

Puno hvala

profesorici Sonji Grgić za vodstvo, savjete i strpljenje,

obitelji za svu ljubav, podršku i vjeru u mene,

Heleni i Hani, koje su svojom pomoći uljepšale rad

i

svim prijateljima, uz koje su mi ove godine bile najdivnije razdoblje života.

Sadržaj

Uvod	3
1. Digitalna slika.....	4
1.1. Čovjekova percepcija boje.....	5
1.2. Prostor boja.....	6
1.2.1. RGB prostor boja.....	6
1.2.2. CIELAB i YUV prostori boja.....	7
1.3. Promjena kromatskih komponenti slike	8
1.3.1. Promjena zasićenja boje	8
1.3.2. Promjena vrste boje	10
1.4. Evaluacija kvalitete slike	11
2. Subjektivne metode evaluacije slike	13
2.1. Metode pojedinačnog podražaja.....	13
2.2. Metode dvostrukog podražaja	14
2.3. Metode usporedbe podražaja	14
3. Objektivne metode evaluacije slike.....	16
3.1. Podjela metoda ovisna o dostupnosti referentne slike.....	16
3.1.1. Metode koje zahtijevaju pristup potpunoj referentnoj slici	16
3.1.2. Metode koje zahtijevaju pristup dijelu informacija referentne slike	16
3.1.3. Metode koje ne zahtijevaju pristup referentnoj slici	17
3.2. Podjela metoda ovisna o području na kojem se temelje.....	17
3.2.1. Metode temeljene na ljudskom vizualnom sustavu	17
3.2.2. Metode temeljene na strukturnoj sličnosti.....	17
3.2.3. Metode temeljene na informacijsko-teorijskom pristupu.....	18
3.3. Pregled korištenih objektivnih metoda za evaluaciju kvalitete slike.....	18
3.3.1. MSE i PSNR.....	19

3.3.2.	SSIM.....	20
3.3.3.	CER	21
3.3.4.	UCIQE.....	23
3.3.5.	UIQM	24
3.3.6.	CCF.....	24
4.	Rezultati.....	26
4.1.	Uvod	26
4.2.	Subjektivna evaluacija slika	29
4.3.	Objektivna evaluacija slika.....	34
4.4.	Usporedba i analiza rezultata.....	42
	Zaključak	49
	Literatura	51
	Sažetak.....	53
	Summary.....	54
	Skraćenice.....	55

Uvod

Višestoljetni razvoj kamere rezultirao je razdobljem u kojem je čin fotografiranja dostupan gotovo svakome. Nakon stvaranja slike, ona se koristi u raznim okruženjima, od dijeljenja na društvenim medijima do primjene u mnogim industrijama. Tijekom korištenja slika u profesionalnim svrhama, ona se često obrađuje i analizira. Razina kvalitete slike koja se koristi vrlo je važna informacija.

Digitalna slika prikazuje se kao mreža piksela, od kojih svaki poprima određenu boju. Pri fotografiranju, boje stvarne scene pokušavaju se opisati ograničenim rasponom digitalnih vrijednosti. Ljudski vizualni sustav prilagođen je raspoznavanju mnogih nijansi boja koje znatno utječu na doživljaj okoline. Kako su krajnji korisnici slika uglavnom ljudi, prilagodba slike ljudskom vizualnom sustavu od velike je važnosti. Slikama se u određenim slučajevima mijenjaju značajke kako bi se postigli određeni efekti. Značajka koju ljudski promatrač prvu primijeti je vrsta boje, određena valnom duljinom. Osjetljivost na različite vrste boja kroz razvoj čovječanstva imao je veliku ulogu, pomažući procijeniti primjerice je li uzgajani plod zreo ili je još zelen i neprikladan za jesti. Osim vrste boje, zasićenje je značajka koja utječe na doživljaj slike. Utjecaj boje i promjene boje na kvalitetu slike značajan je dio evaluacije kvalitete.

Postupci za ocjenjivanje kvalitete slike mogu se podijeliti na subjektivne i objektivne. U subjektivnom odabrana skupina promatrača ocjenjuje kvalitetu prikazane slike. Subjektivna metoda atraktivna je jer za ocjenjivanje koristi krajnje korisnike – ljude. Ipak, zbog dugog trajanja i kompleksnosti izvedbe, razvile su se objektivne metode. One matematičkim modelom pokušavaju opisati ljudski vizualni sustav. Brže su i češće korištene, ali postižu različite razine uspjeha približavanja ljudskoj ocjeni.

Ovaj rad bavit će se utjecajem promjene vrste i zasićenja boja slike na njezinu kvalitetu. Dati će se pregled prostora boja, sustava opisa boja digitalne slike. Objasnit će se postupci subjektivne i objektivne analize slike te dati uvid u pojedinačne objektivne metode. Stvorit će se baza slika s modificiranim značajkama zasićenja i vrste boje. Nad bazom će se provesti subjektivno ispitivanje pomoću ispitanika te će programskim rješenjem objektivno ocijeniti kvaliteta. Provest će se usporedba dvije metode i analizirati njihova učinkovitost pri promjeni zasićenja i vrste boje.

1. Digitalna slika

Digitalna slika je slika koja se sastoji od konačnog broja malih elemenata, piksela. Piksel je najmanja razlučiva jedinica ekrana na kojem se slika prikazuje. Digitalna slika se veže s konceptima obrade, kompresije, pohrane i prikaza slika. Svaki od navedenih procesa može se obaviti na mnogo načina, ovisno o svrsi i mogućnostima korisnika. Digitalna slika postala je velik dio svakodnevice, od velikih industrija do običnog čovjeka koji mobitelom želi uvijekovječiti posebni trenutak.

Brz razvoj tehnologije za svakodnevnu uporabu očituje se u razvoju tehnologije vezane uz digitalne slike. Milijuni slika dnevno se stvaraju pomoću mobilnih telefona s kamerama, računala, skenera i drugih uređaja. Oni postaju sve razvijeniji, jeftiniji i lakši za korištenje. Fotografiranje više ne podrazumijeva posjedovanje analogne kamere i mjesta za razvoj slika s filma. U 21. stoljeću fotografija je široko dostupna. Digitalizacija je, uz pomoć Interneta, olakšala i dijeljenje slika putem društvenih medija kao što je Instagram. Osim raznostranosti, digitalna slika utjecala je i na mnoga druga područja života. Značajno je pomogla u edukaciji, gdje je uz digitalne projektore i ekrane učenicima lakše prikazati određene koncepte. U medicini se koristi tijekom dijagnostike i liječenja, skraćuje procese i ubrzava komunikaciju. Time dovodi do veće dostupnosti informacija i smanjenja cijena određenih procedura. Digitalna slika veoma je unaprijedila i područje informacijske tehnologije. Podaci se mogu trajnije sačuvati nego analognom slikom. Razvijaju se i potpuno nove grane tehnologije. Prepoznavanje uzoraka korisno je u područjima statističke analize podataka, strojnog učenja, računalne grafike, bioinformatike i mnogim drugima.

U digitalnom sustavu svi podaci prikazani su diskretnim vrijednostima, dok se analogno podaci prikazuju kontinuiranim vrijednostima. Elementi digitalne slike diskretno se opisuju pomoću dvodimenzionalne mreže piksela. Kroