je osetljivost, ali je prostorna rezolucija oka smanjena i ne mogu se izdvojiti boje.

Tokom inverznog procesa, u okruženju visokih svetlosnih nivoa, otvor dužice se povećava, aktiviraju se čepići i vreme neuralne detekcije fotoreceptora se smanjuje. U procesu koji traje oko 3 minuta, oko prestaje da bude osetljivo na niske nivoe osvetljaja, ali se povećava prostorna rezolucija i poboljšana je percepcija boja.

Često se navodi da sistem ljudskog vida ima veliki dinamički opseg od oko 120 dB. Međutim, postoji konfuzija između dinamičkog opsega međuscene i maksimalnog dinamičkog opsega. U prisustvu jake svetlosti, oko ima poteškoće da vidi detalje u senkama i njegov dinamički opseg je oko 40 dB. U mraku, očima treba vremena da se

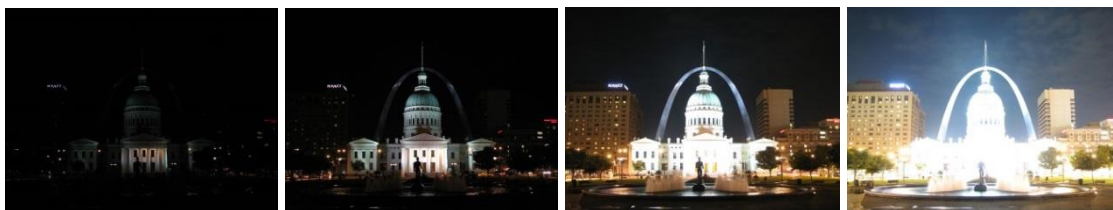
prilagode pre nego što mogu da vide dobro. Postoji velika razlika u nivou osvetljaja između svetlih objekata koje oko može da vide na jakom suncu i mračnih scena koje može videti u mraku posle adaptacije, ali neće moći da vide oba nivoa na istoj sceni. Mrežnjača ima kontrast od oko 100:1, odnosno 40 dB. Inicijalna tamna adaptacija može se izvršiti za oko četiri sekunde, dok se kompletan proces adaptacije odvija za oko 30 minuta, ali na ovo vreme može uticati unos duvana ili alkohola. Opisani proces omogućava ljudskom oku da se postigne ukupan dinamički opseg od oko 1.000.000:1 (maksimalan dostupan dinamički opseg je na taj način 120 dB), pri čemu prilagođavanje svetlosti ne zavisi od prečnika otvora dužice (Darmont, 2012).

3 Objašnjenje pojmova HDR i HDR-like

Glavna motivacija za bavljenje HDR tehnologijom i njoj sličnoj, HDR-like, u ovoj disertaciji predstavlja poboljšanje kvaliteta slike u toku procesa akvizicije tako da rezultujuća slika određene scene bude što približnija slici koju vidi ljudsko oko. Može se reći da postoji generalna težnja u razvoju uređaja elektronske vizije za imitiranjem sposobnosti ljudskog oka i eventualnom prelaženju granica u određenim aspektima. Oko i ljudski vizuelni sistem su toliko moćni da svaka strategija za realizaciju sličnih karakteristika korišćenjem elektronike i informacionih tehnologija mora biti fokusirana na sposobnost čoveka da prikupi najsveobuhvatnije informacije o našem fizičkom okruženju (Hoefflinger, 2007). Stalnim unapređivanjem tehnologija poboljšavaju se performanse uređaja tako da slika postaje sve bolja i bolja. Dominantan marketinški faktor, kada se analiziraju specifikacije aktuelnih uređaja za snimanje slike, uglavnom predstavlja prostorna rezolucija, odnosno ono što je, tehnički rečeno, izraženo u pikselima. Međutim, u praksi se pokazuje da visoka rezolucija nije presudan faktor za dobijanje kvalitetne slike. Na kvalitet slike utiče još jedan faktor koji predstavlja opseg boja. Možda je ovaj drugi faktor i bitniji od rezolucije slike. Čini se da je uvek potrebno

više boja, ali povećavanje broja boja nema smisla kada je njihov raspon dovoljan da ne dolazi do uvođenja artefakata. Primera radi, kada se gleda velika slika na monitoru, tako da jedan piksel sa slike odgovara jednom pikselu monitora, sliku nekada nije moguće prikazati u celosti. Ukoliko se slika „odzumira“ i smanji broj piksela koji se prikazuju, može se videti cela slika. U poređenju sa opsegom boja, ovo nema pravi ekvivalent. Može se gledati jedan segment opsega boja, korišćenjem virtuelne kontrole ekspozicije, ali ovo nije tako često u upotrebi (James, 2006).

Iako je trend povećanja rezolucije slike očigledan, postoje težnje ka promeni opsega vrednosti koje svaki piksel može predstavljati (Reinhard et al., 2010). Trenutno je većina slika u boji predstavljena sa po tri bajta po pikselu, gde svaki bajt predstavlja po jedan crveni, zeleni i plavi kanal. Sa tri bajta po pikselu, oko 16,7 miliona različitih boja može biti dodeljeno svakom pikselu, što je poznato pod terminom „milioni boja“ (eng. millions of colors). Ovo na prvi pogled može izgledati impresivno, ali treba imati u vidu da u stvari postoji samo 256 nivoa za svaki od pojedinačnih kanala svakog piksela. Nekada je 256 nivoa po kanalu boja nedovoljno da predstavi željenu scenu. Primer mogu biti slike prikazane na slici 3.1 (Wikipedia, 2016). Na ovim slikama vidi se da postoje određeni delovi sa tamnim regionima, kao i delovi sa svetlim regionima, a predstavljene slike imaju različita vremena ekspozicije iste scene. Kao rezultat različitog konteksta scene javljaju se presvetljeni delovi na slici i delovi koji nisu dovoljno osvetljeni.



Slika 3.1. Primer različitih ekspozicija iste scene

Uopšteno govoreći, kada je vreme ekspozicije kratko ili je otvor zenice mali, najsvetliji delovi scene imaju dovoljno kontrasta, ali najtamniji delovi ne mogu se razlikovati i padaju ispod minimalnog nivoa detekcije senzora. Kada se produži vreme ekspozicije ili je otvor irisa veliki, najtamniji delove scene imaju dovoljno kontrasta, ali se najsvetliji ne mogu izdvojiti, jer ulaze u zonu zasićenja senzora. Do ove pojave dolazi zbog nedovoljno širokog dinamičkog opsega senzora, pa senzor ne može u istom trenutku da uhvati sve delove scene.

U cilju daljeg razumevanja, termin dinamički opseg dodatno je objašnjen. Kada se govori o slici, dinamički opseg predstavlja odnos između najsvetlijeg i najtamnijeg piksela. Treba imati na umu da će veoma često vrednosti maksimalnog i minimalnog piksela predstavljati pragove zasićenja, pa merenje dinamičkog opsega na ovaj način nije uvek pouzdano. Pouzdanije merenje dinamičkog opsega može se postići ukoliko se odstrani procenat najsvetlijih i najtamnijih piksela (Reinhard et al., 2010).

Dinamički opseg koji se može postići korišćenjem konvencionalnih kamera ograničen je njihovim dizajnom, tj. širinom reči analogno/digitalnog konvertora. To znači da tehnološke mogućnosti senzora dozvoljavaju da opseg nivoa osvetljaja od oko dva reda veličine može biti snimljen i sačuvan. Slike su kasnije obično gama kodovane sa osam bita po kanalu boje. Mnogi proizvođači kamera dozvoljavaju izvoz sirovih podataka iz svojih kamera, u takozvanom RAW formatu. To su slike koje su prošle minimalnu obradu u samoj kameri, a njihov sadržaj je linearno kodovan sa oko 10 do 14 bita. Treba imati na umu da linearno kodovanje od 10 bita ne predstavlja veći opseg vrednosti osvetljaja od 8-bitnog nelinearnog kodiranja. Čak i ako sirovi podaci daju veći dinamički opseg od konvencionalnih 8-bitnih slika, ne može se govoriti o zaista velikom povećanju dinamičkog opsega. Drugim rečima, ograničenja u dizajnu kamera ne dozvoljavaju da se snimi čitav spektar intenziteta dostupnih osvetljaja u tipičnim realnim scenama. Neki kompromisi u dizajnu kamera odnose se na karakteristike šuma, mogućnosti da se prihvati konačna količina fotona pre nego što se pikseli zasite, odsjaj optike... Takođe, treba uzeti u obzir i činjenicu da je kvantna efikasnost senzora smanjena usled težnje dizajnera senzora ka njihovom fizičkom smanjivanju, tj. težnji da se smanji veličina piksela od kojih je sačinjen senzor (Reinhard et al., 2010).

Primer različitih intenziteta osvetljaja prikazan je u Tabeli 1. (Darmont, 2012). Prosek noćnih osvetljaja kreće se oko 10^{-3}cd/m^2 , dok danju prosečni nivo dostize 10^6cd/m^2 . Treba istaći da ljudski vid može uočiti detalje koji se nalaze u opsegu kontrasta od 1 do 10^4 , za zadati nivo adaptacije oka (nekada čak i do 5 redova veličina intenziteta osvetljaja). Iz svega navedenog zaključuje se da standardni senzori ne mogu pokriti ovako široke dinamičke opsege zbog svojih tehnoloških ograničenja u smislu dinamičkog opsega, te je potrebno koristiti neke druge tehnologije čijom upotrebom može biti snimljena scena širokog dinamičkog opsega. U ove svrhe koristi se HDRI

tehnika, koja predstavlja značajan iskorak u poređenju sa standardnim tehnikama za akviziciju slike.

Tabela 1. Primeri intenziteta osvetljaja

Izvor osvetljaja	Vrednosti luminansi [cd/m^2]
Zvezdano nebo	3×10^{-5}
Pun mesec	0.06
Dnevna soba	12
Kancelarijsko osvetljenje	125
Oblačno nebo	1500
Sunčano nebo	2×10^9

HDR je termin koji se koristi za snimanje, skladištenje, manipulaciju, prenos i prikaz slika koje preciznije predstavljaju širok spektar nivoa osvetljaja realnog sveta. Sa pojavom prvih HDR video sistema, koristeći iskustvo od preko 20 godina sa statičkim HDR slikama, HDR je konačno spreman da postane tehnologija za snimanje (Banterle et al., 2011).

Kod korišćenja HDR tehnika, poboljšane su ekspozicije scena koje se nalaze u unutrašnjem prostoru kao i one koje su na otvorenom. Ovakve slike pokazuju više detalja i u tamnim i u svetlim oblastima. Čak i u slučaju kada se prikazuju na papiru, vidi se mnogo veći opseg vrednosti osvetljaja nego u konvencionalnoj slici. Implikacija ovoga je da i u odsustvu uređaja koji ima mogućnost prikaza HDR slike, korišćenje HDR tehnologije ima značajnu prednost u procesu snimanja. Činjenica da je korišćenjem HDR-a povećan broj detalja koji su na raspolaganju u jednoj slici, stvara nove mogućnosti u kasnijim fazama koje se odnose postprocesiranje slike. HDRI predstavlja veoma značajan napredak, revolucionaran kao i prelazak sa crno-bele slike na sliku u boji (Bloch, 2012). Ovo je, naravno, praćeno i korišćenjem odgovarajućih operatora koji omogućavaju prelaz sa HDR slike u nešto što se može videti i odštampati na konvencionalnim uređajima.

U nastavku će detaljnije biti opisana oblast proširenog dinamičkog opsega, uključujući metode za formiranje posebnog formata slike, njihov prikaz i postojeći hardver.

3.1 Opšte osobine HDR-a

Postojeće tehnike snimanja ne reprodukuju pouzdano scenu koju snimaju. Istorijski gledano, najraniji pokušaji HDR snimanja scena bili su još davne 1850. godine kada su Baldus i Robinson ispitivali mogućnosti filmske fotografije (McCann & Rizzi, 2012).

Poslednjih par decenija tehnika HDR snimanja doživela je revoluciju u oblasti kompjuterske grafike i drugim oblastima kao što su fotografija, virtuelna realnost, vizuelni efekti i industrija video igara. Razne aplikacije mogu snimiti, sačuvati, preneti i potpuno iskoristiti osvetljaje koji se javljaju u realnom svetu, bez potrebe za linearizacijom signala. I vrlo tamne i vrlo svetle oblasti scene mogu biti istovremeno snimljene u format slike ili videa, izbegavajući da se pritom pojave nedovoljno ekspanirane ili preeksponirane oblasti. Tradicionalne metode snimanja ne koriste fizičke vrednosti i obično su ograničene tehnologijom koja prihvata samo 8 bita po kanalu boje svakog piksela. Za takve slike (8 bita ili manje po kanalu boje) kaže se da imaju uzak dinamički opseg (Banterle et al., 2011).

Istorijski gledano, istraživanje u HDRI započelo je motivisano fotorealističnom sintezom slike koristeći osvetljenje zasnovano na fizičkim pojavama. U ovom tipu simulacije postavka scene predstavljena je fizičkim veličinama, a rezultujuća slika predstavlja mape radijansi. Problem koji se ovde javlja odnosi se na prikaz HDR slike na LDR displejima. U takvim situacijama, kao rešenje, koriste se operatori za tonsko mapiranje (TMO) i zbog toga problem tonskog mapiranja dobija značajnu pažnju. HDRI tehnologija posvećena je prevazilaženju tonskih ograničenja senzora, pri čemu je glavni cilj postizanje bolje predstave i vizualizacije slika, kao i snimanje scene sa stvarnim vrednostima radijansi. Kao što je ranije pomenuto, značaj ovih promena poredi se sa uvođenjem slike u boji (Sa et al., 2007).

Postoje dva načina da se snimi široki spektar osvetljaja koji je prisutan u mnogim scenama. Prvi je da se koristi specijalni, nekonvencionalan hardver, a drugi je da se izvrši rekonstrukcija HDR slike iz niza različito ekspaniranih, konvencionalnih LDR slika. Implementacija HDR funkcionalnosti u nove uređaje omogućava veran prikaz slike i najveća korist ogleda se u primeni gde postoji širok opseg osvetljaja i

aplikacijama gde se mešaju prirodno i veštačko svetlo, gde postoji velika razlika u intenzitetima osvetljaja. Primene mogu biti u određenim industrijskim procesima, npr. varenje (Mann et al., 2012) i (Luo et al., 2014), sistemima za asistenciju vozačima tokom vožnje (Li et al., 2015) i (Terzis, 2016), u video nadzoru (Mangiat & Gibson, 2011), udaljenoj detekciji (Huang et al., 2014), te kao pomoć tokom savremenih medicinskih zahvata (Leflar et al., 2009) i (Arrimedical, 2016). Savremena fotografija takođe koristi tehnike snimanja scena širokog dinamičkog opsega (Rand et al., 2011).

HDR slike mogu prevazići mnoge probleme koji se tiču različitih prostora boja. HDR slike obuhvataju veliki i veoma precizan prostor boja (neke implementacije su dovoljno velike i obuhvataju sve prostore boja koji postoje) i koriste funkciju tonskog mapiranja za pravilan prikaz na različitim uređajima (James, 2006).

Kao što postoje očigledne prednosti korišćenja slike visoke rezolucije, takođe postoje i prednosti korišćenja HDR tehnologije. HDR slike i video verno odslikavaju scenu na koju se odnose, mnogo bolje nego monitori na kojima treba da budu prikazane. Kao rezultat toga, vernost reprodukcije HDR slika je mnogo veća od konvencionalnih (LDR) slika. Značajna prednost korišćenja HDR tehnologije je u obradi slike i može se primeniti bilo kada u toku životnog veka slike. Na primer, korekcija balansa bele boje LDR slike može nekada biti teško ostvariva zbog prisustva preeksponiranih piksela, a ovaj problem je u mnogo manjoj meri izražen kod pravilno snimljenih HDR slika. HDR snimanje takođe omogućava kreativnu manipulaciju bojama i bolje snimanje visoko zasićene boje. Takođe, potrebno je voditi manje računa o pravilnoj osvetljenosti scene, o čemu fotografi moraju naročito brinu. Postprocesiranje slike koje uključuje boju, kontrast i podešavanje osvetljaja postaje mnogo lakše upotrebom HDR slika. Ovakve operacije mogu nelinearno skalirati vrednosti piksela, tako da delovi opsega vrednosti zahtevaju veći nivo preciznosti od onog koji se može postići tradicionalnim 8-bitnim kodiranjem piksela. Korišćenjem HDR slika preciznost greške se smanjuje ispod nivoa koji čovek može detektovati (Reinhard et al., 2010).

U poslednjoj deceniji postoji trend ka razvoju displeja sa sve kvalitetnijim ekranima, pri čemu neki od njih nude i mogućnost direktnog prikaza HDR slike. S druge strane, sasvim je moguće HDR sliku prikazati na ekranu LDR uređaja. Jednostavno govoreći, mnogo je lakše ukloniti informacije sa slike (skupiti dinamički opseg) nego da se proširi

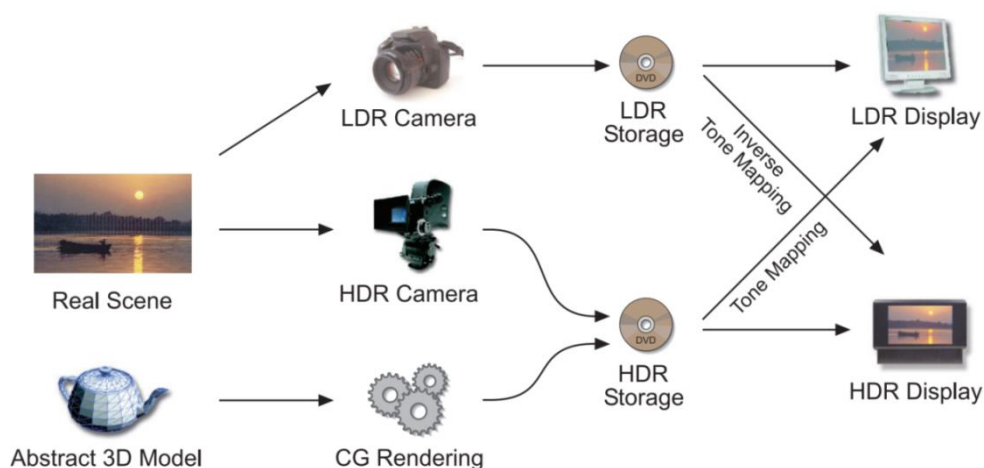
dinamički opseg snimljnog materijala (Reinhard et al., 2008). U ovim situacijama dolazi do kvantizacionih artefakata koji mogu da postanu vidljivi, kao i regiona koji mogu biti nedovoljno ili previše eksponirani. Shodno tome, uvek ima smisla generisati neki sadržaj u HDR formatu, čak i ako HDR displeji za njihov prikaz nisu toliko rasprostranjeni. Takva razmatranja treba da igraju važnu ulogu, naročito u dizajnu sistema za arhiviranje podataka (Reinhard et al., 2010). Ovakav pristup vodi ka pragmatičnom rešavanju problema i treba ga što više eksploatisati, ali ovde postoje određeni kompromisi koji će biti razmatrani u daljem tekstu disertacije.

Često se govori o problemu „kokoške i jajeta“ koji postoji između produkcijskih kuća koje kreiraju video sadržaje, distributera sadržaja i proizvođača televizora (Yurek, 2015). Na primer, u toku razvoja sledeće generacije video sadržaja koji se odnosi na format visoke rezolucije, 4K UHD, bilo je neophodno usaglasiti tri prethodno pomenute grupe da se dođe do najboljih performansi u rezoluciji, širokoj paleti boja i širokom dinamičkom opsegu (HDR). Svaka strana je sporo donosila konkretne odluke, jer su produkcijske kuće i distributeri očekivali više mogućnosti od proizvođača televizora, dok su proizvođači televizora očekivali da bude dostupno više konteksta koji bi se mogao prikazivati na njihovim uređajima. Sa aspekta distributera video sadržaja, veoma je teško zamisliti unapređenje na novu HDR ili 4K tehnologiju ukoliko ne postoji dovoljan broj televizora sposobnih da emituju takav sadržaj. Za to mora da se izdvoji značajan deo infrastrukture. Upravo iz ovog razloga Netflix (Netflix, 2016) i Amazon (Amazon, 2016) menjaju postojeću filozofiju distributera i omogućavaju krajnjim korisnicima da gledaju tačno ono što žele, izbegavajući na taj način potrebe za izmenama u infrastrukturi. To znači da ne moraju svi korisnici da gledaju isti kvalitet slike, već će dobiti onakav kvalitet kakav žele, što vodi ka povećanoj potrebi za generisanjem 4K i UHD video sadržaja.

3.2 Primena HDR-a

Većina novih tehnologija ima za cilj da unapredi određene funkcionalnosti na mestu primene, kako bi se opravdalo njihovo postojanje. Takođe, veoma je bitno i da se nove

tehnologije uklope u postojeće okruženje i omoguće da stvari funkcionišu neometano u unapređenom sistemu. Na slici 3.2 na pojednostavljen način prikazano je uklapanje HDR tehnologije u postojeću infrastrukturu, slično kao što se navodi u postojećim radovima u literaturi (Mantiuk et al., 2016). Slika 3.2 predstavlja kompletan proces kroz koji prođe HDR slika, od njene akvizicije, preko faze kompresije do prikaza na displeju.



Slika 3.2. Koraci od stvaranja do prikaza HDR slike

Postoje dva osnovna praktična problema koja se javljaju u praksi tokom snimanja i reprodukcije HDR slike. Prvi je neophodnost snimanja informacija u što je moguće širom spektru svetlosti, dok je drugi problem prikazivanje istih informacija na način koje je najbolji za ljude. Očigledan pristup precizne reprodukcije scena koje imaju široki dinamički opseg je da se poboljša tehnologija snimanja. Naime, ako se može poboljšati dinamički opseg svetlosnih senzora, povećati broj digitalnih nivoe kvantovanja i poboljšati dinamički opseg displeja, tada bi bila moguća precizna reprodukcija u većem rasponu osvetljaja (McCann & Rizzi, 2012).

Digitalne slike mogu biti kreirane pomoću digitalnih kamera (eventualno nekim sličnim uređajima za akviziciju slike) ili metodama kompjuterskog renderinga. Izvorno generisane slike, u zavisnosti od kvaliteta, mogu zauzimati dosta prostora za skladištenje. Zato je neophodno digitalni sadržaj efikasno komprimovati i kodirati za potrebe skladištenja ili prenosa. Multimedijalni sadržaj na ovaj način može biti sačuvan u LDR ili HDR formatu. Konačno, digitalni sadržaj prikazuje se na odgovarajućim displejima. Kao što je prikazano na slici 3.2, HDR sadržaj se pravolinijski prikazuje na HDR monitorima. Kada postoji potreba da se HDR sadržaj prikaže na LDR monitoru,

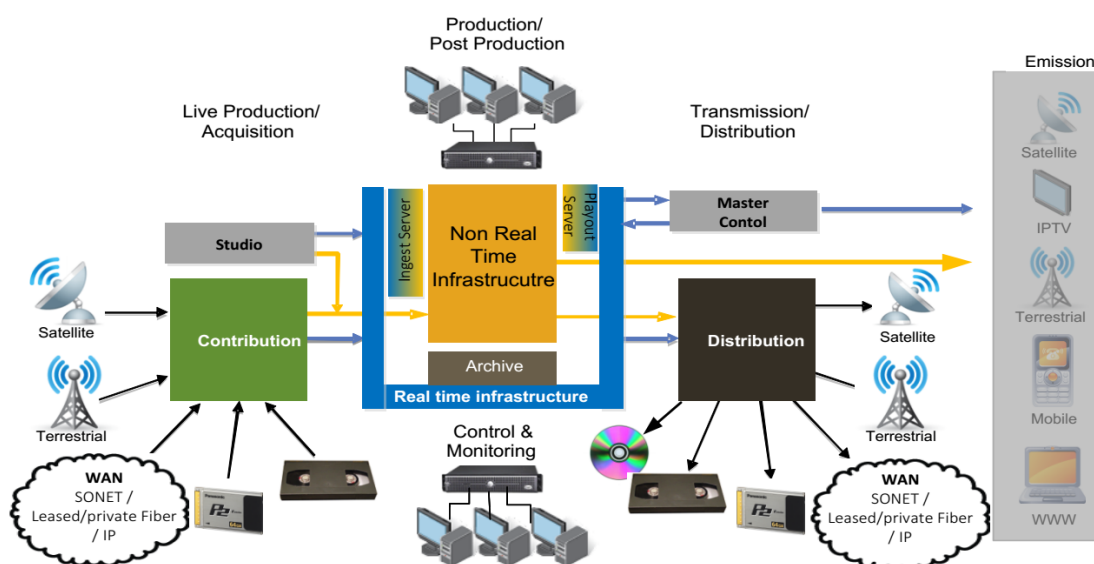
tada je neophodno koristiti, ranije pomenuto, tonsko mapiranje. Jasno je da se LDR sadržaj pravolinijski prikazuje na LDR monitorima, mada postoje i načini da se ovaj sadržaj prikaže na HDR monitorima, kada dolazi do veštačkog proširenja dinamičkog opsega. Ova transformacija u literaturi je poznata kao inverzno tonsko mapiranje (Banterle et al., 2006) i (Rempel et al., 2007).

Konačno, kada je slika prikazana na određenom tipu monitora, moguće je uraditi evaluaciju kvaliteta slike. Procena kvaliteta slike je u povoju i postoji značajan broj knjiga i radova iz ove oblasti (Wang & Bovik, 2006), (Kocić et al., 2016), ali se oblast procene kvaliteta HDR slike praktično tek razvija. Procena kvaliteta slike predstavlja jedan od najkompleksnijih zadataka u obradi slike.

Snimanje osvetljaja u realnom svetu zahteva veoma veliku količinu podataka. Postizanje veće preciznosti u okviru HDR slike zahteva i veću količinu podataka kojima je predstavljen jedan piksel, a to znači da je potrebno mnogo više mesta za skladištenje ovakvih sadržaja. HDR slika se uglavnom predstavlja sa 96 bita po pikselu u aritmetici sa pokretnom tačkom. Jedan nekomprimovan HDR piksel zahteva 12 bajtova memorije za čuvanje svakog od 3 RGB kanala. Ovakva predstava piksela može postići smanjenje na 32 ili 24 bita po pikselu (*engl.* Bits Per Pixel - BPP). Međutim, čak ni ovo smanjenje zauzeća memorije nije dovoljno i nije praktično za laku distribuciju HDR sadržaja ili čuvanje velike baze podataka slike ili video sadržaja. Primera radi, jedan frejm u visokoj rezoluciji (1920×1080) zahteva oko 24MB. Bez primene tehnika kompresije, nije izvodljivo da se sačuva ovako velika količina podataka, a o prenosu ne treba ni razmišljati. Iako se kontinuirano povećava protok u oblasti širokopojsnih zemaljskih komunikacija, malo je verovatno da će i to biti dovoljno da u bliskoj budućnosti bude omogućeno emitovanje nekomprimovanih HDR filmova. Zato se već duže vreme radi na razvoju sofisticiranih tehnika kompresije koje bi učinile čuvanje HDR sadržaja praktičnijim. Glavna strategija bila je modifikacija i/ili adaptacija postojećih standarda i tehnika kompresije kao što su JPEG i MPEG (Banterle et al., 2011). Primeri za kompresiju slike i video signala obrađeni su u sledećim radovima (Mantiuk et al., 2007) i (Korshunov & Ebrahimi, 2012).

HDR signali mogu biti prisutni svuda u produkcijskom ekosistemu. Na slici 3.3 prikazan je primer jednog sistema za televizijsku produkciju i emitovanje (Society of

Motion Picture and Television Engineers, Inc. (SMPTE), 2015). U većem delu ovog sistema moguće je uklapanje sadržaja koji imaju široki dinamički opseg i široku paletu boja (*engl.* Wide Color Gamut - WCG). To znači da su najvećim delom HDR i WCG interfejsi kompatibilni sa HDTV i UHD TV i da se 10-bitni i 12-bitni signali mogu preneti preko postojećih 3-12 GB/s interfejsa.

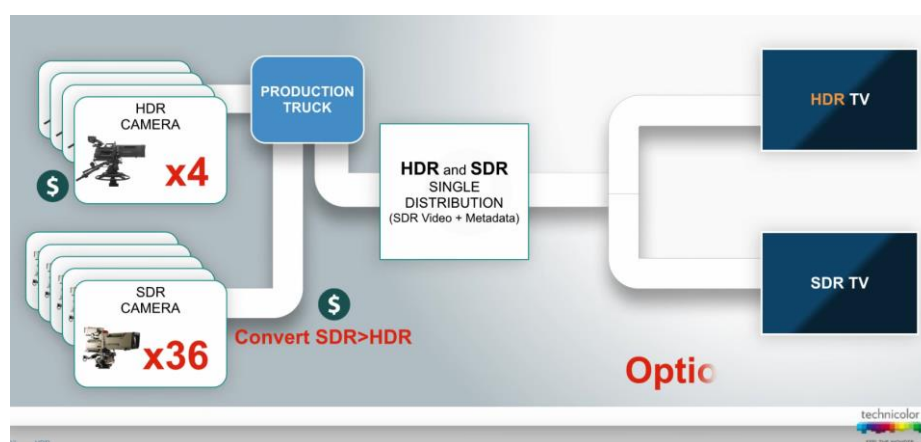


Slika 3.3. UHD TV ekosistem (SMPTE)

Međutim, ako se u budućnosti budu koristili signali sa visokim brojem slika po sekundi (*engl.* High Frame Rate - HFR), kao što su 100 Hz i 120/1.001 Hz, tada će biti potrebna unapređenja i u interfejsima i infrastrukturi. Postojanje različitih kolorimetrija displeja može stvoriti dodatnu konfuziju, a to dalje vodi ka novim zahtevima za interoperabilnošću sistema. Razne komponente u sistemima za produkciju (displeji, procesori slike, konverteri boje itd.) treba da prepoznaju tip HDR kodovanja i kolorimetrije, te da potom pravilno obrade i prikažu signal. Kompresija i obrada slike predstavljaju značajne komponente mnogih proizvodnih i distributivnih sistema, a interakcija HDR signala sa standardnim metodama još nije u potpunosti istražena. HDR i WCG su nove tehnologije koje su još uvek u razvoju i zato postoje različiti pristupi u stvaranju, transportu, distribuciji i prikazivanju HDR/WCG sadržaja. Ovo predstavlja implementacioni izazov koji je složen, visoko automatizovan i izgradnja sistema je veoma skupa. Televizijske mreže se oslanjaju na standarde kako bi se osigurala interoperabilnost i kako bi se izgradili isplativi procesi. Implementacija HDR/WCG tehnologija sa 50-60 fps može se prilagoditi postojećim multi link interfejsima protoka

1.5 ili 3Gb/s, ili 10Gb/s optičkim linkovima. HDR/WCG signali će zahtevati promenu displeja u cilju ispravnog prikazivanja slike. Upotreba signala koji imaju preko 60 fps koji uključuju UHDTV rezolucije 4K i 8K zahtevaće izgradnju nove infrastrukture (Society of Motion Picture and Television Engineers, Inc. (SMPTE), 2015).

Jedno rešenje prikazano je na slici 3.4 (Technicolor, 2016). U ovom slučaju oni kombinuju korišćenje HDR i LDR kamera u skupim produkcijskim sistemima. Sadržaj sa LDR kamera konvertuju u HDR, a onda, po potrebi kupaca, isporučuju odgovarajući format sadržaja.

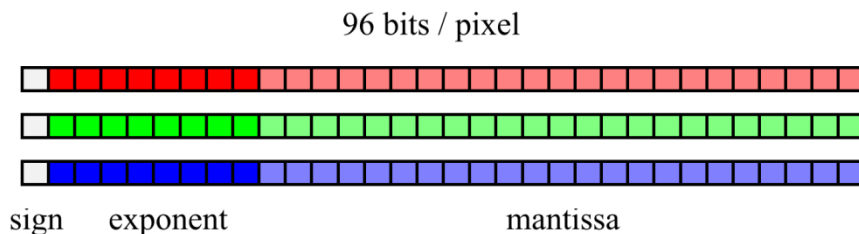


Slika 3.4. Technicolor rešenje za paralelno korišćenje HDR i LDR kamera

3.3 HDR formati

Kao što je već objašnjeno, zapis HDR slike ili videa u aritmetici sa pokretnom tačkom može da zauzme četiri puta veću količinu memorije u odnosu na količinu memorije potrebne za čuvanje odgovarajućeg LDR sadržaja. To ima veliki uticaj ne samo na čuvanje i prenos HDR podataka, već i na proces obrade tako što zahteva povećanje računarske moći na mestu obrade. Ipak, ukoliko ne postoji problem sa kapacitetom memorije za čuvanje velike količine podataka, najbolje rešenje je čuvanje svakog od R, G i B kanala u 32-bitnoj aritmetici sa pokretnom tačkom po IEEE standardu, kao što je prikazano na slici 3.5 (Szeliski, 2011). U cilju prevazilaženja navedenih problema razvijeni su efikasni načini za predstavljanje brojeva sa pokretnom metrikom koji se

koriste za HDR snimanje. Takođe, izvršena su unapređenja postojećih kompresija, kao što su JPEG i MPEG, kako bi se omogućio adekvatan rad sa HDR sadržajem (Banterle i dr . , 2011).



Slika 3.5. Prikaz 32 bita po kanalu

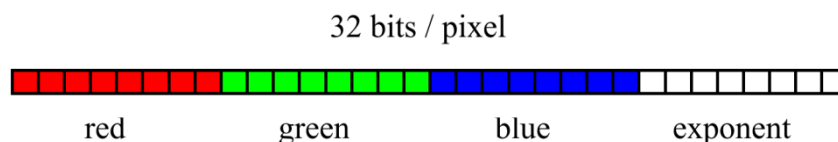
U nastavku će biti predstavljeni neki od najpoznatijih formata pomoću kojih je moguće kodovati HDR sliku. Pregled najčešće korišćenih formata u istraživanju i industriji izložen je i u citiranoj referenci (Anyhere Software, 2015). Pomoću nekih od pomenutih formata moguće je predstaviti stvarni HDR piksel (u širokom dinamičkom opsegu), dok su neki formati nezatna poboljšanja 24-bitnog RGB kodovanja. Najčešće korišćeni format PPM podržava i nekomprimovano ASCII i binarno RAW kodovanje. Ovaj format može biti proširen na aritmetiku sa pokretnom tačkom, u PFM format, modifikacijom zaglavlja fajla. TIFF format takođe podržava aritmetiku sa pokretnom tačkom.

Od interesa za ovu diskusiju biće formati kodovanja piksela koji zauzimaju oko 4 i više redova veličine amplituda, naročito ukoliko obuhvataju ceo vidljivi spektar boja (bez ograničenja na određeni podskup boja). Formati koji ispunjavaju ove uslove i imaju veličinu koraka osvetljaja ispod 1% i dobru rezoluciju boje, moći će da kodiraju bilo koju sliku isto toliko verno koliko je i ljudski vizuelni sistem u mogućnosti da to obavi. Diskusija je ograničena na ovu klasu kodovanja, sa par izuzetaka.

- **Pixar Log Encoding (TIFF)** Istraživači koji se bave kompjuterskom grafikom još pre par decenija su uvideli ograničenja kod standardne 24-bitne RGB predstave piksela. Jedna od prvih grupa koja je radila na prevazilaženju ovih problema, u cilju kreiranja standarda za HDR, je kompanija Pixar (Pixar, 2016). Oni su razvili logaritamsko kodovanje sa po 11 bita za svaku RGB vrednost, tako da im je bilo potrebno 33 bita po pikselu. Koristeći se ovakvim predstavljanjem brojeva, Piksar je bio u stanju da kodira dinamički opseg od

približno 3,6 redova veličine (3600:1) u koracima od po 0,4%. Detalji o ovom formatu nisu publikovani, osim što se koristi kao kodek u biblioteci *libtiff* (Leffler, 2015).

- **RGBE kodovanje** predstavlja HDR format čiji je razvoj Greg Ward započeo 1985. godine, u sistemu za prikaz baziranom na fizičkim osobinama (Anyhere Software, 2015). Sistem je dizajniran da izračuna fotometrijske veličine i činilo se neprihvatljivim odbacivati ove informacije tokom zapisa slike. Korišćen je 32-bitni format tako da je svaki kanal predstavljen sa po jednom 8-bitnom mantisom, pri čemu je deljen jedan zajednički 8-bitni eksponent. Ovo je predstavljeno na slici 3.6 (Szeliski, 2011). Eksponent se koristi kao faktor skaliranja tri linearne mantise.



Slika 3.6. RGBE kodovanje

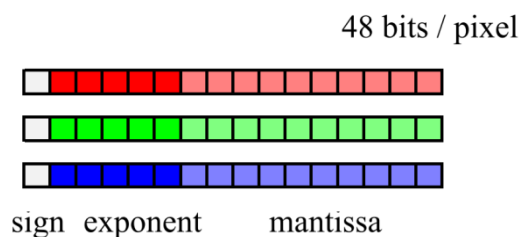
Krajnji rezultat je format koji ima apsolutnu tačnost od oko 1%, a pritom pokriva preko 76 redova veličine. Poznato je da je opseg osvetljaja u realnom svetu oko 10^{14} , pa je jasno da je ovaj format malo predimenzionisan, jer ostavlja 62 reda veličina vrednosti koje su beskorisne. Rezultat bi bio bolji upotrebom RGBE formata sa manjim opsegom, ali većom preciznošću, što bi zahtevalo neku vrstu logaritamskog kodovanja. Takođe, nedostatak je i to što ne postoji mogućnost predstavljanja negativnih brojeva. Takođe, ovaj način kodovanja nema uniformnu raspodelu greške. Svi pomenuti nedostaci vodili su ka razvoju narednog formata kodovanja.

- **SGI LogLuv (TIFF)** predstavlja nadgradnju formata RGBE, pošto su ispravljani uočeni nedostaci, što je rezultovalo implementacijom LogLuv kodeka u *libtiff* biblioteci. Ovo kodovanje se zasniva na vizuelnoj percepciji tako da odgovara ljudskom vizuelnom sistemu. Ključna prednost leži u činjenici da je kvant kodovanja ispod nivoa koji bi mogli dovesti do vidljivih razlika na „savršenom“ displeju. Odvajanjem osvetljaja (luminanse) i hrominanse kanala, a zatim primenom logaritamskog kodovanja osvetljaja, dolazi se do veoma

efikasne kvantizacije onoga što čovek može da vidi. Zapravo, postoje tri varijante ovog logaritamskog kodovanja. U prvom slučaju prave se parovi, tako da se osvetljaj predstavlja sa 10 bita, a boje u CIE prostoru boja (u' i v') sa 14 bita. U drugom slučaju se koristi 16 bita za čisto kodovanje osvetljaja. Treći slučaj predstavlja kodovanje osvetljaja pomoću 16 bita u predstavi sa znakom i dodavanje po 8 bita za obe komponente boje u CIE sistemu, što rezultuje formatom ukupne dužine 32 bita po pikselu.

LogLuv format nije našao široku primenu kao što su se autori nadali, iako je jedan broj istraživača koji se bave računarskom grafikom usvojio ovaj format, a takođe je implemetiran u *libtiff* biblioteci, što znači da je veliki broj programa mogao da ga pročita. Jedan deo odgovora leži u činjenici da ljudi ne žele da menjaju svoje navike koje su vezane za RGB format, dok se drugi deo odnosi na prelazak na novi format (u čemu treba imati veliku podršku ključnih partnera u industriji). Zbog ovoga je teško upotrebiti novi format, bez obzira na korist koja se time može postići. Kao što autori kažu, trenutno ne postoji format koji više odgovara arhiviranju slike u boji, sve dok se evolucijom ne usavrši ljudski vid (Anywhere Software, 2015).

- **Industrial Light & Magic OpenEXR (EXR)** je format objavljen 2002. godine u obliku C ++ izvornog koda za čitanje i pisanje OpenEXR formata slike (Industrial Light & Magic, 2016). Ovaj format koriste kompanije u primenama kompjuterske obrade slike i prvenstveno je namenjen specijalnim efektima (OpenEXR, 2016). Format je opšte namene i podržava različite aritmetike, kao što su: 16-bitna aritmetika sa pokretnom tačkom, 32-bitna aritmetika sa pokretnom tačkom i 32-bitna celobrojna aritmetika. 16-bitni tip podataka sa pokretnom tačkom naziva se još „Half“ i predstavlja logičnu modifikaciju IEEE-754 aritmetike sa pokretnom tačkom na 16 bita. Takođe se koristi i naziv "S5E10" jer ima format: znak plus 5 bita za eksponent i plus 10 bita za mantisu, kao što je prikazano na slici 3.7 (Szeliski, 2011). Ovaj format već neko vreme predstavlja standard u oblasti razvoja uređaja za kompjutersku grafiku.



Slika 3.7. OpenEXR format

OpenEXR format omogućava i zapis negativnih brojeva, pa može da pokrije opseg od 10.7 redova amplituda, sa relativnom preciznošću od 0.1%, što označava veoma dobre performanse i omogućava široku primenu. Iako ovaj format ima 48 bita po pikselu, što je znatno više u odnosu na 32 bita po pikselu kod LogLuv i RGBE formata, dodatna preciznost je veoma bitna u primenama višestrukih ekspozicija kada dolazi do pojave akumulacije greške.

Predviđanja su da će OpenEXR format zadržati široku primenu u kompjuterskoj grafici i industriji specijalnih efekata, zato što ima jasne prednosti za obradu slike visokog kvaliteta, a i direktno ga podržavaju današnje grafičke kartice visokih performansi (Anyhere Software, 2015).

- **Microsoft/HP scRGB kodovanje** predstavlja format za interpretaciju HDR slike koji su predložili Microsoft i Hewlett-Packard, a potom je prihvaćen kao standard IEC-61966-2-2. Poznat je i pod nazivom scRGB i predstavlja nadgradnju standarda 24-bitnog sRGB (W3, 1996). Standard scRGB podeljen je na dva dela: deo koji koristi 48 bita po pikselu u RGB kodovanju i deo koji koristi 36 bita po pikselu. U zavisnosti od tipa kodovanja koji se koristi za pojedinačnu osnovu, postoji linearno kodovanje od 16 bita (48 bpp) i nelinearno kodovanje od 12 bita po kanalu (36 bpp).

U delu standarda koji se odnosi na 48 bita po pikselu, scRGB koristi linearnu krivu za svaku osnovnu boju. Linearna kriva se koristi zbog pojednostavljenja grafičkog hardvera i operacija obrade slike. Međutim, linearno kodovanje veći deo preciznosti „troši“ u delu krive gde su predstavljene visoke vrednosti, gde oko može da detektuje malu razliku u susednim vrednostima. Zato je manja preciznost u delu krive sa niskim vrednostima, pa je efektivni dinamički opseg ovog formata samo oko 3,5 redova veličine, što i nije toliko značajno. Standard dozvoljava korišćenje negativnih vrednosti, što predstavlja poboljšanje u odnosu

na ranije RGB standarde, ali ima problem, na osnovu prethodno rečenog, sa dinamičkim opsegom.

Deo scRGB standarda koji se odnosi na 36 bpp osetljiviji je i kompaktniji. Koristi standardnu gama krivu, koja je linearizovana u oblasti blizu nule. Iako zauzima 25% manje memorijskog prostora od verzije sa 48 bita, ima skoro isti dinamički opseg. Takođe, postoji problem sa bojama na krajevima dinamičkog opsega, ali ukupno gledano, predstavlja bolje kodovanje (Anyhere Software, 2015).

Uporedne karakteristike prethodno opisanih formata prikazane su u tabeli 2, poredeći njihovo zauzeće memorije po pikselu, dinamički opseg i kvantni korak.

Tabela 2. Poređenje karakteristika HDR formata

Kodovanje	BPP	Dinamički opseg	Kvantni korak
Pixar Log	33	3.8 (25.0:0.004)	0.4%
RGBE	32	76 (10^{38} : 10^{-38})	1%
LogLuv 24	24	4.8 (15.9:0.00025)	1.1%
LogLuv 32	32	38 (10^{19} : 10^{-20})	0.3%
EXR	48	10.7 (65000:0.0000012)	0.1%
sRGB	24	1.6 (1.0:0.025)	promenljiv
scRGB	48	3.5 (7.5:0.0023)	promenljiv
scRGB-nl	36	3.2 (6.2:0.0039)	promenljiv

Svi prethodno pomenuti formati su bez gubitaka, što znači da kada se jednom snimi scena, više nema gubitaka prilikom čuvanja u memoriji. Ovo je često poželjna opcija, naročito kada slika prolazi kroz različite faze postprocesiranja. Međutim, postoje i primene gde je poželjno čuvati slike u formatu sa gubitkom, naročito kada je bitno zauzeće memorije ili je slika sačuvana neposredno pred prikaz na displeju. Poželjna karakteristika svakog novog formata je da na neki način bude kompatibilan sa postojećim alatima, što kod HDR tehnologije predstavlja LDR, kao mapirana slika originala. Zbog ovog tipa kompatibilnosti, a i zbog smanjenja zauzeća memorije,

ukratko će biti predstavljena tri formata koja unose gubitke prilikom čuvanja HDR slike, kao što je opisano u literaturi (Reinhard et al., 2010).

- **Dolby JPEG-HDR** format kompatibilan je sa 8-bitnim JPEG standardom (Dolby, 2016). Ovaj način kodovanja predstavlja čuvanje tonski mapirane HDR slike kao JPEG fajl. Dodatno se čuvaju i metapodaci, na osnovu kojih je moguće uraditi potpunu rekonstrukciju HDR slike. Na ovaj način se uvećava originalna JPEG slika za samo 20%. Poređenja radi, većina HDR formata bez gubitaka zahteva 16 puta više prostora za skladištenje od JPEG-a.
- **XDepth** predstavlja još jedan format koji je kompatibilan sa osnovnim JPEG formatom (XDepth, 2016). Detalji formata nisu javno dostupni, ali se koristi slična logika kao kod JPEG-HDR-a, gde se čuva tonski mapirana slika i dodatni metapodaci, primenom jednostavnog gama kodovanja. XDepth format postiže nivo kompresije tako da JPEG fajl zauzima manje od 5% veličine HDR fajla.
- **JPEG XR** format baziran je na **Microsoft HD Photo** formatu slike, (Microsoft, 2016) i razvili su ga Microsoft-a, JPEG, ITU-T i ISO/IEC. U suštini predstavlja kontejner format koji podseća na JPG 2000, a ima mogućnost kompresije sa ili bez gubitaka, postiže dobru pouzdanost boja i manje je zahtevan u smislu računarskih resursa i alokacije memorije (JPEG, 2016).

3.4 Načini generisanja HDR slike

Ukoliko se ne koriste uređaji specijalne namene, generisanje HDR slike može da se izvrši snimanjem više slika iste scene sa različitim vremenima ekspozicije. Fuzijom dobijenih slika rekonstruiše se originalni dinamički opseg snimljene scene i ovaj metod predstavlja jedan od najčešće korišćenih metoda za snimanje HDR slike. U literaturi postoji nekoliko radova koji se bave ovom problematikom (Mann & Picard, 1995), (Debevec & Malik, 1997), (Mitsunaga & Nayar, 1999), (Robertson et al., 2003), (Granados et al., 2010), itd. Neki principi generisanja HDR slike predstavljeni su i u (Lukac, 2011).

Mann i Picard prepostavljaju da digitalna kamera, kao ni film, nemaju linearni odziv, već je to uopštena funkcija koja se naziva funkcija odziva kamere (*eng.* Camera Response Function - CRF) (Mann & Picard, 1995). U poređenju sa filmom, ta funkcija se može definisati kao:

$$f(x) = ax^\gamma + b. \quad (3.1)$$

Autori predlažu jednostavan način za računanje ove funkcije, tako što porede odgovarajuće vrednosti piksela i dodeljuju težinske faktore. Na ovaj način izbegava se gruba kvantizacija vrednosti piksela, a greška koja se na ovaj način javlja je uniformna. Ova parametrizovana funkcija je veoma ograničena i ne podržava većinu realnih odzivnih funkcija kamere (Banterle et al., 2011).

Debevec and Malik takođe predlažu jednostavan način za pronalaženje CRF (Debevec & Malik, 1997), što je predstavljeno i u (Banterle et al., 2011). Oni polaze od pretpostavke da je vrednost piksela na slici određena primenom odzivne funkcije kamere na iradijansu, skalirano za vreme ekspozicije. To je definisano sledećom jednačinom:

$$I(x) = f(E(x)\Delta t_i). \quad (3.2)$$

Inverzijom i primenom logaritma, dobija se sledeća jednačina:

$$\log(f^{-1}(I(x))) = \log E(x) + \log \Delta t_i. \quad (3.3)$$

Uzimajući u obzir da je f glatka i monotonno rastuća funkcija, a g je inverzna funkcija odzivne funkcije kamere (CRF), f i E se mogu odrediti izvođenjem iz prethodne jednačine, minimizacijom srednje kvadratne greške, uzimajući piksele sa slika različitih ekspozicija:

$$\begin{aligned} \mathcal{O} = & \sum_{i=1}^{N_e} \sum_{j=1}^M \left(\omega(I_i(x_j)) \left[g(I_i(x_j)) - \log E(x_j) - \log \Delta t_i \right] \right)^2 \\ & + \lambda \sum_{x=T_{min}+1}^{T_{max}-1} (\omega(x)g''(x))^2, \end{aligned} \quad (3.4)$$

gde M predstavlja broj piksela koji se koristi u ovom procesu minimizacije za broj slika N_e , a T_{min} i T_{max} predstavljaju maksimum i minimum celobrojnih vrednosti na slikama I_i , respektivno. Dodatno se uvodi težinska funkcija $\omega(x)$, koja ima za cilj da poboljša

uklapanje i pojača glatkost u srednjem delu odzivne funkcije. Ona daje nulte težine preekspozicionim i nedovoljno ekspozicionim pikselima, a definiše se kao:

$$\omega(x) = \begin{cases} x - T_{min}, & x \leq \frac{1}{2}(T_{min} + T_{max}), \\ T_{max} - x, & x > \frac{1}{2}(T_{min} + T_{max}). \end{cases} \quad (3.5)$$

Treba zapaziti da je proces minimizacije obavljen nad skupom od M piksela zato što je računarski veoma zahtevno da se obavi na svim pikselima. Po dobijanju funkcije g , vrednosti iradijansi mogu se dobiti korišćenjem jedne slike ili korišćenjem svih slika i težinske funkcije. Korišćenje više slika smanjuje šum i redukuje pojavu raznih artefakata.

Unapređenje metoda (Debevec & Malik, 1997) predloženo je u (Mitsunaga & Nayar, 1999). Oni su prenosnu funkciju kamere predstavili polinomom na sledeći način:

$$I_i(x) = f(E(x)\Delta t_i) = \sum_{k=0}^P c_k(x)^k, \quad (3.6)$$

gde P predstavlja red polinoma, a c_k su koeficijenti. Posmatrajući dve slike sa dva različita vremena ekspozicije Δt_1 i Δt_2 , može se izvesti odnos:

$$R_{1,2} = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{I_1(x)}{I_2(x)}. \quad (3.7)$$

Izmereni osvetljaj $I_i(x)$ u sistemu za akviziciju slike odnosi se na radijansu $E(x\Delta t_i)$ u vremenskom trenutku i za prenosnu funkciju $I_i(x) = f(E(x\Delta t_i))$ (Banterle et al., 2011). U obzir treba uzeti činjenicu da je $\Delta t_1 < \Delta t_2$. Funkcija odziva sistema povezana je sa odnosom ekpozicija, pa prethodna jednačina može biti napisana kao:

$$R_{1,2} = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{I_1(x)}{I_2(x)} = \frac{\sum_{k=0}^P c_k I_1(x)^k}{\sum_{k=0}^P c_k I_2(x)^k}. \quad (3.8)$$

Funkcija odziva može se pronaći definisanjem funkcije greške na sledeći način (normalizujući sva merenja tako da je $I_i(x)$ u opsegu $[0,1]$):

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{N_e} \sum_{j=1}^P \left(\sum_{k=0}^P c_k I_i(x_j)^k - R_{i,i+1}(x_j) \sum_{k=0}^P c_k I_{i+1}(x_j)^k \right)^2 \quad (3.9)$$

Dodatno ograničenje se dobija ako se uzme u obzir sledeće:

$$f(1) = I_{max}, \quad c_p = I_{max} - \sum_{k=0}^{P-1} c_k. \quad (3.10)$$

Koeficijenti funkcije odziva dobijaju se rešavanjem sistema linearnih jednačina koji proizilaze iz sledećeg uslova:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial c_k} = 0. \quad (3.11)$$

Robertson i autori (Robertson et al., 2003) koriste teoriju verovatnoće da bi izveli optimalnu težinsku funkciju. Oni procenjuju funkciju odziva i iradijansu $E(x)$ minimizacijom funkcije:

$$\mathcal{O}(I, E) = \sum_{i=0}^{N_e} \sum_{j=0}^M \omega_{i,j} \left(I_i(x_j) - \Delta t_i E(x_j) \right)^2, \quad (3.12)$$

pri čemu ω predstavlja šum sistema za akviziciju slike, definisan Gausovom funkcijom. Izvedeni težinski faktori se smanjuju linearno sa varijansom izlaza, a uvećavaju se kvadratno sa vremenom ekspozicije.

Težinska funkcija bazirana na statistički optimalnim procenama, koja koristi kalibrisani model kamere i uzima u obzir sve izvore šuma, predložena je u (Granados et al., 2010).

3.5 HDR oprema

Da bi bila moguća potpuna implementacija HDR tehnologije u jedan sistem, potrebno je da sa njom budu kompatibilne sve komponente tog sistema. Tek tada će biti uočene sve najbolje strane HDR tehnologije i biti jasno zašto HDR tehnologija predstavlja budućnost. U tom smislu, u nastavku će biti dat osvrt na bitne elemente u lancu za akviziciju i prikazivanje HDR slike.

3.5.1 Senzori

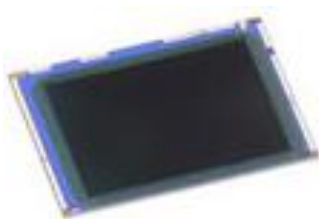
Senzori za akviziciju slike uvek se sastoje od sledeća tri bloka: (1) blok koji konvertuje ulaznu svetlost u naelektrisanje i čuva ga, (2) blok koji skenira sve piksele da bi identifikovao lokacije sačuvanih naelektrisanja i (3) blok koji meri količinu naelektrisanja i konvertuje je u električni signal (Kuroda, 2015). Način rada pojedinih blokova određuje tip senzora, pa shodno tome postoje sledeće vrste senzora: CCD (*eng.* Charge Coupled Device), MOS (*eng.* metaloxide semiconductor) i CMOS (*eng.* complementary metal-oxide semiconductor). U novije vreme najčešće se koriste CMOS senzori.

Većina standardnih senzora ima piksele sa linearnim odzivom koji u sebi imaju dodatna pojačanja. Odziv piksela predstavlja integralnu funkciju fotona koji upadnu u piksel za vreme trajanja ekspozicije (vremena integracije). Fotoni se konvertuju u elektrone (struju), što dovodi do promene napona (Darmont, 2012). Ova procedura je uglavnom standardna za linearne senzore, pa je samim tim i njihov dinamički opseg ograničen. U cilju povećanja dinamičkog opsega senzora koriste se različite tehnike koje se primenjuju na nivou senzora i one odnose se na promenu dizajna samog piksela ili njegove kontrole. Jedan od primera je multilinearni piksel koji je po svojoj prirodi linearan, ali se njime upravlja tako da u toku trajanja ekspozicije, njegov odziv postaje nelinearan. Postoji i tehnika višestrukog odabiranja linearnog piksela bez uticaja na prikupljeno naelektrisanje za vreme trajanja ekspozicije. U ovom slučaju će svetli pikseli biti pročitani bar jednom pre odlaska u zasićenje, a oni koji se nalaze u tamnim delovima biće pročitani na kraju vremena integraljenja. Još jedan primer piksela modifikovanih u cilju proširenja dinamičkog opsega su pikseli sa logaritamskim odzivom. Kod ovih senzora promenjena je kriva odziva, dajući veću osetljivost manje osvetljenim delovima scene, čineći da odziv ovih senzora bude inverzno proporcionalan intenzitetu dolaznog osvetljaja. Postoje i senzori koji mere vreme za koje fotodioda dostigne odgovarajući nivo, umesto da mere nivo koji se dostigne za određeno vreme. Njihov najveći nedostatak je velika količina upravljačke logike, neophodna da se ova funkcionalnost dostigne. Još jedan tip senzora baziran je na frekvencijskim modulatorima koji na izlazu obezbeđuju signal konstantne amplitude, ali promenljive

frekvencije, koja je proporcionalna struji fotodiode. Ovaj tip piksela zahteva više od 10 tranzistora po pikselu, što ograničava primenu senzora (Darmont, 2012).

Proizvođači optičkih senzora uočili su potrebu tržišta za primenom HDR tehnologije, i odlučili da je implementiraju u svoje proizvode. Sve više njih reklamira svoje proizvode tako što kao jednu od najbitnijih karakteritika ističu HDR opciju. Što se tiče samih implementacija, uglavnom nema mnogo dostupnih informacija koje detaljno opisuju arhitekturu senzora, ali postoje proizvodi koji mogu omogućiti dobijanje slike širokog dinamičkog opsega i postoji podrška za njihovu implementaciju. U nastavku će biti analizirano nekoliko senzora najpoznatijih proizvođača.

- Sony u svojoj ponudi ima tri tipa senzora koji podržavaju HDR tehnologiju (jedan tip senzora prikazan je na slici 3.8) i ističe je kao jedan od efektivnijih metoda za poboljšanje kvaliteta slike (Sony, 2016).



Slika 3.8. Sony HDR senzor

Sony ističe problem koji postoji kod generisanja HDR slike korišćenjem postojećih algoritama, ističući da oni nisu primenljivi na scene koje sadrže pokretne objekte, jer se pravi vremenski razmak između odgovarajućih slika. Ovaj problem rešavaju fuzijom dve različito eksponirane slike na nivou senzora, i primenjuju odgovarajuće algoritme za generisanje optimalne slike sa širokim dinamičkim opsegom. Treba uzeti u obzir ograničenje da snimljene slike mogu biti u punoj rezoluciji od 13 megapiksela (MP), dok isporučeni video sadržaj može imati rezoluciju 1920x1080 (FullHD), pri 30fps.

- Kompanija On Semiconductor je razvila senzor koji manipuliše sa 4 slike različitih ekspozicija u cilju dostizanja HDR performansi slike i videa (ON Semiconductor, 2016). Proizvođač navodi da je dinamički opseg ovog senzora

više od 120dB i da se, zahvaljujući svojim superiornim performansama, može primenjivati u autoindustriji u primenama napredne asistencije vozaču.

- CMOSIS navodi da je dinamički opseg obično ograničen u procesu očitavanje piksela sa CMOS senzora, a da bi se ovo prevazišlo koristile su se tehnike nelinearne kompresije signala (CMOSIS, 2015). Kompanija je razvila novi CMOS senzor piksela koji omogućuje očitavanje sa fotodiode sa širokim dinamičkim opsegom, koji održava linearni odziv. Nakon ekspozicije, fotodiode se očitava preko dva izlazna kola u dve tačke očitavanja, tako da se dva signala čitaju iz svakog piksela. Prvo očitavanje obavlja se u prvoj tački, sa maksimalnim pojačanjem i malim šumom očitavanja. Drugo očitavanje vrši se zbirno za obe tačke, pri čemu se koristi malo pojačanje. Na ovaj način se postiže dinamički opseg senzora od 90dB.
- Omni Vision Technologies za svoj HDR senzor kažu da nudi najveću osetljivost i najbolje performanse u svojoj klasi po pitanju širokog dinamičkog opsega, te se zbog toga preporučuje upotreba u autoindustriji u raznim naprednim aplikacijama. Dinamički opseg ovog senzora je do 120dB korišćenjem tehnologije OmniHDR (OmniVision Technologies, 2016).
- ST Microelectronics, takođe proizvodi senzore koji podržavaju HDR tehnologiju (STMicroelectronics, 2016). Unutar senzora je implementiran blok za spajanje tri slike različitih ekspozicija u relnom vremenu, tako da se postiže dinamički opseg do 132dB. U cilju najboljeg snimanja dinamičkog opsega scene može se izabrati jedan od pet različitih modela po kojima će biti generisana HDR 22-bitna slika.

3.5.2 Optika

U toku procesa projektovanja i razvoja kamere, inženjeri se često fokusiraju samo na senzor, koji predstavlja ključni element u uređaju za akviziciju slike, zaboravljajući pritom na ogroman uticaj optike (Darmont, 2012). Veoma je bitno posvetiti dovoljno pažnje optici tj. performanse optičkog sistema uklopiti sa performansama senzora, jer će samo u toj situaciji dinamički opseg scene biti pravilno prenet do senzora.

3.5.3 Kamere

Na tržištu se tek u skorije vreme pojavljuje određeni broj kamera koje podržavaju HDR tehnologiju. Generalno je to posledica činjenice da je HDR tehnologija još uvek u razvoju, još uvek se definišu standardi, relativno je mali broj senzora koji je podržavaju itd. Na slici 3.9 prikazano je nekoliko kamera koje imaju implementiranu HDR tehnologiju. Kamere prikazane na slici 3.9 biće predstavljene u kratkim crtama u sledećem delu teksta.

- Spheron je kompanija poznata kao pionir u oblasti HDR kamera. Njihov proizvod je Spheron Lite, uređaj namenjen za pouzdano snimanje HDR materijala. Ova kamera je najpreciznija u sfernom snimanju, pošto se glava kamere rotira oko centralne pozicije. Takođe, ne zahteva dodatno spajanje slika, već se HDR slika automatski dobija u jednom ciklusu rotacije, dajući veoma kvalitetnu sliku (Spheron, 2013).
- PointGrey, iskusni proizvođač kamera, implementirao HDR tehnologiju u svoju kameru Ladybug5 (Point Grey, 2016). Ova kamera je takođe namenjena za sferno snimanje i obavlja fuziju slike sa šest senzora. Dajući maksimalnu fleksibilnost korisniku, ova kamera proizvodi kvalitetne HDR slike.
- Weiss AG Civetta 360° predstavlja kameru sa potpuno automatizovanom tehnologijom za sferno snimanje, isporučujući slike od 100MP u EXR formatu ili u tonski mapiranom 8-bitnom JPEG formatu (Weiss-ag, 2016).
- Brinno TLC200 PRO je kamera sa ugrađenom HDR tehnologijom čiji je dinamički opseg 115dB (Brinno, 2016). Specijalno je namenjena za snimanje „time-lapse“ video sadržaja, dajući gotov video materijal koji ne zahteva dodatno procesiranje. Ono što posebno krase ovu kameru je veličina piksela od 4.2µm, tako da ima dobre performanse i u uslovima slabog osvetljenja.
- Panasonic 4K Ultra HD Camcorder HC-VX870 predstavlja komercijalnu kameru izuzetnih performansi (Panasonic, 2016). Ima mogućnost snimanja video sadržaja rezolucije 4K implementirajući HDR kombinacijom dve slike različitih ekspozicija. Rezultat je oštar i jasan generisani video materijal, bez

prisustva delova koji sadrže senke. Zahvaljujući ovim karakteristikama kameru je moguće koristiti prilikom snimanja scena koje imaju pozadinsko osvetljenje.

- Bosch je implementirao široki dinamički opseg u jednoj od svojih IP kamera (Bosch, 2012). Primena HDR-a je izuzetno značajna u aplikacijama koje se odnose na video nadzor, jer u takvim situacijama često dolazi do snimanja scena sa širokim dinamičkim opsegom.



Slika 3.9. HDR kamere: Spheron Lite – gore levo, PT Grey – gore u sredini, Brinno – gore levo, Panasonic – dole levo, Bosch – dole desno

3.5.4 Displeji

Da bi krajnji korisnik imao potpunu impresiju gledanjem HDR sadržaja, neophodno je da isti bude prikazan na adekvatnom displeju. HDR displeji doživljavaju ekspanziju u smislu komercijalizacije tek u poslednjih godinu ili dve, čineći da odgovarajući sadržaj bude dostupan velikom broju ljudi. Pre toga je postojao ograničen broj mogućnosti da se prikaže HDR sadržaj.

Jedan od prvih HDR displeja na tržištu proizvela je kompanija Dolby (Dolby, 2011). U pitanju je profesionalni referentni monitor namenjen produkcijskoj industriji za precizno predstavljanje slike sa punim dinamičkim opsegom i paletom boja. Početkom 2016. godine razvojni tim ovog displeja dobio je prestižno priznanje Američke Akademije za svoj doprinos tehnologiji snimanja. Nakon pomenutog displeja pojavili su se i njegovi naslednici, a jedan od njih prikazan je na slici 3.10 (Canon, 2015). Referentni displeji su veoma skupi, koštaju nekoliko desetina hiljada dolara, te nisu namenjeni komercijalnom tržištu.

Jasna je potreba za definisanjem novih standarda kada se uvodi novi tip multimedijalnih sadržaja. U tom smeru je UHD alijansa definisala premijum standard kao rezultat rada filmskih studija, distributera sadržaja, proizvođača potrošačke elektronike i tehnoloških kompanija (UHD ALLIANCE, 2016). Cilj je da svaki uređaj, sadržaj ili servis koji nosi premijum logo bude usaglašen sa performansama definisane metrike po pitanju rezolucije, širokog dinamičkog opsega, vršnih osvetljaja, nivoia crne boje, široke palete boja itd. Rezultat pomenutih aktivnosti je prisustvo sve većeg broja novih uređaja, što se prevashodno odnosi na displeje, jer su se na tržištu pojavili najveći proizvođači čiji su proizvodi prikazani na slici 3.10 (Samsung, 2016), (LG, 2016), (Sony, 2016). Još jedan standard predstavlja Dolby Vision, ali se čini da ga manje proizvođača podržava zbog neophodnog plaćanja licenci.



Slika 3.10. HDR televizori

3.6 Tonsko mapiranje

Kada je HDR slika (mapa radijansi) generisana, uglavnom postoji potreba za prikazom na LDR displeju koji ima dinamički opseg maksimalno do 1000:1. Kada se koriste ovakvi displeji neophodno je izvršiti kompresiju dinamičkog opsega i ova operacija se naziva tonsko mapiranje (Banterle et al., 2011). Postoji i definicija po kojoj je tonsko mapiranje u stvari mapiranje jednog seta boja u drugi. Različite tehnike tonskog mapiranja su razvijene za potrebe prikaza HDR slika i one se odnose ili na izračunavanje prostorno promenljivih funkcija prenosa ili na redukovanje gradijenta slike kako bi se uklopilo u dinamički opseg (Szeliski, 2011). Primarni cilj korišćenja tonskog mapiranja je čuvanje i prikaz slike. U aplikacijama koje se odnose na mašinsku viziju nije ih potrebno primenjivati zbog efikasnije i preciznije obrade (Darmont, 2012).

Svi operatori tonskog mapiranja mogu biti podeljeni u dve kategorije – globalni i lokalni. Globalni operatori tonskog mapiranja su nelinearne funkcije bazirane na parametrima slike. Kada se odredi nelinearna funkcija mapiranja, ona se na isti način primenjuje za sve piksele na slici koristeći „look-up“ tabelu, ne uzimajući pritom u obzir okolne piksele. Ovi operatori su obično brži i jednostavniji, ali mogu prouzrokovati gubitak kontrasta. Lokalni operatori tonskog mapiranja su prostorno promenljivi. Vrednost svakog piksela računa se u zavisnosti od okolnih piksela. Ovi operatori su obično složeniji i proizvode nerealne slike. Prilikom upotrebe lokalnih operatora može doći do pojave niza artefakata kao što su oreoli oko tamnih objekata (kada je kontrast visok), pojava efekata dupliranja objekata na slici, veoma zasićene boje itd. Česta je pojava da se koriste obe vrste operatora, jedan za drugim (Darmont, 2012). U nastavku teksta će u kratkim crtama biti opisani neki od najpoznatijih operatora tonskog mapiranja.

Geg Ward je na Berkliju razvio algoritam za globalno tonско mapiranje koji je baziran na pronalaženju konstante proporcije između osvetljaja displeja i osvetljaja okruženja, održavajući vidljivi kontrast scene (Ward, 1994). Na osnovu ranije izvedenih studija za osetljivost kontrasta, dobijena je relacija između adaptacije osvetljaja i minimalne vidljive razlike i ona je predstavljena jednačinom:

$$\Delta L(L_a) = 0,00594 \times (1,219 + L_a^{0.4})^{2.5}. \quad (3.13)$$

Ako se pretpostavi da su L_d i L_w osvetljaji displeja i okruženja, onda se teži pronalazenu koeficijenta m tako da važi

$$L_d = m L_w. \quad (3.14)$$

Kada se iskoristi zavisnost $\Delta L(L_a)$, može se doći do sledeće korelacije:

$$\Delta L(L_{da}) = m \Delta L(L_{wa}), \quad (3.15)$$

gde $\Delta L(L_{da})$, L_{da} i L_{wa} predstavljaju minimalni primetni osvetljaj, osvetljaj adaptacije displeja i osvetljaj adaptacije okruženja, respektivno. Na osnovu prethodnih jednačina izveden je faktor množenja m :

$$m = \left[\frac{1,219 + L_{da}^{0.4}}{1,219 + L_{wa}^{0.4}} \right]^{2.5}. \quad (3.16)$$

Konačno izvedeni faktor skaliranja koji povezuje osvetljaje okruženja i displeja je:

$$sf = \frac{1}{L_{dmax}} \left[\frac{1,219 + \left(\frac{L_{dmax}}{2}\right)^{0.4}}{1,219 + L_{wa}^{0.4}} \right]^{2.5} . \quad (3.17)$$

Ovaj algoritam su kasnije unapredili Ferwerda sa koautorima (Ferwerda et al., 1996) i Ward sa koautorima u radu (Ward Larson et al., 1997). Ferwerda je razvio model vizuelne adaptacije za sintezu realističnih slika, baziran na psihofizičkim eksperimentima, koji koristi ljudski vizuelni sistem. Ovaj model snima promene u pragovima vidljivosti, izgledu boje, oštini vida, kao i u osetljivosti tokom vremena koja je izazvana mehanizmima adaptacije ljudskog vizuelnog sistema. Rezultujuće slike bolje predstavljaju scenu u širokom opsegu nivoa osvetljaja. Ward je sa koautorima predstavio tehniku koja koristi podešavanje histograma za reprodukciju perceptualno pouzdanih tonova scena širokog dinamičkog opsega. Autori su se fokusirali na vidljivost objekata i kontrast slike, sa dodatnim ciljem da subjektivni osećaj čoveka gledanjem ovako generisane slike bude sličan kao kad gleda realnu scenu.

Tumblin je sa koautorima (Tumblin et al., 1999) predložio dva nova operatora bazirana na prethodnim radovima, korišćenjem karakteristika procesa adaptacije ljudskog vizuelnog sistema. Prvi od njih generiše sliku za prikaz upotrebom nekoliko slojeva osvetljaja i karakteristikom površine. Nedostatak ovog pristupa je što radi samo za sintetički generisane slike. U drugom metodi vrši se interaktivno podešavanje finih detalja u regionu oko pogleda posmatrača, a istovremeno i kompresija ostatka slike. Oba predložena metoda ne zahtevaju značajno izdvajanje resursa resursa.

Drago i koautori (Drago et al., 2003) su predložili algoritam za globalno tonsko mapiranje. On je takođe zasnovan na logaritamskoj kompresiji vrednosti osvetljaja i imitira odziv ljudskog oka na svetlost. U cilju unapređenja kontrasta u tamnim oblastima predložena su unapređenja u proceduri gama korekcije. Konačna funkcija koju autori predlažu za izračunavanje vrednosti koja će se prikazivati na displeju za svaki piksel ima sledeći oblik:

$$L_d = \frac{L_{dmax} * 0.01}{\log_{10}(L_{wmax} + 1)} * \frac{\log_{10}(L_w(x) + 1)}{\log_{10}\left(2 + 8 * \left(\frac{L_w(x)}{L_{wmax}}\right)^{\frac{\log b}{\log 0.5}}\right)}, \quad (3.18)$$

pri čemu parametar b ima vrednosti $[0,1]$, a $L_{dmax} = 100cd/m^2$. Vrednosti osvetljaja scene računaju se logaritamskim funkcijama sa različitim osnovama. Funkcija \log_2 koristi se za tamne oblasti scene u cilju postizanja dobrog kontrasta i vidljivosti, dok se \log_{10} koristi za visoko osvetljene delove scene.

Pattanaik je sa grupom autora (Pattanaik et al., 2000) predložio novi operator tonskog mapiranja koji uzima u obzir sve bitne efekte ljudskog vizuelnog sistema. Ovaj model oponaša mrežnjaču u oku i izračunava vrednosti za svaki piksel na slici. Od korisnika se zahteva da odredi reference za „crno“ i „belo“, a potom model ocenjuje izgled svakog signala u skladu sa ovim vrednostima. Na ovaj način stvaraju se promene u vizuelnoj adaptaciji. Operator je pogodan za upotrebu u realnom vremenu, jer zbog upotrebe jedinstvenog modela adaptacije nema potrebe za obimnim računanjima.

U radu (Mantiuk et al., 2008) prikazan je operator tonskog mapiranja koji minimizuje distorzije vidljivog kontrasta u raznim uređajima za prikaz sadržaja. Ovaj operator određuje težinske faktore distorzija kontrasta na osnovu predviđanja baziranih na ljudskom vizuelnom sistemu, što je slučaj i u značajnom broju prethodnih radova. Autori koriste statistiku slike višeg reda i posebnu tehniku za optimizaciju matematičkih problema, tzv. kvadratno programiranje. Predloženom tehnikom podešava se dati sadržaj za optimalni kontrast, uzimajući u obzir ambijentalno osvetljenje i karakteristiku displeja.

Svi prethodno opisani algoritmi vezani su za globalno tonsko mapiranje. Dalje će biti opisani neki od algoritama za lokalno mapiranje. Jedan od najranijih radova vezan za ovu temu je predstavio je Chiu sa svojim kolegama (Chiu et al., 1993). Oni su predložili algoritam koji skalira piksele kompjuterski generisane slike, tako da je moguće prikazati ih na displeju, pri čemu je ovo skaliranje prostorno neuniformno. Istraživanjem globalnih operatora došli su do zaljučka da primena iste funkcije mapiranja na sve piksele ne daje uvek najbolje rezultate. Chiu i saradnici su definisali sledeću funkciju:

$$L_d(i, j) = L_w(i, j) * s(i, j), \quad (3.19)$$

gde se sa $s(i, j)$ definiše lokalno usrednjavanje piksela korišćenjem Gausovog filtriranja i skalirajućeg faktora. Nedostatak ovog pristupa je njegova računarska zahtevnost.

U radu (Pattanaik et al., 1998) razvijena je tehnika bazirana na multiskalirajućoj predstavi oblika, osvetljaja i procesiranju boje u ljudskom vizuelnom sistemu. Algoritam uzima u obzir odzive čepića i štapića u ljudskom oku i na taj način kreira računarski model adaptacije i prostorne vizije za realističnu reprodukciju tonova. Model se sastoji iz dva dela, gde jedan deo predstavlja vizuelni model, dok je drugi zadužen za prikaz na displeju. Vizuelni deo obrađuje ulaznu sliku i koduje uočeni kontrast za hromatske i ahromatske kanale filtriranjem, odnosno propuštanjem opsega. Deo za prikaz na displeju preuzima ovu kodovanu informaciju i rekonstruiše izlaznu sliku. Ovaj model je računarski zahtevan usled velikog broja operacija filtriranja i neophodnih međufaza obrade.

Reinhard sa grupom autora (Reinhard et al., 2002) predlaže metod koji podseća na postupke koji se obavljaju prilikom izrade fotografije. Lokalni operator definisan je preko globalnog, korišćenjem sledeće jednačine:

$$L_d(x) = \frac{L(x)}{1 + L(x)} . \quad (3.20)$$

Proširenjem prethodne jednačine, tako da visoki osvetljaji budu pod kontrolom, autori su izveli sledeću jednačinu:

$$L_d(x) = \frac{L(x)(1 + \frac{L(x)}{L_{white}^2})}{1 + L(x)} , \quad (3.21)$$

pri čemu je L_{white} najmanji osvetlaj koji će biti mapiran kao slabo bela boja. Prethodno definisani operator tonskog mapiranja zadržava ivice na slici i onemogućava pojavu oreola oko objekata („halo“ efekti). Dodatna prednost je što ne zahteva nikakvu kalibraciju. Sličan algoritam sa funkcijom redukcije opsega, bez modelovanja ostalih efekata, izložen je u (Ashikhmin, 2002).

U radu (Durand & Dorsey, 2002) autori koriste bilateralni filter za očuvanje ivica da bi razdvojili sliku na dva sloja. Osnovni sloj dobijen je pomenutim filtriranjem i u njemu je redukovan kontrast, dok su detalji očuvani u drugom sloju. Da bi omogućili brzu

dekompoziciju u pomenuta dva sloja i izbegli artefakte, autori predlažu brz i robustan filter za očuvanje ivica.

Fattal sa grupom autora (Fattal et al., 2002) predlaže metod koji je konceptualno jednostavan, računarski efikasan, robustan i lak za upotrebu. Metod se zasniva na slabljenju amplituda visokih priraštaja osvetljaja, koji postoje u HDR scenama, tako što vrše kompresiju visokih priraštaja, čuvajući detalje. Slika sa užim dinamičkim opsegom (LDR) dobija se tako što se po identifikovanju promena intenziteta umanjuju visoki priraštaji.

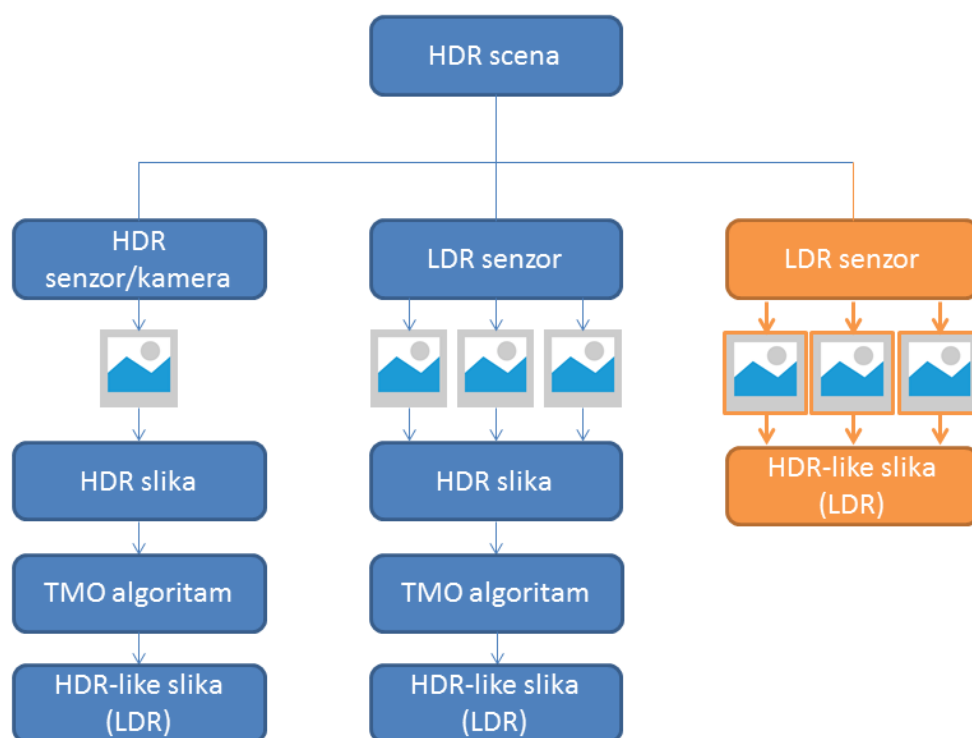
3.7 Specifičnosti HDR-like slike

Ranije je pomenuto da postoji nekoliko načina za generisanje HDR slike i opisani su senzori i kamere pomoću kojih je to moguće uraditi. Pored hardverskog načina generisanja slike gde se sva obrada izvršava na nivou senzora, veoma su zastupljeni i softverski metodi, koji uglavnom podrazumevaju primenu određenih algoritama u fazi postprocesiranja. Ovi metodi se naročito koriste u primenama gde se zahteva veći dinamički opseg, naročito u fotografiji, kompjuterskoj grafici, naučnim istraživanjima itd. Nekada se na ovaj način mogu dobiti i bolji rezultati od onih koji se postižu primenom hardverskih metoda.

Najveći nedostatak korišćenja softverskih metoda, odnosno fuzije više slika, je to što zahtevaju nekoliko slika iste scene, što nije moguće kada se na sceni nalaze pokretni objekti ili scena sadrži promenljive izvore iluminacije. Još jedan nedostatak ovih metoda je potreba za moćnim računarima na kojima je vreme izvršavanja metoda prilično dugo, čak i za slike ne toliko velike rezolucije. Obrada slika HD rezolucije može trajati i nekoliko sekundi, te zato nema smisla govoriti o brzom i efikasnom rešenju. Treba imati na umu da softverski metodi generišu slike koje su nekada privlačnije ljudskom oku, ali oni uglavnom ne predstavljaju precizno snimljenu scenu (Darmont, 2012).

Nije uvek neophodno imati HDR sliku sačuvanu u punom opsegu. Nekada se kombinacijom više LDR slika može kreirati fuzionisana slika, koja je takođe LDR, ali ovakva slika sadrži znatno više detalja. Sve je učestalije da se za ovaj tip slika koristi izraz „HDR-like“. To su zapravo LDR slike koje su poboljšane ili primenom tehnika fuzije na nekoliko različito eksponiranih slika, ili su dobijene primenom operatora tonskog mapiranja na HDR slikama. Ove HDR slike mogu biti dobijene na dva načina, korišćenjem LDR ili HDR senzora. Način generisanja HDR-like slike snimanjem HDR scene prikazan je na slici 3.11.

Bitno je pomenuti konfuziju koju stvaraju proizvođači savremene potrošačke elektronike kada na svojim uređajima označe da imaju mogućnost generisanja HDR sadržaja. Treba reći da ovo nisu prave HDR, već HDR-like slike. Prvo što je uočljivo je da ovakvi uređaji nemaju HDR displeje, a takođe ni format slike u kom je sačuvana nije HDR.



Slika 3.11. Načini generisanja HDR-like slike

3.7.1 Algoritmi za formiranje HDR-like slike

Fuzija slika u boji, kao i efekti poboljšanja slike u dva domena, u proširenju dinamičkog opsega i dubini fokusa, predstavljeni su u (Bogoni & Hansen, 2001). Njihov metod obezbeđuje mehanizam za spajanje više monohromatskih slika u jedan kompozitni rezultat, kroz identifikovanje istaknutih detalja sa izvornih slika u različitim razmerama i orijentacijama. Predloženi metod se može primenjivati za crno-bele i slike u boji, ali i za multispektralne slike. Autori su proširili generalni koncept fuzije slika korišćenjem Laplasovih piramida tako da se koncept može primeniti i na slike u boji. Svaki piksel su posmatrali kao vektor u odgovarajućem prostoru boja. Prvi korak u njihovom metodu predstavlja registraciju slika u zajedničkom koordinatnom sistemu koristeći globalnu procenu pokreta. Potom su primenjivali lokalnu procenu pokreta u cilju registracije lokalne strukture scene, da bi mogli da utvrde ukoliko postoje određeni pokreti u izvornim slikama. Pošto su uklopili slike na ovaj način, vršili su fuziju slika.

Još jedna tehnika fuzije slika predložena je u (Mertens et al., 2009). U ovom radu je fuzija slika vođena jednostavnim merama kvaliteta kao što su kontrast i zasićenje. Za procenu kontrasta koriste Laplasov filter i na osnovu njega izvode jednostavan indikator C . Za procenu zasićenja koriste faktor S koji predstavlja standardnu devijaciju R, G i B kanala za svaki piksel. Treći faktor, E , odnosi se na kvalitet ekspozicije i izveden je množenjem rezultata koji se dobijaju primenom definisane Gausove krive na svaki kanal nezavisno. Prethodno opisanim postupkom dobija se težinska funkcija:

$$W_{ij,k} = C_{ij,k}^{w_c} \times S_{ij,k}^{w_s} \times E_{ij,k}^{w_E}, \quad (3.22)$$

gde w_c , w_s i w_E predstavljaju težinske eksponente, za piksel sa koordinatama i, j za k -tu sliku. Neophodno je uraditi normalizaciju težinskih mapa sa N slika kako bi njihov zbir bio jednak 1 korišćenjem sledećeg izraza:

$$\hat{W}_{ij,k} = \left[\sum_{k=1}^N W_{ij,k} \right]^{-1} W_{ij,k}. \quad (3.23)$$

Rezultujuća slika određuje se preko sledeće jednačine, pri čemu se I odnosi na odgovarajuću sliku u sekvenci:

$$R_{ij} = \sum_{k=1}^N \hat{W}_{ij,k} I_{ij,k} . \quad (3.24)$$

Ke sa grupom autora u svom radu (Ke et al., 2015) predlaže metod koji se konceptualno naslanja na prethodni. U ovom radu, koji je baziran na ljudskom vizuelnom sistemu, dodatno koriste i indeks ukupnog kvaliteta slike, kao i lokalno zasićenje.

Goshtasby je u svom radu predstavio metod koji deli nekoliko ulaznih slika na uniformne blokove i za svaki blok određuje sliku koja sadrži najviše informacija unutar datog bloka (Goshtasby, 2005). Odabrane slike se potom spajaju korišćenjem predložene funkcije, vodeći računa da nijedna vrednost fuzionisanih piksela ne pređe vrednost 1. Za procenu količine informacija u određenom delu slike Goshtasby koristi entropiju, prema sledećim izrazima za crno-belu i sliku u boji uz pretpostavku da je p_i verovatnoća da određeni piksel na slici ima vrednost i :

$$E_g = \sum_{i=0}^{255} -p_i \log p_i , \quad (3.25)$$

$$E_c = \sum_{i=0}^{255} -p_i^c \log(p_i^c) . \quad (3.26)$$

Kada se ovako odrede blokovi koeficijenata, koriste se interpolacione funkcije kako bi se izbegli diskontinuiteti među blokovima. Finalna slika dobija se množenjem ulaznih slika sa težinskim faktorima koji su definisani kao :

$$W_{j,k}(x, y) = \frac{G_{j,k}(x, y)}{\sum_{m=1}^{n_r} \sum_{n=1}^{n_c} G_{mn}(x, y)} , \quad (3.27)$$

pri čemu je

$$G_{j,k}(x, y) = \exp \left\{ -\frac{(x - x_{jk})^2 + (y - y_{jk})^2}{2\sigma^2} \right\} , \quad (3.28)$$

gde n_r i n_c određuju poziciju bloka, a x_{jk} i y_{jk} su koordinate unutar bloka jk .

Bilcu sa koautorima (Bilcu et al., 2008) na sličan način dolazi do finalne slike, tako što polazne slike sa različitim ekspozicijama množi odgovarajućim težinskim faktorima. Takođe, Gelfand sa grupom autora koristi težinske mape za dobijanje finalne slike koje su bazirane najjednostavnijim eksponencijalnim funkcijama (Gelfand et al., 2010).

Jung sa ostalim autorima u (Jung et al., 2013) inicijalno generiše težinsku funkciju, koja je bazirana na nivoima osvetljaja, a potom primenjuje bilateralno retuširanje na bazi filtra da bi se poboljšali detalji na slici, naročito u tamnim regionima.

Metod koji je baziran na fuziji dve različito eksponirane slike i koristi informaciju o prostornoj raspodeli intenziteta prikazan je u (Yu et al., 2013). Inicijalno se kreira slika na osnovu težinskih faktora izračunatih za pozadinski sadržaj usrednjene slike, gde je pozadinski sadržaj dobijen konvolucijom osvetljaja ulaznih slika sa Gausovom funkcijom standardne devijacije za vrednost 15. Potom se ova među slika poboljšava uklanjanjem istog pozadinskog sadržaja i njegovim ponovnim generisanjem na predloženi način.

Multimodalna fuzija slike je predložena u radu (Shah et al., 2014). Autori predlažu okruženje kao uopšteno rešenje i za primene koje se odnose na multifokalnu, multiekspozicijsku i multispektralnu fuziju slike i video sadržaja. Oni predlažu rešenje bazirano na statističkim karakteristikama lokalnog okruženja određenog piksela. Koriste sopstvenu vrednost objektivne procene kovarijanse matrice bloka slike, koja zavisi od jačine ivica datog bloka, te tako definišu značaj piksela. Ovaj generalizovani značaj piksela predstavlja meru korisne informacije i koristi se u procesu fuzije.

Nijedan od do sada pomenutih algoritama nije uzimao u obzir artefakte koji se javljaju prilikom postojanja pokretnih objekata na sceni. Kada se objekti na sceni pomeraju, oni su prilikom različitih ekspozicija scene na različitim mestima, pa je isto i na fuzionisanoj slici. Zato što se pojavljuju kao duhovi na sceni, za uklanjanje artefakata ove vrste koristi se izraz „de-ghosting“. Li i Kang u svom radu (Li & Kang, 2012) predlažu metod za koji prvo rade fuziju tri slike na bazi tri faktora procenom težinskih mapa (slično kao u (Mertens et al., 2009)), a potom rade korekciju ovih mapa rekursivnim filtriranjem čime se značajno unapređuje preciznost. Izraz za rekursivno

filtiranje k -tog piksela redefinisane funkcije $J[k]$ na osnovu ulazne funkcije $I[k]$ ima oblik:

$$J[k] = (1 - a^d)I(k) + a^d J(k - 1), \quad (3.29)$$

pri čemu $a \in [0,1]$ predstavlja koeficijent povratne sprege, a d rastojanje među susednim pikselima.

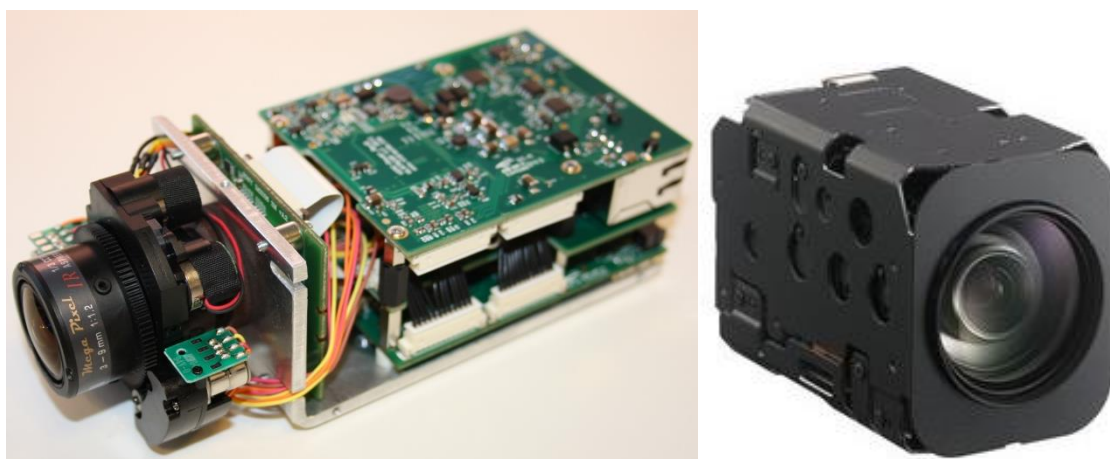
Kang sa koautorima u (Kang et al., 2016) predlaže metod baziran na strukturalnoj sličnosti pojedinih regiona u cilju detekcije i dalje obrade pokretnih delova slike, kako bi uspešno bio izvršen „de-ghosting“.

4 Opis predloženog metoda

U prethodnoj glavi detaljno je opisana HDR tehnologija, naglašen njen značaj i namera proizvođača da je implementiraju u nove proizvode. Izvesno je da će u bliskoj budućnosti postojati sve više HDR sadržaja i u nekom trenutku ovaj tip sadržaja postaće standard. U međuvremenu je potrebno premostiti jaz koji postoji između sadašnjih mogućnosti infrastrukture i budućih mogućnosti koje će ispratiti HDR. Sve do trenutka masovne ekspanzije HDR senzora biće korisno unapređivati mogućnosti postojećih LDR senzora. Kombinovanje više slika iste scene sa različitim ekspozicijama treba da rezultuje poboljšanjem kvaliteta finalne slike i prisustvom što više detalja koji stvaraju pozitivan efekat unapređenja korisničkog iskustva. Ovo se postiže primenom odgovarajućih HDR-like algoritama u fazi generisanja slike (u samoj kameri) ili u fazi postprocesiranja. Novi metod za generisanje HDR-like slike predložen je i analiziran u (Popadić et al., 2016). Metod će biti detaljno opisan u ovoj glavi.

Dinamički opseg kamere ograničen je dinamičkim opsegom korišćenog senzora. Ranije je objašnjeno da dinamički opseg scene može biti znatno širi od dinamičkog opsega

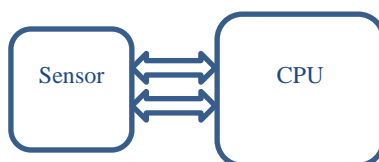
slike zbog ograničenja A/D konvertora. U takvoj situaciji brojni detalji sa scene ne mogu biti adekvatno prikazani na slici. Trenutno su standardne digitalne kamere uglavnom ograničene na snimanje samo 8-bitne ili 12-bitne slike, te na taj način ne pokrivaju kompletan dinamički opseg osvetljaja u stvarnom svetu. Poznato je da se HDR tehnika snimanja koristi baš u ovakvim situacijama, odnosno za snimanje većeg dinamičkog opsega osvetljaja od onog koji pružaju standardne digitalne kamere. Generisanje ovakvih slika koristi se primenom serije tehnika obrade. Sistemi sa ovako unapređenim funkcionalnostima sve se više koriste u automobilskoj industriji, praćenju saobraćajnica i drugim industrijskim, bezbednosnim i vojnim aplikacijama (Darmont, 2012). Kamere koje se koriste u prethodno pomenutim aplikacijama mogu se razlikovati po kvalitetu i ceni. Mogu se naručiti kao gotovi proizvodi u svojim kućištima za finalnu upotrebu ili kao moduli koji mogu biti izmenjeni, a zatim ugrađeni u kućište čiji tip zavisi od primene. Moduli, kao jedna vrsta kamera, često se koriste u industriji. Oni su generalno jeftiniji i obezbeđuju veći stepen slobode u finalnoj primeni. Primer dva modula industrijskih kamera koje su proizvele kompanije Vlatacom (Vlatacom Institute, 2013) i Sony (Sony, 2016) prikazan je na sledećoj slici.



Slika 4.1. Industrijski moduli

Tipična arhitektura koja predstavlja vezu između senzora i procesora (CPU), prikazana je na slici 4.2. Postoji interfejs za konfigurisanje senzora i magistrala preko koje senzor šalje podatke procesoru, zajedno sa sinhronizacionim signalima. Zadatak procesora je da konfiguriše senzor i da nakon toga prima podatke sa senzora preko odgovarajućeg odabranog interfejsa. U toku procesa konfiguracije procesor zadaje i parametar automatskog vremena ekspozicije.

Procesori u kamerama uglavnom nemaju veliku računarsku moć, ali imaju specijalizovane hardverske blokove koji su optimizovani za rad sa slikom. Tu se misli na ulazni blok koji prihvata podatke sa senzora, na delove koji učestvuju u formiranju i poboljšanju slike, kao i naročito specijalne koprocesore za MPEG4/H.264/H.265 ili MJPEG kompresiju. Primera radi, fullHD kompresija video signala koju postiže ovakav kompresor na radnom taktu od oko 400MHz, zahteva za dekompresiju savremeni multiježgarni računar sa radnim taktom visoke učestanosti (npr. 4 jezgra sa bar 2Ghz). Ove kamere su uglavnom zatvoreni sistemi i veoma je teško vršiti bilo kakve modifikacije, naročito softverske. Širenje dinamičkog opsega snimanjem više standardnih slika i njihovo spajanje u jednu zahteva promene u softveru kamere. Većina proizvođača kamera ne dozvoljava bilo kakvu izmenu ili pristup softveru kamere, što ove proizvode čini nepodobnim za bilo koju vrstu poboljšanja.



Slika 4.2. Tipična veza između senzora i procesora

Dodatno treba naglasiti da su standardne digitalne kamere uglavnom opremljene funkcijom automatske ekspozicije, tako da se automatski postavljaju vrednosti otvora blende i vreme ekspozicije. Ovo ima smisla za scene koje su dobro i jednako osvetljene. Kada se snima scena sa atipičnom distribucijom svetlih i tamnih elemenata, tj. kada je scena loše (nejednako) osvetljena, dolazi se do zaključka da vreme auto-ekspozicije ne može biti optimalno.

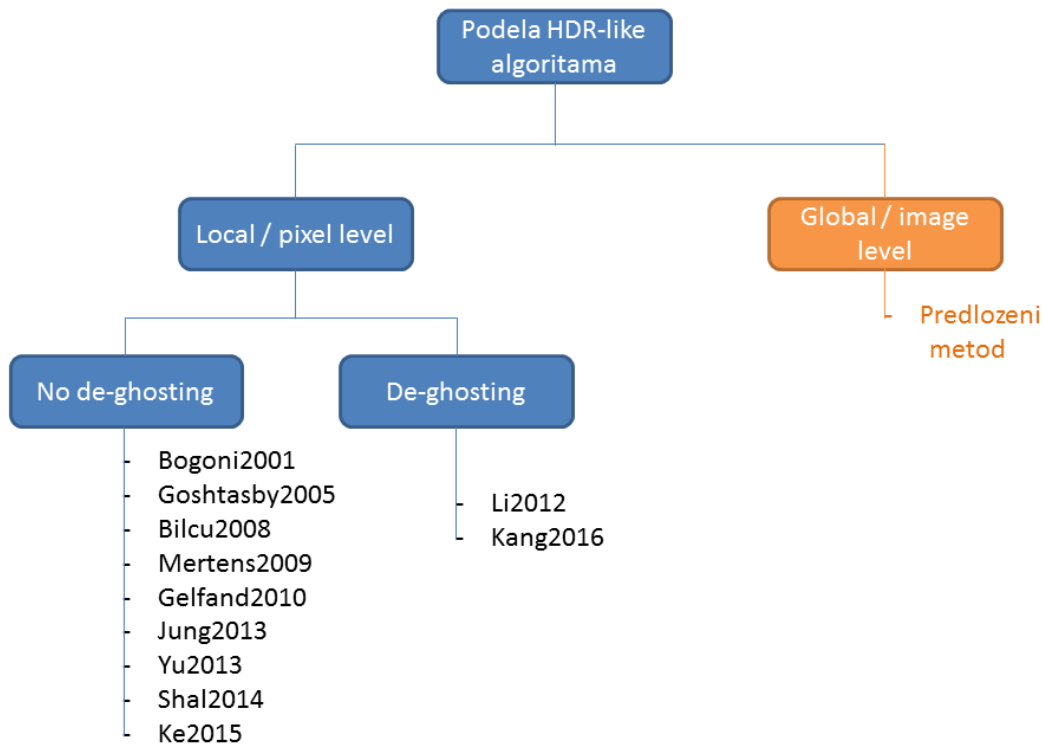
U prethodnim glavama objašnjeno je da se scena širokog dinamičkog opsega snima ili upotrebom posebnih senzora ili snimanjem više standardnih slika i njihovim spajanjem u sledećoj fazi, primenom odgovarajućih softverskih algoritama. Kada se misli na unapređenje postojećih kamera tada treba odbaciti mogućnost zamene senzora, jer se time ne postiže željeni efekat zato što je kompletan hardver kamere zasnovan na principu funkcionisanja upravo tog korišćenog senzora. Preostaje, dakle, da se unapređenja izvrše softverskim putem.

Pored navedenih referenci koje se odnose na generisanje HDR i HDR-like slika, ovde treba pomenuti i algoritam za generisanje HDR slike od dve različito eksponirane slike, predloženo u (Jung & Ho, 2013). Glavni nedostatak prethodno pomenutih algoritama koji vrše fuziju više standardnih slika je njihova brzina izvršavanja. Ovi algoritmi imaju dugačko vreme obrade, zbog velikog broja računskih operacija na kojima su zasnovani, te ih zato nije moguće implementirati da rade u realnom vremenu. Za stvarno unapređenje funkcionalnosti kamere neophodno je da se sva dodatna obrada slike izvršava u realnom vremenu i da se na taj način postignu eventualna mala kašnjenja koja se unose u lanac obrade slike. Analizirajući postojeće algoritme dolazi se do zaključka da svi oni rade na nivou piksela, što dodatno usporava vreme izvršavanja.

Predloženi metod predstavlja jednostavno rešenje za poboljšanje slike kroz povećanje vidljivih detalja. Manipulacija slikom obavlja se na globalnom nivou, što je drugačije u odnosu na analizirane postojeće algoritme koji imaju lokalni karakter i vrše izračunavanja na nivou piksela. Ovo je prikazano je na slici 4.3.

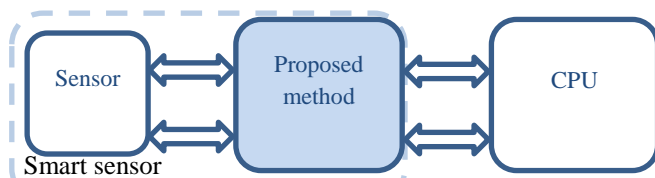
Cilj predloženog metoda je da se poboljšaju funkcionalnosti postojećih standardnih digitalnih kamera, sa primarnim fokusom na industrijske kamere, uz što niže troškove implementacije. Takođe, nema potrebe za izmenom postojećeg softvera kamere koji se pokreće prilikom njenog uključivanja. Ultimativni zahtev prilikom projektovanja metoda je njegova brzina i jednostavnost kako bi bilo postignuto malo kašnjenje, a time i omogućen rad i primena u realnom vremenu. Sve navedeno postiže se modifikacijom arhitekture kamere tako da implementacija izgleda kao na slici 4.4.

Module industrijskih kamera moguće je modifikovati na predloženi način prekidanjem postojeće veze između procesora i senzora (što se uglavnom obavlja preko jednog flet kabla) i umetanjem novog čipa između njih. Ovako se najefikasnije koriste postojeći resursi, bez ikakve potrebe za modifikacijom postojećeg hardvera ili softvera. Metod je moguće implementirati u FPGA ili neki drugi čip specijalne namene. Format slike koja se šalje procesoru (koju procesor očekuje posle uspešno izvršene konfiguracije) ostaje nepromenjen, pa je ispunjena potpuna kompatibilnost sa procesorom.



Slika 4.3. Poređenje predloženog metoda sa postojećim

U predloženoj arhitekturi, senzor i čip sa implemenitranim metodom formiraju "smart senzor", prikazan isprekidanom linijom na slici 4.4. Iste podatke koje je procesor ranije slao senzoru, sada prima ova nova komponenta i na odgovarajući način ih prosleđuje senzoru. To znači da se komunikacija između procesora i implementiranog metoda ostvaruje istim interfejsom koji poseduje senzor. U cilju kreiranja HDR-like slike, tri slike se spajaju u jednu. Kako bi ih obradio na odgovarajući način, metod mora da utvrdi težinske koeficijente i da upravlja senzorom, koristeći prvobitno izračunato vreme automatske ekspozicije koje je poslao procesor. Kada se uspešno kreira slika, šalje se procesoru, pa na ovaj način, sa gledišta procesora, ništa nije promenjeno, jer on dobija sliku isto kao i da nije bilo promena u arhitekturi.

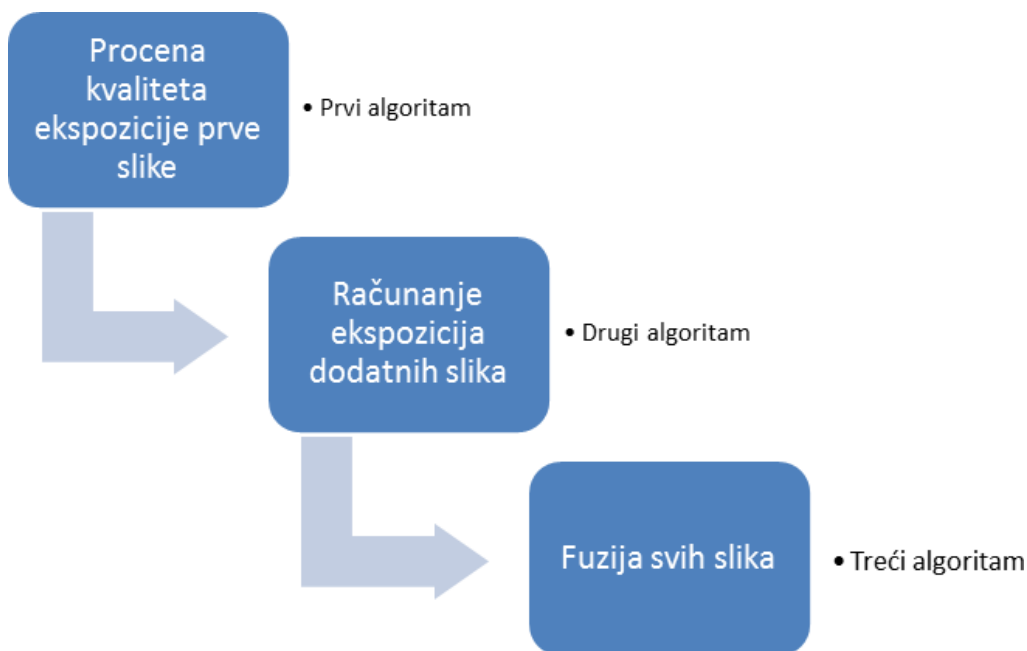


Slika 4.4. Arhitektura metoda

Novi metod kreira HDR-like sliku koristeći tri slike snimljene sa različitim vremenima ekspozicije. Na ovaj način se značajno proširuje snimljeni dinamički opseg scene. Predloženi metod je organizovan tako da se sastoji od tri algoritma:

1. algoritam za procenu optimalnosti vremena automatske ekspozicije,
2. algoritam koji određuje vreme ekspozicije za dve dodatne slike, pri čemu je jedna sa kraćim, a druga sa dužim vremenom ekspozicije od vremena auto-ekspozicije, i
3. algoritam za kreiranje HDR-like slike fuzijom tri prethodno dobijene slike.

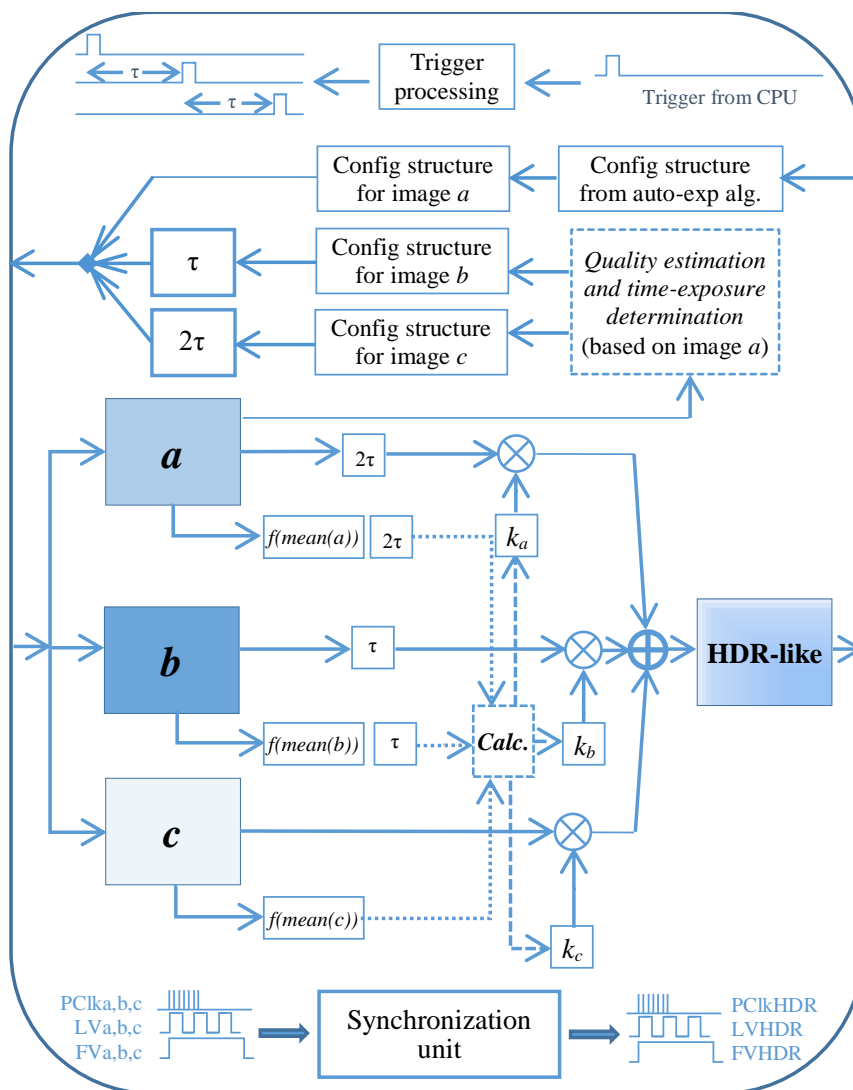
Izvršavanje metoda realizovano je u tri sekvencijalna koraka, pri čemu svaki od njih predstavlja odgovarajući algoritam, kao što je prikazano na slici 4.5. Postupak se za sada sprovodi polu-automatski, sa namerom da se doradi tako da izvršavanje bude potpuno automatsko, bez potrebe za intervencijom čoveka. Takođe, ne postoji potreba za detaljnim poznavanjem tehničkih karakteristika kamere. Potrebno je samo poznavati protokol senzora kako bi ga bilo moguće konfigurisati i pripremiti sliku na način koji je kompatibilan sa protokolom koji implemetiranim u procesoru.



Slika 4.5. Prikaz izvršavanja koraka metoda

Prodložena struktura implementacije metoda prikazana je na slici 4.6. Metod može biti implementiran na nekoj od predloženih programabilnih komponentata koja je

postavljena na dodatnoj ploči koja se ugrađuje u kameru i predstavlja most između procesora i senzora. Snimanje slika aktivira se nakon podešavanja parametara konfiguracije za određenu sliku. Metod uzima ove slike u pomerenim vremenskim intervalima τ , tri puta brže nego što to radi procesor, i spaja ih u HDR-like sliku. Ova finalna HDR-like slika treba da se uz sinhronizacione signale (*PCIkHDR*, *LVHDR* i *FVHDR*) prenosi do procesora. U konačnoj implementaciji format ove slike je isti (format Bayer matrice) kao RAW slika koju šalje senzor.



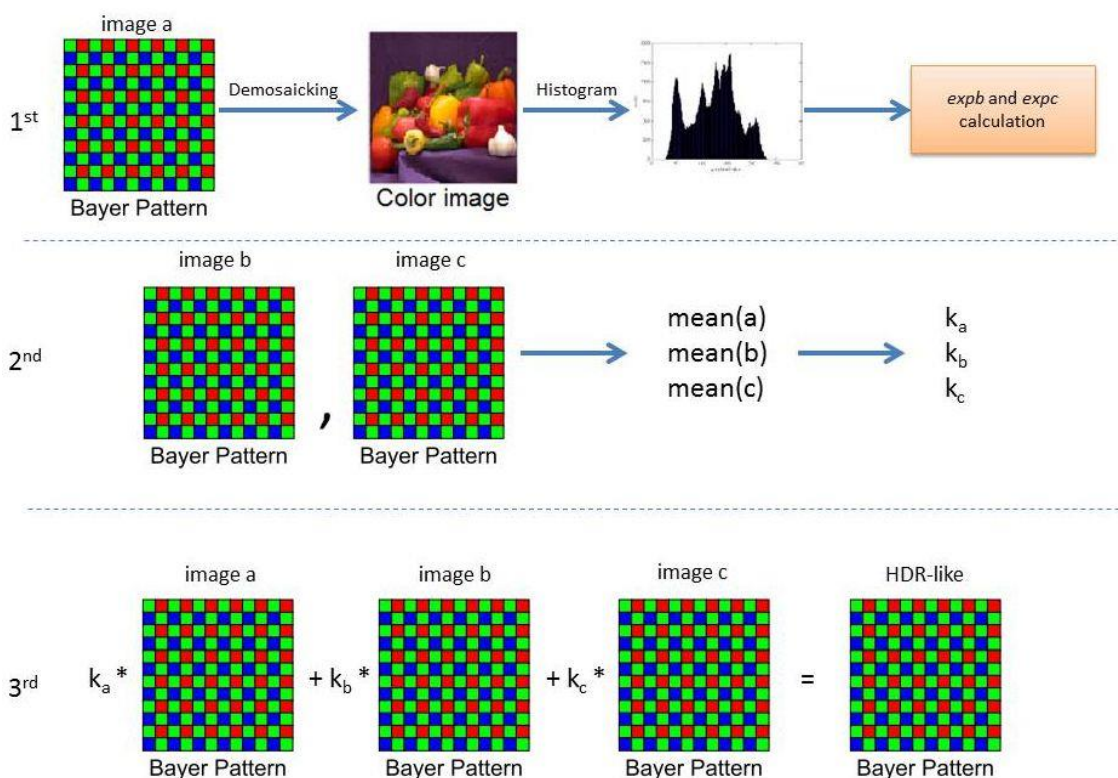
Slika 4.6. Struktura implementacije metoda u „smart sensor“ arhitekturi između senzora i procesora (CPU)

Uzevši u obzir da su standardne digitalne (industrijske) kamere opremljene funkcijom automatske ekspozicije, prvi korak predloženog metoda je da snimi i proceni kvalitet te

prve uzete slike. Ako kvalitet ove slike nije prihvatljiv prema predloženom kriterijumu, vreme auto-ekspozicije nije optimalno. U cilju poboljšanja kvaliteta slike, proces generisanja HDR-like slike nastavlja se uzimanjem još maksimalno dve slike, pomerene u vremenu za interval τ . Drugi korak predloženog metoda je algoritam koji izračunava vreme ekspozicije dve dodatne slike koje će učestvovati u finalnoj slici. Treći korak metode je algoritam koji vrši fuziju tri dobijene slike.

Slični algoritmi predstavljeni su u (Bilcu et al., 2008) i (Gelfand et al., 2010), ali oni imaju različite načine za izračunavanje koeficijenata, koristeći odgovarajuće ponderacione funkcije, kao što je ranije pomenuto. Predloženi metod za generisanje scenski mapirane HDR-like slike obavlja izračunavanja na globalnom nivou slike. Ovaj pristup čini algoritam jednostavnim i brzim, te dodatno ravnanje prelaza (smoothing) nije potrebno.

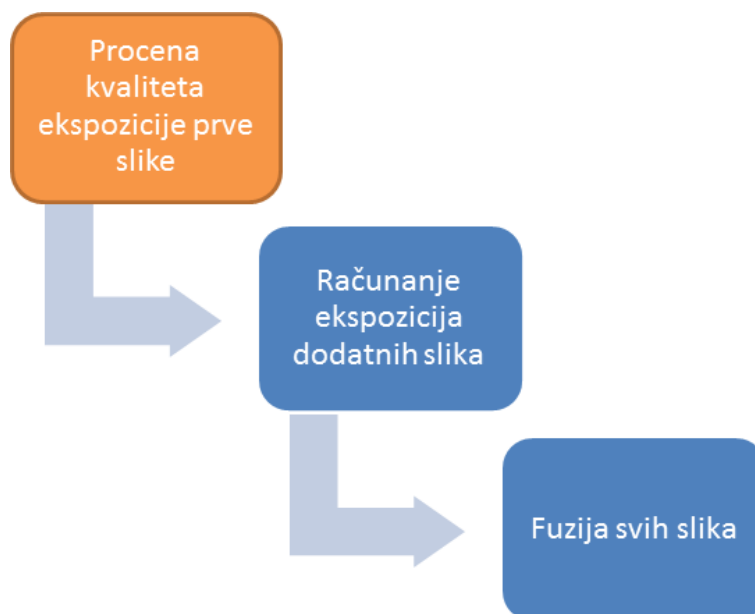
Koraci u lancu obrade slike izgledaju kao na slici 4.7.



Slika 4.7. Lanac obrade slike

U nastavku će detaljno biti opisan svaki od tri algoritma od kojih je sastavljen predloženi metod. Faze izvršavanja algoritama prikazane su na slikama 4.8, 4.15 i 4.19.

4.1 Algoritam za procenu kvaliteta ekspozicije



Slika 4.8. Prikaz izvršavanja prvog algoritma

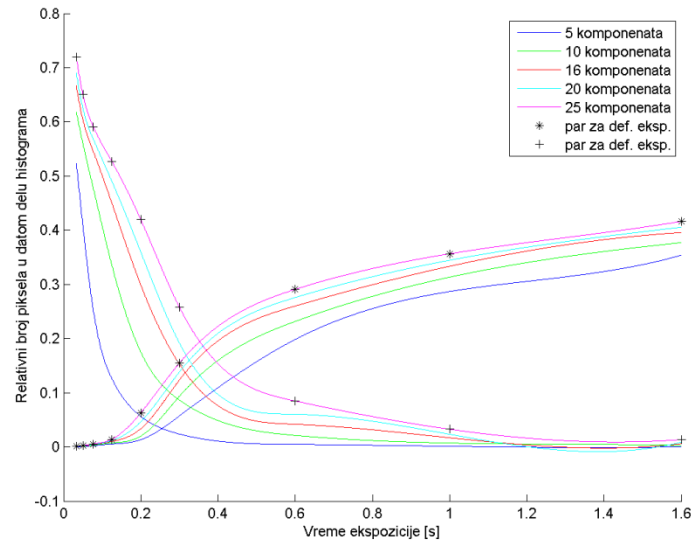
Prvi korak predloženog metoda za fuziju HDR-like slike predstavlja algoritam za procenu kvaliteta ekspozicije slike, bez korišćenja referentne slike, a njegova funkcija je da proceni kvalitet snimljene slike na osnovu automatske ekspozicije kamere.

Jedan od pristupa za određivanje kvaliteta ekspozicije slike bazira se na uzimanju sekvence od nekoliko slika, sve dok se ne utvrdi koja je od njih dobro eksponirana. U radu (Bilcu et al., 2008) kvalitet ekspozicije određuje se tako što se fiksiraju dva piksela na inicijalno eksponiranoj slici, jedan koji ima vrednost oko 341 i drugi čija je vrednost oko 682 (u sistemu koji radi akviziciju slike sa 10 bita). Potom se smanjuje vreme ekspozicije u sitnim koracima. Ako je vrednost označenog piksela koji je imao vrednost 682 u novoj slici manja od 10 i svi pikseli imaju vrednost manju od 1024, proces se zaustavlja i trenutna slika se zadržava. U suprotnom, proces se nastavlja novim smanjenjem vremena ekspozicije do konačnog čuvanja slike sa kraćim vremenom ekspozicije. Kada se povećava vreme ekspozicije, prati se obeleženi piksel sa vrednošću 341. Ako je na novoj slici vrednost ovog piksela veća od praga 682, proces se zaustavlja i čuva se trenutna slika. U suprotnom se proces nastavlja do konačnog čuvanja slike sa dužim vremenom ekspozicije. Predloženi proces može biti spor, jer je moguće snimiti i

više od tri slike, pa se na taj način unosi kašnjenje u obradi slike, čineći kamere nepodobnim za rad u realnom vremenu. Sličan metod je predstavljen u (Gelfand et al., 2010), gde se dobijaju vremena ekspozicije po specijalnom automatskom principu. Kratko vreme ekspozicije se izračunava u iterativnom postupku čiji je cilj da se postigne da 10% piksela bude svetlo (imaju vrednost iznad 239). Analogno prethodnom, dugo vreme ekspozicije određuje se u iterativnom postupku koji se ponavlja sve dok se ne dobije 10% piksela koji imaju vrednosti manje od 16. Pomenuti proces takođe može da bude dugotrajan jer, kao ni u prethodnom algoritmu, ne postoji ograničenje u broju snimljenih slika. U opisanom postupku računanja duge i kratke ekspozicije više od tri slike mogu biti snimljene, te je utrošeno vreme za izvršavanje algoritama proporcionalno broju sačuvanih slika. Iz svega navedenog proizilazi da nije uvek moguće ostvariti rad u realnom vremenu pomoću pomenutih algoritama.

Algoritam koji se ovde opisuje detaljno je predstavljen u radu (Popadić et al., 2016). Izveden je na osnovu eksperimentalnih rezultata, a služi za preprocesiranje u okviru metoda i glavni zadatak je da odredi kvalitet ekspozicije slike u realnom vremenu. Algoritam je izveden empirijski, na osnovu analize histograma sprovedene na 160 skupova slika, pri čemu se svaki skup sastoji od 7-9 različito eksponiranih slika koje predstavljaju istu scenu. Skup podataka koji je korišćen za analizu je javno dostupna EPFL baza koja se koristi u HDR istraživanjima i referencirana je u radu (Nemoto et al., 2015), kao i baza koja predstavlja nadogradnju prehodno navedene (EMPA Media Technology, 2015).

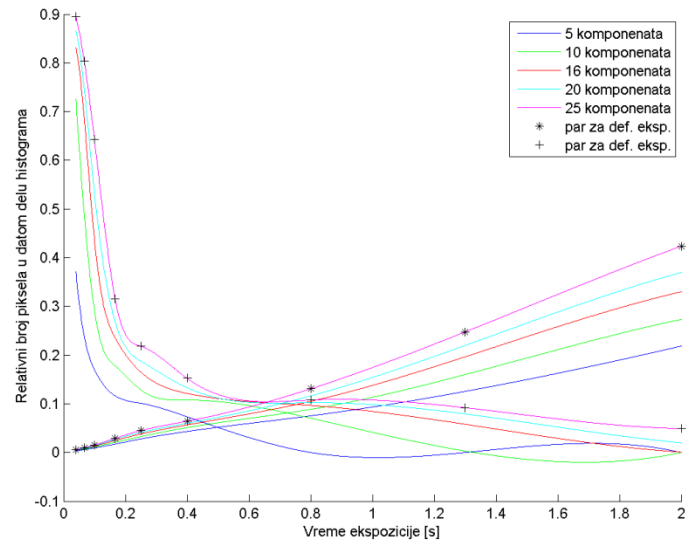
Cilj empirijske analiza bio je da se utvrde relevantni parametri na osnovu kojih se dalje može govoriti o kvalitetu ekspozicije slike. Koristeći polaznu ideju iz rada (Gelfand et al., 2010), analiziran je broj piksela koji se nalazi u različitom broju komponenata histograma i to je prikazano različito obojenim krivim linijama na slici 4.9 i slici 4.10. Analiza je izvršena za broj komponenata koje se nalaze u 5, 10, 16, 20 i 25 komponenata histograma. U tabeli 3. i tabeli 4. prikazane su vrednosti entropija.



Slika 4.9. Prvi primer presecanja krivih za procenu kvaliteta

Tabela 3. Vrednosti entropije slika iz prvog primera

Ekspozicija [s]	0,03	0,05	0,08	0,13	0,2	0,3	0,6	1	1,6
Entropija	5,27	5,89	6,43	6,94	7,37	7,59	7,29	6,82	6,29

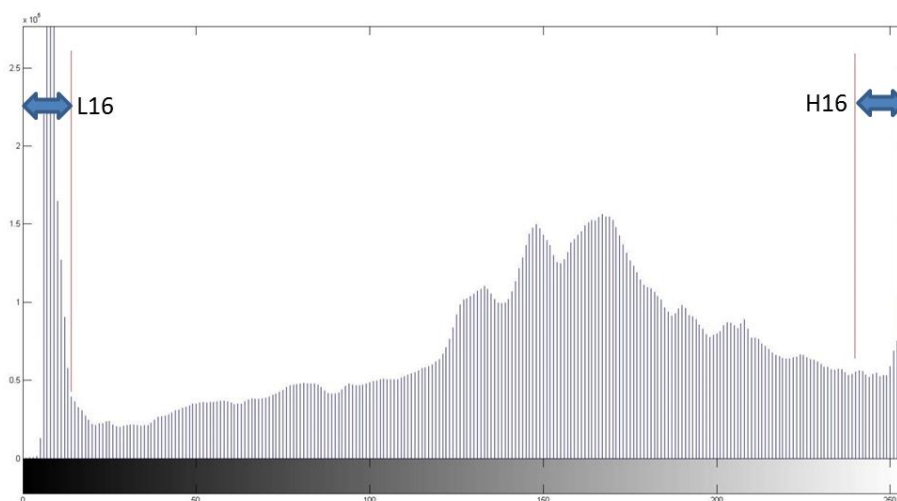


Slika 4.10. Drugi primer presecanja krivih za procenu kvaliteta

Tabela 4. Vrednosti entropije slika iz drugog primera

Ekspozicija [s]	0,04	0,07	0,10	0,17	0,25	0,40	0,80	1,30	2,00
Entropija	4,84	5,56	6,27	7,01	7,41	7,61	7,59	7,36	6,84

Potrebno je napomenuti da su slike iz skupa slika predstavljene u 8-bitnom formatu, što znači da je ukupan broj komponenata histograma 256. Svaki par krivih izvodi se interpolacijom vrednosti koje se računaju za isti broj, prethodno definisanih, najviših i najnižih komponenata histograma. Vrednosti se računaju za svaku od 9 slika iz seta. U preseku jednog para krivih očitavaju se vrednosti ekspozicije na apscisi. Opisana analiza je pokazala da je za procenu kvaliteta ekspozicije slike vrednost optimalnog broja komponenata histograma 16. Vrednosti ekspozicija na koje ukazuje analiza poklapaju se sa najvišom vrednošću entropije, kao što se vidi u prethodnim tabelama gde su crvenom bojom označene značajne vrednosti. Takođe, prema (Goshtasby, 2005) veća vrednost entropije ukazuje i na veći broj detalja na slici. Za sliku koja ima vrednost ekspozicije utvrđenu na prethodni način i subjektivno se potvrđuje da je baš ona najbolje eksponirana. Na slici 4.11. prikazani su segmenti koji su značajni za utvrđivanje kvaliteta ekspozicije slike.

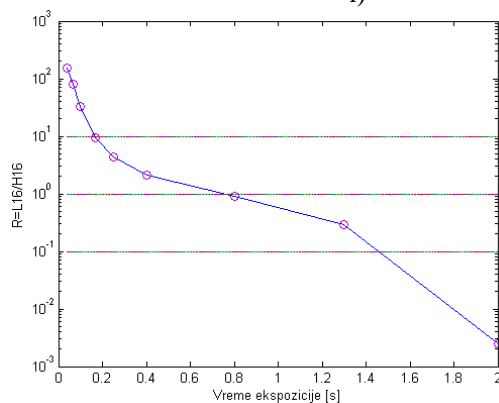
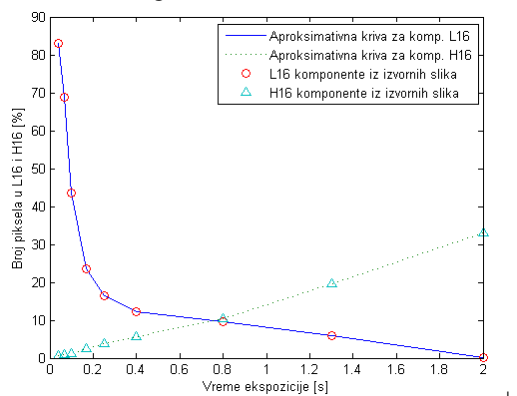
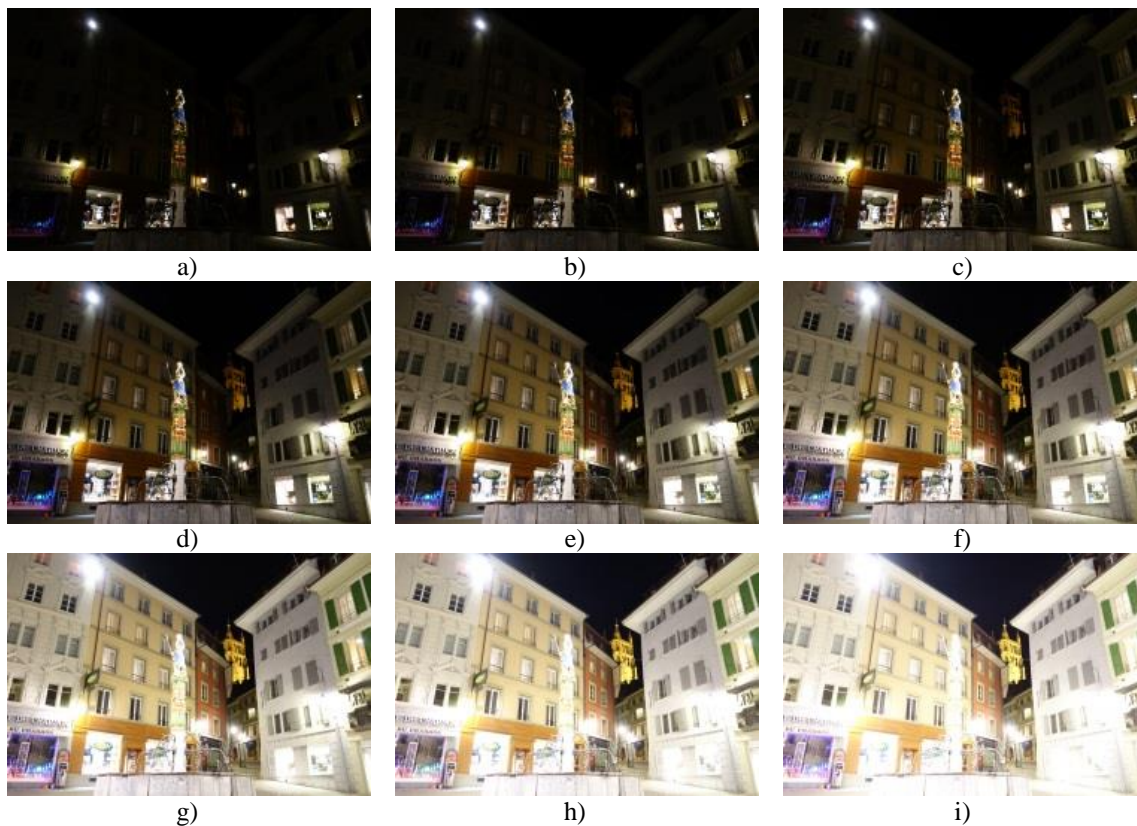


Slika 4.11. Segmenti histograma sa 16 najviših i najnižih komponenata

Relativni broj piksela u 16 najnižih komponenti histograma označen je kao L_{16} , a relativni broj piksela u 16 najviših komponenata histograma kao H_{16} . Odnos dva prethodno označena broja, L_{16} i H_{16} , predstavlja meru kvaliteta ekspozicije slike i definisan je sledećim izrazom:

$$R = \frac{L_{16}}{H_{16}} . \quad (4.1)$$

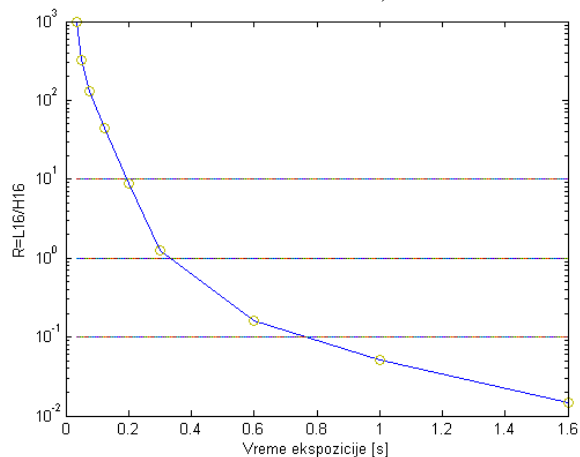
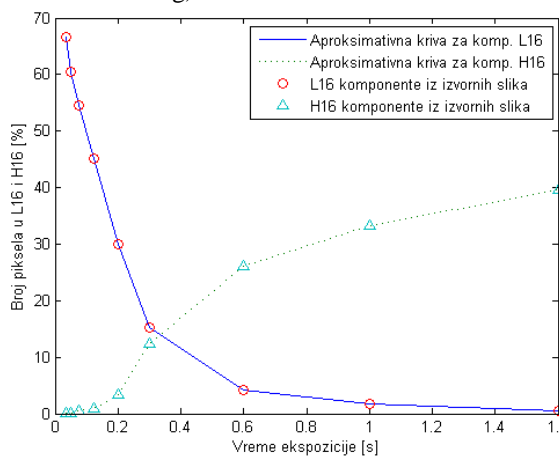
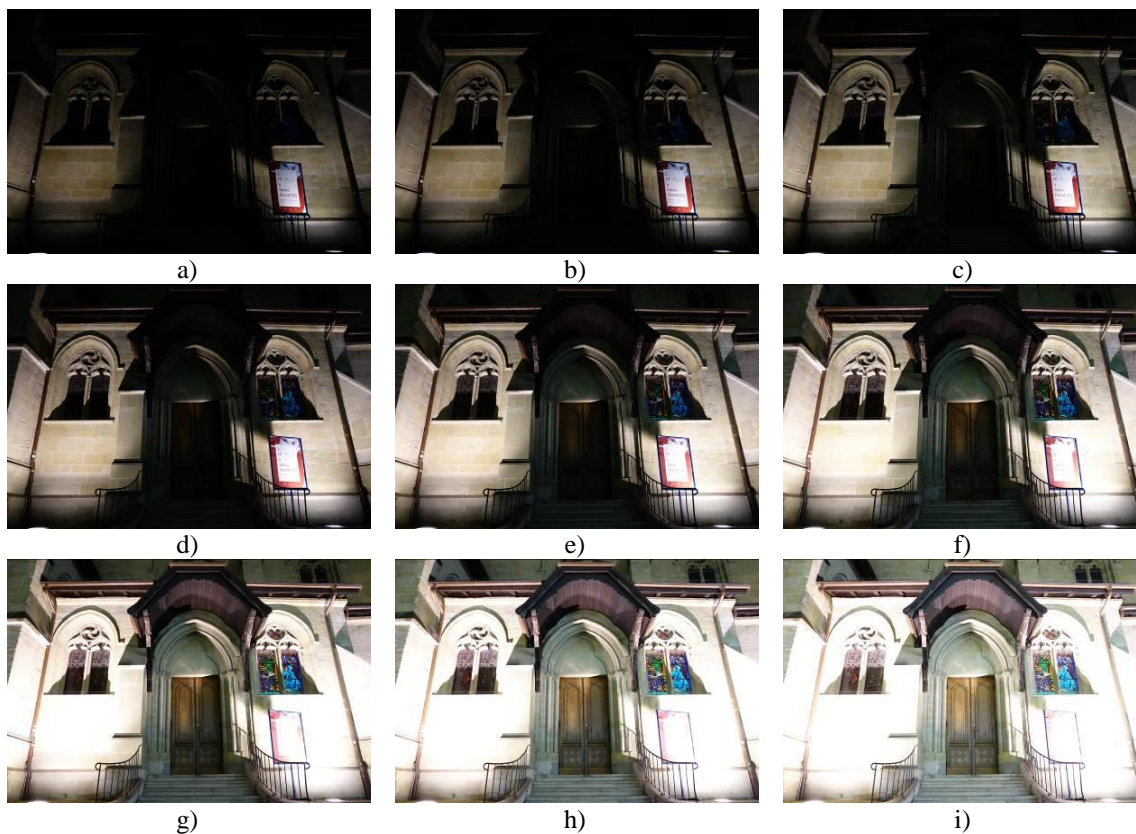
Što je ovaj odnos bliži broju 1, tj. u značajnim komponentama se nalazi sličan broj piksela, kvalitet ekspozicije slike je bolji. U nastavku su prikazani primeri tri seta od po 9 slika, interpolacione krive konstruisane na osnovu komponentata histograma i izvedeni odnos R , respektivno.



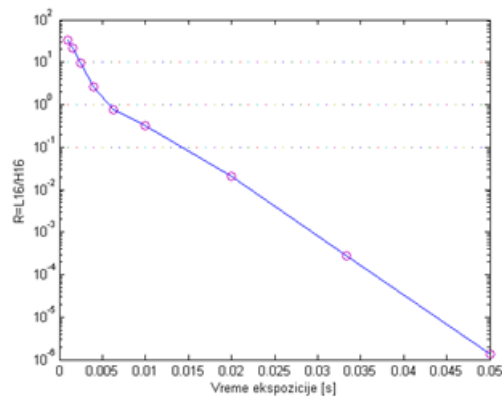
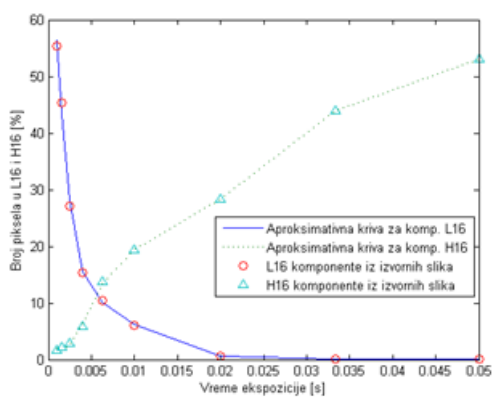
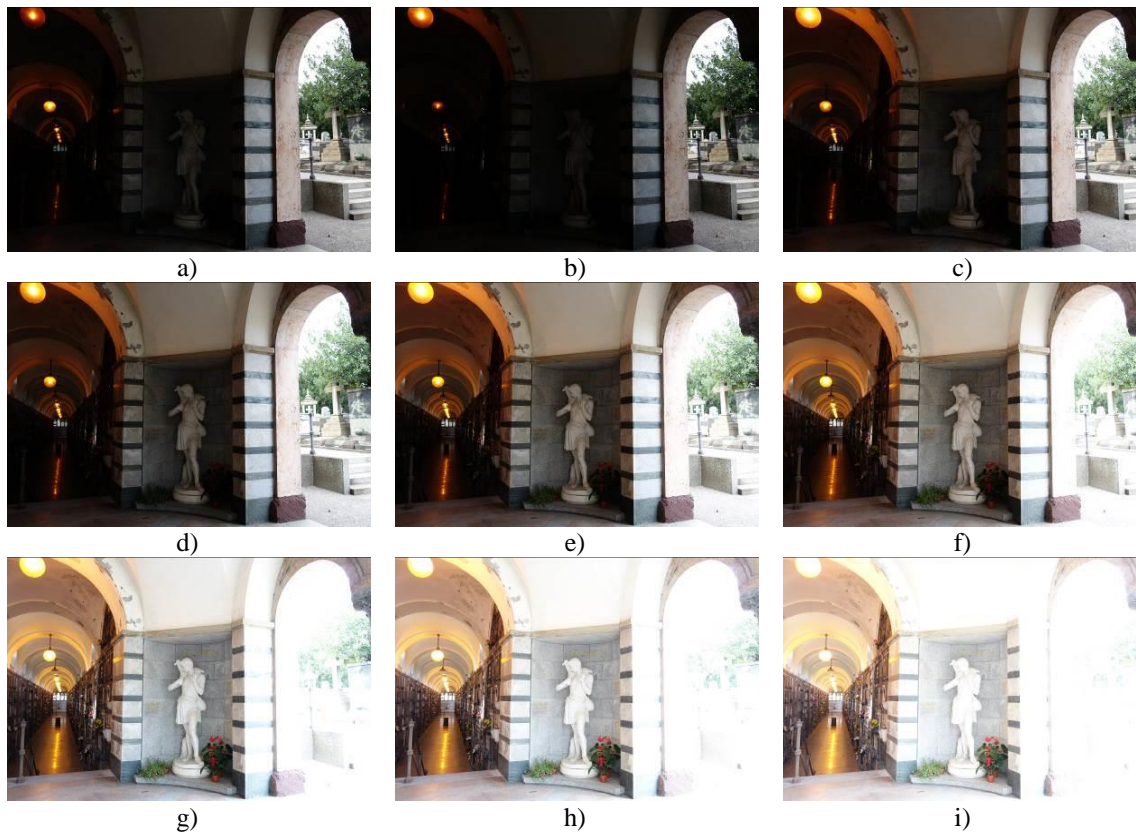
j)

k)

Slika 4.12. Izvorne slike a)-i) (gde je slika a) sa najkraćim, a slika i) sa najdužim vremenom ekspozicije); slika j) predstavlja krive L16 i H16; slika k) predstavlja odnos R



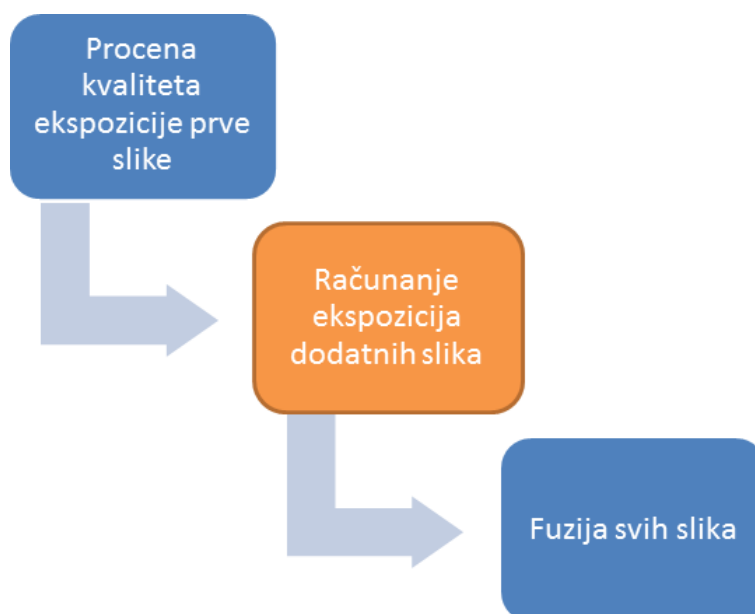
Slika 4.13. Izvorne slike a)-i) (gde je slika a) sa najkraćim, a slika i) sa najdužim vremenom ekspozicije); slika j) predstavlja krive L16 i H16; slika k) predstavlja odnos R



Slika 4.14. Izvorne slike a)-i) (gde je slika a) sa najkraćim, a slika i) sa najdužim vremenom ekspozicije); slika j) predstavlja krive L16 i H16; slika k) predstavlja odnos R

Predloženi algoritam na brz i jednostavan način vrši procenu kvaliteta ekspozicije slike i ima mogućnost izvršavanja u realnom vremenu. Zbog jednostavne arhitekture algoritam se može vrlo lako prilagoditi za razne programabilne platforme.

4.2 Algoritam za računanje ekspozicija dodatnih slika



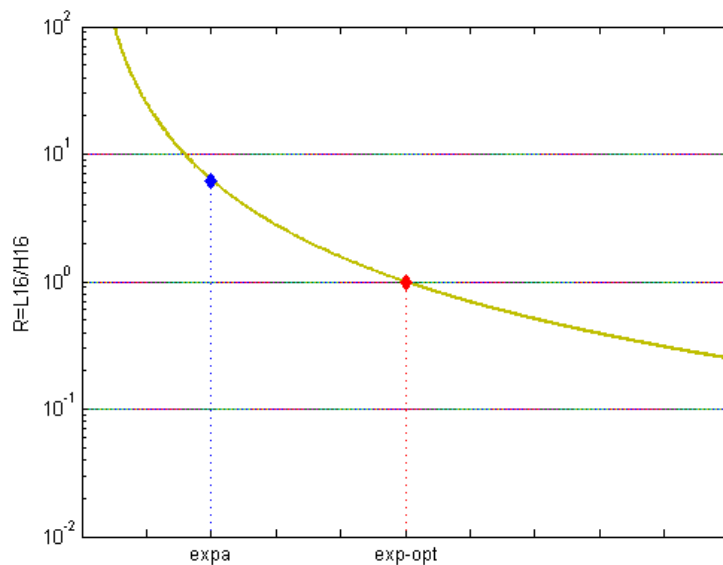
Slika 4.15. Prikaz izvršavanja drugog algoritma

Drugi algoritam po redosledu izvršavanja u okviru predloženog metoda ima funkciju da izračuna vremena ekspozicije dodatnih slika. Slika koja se snima zadatim konfiguracionim parametrima auto-ekspozicije kamere označena je sa a , i dodatne dve slike sa b i c , respektivno. Vremena ekspozicije za slike b i c , označena su sa $expb$ i $expc$. Odgovarajući izbor $expb$ i $expc$ predstavlja izuzetno osetljiv deo i kritičan je korak predloženog metoda, pa kvalitet rezultujuće slike značajno zavisi od pravilnog proračuna ovih vrednosti.

U opisu prethodnog algoritma pomenuto je kako se u radovima (Bilcu et al., 2008) i (Gelfand et al., 2010) određuju vremena dodatnih ekspozicija. U radu (Bilcu et al., 2008) fiksiraju se dva piksela sa vrednostima 381 i 682 i potom se povećavaju vremena ekspozicije u sitnim koracima dok pomenuti pikseli ne dostignu definisane vrednosti. Nije poznato koliki su koraci u kojima se menja ekspozicija niti kada se vreme dodatnih ekspozicija povećava ili smanjuje. Gelfand sa koautorima u radu (Gelfand et al., 2010) primenjuje princip povećavanja vremena ekspozicije sve dok ukupno 10% piksela ne dostigne vrednost veću od 239 (za određivanje duže ekspozicije). Za određivanje kraće ekspozicije vreme ekspozicije se smanjuje sve dok ukupno 10% piksela ne dostigne

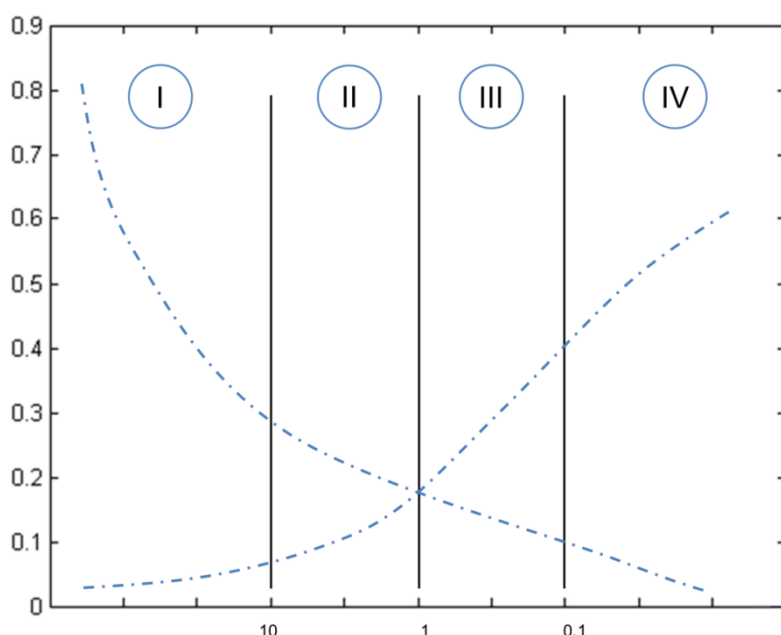
vrednosti koje su manje od 16. Jasno je da kod oba pristupa nije precizno određen broj slika koje se snimaju, te se može snimiti i znatno više od tri slike, što otežava rad u realnom vremenu, jer značajno produžava vreme obrade. Zbog ove osobine analizirani pristupi nisu dobri.

Ključni parametar u predloženom algoritmu za određivanje dodatnih ekspozicija predstavlja vrednost kvaliteta ekspozicije slike R . Kada je vrednost ovog parametra približna broju 1 (što znači i da je sličan broj komponentata u L_{16} i H_{16}), ekspoziciju nazivamo optimalnom i u tom trenutku nije neophodno snimati dodatne slike kako bi se generisala HDR-like slika. Vrednost optimalne ekspozicije je označena sa $exp - opt$ na slici 4.16. Vremena dodatnih ekspozicija računaju se na osnovu vrednosti kvaliteta ekspozicije slike R , tj. udaljenosti vrednosti zadate auto-ekspozicije, $expa$, od vrednosti optimalne ekspozicije.



Slika 4.16. Udaljenost zadate auto-ekspozicije od optimalne

Isprekidanom linijom na slici 4.17. prikazane su dve proizvoljne krive koje predstavljaju interpolirane komponente L_{16} i H_{16} . Na apscisi je označeno relativno vreme u odnosu na optimalnu ekspoziciju, te je u preseku ove dve krive, gde L_{16} i H_{16} imaju jednake vrednosti, relativni odnos jednak 1.



Slika 4.17. Zone po kojima se određuju vremena ekspozicija

U cilju određivanja dodatnih vremena ekspozicije, eksperimentalno su utvrđene 4 zone koje definišu računanje novih vremena ekspozicija. To znači da se vremena ekspozicija $expb$ i $expc$ računaju prema sledećim izrazima:

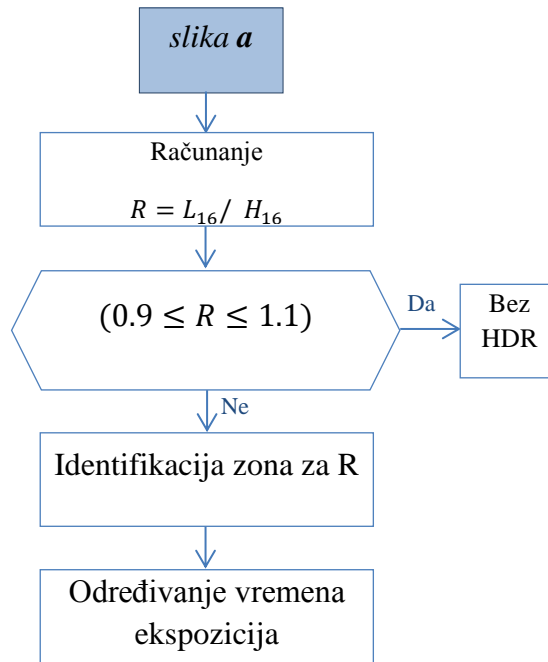
$$R \geq 10; expb = \frac{expa}{4}; expc = expa * 12, \quad (4.2)$$

$$10 > R > 1.1; expb = \frac{expa}{4}; expc = expa * 8, \quad (4.3)$$

$$0.9 > R \geq 0.1; expb = \frac{expa}{8}; expc = expa * 4, \quad (4.4)$$

$$R < 0.1; expb = \frac{expa}{12}; expc = expa * 4. \quad (4.5)$$

Dijagram toka algoritama za određivanje ekspozicija prikazan je na slici 4.18. (na njemu su prikazani integrisano algoritam za procenu kvaliteta ekspozicije i algoritam za procenu vremena dodatnih ekspozicija). Na osnovu dijagrama toka, prvi korak je računanje mere kvaliteta R za sliku a , koja ima zadato vreme auto-ekspozicije $expa$. Ukoliko je vrednost ovog parametra u granicama između 0.9 i 1.1, nije neophodno primenjivati tehniku za generisanje HDR-like slike.

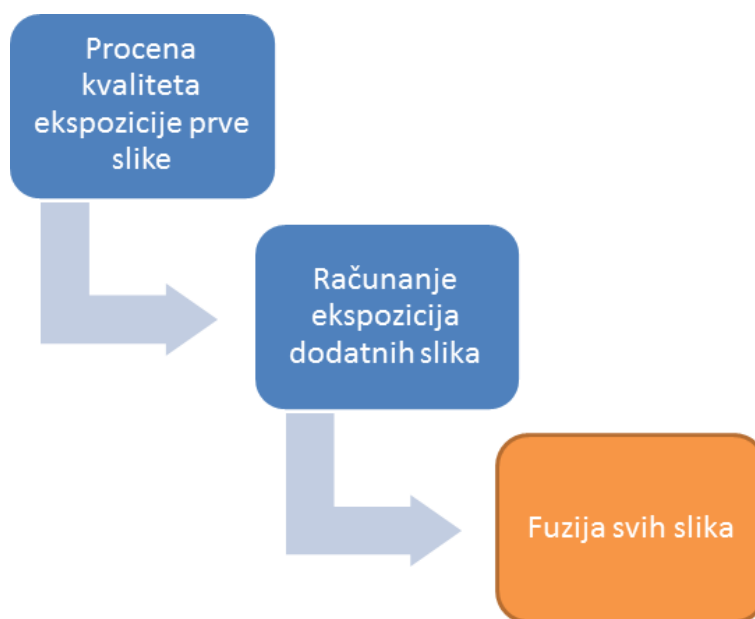


Slika 4.18. Dijagram toka izvršavanja prva dva algoritma

Ukoliko vrednost parametra R nije u pomenutoj zoni, tada se vrši identifikacija zona i određivanje vremena ekspozicija za nove slike b i c , prema prethodno definisanim izrazima od 4.2 do 4.5.

Na osnovu izračunatih vremena ekspozicija, $expb$ i $expc$, algoritam (koji se izvršava na nekoj programabilnoj komponenti) treba da konfiguriše senzor da snimi dve dodatne slike sa zadatim parametrima ekspozicije.

4.3 Fuzija HDR-like slike



Slika 4.19. Prikaz izvršavanja trećeg algoritma

Ukoliko se na osnovu dijagrama toka na slici 4.18 utvrdi da je neophodno generisanje HDR-like slike i izračunaju se vremena ekspozicija exp_b i exp_c , nastavlja se sa preuzimanjem dodatne dve slike b i c . Sve tri slike, a , b i c , učestvuju u generisanju finalne slike korišćenjem algoritma za fuziju HDR-like slike. Prenos finalne slike do procesora vrši se sinhrono sa tri signala: PClkHDR (osnovni takt), LVHDR (za validnost linije) i FVHDR (za validnost celog frejma), kao što je prikazano na slici 3.6. Slična arhitektura prikazana je u (Lapray et al., 2014), ali se taj algoritam oslanja na unapred definisanu „look-up“ tabelu i računa na nivou piksela, što implicira definisanje koeficijenta za svaki piksel, pa je samim tim proces dugotrajan.

Kada su dostupne sve izvorne slike, veoma je bitno kvalitetno izvršiti njihovu fuziju u finalnu HDR-like sliku. Ovo predstavlja značajnu kariku predloženog metoda i zato je analizirano nekoliko načina fuzije slika koji će u nastavku biti izloženi.

U literaturi postoje razni algoritmi koji se bave fuzijom izvornih slika u konačnu, HDR-like, i oni su izloženi u uvodnom delu. Ovde će primarni fokus biti na jednostavnosti implementacije, kako bi bilo moguće na brz način dobiti finalnu sliku, bez mnogo složenih računskih operacija.

Predmet analize su četiri načina fuzije u kojima se za generisanje finalne slike koristi usrednjavanje vrednosti, procena izobličenja, primena tehnike širenja histograma ili se vrši fuzija u YCbCr prostoru boja. Svaka od pomenutih stavki biće detaljnije opisana. Komparativna analiza fuzije slika publikovana je u (Popadić & Todorović, 2016).

A. Fuzija usrednjavanjem vrednosti

Ova vrsta fuzije predstavlja najjednostavniji vid fuzije jer tretira sve tri ulazne slike, a , b i c , sa istim prioritetom. Finalna HDR-like slika dobija se prema sledećoj jednačini:

$$HDR_{like} = \frac{a}{3} + \frac{b}{3} + \frac{c}{3} . \quad (4.6)$$

Fuzija se vrši za svaki kanal boje slike odvojeno, na isti način. Ovako spojeni kanali su u stvari kanali konačne slike.

B. Fuzija bazirana na procenih izobličenja

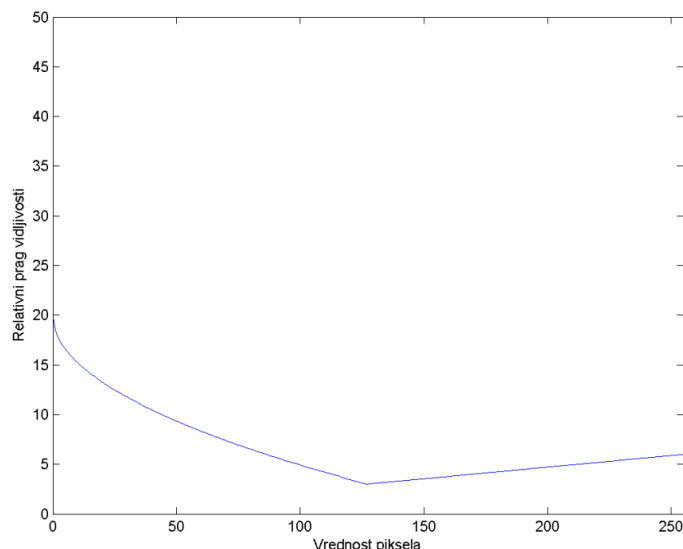
Princip koji je primenjen u ovom slučaju zasniva se na adaptivnom doprinosu ulazne slike u konačnoj slici. Slika doprinosi svojom srednjom vrednošću, koja se koristi u izrazu za procenu primetnih samo-izobličenja (eng. Just noticeable distortion (JND)), izloženom u (Yang et al., 2005) i (Yang et al., 2005). Ovaj izraz definisan je sledećim oblikom:

$$f(x) = \begin{cases} 17 \left(1 - \sqrt{\frac{x}{127}} \right) + 3, & x \leq 127, \\ \frac{3}{128} (x - 127) + 3, & x > 127. \end{cases} \quad (4.7)$$

Odgovarajuća JND kriva koja predstavlja prethodni izraz prikazana je na slici 4.20.

U ovom modelu koristi se karakteristika ljudskog oka tako da se ne može osetiti bilo kakva promena ispod praga JND oko određenog piksela, zbog njegovih osnovnih prostorno-vremenski maskirajućih svojstava. Odgovarajući (čak i nesavršen) JND model može značajno pomoći da se poboljša učinak algoritama video kodiranja (Yang

et al., 2005). Sa stanovišta fuzije slike, korišćenje JND modela definiše doprinos svake slike na osnovu srednje vrednosti monohromatske slike.



Slika 4.20. JND kriva

Adaptivni koeficijenti za svaku sliku računaju se prema sledećem izrazu:

$$k_i = \frac{f(\text{mean}(i))}{f(\text{mean}(a)) + f(\text{mean}(b)) + f(\text{mean}(c))}, \quad i = a, b, c. \quad (4.8)$$

Konačna slika se dobija množenjem dobijenih koeficijenata sa ulaznim slikama a , b i c :

$$HDR_{like} = k_a a + k_b b + k_c c. \quad (4.9)$$

Fuzija slika na ovaj način obavlja se u RGB domenu boja za svaki kanal boje odvojeno. Uočeno je da kod ovog pristupa boje mogu biti izmenjene u smisli da im nedostaje intenzitet, deluje da su isprane, što je generalno pravilo kada je u pitanju tonsko mapiranje HDR slike.

C. Fuzija slike korišćenjem tehnike širenja histograma

Slika koja se dobije na prethodni način može biti unapređena primenom raznih tehnika za poboljšanje slike. Jedna od njih predstavlja širenje histograma. Tehnika se primenjuje na svaki kanal boje u dobijenoj HDR-like slici, sa ciljem da poveća globalni kontrast slike, omogućavajući i regionima sa niskim lokalnim osvetljajem da pojačaju svoj

kontrast. Odnosi se na mapiranje svakog piksela ulazne slike u odgovarajući piksel izlazne slike diskretnom transformacijom (Gonzalez & Woods, 2007). U toku procesa analize korišćena je gotova funkcija koja je ugrađena u softverski alat MATLAB.

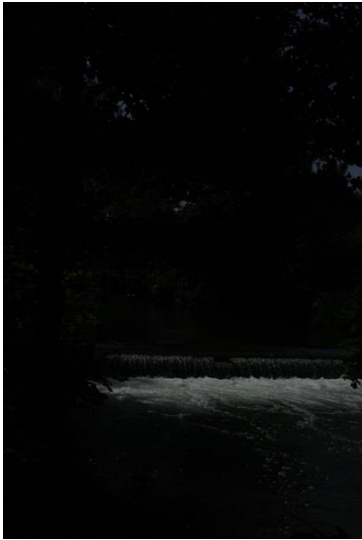
Sa ovim poboljšanjem ponekad se mogu dobiti unapređenja u HDR-like slici, ali ponekad mogu doći do izražaja i neki negativni efekti koji postaju vidljivi na slici, a pre svega se odnosi na značajnu promenu boja u odnosu na referentnu sliku.

D. Fuzija u YC_bC_r prostoru boja

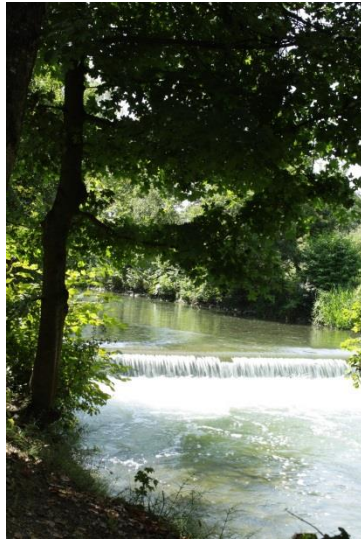
Ova vrsta fuzije zasniva se na konverziji ulaznih slika iz RGB u YCbCr prostor boja gde je svaki piksel predstavljen komponentom osvetljaja i dvema komponentama koje nose informaciju o boji. Nakon konverzije u ovaj prostor boja, izraz za JND primenjuje se samo na komponentu koja predstavlja osvetljaj. Utvrđeno je da se znatno lošiji rezultati dobijaju kada se izvrši normalizacija komponentata boje (hrominantnih komponentata) jer se menja boja. Upravo iz ovog razloga komponente boje treba da ostanu nepromenjene.

Normalizacija komponente osvetljaja vrši se primenom izraza za JND čiji je argument srednja vrednost inicijalne komponente osvetljaja. Nakon dobijanja normalizovane komponente osvetljaja vrši se dodatna konverzija unazad, od YCbCr u RGB prostor boja. Na ovaj način su boje na slici mnogo bolje očuvane i slika je prirodnija.

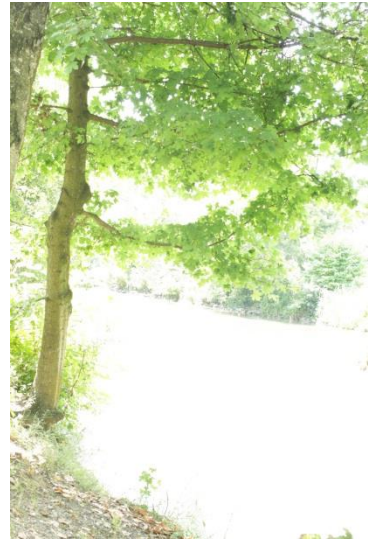
U nastavku su na osnovu tri seta ulaznih slika, koji su prikazani na slikama 4.21, 4.23 i 4.25, prikazani uporedni rezultati fuzija koje se primenjuju, što je označeno na slikama 4.22, 4.24 i 4.26. Za svaku sliku, i izvornu i finalnu, prikazani su odgovarajući histogrami.



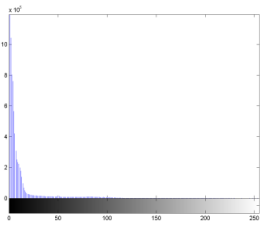
Slika sa najkraćom ekspozicijom



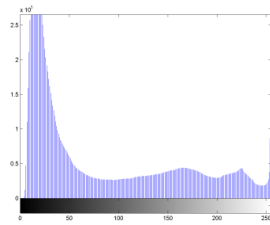
Slika sa srednjom ekspozicijom



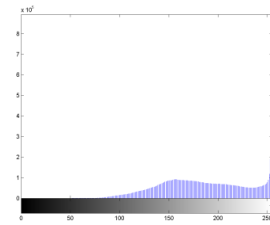
Slika sa najdužom ekspozicijom



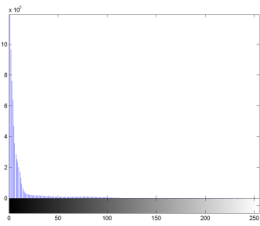
Histogram slike



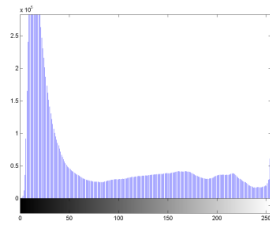
Histogram slike



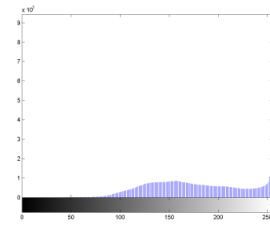
Histogram slike



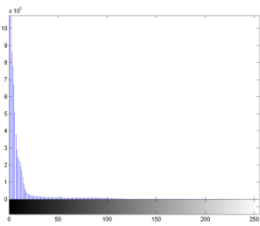
Histogram R kanala



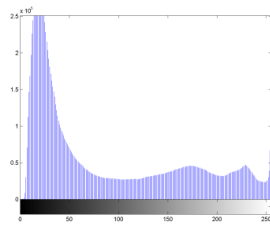
Histogram R kanala



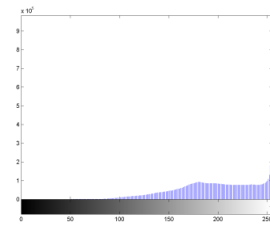
Histogram R kanala



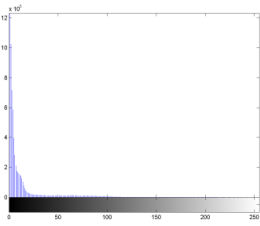
Histogram G kanala



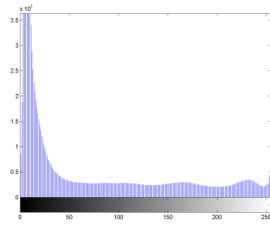
Histogram G kanala



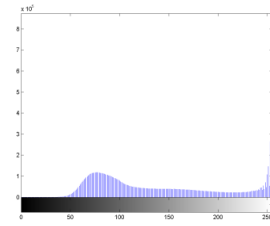
Histogram G kanala



Histogram B kanala



Histogram B kanala

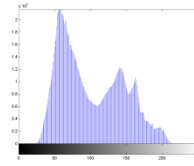


Histogram B kanala

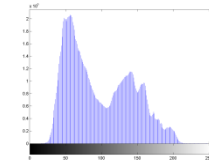
Slika 4.21. Prvi set ulaznih slika



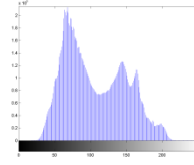
Rezultujuća slika sa usrednjavanjem vrednosti



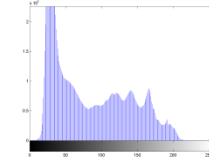
Histogram slike



Histogram R kanala



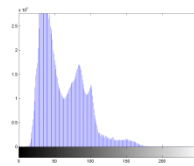
Histogram G kanala



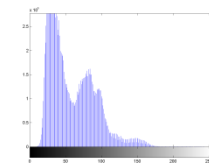
Histogram B kanala



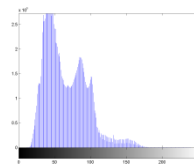
Rezultujuća slika sa JND fuzijom



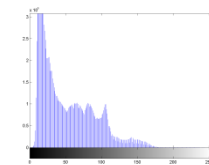
Histogram slike



Histogram R kanala



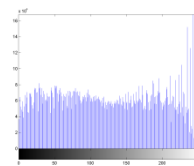
Histogram G kanala



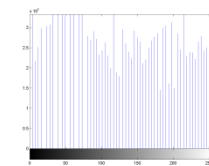
Histogram B kanala



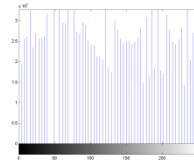
Rezultujuća slika sa širenjem histograma



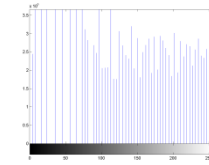
Histogram slike



Histogram R kanala



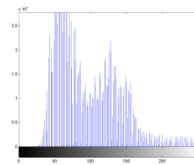
Histogram G kanala



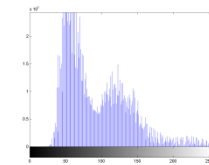
Histogram B kanala



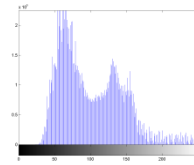
Rezultujuća slika sa fuzijom u YCbCr postoru boja



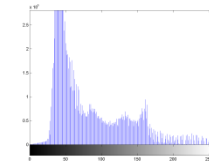
Histogram slike



Histogram R kanala



Histogram G kanala



Histogram B kanala

Slika 4.22. Fuzionisane slike prvog seta slika sa odgovarajućim histogramima



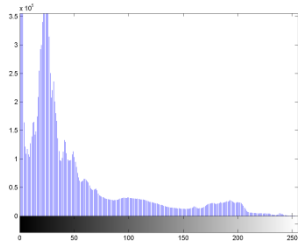
Slika sa najkraćom ekspozicijom



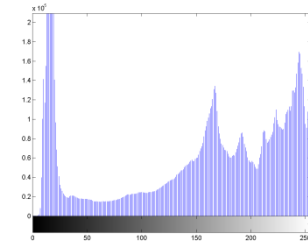
Slika sa srednjom ekspozicijom



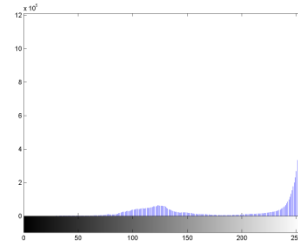
Slika sa najdužom ekspozicijom



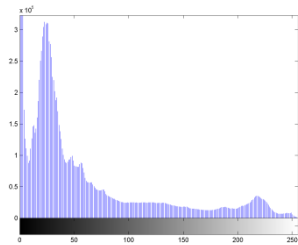
Histogram slike



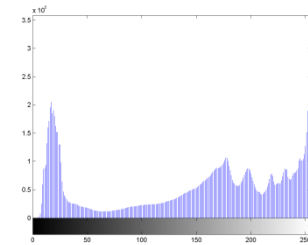
Histogram slike



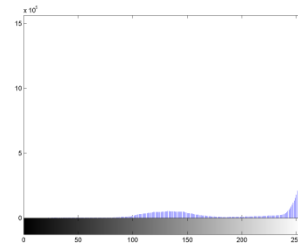
Histogram slike



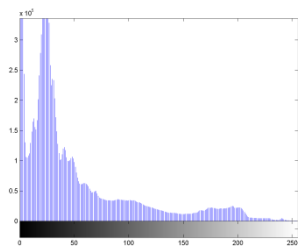
Histogram R kanala



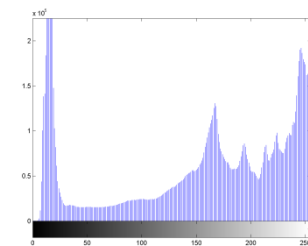
Histogram R kanala



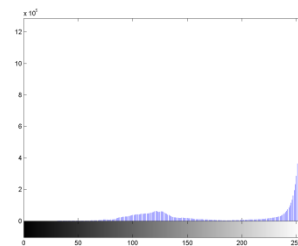
Histogram R kanala



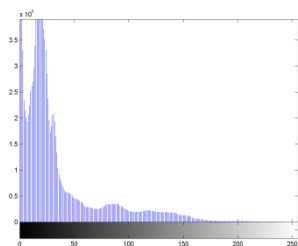
Histogram G kanala



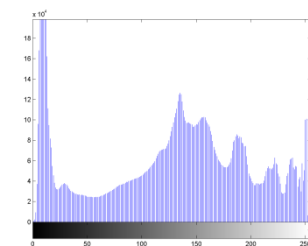
Histogram G kanala



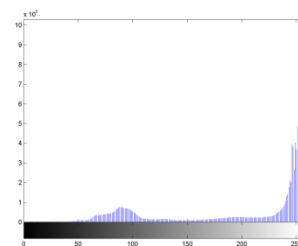
Histogram G kanala



Histogram B kanala



Histogram B kanala

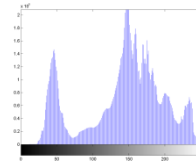


Histogram B kanala

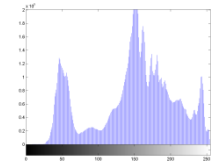
Slika 4.23. Drugi set ulaznih slika



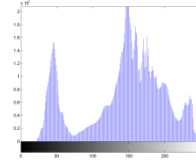
Rezultujuća slika sa usrednjavanjem vrednosti



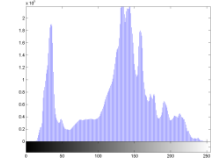
Histogram slike



Histogram R kanala



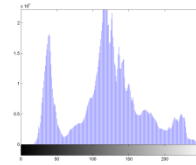
Histogram G kanala



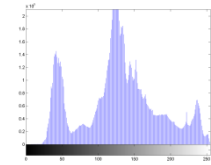
Histogram B kanala



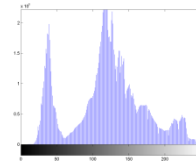
Rezultujuća slika sa JND fuzijom



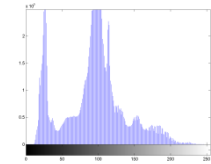
Histogram slike



Histogram R kanala



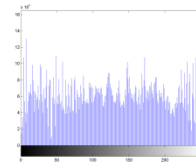
Histogram G kanala



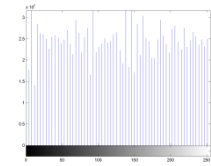
Histogram B kanala



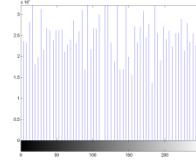
Rezultujuća slika sa širenjem histograma



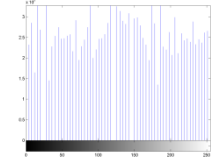
Histogram slike



Histogram R kanala



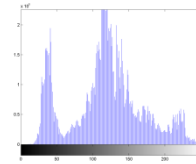
Histogram G kanala



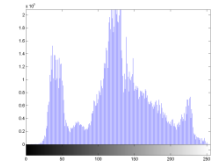
Histogram B kanala



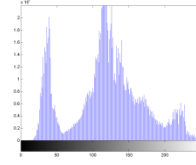
Rezultujuća slika sa fuzijom u YCbCr postoru boja



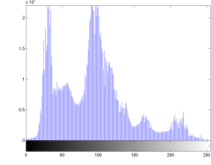
Histogram slike



Histogram R kanala

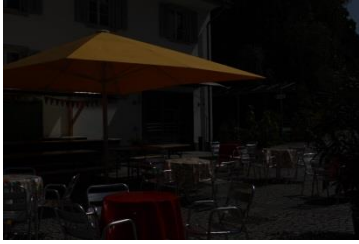


Histogram G kanala

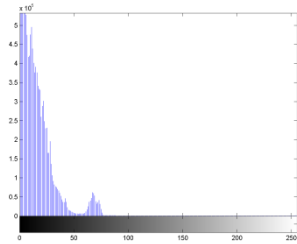


Histogram B kanala

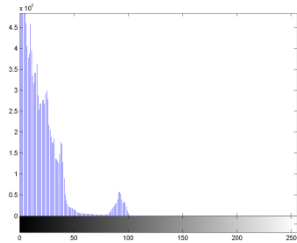
Slika 4.24. Fuzionisane slike drugog seta slika sa odgovarajućim histogramima



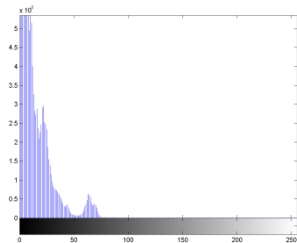
Slika sa najkraćom ekspozicijom



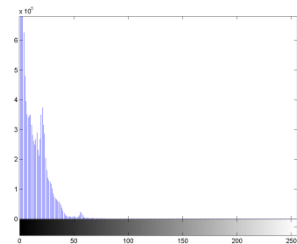
Histogram slike



Histogram R kanala



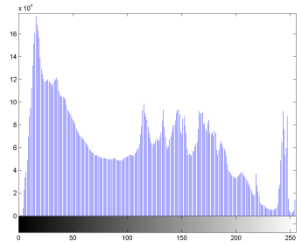
Histogram G kanala



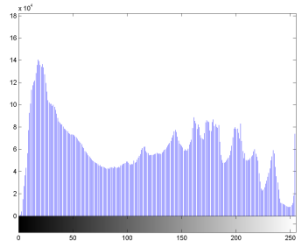
Histogram B kanala



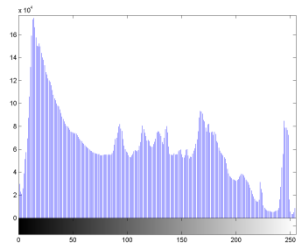
Slika sa srednjom ekspozicijom



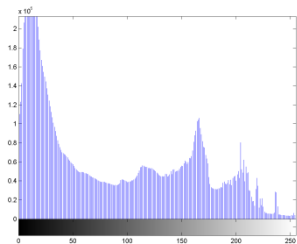
Histogram slike



Histogram R kanala



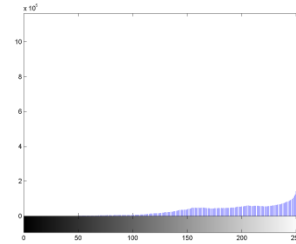
Histogram G kanala



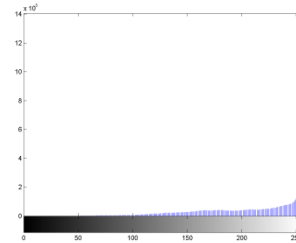
Histogram B kanala



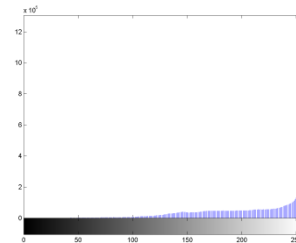
Slika sa najdužom ekspozicijom



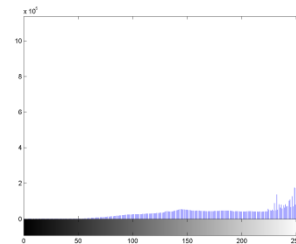
Histogram slike



Histogram R kanala



Histogram G kanala

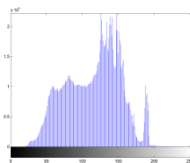


Histogram B kanala

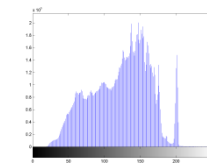
Slika 4.25. Treći set ulaznih slika



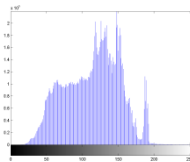
Rezultujuća slika sa usrednjavanjem vrednosti



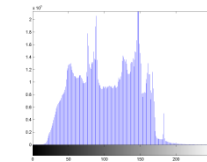
Histogram slike



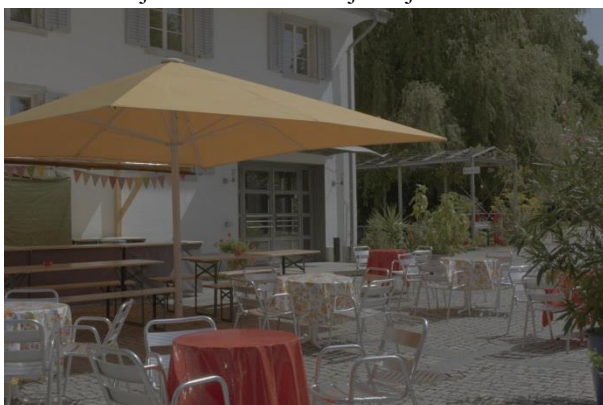
Histogram R kanala



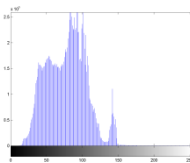
Histogram G kanala



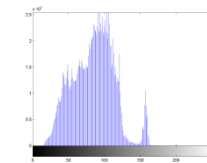
Histogram B kanala



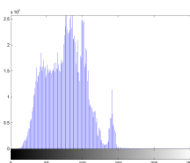
Rezultujuća slika sa JND fuzijom



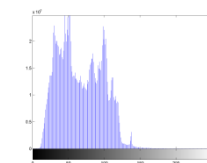
Histogram slike



Histogram R kanala



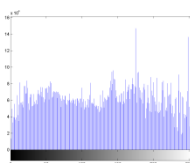
Histogram G kanala



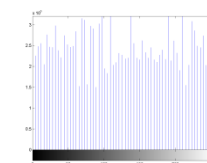
Histogram B kanala



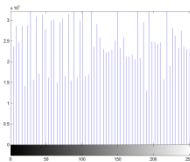
Rezultujuća slika sa širenjem histograma



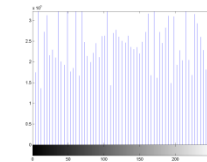
Histogram slike



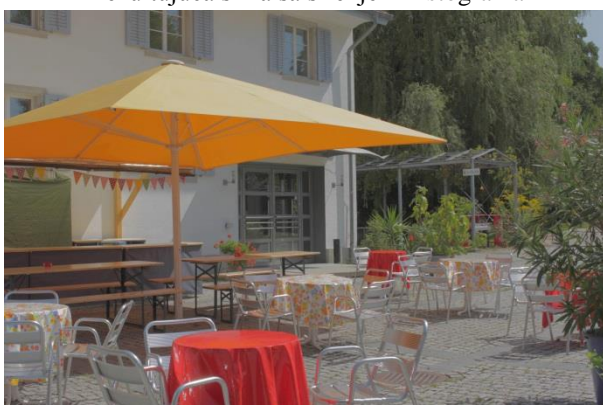
Histogram R kanala



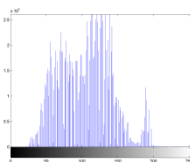
Histogram G kanala



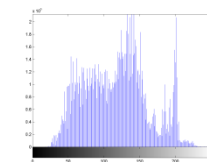
Histogram B kanala



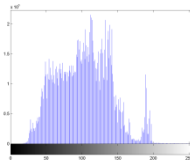
Rezultujuća slika sa fuzijom u YCbCr postoru boja



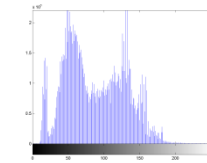
Histogram slike



Histogram R kanala



Histogram G kanala



Histogram B kanala

Slika 4.26. Fuzionisane slike trećeg seta slika sa odgovarajućim histogramima

Rezultati koji su predstavljeni na prethodnim slikama dobijeni su primenom četiri načina fuzije. Težilo se primneni fuzije slika na što jednostavniji način, kako bi bila moguća implementacija u realnom vremenu. Rezultati pokazuju da fuzija slike korišćenjem tehnike usrednjavanja (kada sve slike imaju jednak doprinos) i fuzija korišćenjem JND krive imaju slične performanse. Slika koja se generiše primenom tehnike širenja histograma nekada može dati bolje rezultate nego što se postiže upotrebom prethodne dve tehnike, ali veoma često mogu doći do izražaja efekti koji se odnose na značajnu promenu boja na slici. Najbolji rezultati dobijaju se fuzijom slika u YCbCr prostoru boja. Pokazano je da slike dobijene na ovaj način imaju veoma prirodne boje, i da izgledaju „živo“. Ovo je suprotno od opšteg pravila da tonski mapirane slike koje se odnose na široki dinamički opseg deluju „isprano“. Takođe, treba imati na umu da za implementaciju metoda na finalnoj platformi uglavnom postoji hardverska podrška za konverziju formata iz RGB u YCbCr, kao i obrnuto, pa ovo dodatno poboljšava rad u realnom vremenu.

5 Rezultati

U ovom poglavlju biće predstavljeni rezultati testiranja novog metoda za generisanje HDR-like slika. Cilj je da se pokažu performanse metoda, primenom sva tri algoritma od kojih je sastavljen, tokom generisanja finalnih slika koje imaju više prikazanih detalja u odnosu na bilo koju od polaznih slika. Da bi rezultati testiranja metoda bili ponovljivi, odlučeno je da testiranje bude izvršeno koristeći slike iz javno dostupne baze. Takođe, prikazani su i dobijeni rezultati koji kao ulazne slike koriste slike iz sopstvene baze.

Za testiranje javno dostupnih slika koristi se baza referencirana u radu (Korshunov et al., 2015). Baza predstavlja skupove od sedam ili devet slika snimljenih sa različitim podešavanjima ekspozicija, tako da je vrednost ekspozicije srednje slike 0EV. Slike koje se koriste iz sopstvene baze napravljene su na sličan način, koristeći profesionalni aparat Canon EOS 1000D, sa podešavanjima za snimanje slika sa definisanim koracima različitih ekspozicija. I u slučaju slika iz javno dostupne baze, kao i samostalno

snimljenih, koristi se Canon CR2, specifični format RAW sa minimalnom obradom slike koja se dobija direktno sa senzora.

Za primenu metoda neophodno je koristiti po tri slike iz svake baze, te je zato neophodno malo modifikovati prvi algoritam, koji procenjuje kvalitet ekspozicije na osnovu polazne slike. Kao polazna slika, ili slika a , kako je označena prilikom opisivanja algoritama, određuje se ona čiji je odnos $R = L_{16} / H_{16}$ najbliži 1, tj. njeno vreme ekspozicije je najpribližnije optimalnom. Dodatne slike biraju se iz skupa od sedam do devet slika tako da su njihove vrednosti ekspozicije jednake onim koje je odredio drugi algoritam koji je zadužen za računanje ekspozicija dodatnih slika. Ovako odabrane slike prikazane su u rezultatima i one se koriste za generisanje finalne slike. Za fuziju odabranih slika primenjen je algoritam koji koristi fuziju u YCbCr prostoru boja, jer se on pokazao kao najoptimalniji u fazi testiranja, dajući najbolje rezultate.

Rezultati su predstavljeni tako što su prikazane tri polazne slike i rezultujuća, fuzionisana, HDR-like slika. Na svakoj finalnoj slici jasno je uočljivo da ima značajnih poboljšanja u odnosu na polazne slike. U delu koji sledi posle prikaza rezultata izložena je evaluacija rezultata poređenjem sa postojećim načinima generisanja HDR-like slike.

Ranije je naglašeno da je metod projektovan tako da ga je moguće implementirati u neku programabilnu komponentu. U tom slučaju je potrebno obratiti pažnju na lanac obrade slike, koji je prikazan na slici 4.7. U implementaciji na programabilnoj platformi neophodno je izvršiti kolorizaciju slike (*eng.* demosaicking) da se dobije histogram za određivanje dodatnih ekspozicija slika. Kada se odrede ove ekspozicije, posle konverzije u YCbCr prostor boja, određuju se koeficijenti koji predstavljaju težinske faktore za množenje osvetljaja polaznih slika. Nakon fuzije slike se vraćaju u RGB domen, a potom jednostavnom konverzijom u Bayer format, kako bi procesor mogao da dobije sliku koja je u istom formatu kao i slika koja je dobija direktno sa senzora.

U nastavku ovog poglavlja prikazani su rezultati generisanja HDR-like slika koji su dobijeni pokretanjem pojedinačnih algoritama u programskom alatu MATLAB.

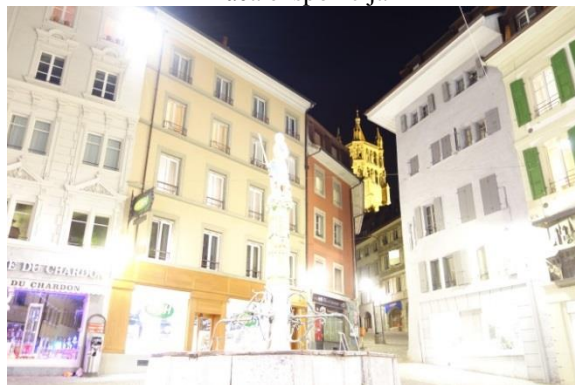
5.1 Rezultati generisanja HDR-like slika



auto-ekspozicija



kraća ekspozicija



duža ekspozicija



HDR-like

Slika 5.1. Primer rezultata za izvorne slike set 1 (javno dostupna baza)



auto-ekspozicija



kraća ekspozicija



duža ekspozicija

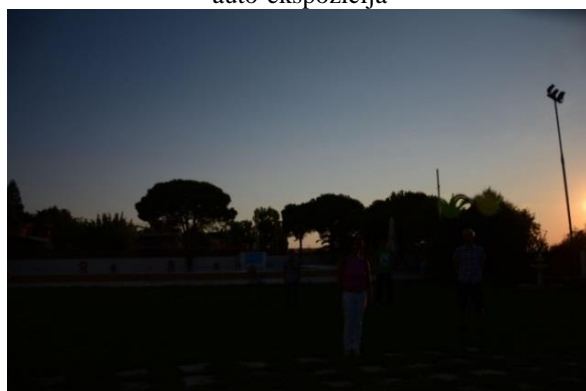


HDR-like

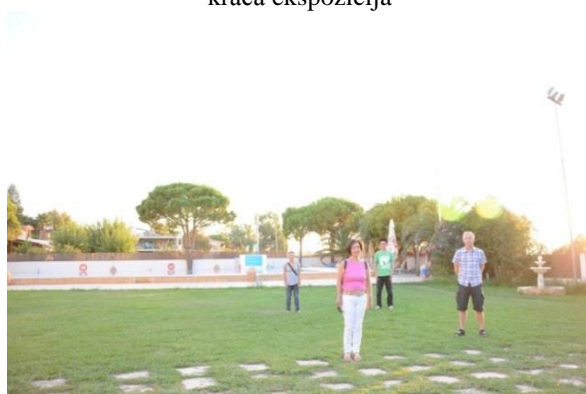
Slika 5.2. Primer rezultata za izvorne slike set 2 (javno dostupna baza)



auto-ekspozicija



kraća ekspozicija



duža ekspozicija

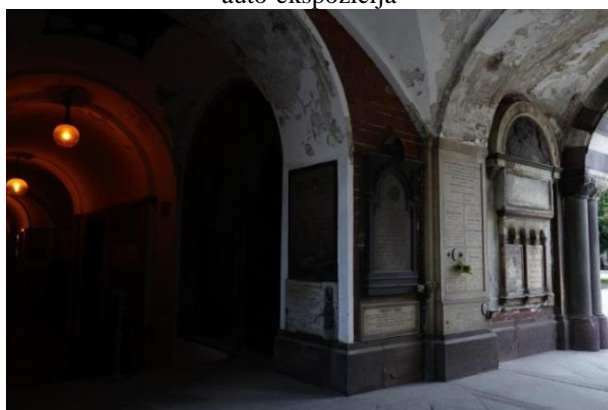


HDR-like

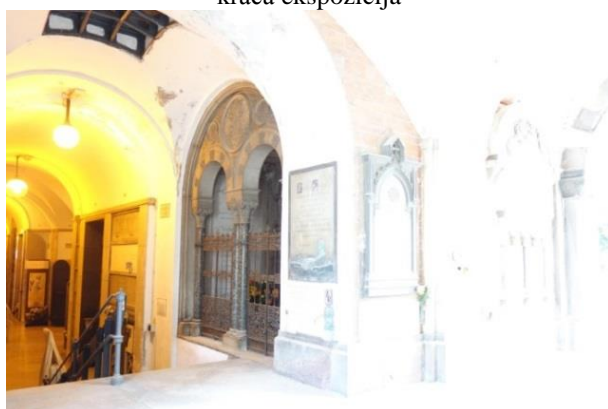
Slika 5.3. Primer rezultata za izvorne slike set 3 (javno dostupna baza)



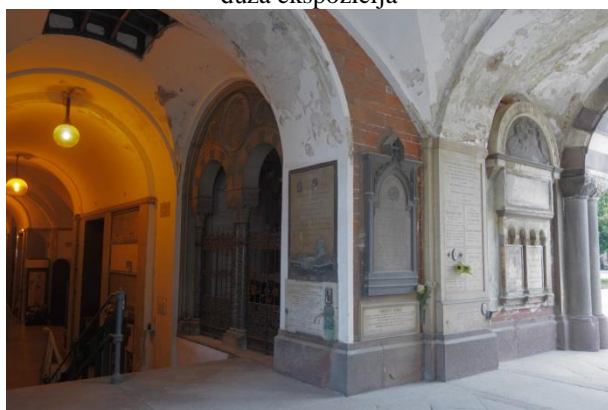
auto-ekspozicija



kraća ekspozicija



duža ekspozicija



HDR-like

Slika 5.4. Primer rezultata za izvorne slike set 4 (javno dostupna baza)



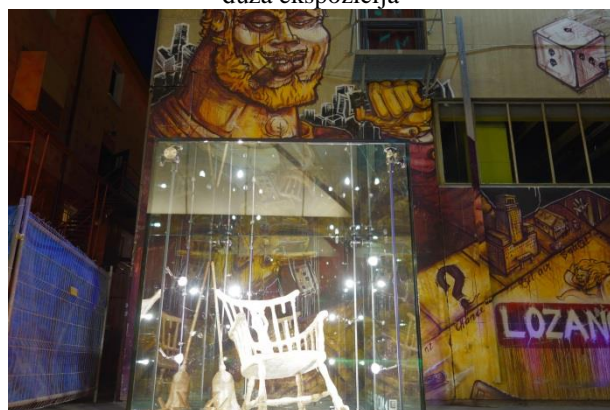
auto-ekspozicija



kraća ekspozicija



duža ekspozicija

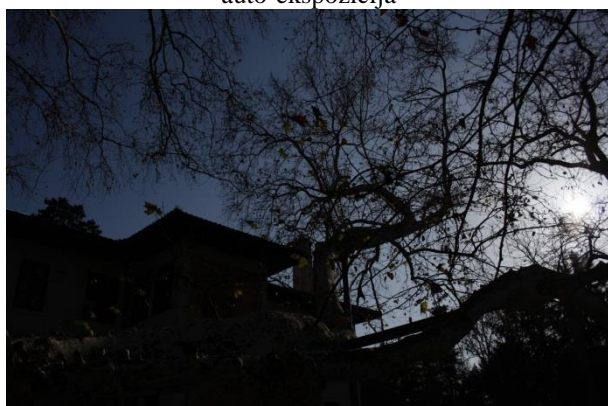


HDR-like

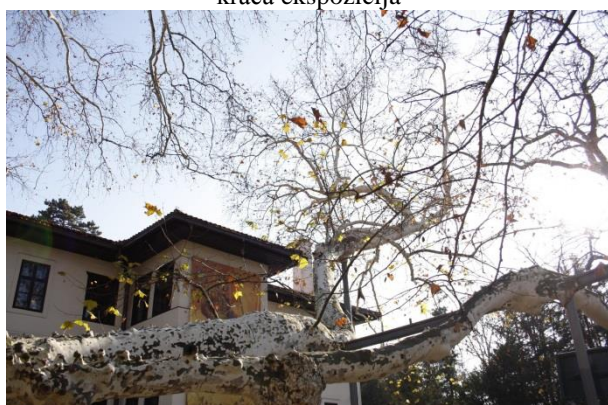
Slika 5.5. Primer rezultata za izvorne slike set 5 (javno dostupna baza)



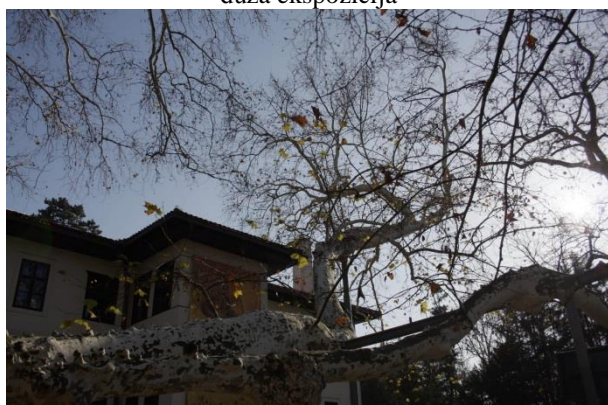
auto-ekspozicija



kraća ekspozicija



duža ekspozicija

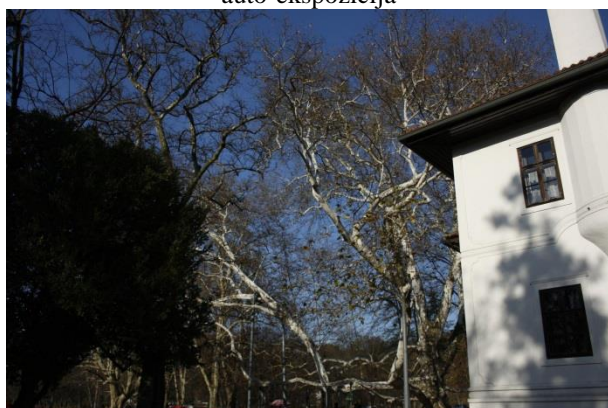


HDR-like

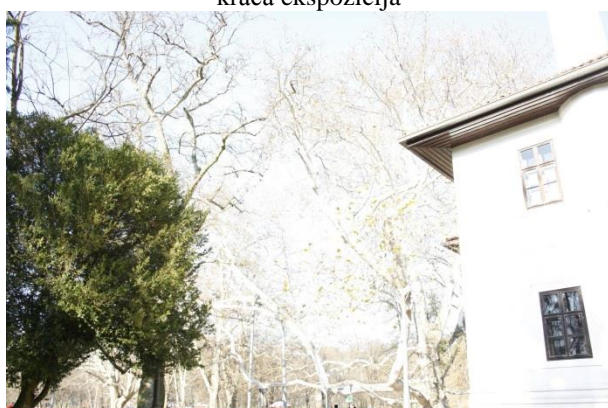
Slika 5.6. Primer rezultata za izvorne slike set 6 (sopstvena baza)



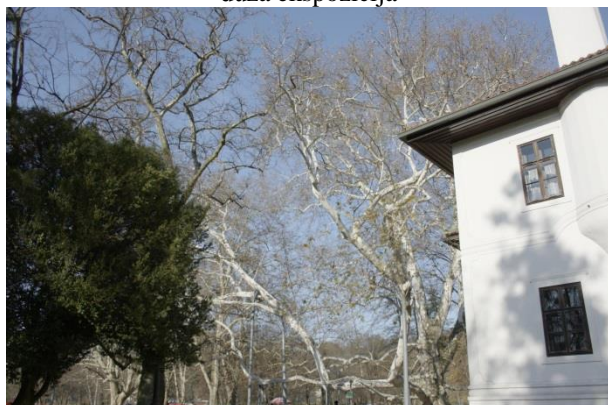
auto-ekspozicija



kraća ekspozicija



duža ekspozicija



HDR-like

Slika 5.7. Primer rezultata za izvorne slike set 7 (sopstvena baza)



auto-ekspozicija



kraća ekspozicija



duža ekspozicija



HDR-like

Slika 5.8. Primer rezultata za izvorne slike set 8 (sopstvena baza)



auto-ekspozicija



kraća ekspozicija



duža ekspozicija

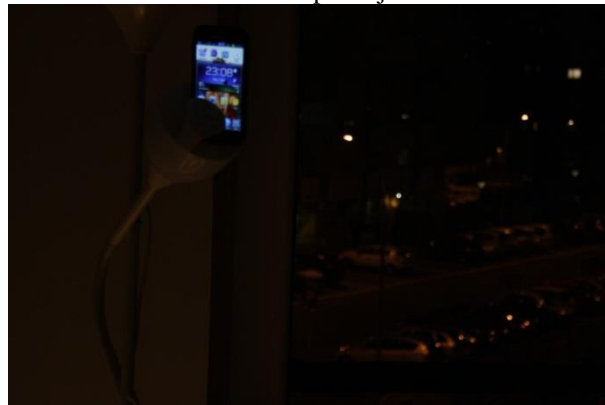


HDR-like

Slika 5.9. Primer rezultata za izvorne slike set 9 (sopstvena baza)



auto-ekspozicija



kraća ekspozicija



duža ekspozicija



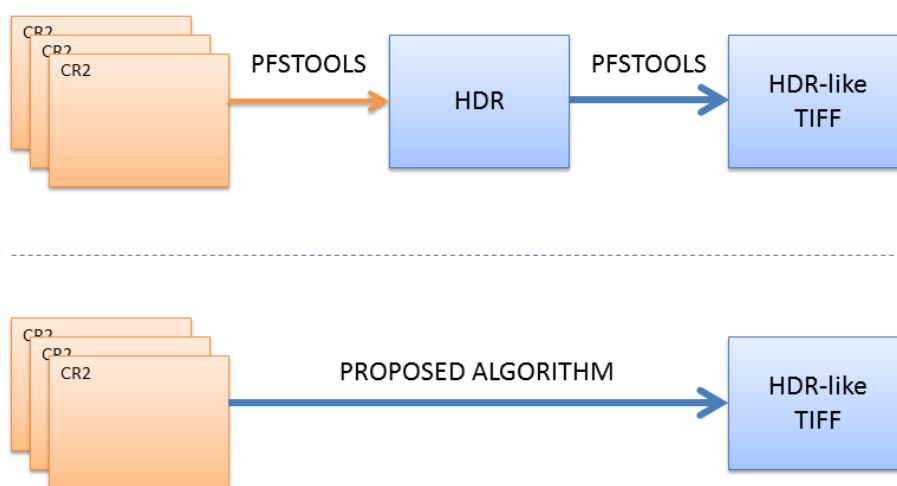
HDR-like

Slika 5.10. Primer rezultata za izvorne slike set 10 (sopstvena baza)

5.2 Ocena rezultata

Rezultati koji su izloženi u prethodnom delu jasno pokazuju poboljšanje izvornih slika. Na generisanoj HDR-like slici mogu se uočiti detalji koji su vidljivi samo na pojedinačnim slikama, što znači da je postignut željeni efekat. Pored izloženih rezultata neophodno je i da se izvrši kvantitativna analiza poređenjem sa drugim načinima generisanja HDR-like slika.

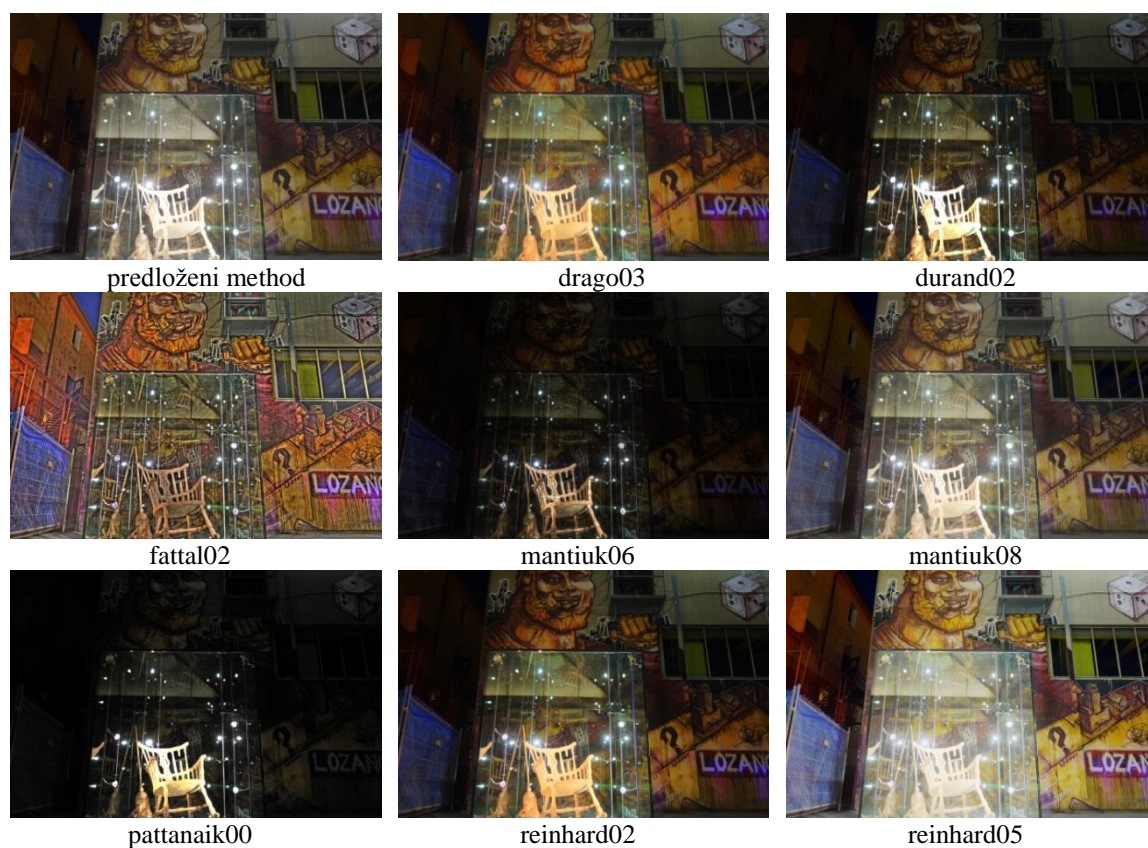
Adekvatno poređenje predloženog metoda sa postojećim načinima generisanja HDR-like slike nije moguće zbog formata ulaznih slika. Postojeći algoritmi koriste obrađene slike koje su u JPEG ili nekom sličnom formatu. Finalna implementacija predloženog metoda odnosi se na manipulaciju slikama koje su u formatu RAW Bayer matrice. Ovo je format slike koja dolazi direktno sa senzora i neobrađena je. Da bi se izvršilo uspešno poređenje potrebno je da se koriste isti format ulaznih slika, a HDR-like slika dobijena korišćenjem predloženog metoda poredi se sa HDR-like slikom koja je dobijena primenom različitih operatora tonkog mapiranja na HDR sliku. HDR slika dobija se na osnovu ulaznih slika u RAW formatu. Ulazni format slika je Canon RAW format fajlova, poznat kao CR2. Rezultujuće slike čuvaju se u TIFF formatu. Postupak poređenja performansi prikazan na slici 5.11. Postupak se zasniva na subjektivnoj proceni kvaliteta HDR-like slike nastale pomoću predloženog metoda, kao i slika koje generišu algoritmi tonkog mapiranja ugrađeni u alat pfstools (pfstools, 2016).



Slika 5.11. Postupak poređenja rezultata

Izvorne slike koje se koriste za poređenje rezultata generisanja HDR-like slika su u linearnom RAW formatu, rezolucije 20MP, referencirane su u (Korshunov et al., 2015). Predloženi metod primenjuje se direktno na sekvencu slika iz pomenute, javno dostupne baze, generišući kao rezultat, HDR-like sliku. Paket *pfstools* koristi se za generisanje HDR-like slike tako što prvo napravi HDR sliku, a potom je konvertuje u HDR-like, korišćenjem operatora tonskog mapiranja. Za generisanje HDR slike iz izvornih slika, korišćenjem alata *pfstools*, potrebno je oko 120s.

Jedan primer seta dobijenih rezultata prikazan je na slici 5.12. Predstavljene su slike dobijene pomoću predloženog metoda, kao i slike koje se dobijaju korišćenjem osam poznatih operatora tonskog mapiranja.



Slika 5.12. Rezultati predloženog metoda i algoritama tonskog mapiranja

Za potrebe subjektivne procene kvaliteta slike sprovedena je anketa u kojoj je učestvovalo deset ispitanika. Za ispitivanje je korišćeno deset setova slika koje se generišu na prethodno opisani način. Devet ispitanika, od njih deset, ocenilo je da najbolji kvalitet ima slika koju generiše predloženi metod.

Pored subjektivne procene kvaliteta, veoma bitan parametar za upoređivanje performansi je i vreme izvršavanja. Tabela 5 prikazuje vreme izvršavanja predloženog metoda i vremena izvršavanja osam korišćenih operatora tonskog mapiranja. Svi testovi su izvršeni na istoj mašini, s tim što je predloženi metod izvršavan u Matlab-u pod Windows 7 okruženjem, a operatori tonskog mapiranja su izvršavani koristeći pfstools instaliran na Linux virtuelnoj mašini (Ubuntu 14.04 LTS). U slučaju kada je korišćena virtuelna mašina, dodeljivani su joj maksimalni resursi da bi poređenje imalo smisla.

Tabela 5. Poređenje vremena izvršavanja

	predloženi	drago03	durand02	fattal02	mantiuk06	mantiuk08	pattanaik00	reinhard02	reinhard05
vreme[s]	4.3	7.2	276.9	69.2	49.1	22.9	23.2	7.2	17.4
platforma	WIN matlab	linux	linux	Linux	linux	linux	linux	linux	linux

Što se tiče brzine izvršavanja, predloženom metodu je potrebno najmanje vremena za generisanje rezultujuće HDR-like slike. Međutim, za potpuno ispravno poređenje, vremenu izvršavanja operatora tonskog mapiranja koje je navedeno u tabeli 5, treba dodati još i vremena za generisanje HDR slike (120s korišćenjem paketa *pfstools*).

Može se primetiti da je vreme izvršavanja algoritma malo duže u odnosu na ono što se očekuje za rad u realnom vremenu. Takođe, treba imati u vidu i da su testne slike veličine 20MP, a da je realno da u konačnoj primeni to bude maksimalno 2MP, što predstavlja rezoluciju koja se označava kao FullHD. Krajnji cilj implementacije ovog metoda, kao što je i ranije rečeno, je implementacija na nekoj programabilnoj specijalizovanoj platformi. Obzirom na činjenicu da je metod projektovan tako da sadrži jednostavne matematičke operacije, očekivanja su da će ubrzanja koja postižu specijalizovane hardverske arhitekture omogućiti rad metoda u realnom vremenu. Ovo znači da bi bilo moguće realizovati i implementaciju za video sadržaj.

6 Zaključak

Aktuelni trendovi ukazuju da će HDR tehnologija u bliskoj budućnosti postati široko rasprostranjeni standard, što potvrđuje sve veći broj uređaja koji je podržavaju. Mnoštvo filmova već se snima korišćenjem HDR tehnologije, a i distributeri video sadržaja koriste je u svojoj ponudi. Proširenje dinamičkog opsega slike i video sadržaja promeniće naviku ljudi da postoje ograničenja u snimanju scena sa širokim opsegom osvetljaja, što je vremenom postala podrazumevana činjenica. Slika napravljena korišćenjem HDR tehnologije mnogo je realnija predstava snimljene scene, tj. sveta koji nas okružuje. Upotrebom HDR tehnologije moguće je videti detalje koji jednostavno nisu mogli biti prikazani na istoj slici zbog ograničenja postojeće LDR tehnologije, odnosno snimanja u uskom dinamičkom opsegu. Za kreiranje HDR sadržaja nekada se može koristiti i LDR tehnologija. Međutim, treba imati u vidu da je najbolji, i jedini pravi, način za snimanje HDR sadržaja korišćenje senzora sa inherentnom podrškom za HDR jer se tako razni negativni efekti (kao što su oni koji se javljaju na pokretnim delovima scene) eliminišu već prilikom akvizicije slike, na nivou senzora.

U uvodnom delu ove disertacije detaljno je predstavljena HDR tehnologija, njene mogućnosti primene i implikacije na infrastrukturne sisteme koji su trenutno u upotrebi. Opisane su značajne komponente koje koriste uređaji ili sistemi za akviziviju, čuvanje i prikaz HDR slike. Predstavljeni su primeri implementacije HDR tehnologije u postojećoj infrastrukturi, detaljno izloženi formati u kojima je moguće sačuvati HDR sliku kao i način kako se takve slike generišu. Opisana je postojeća HDR oprema koja pre svega podrazumeva kamere i displeje za prikaz sadržaja, kao i ključne komponente u delu za akviziciju slike, senzori i optika. Takođe, objašnjen je način mogućeg prikaza HDR sadržaja u infrastrukturi namenjenoj za LDR sadržaj, upotrebom odgovarajućih algoritama tonskog mapiranja. Da bi se bolje razumela ograničenja LDR tehnologije, opisan je princip funkcionisanja i mogućnosti ljudskog oka, kao primer jednog izuzetno kvalitetnog optičkog sistema. Na osnovu iznetih činjenica uočljiva je razlika između dinamičkog opsega ljudskog vida i dinamičkog opsega LDR slike. Upravo ovo predstavlja objašnjenje zašto uglavnom mnogo bolje vidimo svet oko sebe nego što je on prikazan na slikama, kao i da se mnogo bolji efekti postižu korišćenjem HDR tehnologije.

I pored svih navedenih prednosti koje sa sobom donosi HDR tehnologija, ona ne predstavlja baš uvek najbolje rešenje za konkretnu primenu. Često se nedostaci ogledaju u prilično kabastom formatu, tj. četiri puta većem prostoru neophodnom za skladištenje u odnosu na LDR format, kao i nemogućnosti prikaza na široko rasprostranjenim LDR displejima.

Navedeni argumenti uticali su na motivaciju za istraživanje HDR tehnologije, kao i na to da se iskoriste prednosti formiranja HDR slike i sličan princip primeni za doprinos poboljšanju LDR slike, generisanjem HDR-like slike. Izložena je ideja da se prevaziđe jaz koji postoji između izuzetno kvalitetne i informacijama bogate HDR slike i LDR slike koja sadrži manje informacija, ali zauzima znatno manje prostora u uklapa se u većinu postojećih infrastruktura. Od primarnog značaja je snimanje loše osvetljenih scena u kojima postoji neuniformna raspodela osvetljaja, te mogu postojati regioni koji su jako tamni ili regioni koji su u priličnoj meri presvetljeni, kada se koristi standardna tehnologija snimanja LDR slika.

Prilikom upoznavanja sa HDR-like tehnologijom izvršena je pažljiva analiza postojećih rešenja. Princip formiranja finalne slike kod postojećih rešenja je da se računaju težinske matrice kojima se množe ulazne slike. Uočen je zajednički nedostatak većine ovih algoritama da imaju problema sa radom u realnom vremenu, jer za to jednostavno nisu namenjeni. Bazirani su na izračunavanjima na lokalnom nivou, te računaju vrednosti težinskih matrica za svaki piksel, što predstavlja vremenski zahtevnu operaciju. Da bi se ovo izbeglo, ideja vodilja u istraživanju bila je da se primeni princip koji će funkcionisati na globalnom nivou, što znači da se cela ulazna slika množi istim koeficijentom. Na ovaj način se postiže ubrzanje u obradi, naročito kada se koriste specijalizovane arhitekture sa hardverskim optimizacijama.

U disertaciji je predložen potpuno novi metod koji koristi tehniku formiranja slike proširenog dinamičkog opsega u monitoringu loše osvetljene scene. LDR slika koja se dobija na ovaj način poboljšana je uvećanjem broja detalja, tako da postaju uočljivi oni delovi scene koji su ranije bili u senci ili su jednostavno bili presvetljeni i nestali u visokom intenzitetu osvetljaja okoline. Prednost kreiranja slike korišćenjem predloženog metoda je očigledna i može se iskoristiti u mnogim primenama gde postoje slična ambijentalna okruženja u nivoima osvetljaja.

Naučni doprinos disertacije ogleda se u kreiranju novog metoda čiji je cilj primena u industrijskim kamerama radi poboljšanja njihovih performansi. Metod se sastoji od tri algoritma koja učestvuju u kreiranju HDR-like slike:

- algoritam za procenu kvaliteta ekspozicije slike dobijene korišćenjem algoritama za auto-ekspoziciju koji je ugrađen u kameru,
- algoritam za računanje vremena ekspozicija dodatnih slika koje će učestvovati u procesu fuzije finalne slike,
- algoritam za fuziju odabranih slika u finalnu HDR-like sliku.

U disertaciji su detaljno opisana sva tri navedena algoritma. U algoritamu za procenu kvaliteta ekspozicije slike definisana je mera kvaliteta ekspozicije koja se zasniva na komponentama histograma koje se nalaze u određenim segmentima. Algoritam za računanje vremena ekspozicija dodatnih slika koristi meru kvaliteta ekspozicije inicijalne slike i na osnovu ove vrednosti određuje dodatne ekspozicija slika. Za ovo su

izdvojene konkretne zone, pa u zavisnosti od toga u kojoj se zoni pomenuta vrednost nađe, određuju se i vrednosti ekspozicija dodatnih slika na osnovu predloženih parametara. Konačno, algoritam za fuziju odabranih slika spaja sve napravljene slike u finalnu HDR-like sliku. Prikazano je i objašnjeno nekoliko načina fuzije, a zatim i obrazloženo zašto se fuzija obavlja na odabrani način.

U cilju ostvarivanja ponovljivosti, za sve izvršene eksperimente, kao i za većinu dobijenih rezultata u ovoj tezi, korišćene su dve javno dostupne baze slika. Jednu bazu slika kreirala je grupa za multimedijalnu obradu signala (*engl.* Multimedia Signal Processing Group – MMSPG), sa EPFL u Lozani. Drugu bazu kreirala je grupa EMPA Media Technology pri ETH u Cirihu. Ostale slike korišćene su iz sopstvene baze i one su prikazane u rezultatima.

Metod je implementiran i testiran u programskom paketu MATLAB i odnosi se na slike koje nisu sintetički generisane. Rezultati, kao i poređenja sa konkurentnim načinima generisanja HDR-like slike takođe su predstavljeni u ovoj disertaciji. Predložena je arhitektura za jednostavnu implementaciju metoda na nekoj programabilnoj platformi, što ujedno predstavlja i sledeći korak u radu. Takođe, ovde treba dodati i plan rada na generisanju poboljšanog video sadržaja, kao logičan nastavak, koji do sada nije bio predmet istraživanja.

Literatura

Amazon, 2016. *Amazon Video*. [Online] Available at:

<https://www.amazon.com/gp/video/storefront/?ie=UTF8&merchId=uhd> [Accessed 2 September 2016].

Anywhere Software, 2015. [Online] Available at: <http://www.anywhere.com/gward/hdrenc/> [Accessed 2016 Augustus 01].

Arrimedical, 2016. *ARRISCOPE – A NEW ERA IN SURGICAL MICROSCOPY*. [Online] Arrimedical Available at: <http://www.arrimedical.com/assets/pdf/Brochure-ARRISCOPE-English.pdf> [Accessed 01 November 2016].

Ashikhmin, M., 2002. A Tone Mapping Algorithm for High Contrast Images. In *Proceedings of the 13th Eurographics workshop on Rendering.*, 2002.

Banterle, F., Artusi, A., Debattista, K. & Chalmers, A., 2011. *Advanced High Dynamic Range Imaging - Theory and Practice*. CRC Press.

Banterle, F., Ledda, P., Debattista, K. & Chalmers, A., 2006. Inverse tone mapping. In *Proceeding GRAPHITE '06 - Proceedings of the 4th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and Southeast Asia.*, 2006. ACM.

Bilcu, R.C., Burian, A., Knuutila, A. & Vehvilainen, M., 2008. High dynamic range imaging on mobile devices. In *Electronics, Circuits and Systems, 2008. ICECS 2008. 15th IEEE International Conference on.*, 2008.

Bloch, C., 2012. *The HDRI Handbook 2.0 - High Dynamic Range Imaging for Photographers and CG Artists*. Gerhard Rossbach.

Bogoni, L. & Hansen, M., 2001. Pattern-selective color image fusion. *Pattern Recognition*, 34(8), pp.1515-26.

Bosch, 2012. *Bosch introduces 1080p high dynamic range cameras for challenging lighting conditions*. [Online] Available at: http://us.boschsecurity.com/en/05_news_and_extras_2/05_04_press_releases_2/2012/2012_10_01_introduction_1080p/03_content_page_60 [Accessed 20 Augustus 2016].

Brinno, 2016. *TLC200 PRO HDR time lapse camera*. [Online] Available at: <http://brinno.com/time-lapse-camera/TLC200Pro> [Accessed 6 September 2016].

Canon, 2015. *Canon reveals the DP-V2410: a 24-inch 4K reference display*. [Online] Available at: http://cpn.canon-europe.com/content/news/canon_reveals_new_4k_reference_display.do [Accessed 1 September 2016].

Chiu, K. et al., 1993. Spatially Nonuniform Scaling Functions for High Contrast Images. In *Proceedings of Graphics Interface 93.*, 1993.

- CMOSIS, 2015. *High dynamic range pixels*. [Online] Available at: http://www.cmosis.com/technology/technology_overview/high_dynamic_range_pixels [Accessed 08 September 2016].
- Čadík, M., 2008. *Perceptually Based Image Quality Assessment and Image Transformations*. PhD Thesis. Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering.
- Darmont, A., 2012. *High dynamic range imaging : sensors and architectures*. SPIE—The International Society for Optical Engineering.
- Debevec, P.E. & Malik, J., 1997. Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs. In *SIGGRAPH '97 - Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- Dolby, 2011. *Dolby PRM-4200 Professional Reference Monitor*. [Online] Available at: http://www.dolby.com/uploadedFiles/Assets/US/Doc/Professional/PRM_WhitePaper_Final_Web.pdf [Accessed 01 September 2016].
- Dolby, 2016. *JPEG-HDR*. [Online] Available at: <http://www.dolby.com/us/en/technologies/jpeg-hdr.html> [Accessed 05 September 2016].
- Drago, F., Myszkowski, K., Annen, T. & Chi, N., 2003. Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes. In *Proc. of EUROGRAPHICS 2003.*, 2003.
- Durand, F. & Dorsey, J., 2002. Fast bilateral filtering for the display of high dynamic range image. In *SIGGRAPH 2002 Conference Graphics Proceeding.*, 2002.
- EMPA Media Technology, 2015. *HDR Database*. [Online] Available at: <http://empamedia.ethz.ch/hdrdatabase/index.php> [Accessed 2015].
- Fattal, R., Lischinski, D. & Werman, M., 2002. Gradient domain high dynamic range compression. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002, Computer Graphics Proceedings.*, 2002.
- Ferwerda, J.A., Pattanaik, S.N., Shirley, P. & Greenberg, D.P., 1996. A Model of Visual Adaptation for Realistic Image Synthesis. In *SIGGRAPH '96 Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques.*, 1996.
- Gelfand, N., Adams, A., Park, S.H. & Pulli, K., 2010. Multi-exposure Imaging on Mobile Devices. In *MM '10 Proceedings of the 18th ACM international conference on Multimedia.*, 2010.
- Gonzalez, R.C. & Woods, R.E., 2007. *Digital Image Processing - Third Edition*. Pearson Education International.
- Goshtasby, A., 2005. *2-D and 3-D image registration for medical, remote sensing, and industrial applications*. John Wiley & Sons, Inc.

- Goshtasby, A.A., 2005. Fusion of multi-exposure images. *Image and Vision Computing*, 23(6), pp.611-18.
- Granados, M. et al., 2010. Optimal HDR reconstruction with linear digital cameras. In *CVPR 2010, The Twenty-Third IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Francisco, 2010.
- Hecht, S., Shlaer, S. & Pirenne, M.H., 1942. ENERGY, QUANTA, AND VISION. *The Journal of General Physiology*, 25(6), pp.819-40.
- Hoefflinger, B., 2007. *High-Dynamic-Range(HDR) Vision*. Springer.
- Huang, S., Chen, F. & Gong, X., 2014. Research on high dynamic range information capture of GEO camera. In *Proceedings of the SPIE, Volume 9151.*, 2014.
- Industrial Light & Magic, 2016. [Online] Available at: <http://www.openexr.com/> [Accessed 01 Augustus 2016].
- James, J., 2006. *Digital Intermediates for Film and Video*. Elsevier Inc.
- JPEG, 2016. *JPEG XR*. [Online] Available at: <https://jpeg.org/jpegxr/index.html> [Accessed 05 September 2016].
- Jung, J.-I. & Ho, Y.-S., 2013. Low-bit depth-high-dynamic range image generation by blending differently exposed images. *IET Image Processing*, 7(6), pp.606-15.
- Jung, C., Yang, Y. & Jiao, L., 2013. High dynamic range imaging on mobile devices using fusion of multiexposure images. *Optical Engineering*, 52(10).
- Kang, S.-J. et al., 2016. Novel Method to Generate the Ghost-Free Wide Dynamic Range Image. In *Consumer Electronics (ICCE), 2016 IEEE International Conference on.*, 2016.
- Kaschke, M., Donnerhacke, K.-H. & Rill, M.S., 2014. *Optical Devices in Ophthalmology and Optometry*. Weinheim, Germany: WILEY-VCH.
- Ke, P., Jung, C. & Fang, Y., 2015. Perceptual multi-exposure image fusion with overall image quality index and local saturation. *Multimedia Systems*, pp.1–12.
- Kocić, J., Popadić, I. & Livada, B., 2016. Image Quality Parameters - A short review and applicability analysis. In *OTEH 2016 - 7th International Scientific Conference On Defensive Technologies*. Belgrade, 2016.
- Kolb, H., 2012. *Webvision*. [Online] Available at: <http://webvision.med.utah.edu/book/part-i-foundations/gross-anatomy-of-the-ey/> [Accessed 7 July 2016].
- Korshunov, P. & Ebrahimi, T., 2012. A JPEG backward-compatible HDR image compression. In *Proc. SPIE 8499, Applications of Digital Image Processing XXXV, 84990J*. San Diego, 2012. SPIE.

Korshunov, P. et al., 2015. Subjective quality assessment database of HDR images compressed with JPEG XT. In *7th International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)*, 2015.

Kuroda, T., 2015. *Essential Principles of Image Sensors*. CRC Press Taylor & Francis Group.

Lapray, P.-J., Heyrman, B. & Ginhac, D., 2014. HDR-ARtiSt: an adaptive real-time smart camera for high dynamic range imaging. *Journal of Real-Time Image Processing*, pp.1-16.

Leffler, S., 2015. *LibTIFF - TIFF Library and Utilities*. [Online] Available at: <http://www.remotesensing.org/libtiff/> [Accessed 16 Augustus 2016].

Leflar, M., Hesham, O. & Joslin, C., 2009. Use of High Dynamic Range Images for Improved Medical Simulations. In *Modelling the Physiological Human*. Springer Berlin Heidelberg. pp.199-208.

LG, 2016. *Super UHD 4K HDR Smart LED TV*. [Online] Available at: <http://www.lg.com/us/tvs/lg-65UH9500-4k-uhd-tv> [Accessed 9 September 2016].

Li, S. & Kang, X., 2012. Fast Multi-exposure Image Fusion with Median Filter and Recursive Filter. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 58(2).

Li, Y., Qiao, Y. & Ruichek, Y., 2015. Multiframe based High Dynamic Range Monocular Vision System for Advanced Driver Assistance Systems. *IEEE Sensors Journal*, 15(10), pp.5433 - 5441.

Lukac, R., 2011. *Computational Photography - Methods and Applications*. CRC Press.

Luo, X., Wang, Z.-Y. & Jia, C.-B., 2014. A Low-Cost Vision System for Open Arc Welding Based on Multi-exposure. In *Robotic Welding, Intelligence and Automation RWIA 2014.*, 2014. Springer.

Mangiat, S. & Gibson, J., 2011. Inexpensive High Dynamic Range Video for large scale security and surveillance. In *MILCOM 2011 Military Communications Conference*. Baltimore, 2011.

Mann, S. et al., 2012. HDRchitecture: Real-time Stereoscopic - HDR Imaging for Extreme Dynamic Range. In *SIGGRAPH 2012*. Los Angeles, 2012.

Mann, S. & Picard, R.W., 1995. On being 'undigital' with digital cameras: extending dynamic range by combining differently exposed pictures. In *Proceedings of IS&T.*, 1995.

Mantiuk, R., Daly, S. & Kerofsky, L., 2008. Display Adaptive Tone Mapping. *ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2008*, 27(3), p.Article No. 68.

Mantiuk, R., Krawczyk, G., Myszkowski, K. & Seidel, H.-P., 2007. High Dynamic Range Image and Video Compression - Fidelity Matching Human Visual Performance. In *Proc. of IEEE International Conference on Image Processing.*, 2007.

- Mantiuk, R.K., Myszkowski, & Seidel, H.-P., 2016. *High Dynamic Range Imaging*. Wiley Encyclopedia of Electrical.
- McCann, J.J. & Rizzi, A., 2012. *The art and science of HDR imaging*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Mertens, T., Kautz, J. & Van Reeth, F., 2009. Exposure Fusion: A Simple and Practical Alternative to High Dynamic Range Photography. *Computer Graphics Forum*, 28(1), pp.161-71.
- Microsoft, 2016. *HD Photo Format Overview*. [Online] Available at: [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/gg430023\(v=vs.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/gg430023(v=vs.85).aspx) [Accessed 05 September 2016].
- Mitsunaga, T. & Nayar, S.K., 1999. Radiometric self calibration. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 1999.
- Nemoto, H., Korshunov, P., Hanhart, P. & Ebrahimi, T., 2015. Visual attention in LDR and HDR images. In *9th International Workshop on Video Processing and Quality Metrics for Consumer Electronics (VPQM)*. Chandler, Arizona, USA, 2015.
- Netflix, 2016. [Online] Available at: <http://4k.com/netflix-is-dramatically-expanding-its-4k-hdr-content-selection-for-2016-14173-2/> [Accessed 29 Augustus 2016].
- Ng, E.Y.K., Tan, H., Acharya, U.R. & Suri, J.S., 2012. *Human Eye Imaging and Modeling*. Boca Raton: CRC Press.
- OmniVision Technologies, 2016. *OV10642 RCCC CMOS 1.3-Megapixel (1280x1080) High Dynamic Range (HDR) High Definition Image Sensor*. [Online] Available at: <http://www.ovt.com/applications/application.php?id=7> [Accessed 7 September 2016].
- ON Semiconductor, 2016. *AR0231AT: 2.3 MP 1/2.7" CMOS Image Sensor*. [Online] Available at: <http://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=AR0231AT> [Accessed 08 September 2016].
- OpenEXR, 2016. [Online] Available at: <http://www.openexr.com/> [Accessed 03 September 2016].
- Panasonic, 2016. *4K Ultra HD Camcorder HC-VX870*. [Online] Available at: <http://www.panasonic.com/uk/consumer/cameras-camcorders/camcorders/hd-camcorders/hc-vx870.html> [Accessed 5 September 2016].
- Pattanaik, S.N., Ferwerda, J.A., Fairchild, M.D. & Greenberg, D.P., 1998. A Multiscale Model of Adaptation and Spatial Vision for Realistic Image Display. In *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques.*, 1998.
- Pattanaik, S., Tumblin, J., Yee, H. & Greenberg, D.P., 2000. Time-Dependent Visual Adaptation For Fast Realistic Image Display. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000.*, 2000.

- PetaPixel, 2015. *This is What the History of Camera Sales Looks Like with Smartphones Included*. [Online] Available at: <http://petapixel.com/2015/04/09/this-is-what-the-history-of-camera-sales-looks-like-with-smartphones-included/> [Accessed 28 July 2016].
- pfstools, 2016. *pfstools*. [Online] Available at: <http://pfstools.sourceforge.net/index.html> [Accessed 25 September 2016].
- Pixar, 2016. [Online] Available at: www.pixar.com [Accessed 15 Augustus 2016].
- Point Grey, 2016. *Ladybug5 USB 3.0*. [Online] Available at: <https://www.ptgrey.com/ladybug5-360-degree-usb3-spherical-camera-systems> [Accessed 20 Augustus 2016].
- Popadić, I. & Todorović, B.M., 2016. Image fusion based on the multi-exposed images. In *24th Telecommunications Forum TELFOR 2016*. Belgrade, 2016.
- Popadić, I., Todorović, B. & Kocić, J., 2016. Algoritam za procenu kvaliteta ekspozicije slike. In *Zbornik 60. konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku*. Zlatibor, 2016.
- Popadić, I., Todorović, B.M. & Reljin, I., 2016. Method for HDR-like imaging using industrial digital cameras. *Multimedia Tools and Applications*, pp.1-17.
- Rand, G., Broughton, C. & Quintenz-Fiedler, A., 2011. *Capture - Digital Photography Essentials*. 1st ed. Rocky Nook Inc.
- Reinhard, E., Khan, , Akyuz, A.O. & Johnson, G., 2008. *Color Imaging - Fundamentals and Applications*. A K Peters, Ltd.
- Reinhard, E., Stark, M., Shirley, P. & Ferwerda, J., 2002. Photographic Tone Reproduction for Digital Images. In *Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques.*, 2002.
- Reinhard, E. et al., 2010. *High dynamic range imaging : acquisition, display, and image-based lighting*. Second Edition ed. Elsevier.
- Rempel, A.G. et al., 2007. Ldr2Hdr: on-the-fly reverse tone mapping of legacy video and photographs. *ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2007*, 26(3).
- Robertson, M.A., Borman, S. & Stevenson, R.L., 2003. Estimation-theoretic approach to dynamic range enhancement using multiple exposures. *Journal of Electronic Imaging*, 12(2), pp.219-28.
- Sa, A.M., Carvalho, P.C. & Velho, L., 2007. *High Dynamic Range Imaging Reconstruction*. Morgan & Claypool Publishers.

Samsung, 2016. *65" KS7000 Flat SUHD Quantum Dot Ultra HD Premium HDR 1000 TV*. [Online] Available at: <http://www.samsung.com/uk/consumer/tv-audio-video/televisions/quantum-dot-display/UE65KS7000UXXU> [Accessed 9 September 2016].

Shah, P., Srikanth, T.V., Merchant, S.N. & Desai, U.B., 2014. Multimodal image/video fusion rule using generalized pixel significance based on statistical properties of the neighborhood. *Signal, Image and Video Processing*, 8(4), pp.723–38.

Smith, W.J., 2000. *Modern Optical Engineering - The Design of Optical Systems*. Third Edition ed. McGraw-Hill.

Society of Motion Picture and Television Engineers, Inc. (SMPTE), 2015. *High-Dynamic-Range (HDR) Imaging Ecosystem*. Study Group Report.

Sony, 2016. *FCBEV7300*. [Online] Available at: <https://pro.sony.com/bbsc/ssr/cat-camerasindustrial/cat-ciblockcameras/product-FCBEV7300/> [Accessed 22 September 2016].

Sony, 2016. *IMX214*. [Online] Available at: <http://www.sony.net/Products/SC-HP/IS/sensor1/products/imx214.html> [Accessed 07 September 2016].

Sony, 2016. *X930D/X940D*. [Online] Available at: <http://www.sony.com/electronics/televisions/xbr-x940d-x930d-series> [Accessed 9 September 2016].

Spheron, 2013. *Spheron VR*. [Online] Available at: <https://www.spheron.com/home.html> [Accessed 1 September 2016].

STMicroelectronics, 2016. *VG6640 1.3 megapixel high dynamic range image sensor*. [Online] Available at: http://www.st.com/content/st_com/en/products/imaging-and-photonics-solutions/cmos-image-sensors/vg6640.html [Accessed 7 September 2016].

Szeliski, R., 2011. *Computer Vision - Algorithms and Applications*. Springer.

Technicolor, 2016. *Technicolor Learning Center: HDR*. [Online] Available at: <http://www.technicolor.com/en/who-we-are/technicolor-learning-center/technicolor-learning-center-hdr%20> [Accessed 1 September 2016].

Terzis, A., 2016. *Handbook of Camera Monitor Systems: The Automotive Mirror-Replacement Technology based on ISO 16505*. Springer.

Tumblin, J., Hodgins, J.K. & Guenter, B.K., 1999. Two methods for display of high contrast images. *ACM Transactions on Graphics*, 18(1), pp.56-94.

UHD ALLIANCE, 2016. *UHD ALLIANCE PRESS RELEASE*. [Online] Available at: <http://www.uhdalliance.org/uhd-alliance-press-release-april-12-2016/> [Accessed 9 September 2016].

- Vlatacom Institute, 2013. *vCAM VIPC-3M1*. [Online] Available at: http://www.vlatacom.com/?page_id=791 [Accessed 22 September 2016].
- W3, 1996. *A Standard Default Color Space for the Internet - sRGB*. [Online] Available at: <https://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB> [Accessed 05 Augustus 2016].
- Wang, Z. & Bovik, A.C., 2006. *Modern Image Quality Assessment*. Morgan & Claypool.
- Ward Larson, G., Rushmeier, H. & Piatko, C., 1997. A Visibility Matching Tone Reproduction Operator For High Dynamic Range Scenes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 3(4), pp.291-306.
- Ward, G., 1994. A contrast-based scalefactor for luminance display. *Graphics Gems IV*, pp.415-21.
- Weiss-ag, 2016. *Civetta 360° digital imaging*. [Online] Available at: <http://www.weiss-ag.org/home/civetta/> [Accessed 8 September 2016].
- Wikipedia, 2016. *High-dynamic-range imaging*. [Online] Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/High-dynamic-range_imaging [Accessed 03 Augustus 2016].
- Wördenweber, B., Wallaschek, J., Boyce, P. & Hoffman, D., 2007. *Automotive Lighting and Human Vision*. Springer.
- XDepth, 2016. [Online] Available at: <http://www.xdepth.com/> [Accessed 05 September 2016].
- Yang, X.K. et al., 2005. Just noticeable distortion model and its applications in video coding. *Signal Processing: Image Communication*, 20(7), pp.662–80.
- Yang, X. et al., 2005. Motion-compensated residue preprocessing in video coding based on just-noticeable-distortion profile. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 15(6), pp.742-52.
- Yurek, J., 2015. Ultra High Definition - Beyond pixel count. *IEEE Consumer Electronics Magazine*.
- Yu, M. et al., 2013. A novel method for fusion of differently exposed images based on spatial distribution of intensity for ubiquitous multimedia. *Multimedia Tools and Applications*, 74(8), pp.2745–61.

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Илија Попадић је рођен 01.12.1982. године у Крагујевцу. Завршио је Прву крагујевачку гимназију 2001. године, у одељењу обдарених ученика математичке гимназије. Исте године уписао се на Електротехнички факултет у Београду. Дипломирао је у јануару 2008. године на одсеку за електронику, са темом „Дистрибуирани сензорски систем на бази Зиг-Би комуникације“, код ментора проф. др Лазара Сарановца. На докторске академске студије на Електротехничком факултету у Београду уписао се школске 2009/2010. године. Иницијално одабрани ментор био је проф. др Јован Елазар, а по његовом одласку у пензију менторство је преузела проф. др Ирини Рељин.

По дипломирању, од фебруара 2008. године, запослен је у компанији Vlatasom, која од 2015. године послује као институт. У Институту Vlatasom ради на позицији инжењера за истраживање и развој, са фокусом на развој уређаја за специјалне намене.

У децембру 2015. год. изабран је у звање вишег стручног сарадника од стране Научног већа Института Vlatasom. Био је носилац реализације два иновациона пројекта које је финансирало Министарство просвете, науке и технолошког развоја. Такође, учествовао је у реализацији једног прихваћеног техничког решења и два техничка решења чија је верификација у току.

У оквиру научно-истраживачког и стручног рада, руководио је или је као члан тима учествовао на већем броју пројеката који су реализовани у Институту Vlatasom и овде ће бити наведени само најважнији.

- Развој и реализација биометријског аутентификатора за узимање и поређење отиска прстију (руководилац пројекта).
- Развој и реализација мултифункционалне ИП камере и компресора слике (руководилац пројекта).
- Развој и реализација камере и пратећег електронског система за аутоматско препознавање регистарских таблица.
- Развој и реализација генератора случајних бројева и система за формирање крипто кључева.

Због заштите интелектуалне својине Института Vlatasom, већи део резултата истраживања и развоја није било могуће презентовати на конференцијама или публиковати у стручним и научним часописима. До сада је из области којима се бавио и које су повезане са предложеном темом докторске дисертације, као први аутор или коаутор објавио један рад у међународном часопису, три рада на међународним конференцијама и три рада која су реферисана на домаћим конференцијама.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани Илија Попадић

број индекса 09/5037

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Примена технике формирања слика проширеног динамичког опсега у
мониторингу лоше осветљене сцене

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Београду, 27.02.2017.

Потпис докторанда

Илија Попадић

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Илија Попадић

Број индекса 09/5037

Студијски програм Електротехника и рачунарство

Наслов рада Примена технике формирања слика проширеног
динамичког опсега у мониторингу лоше осветљене сцене

Ментор проф. др Ирини Рељин

Потписани Илија Попадић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, 27.02.2017.

Потпис докторанда

Илија Попадић

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Примена технике формирања слика проширеног динамичког опсега у мониторингу лоше осветљене сцене

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

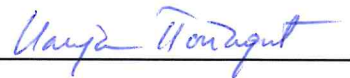
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Београду, 27.02.2017.

Потпис докторанда



1. Ауторство - Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.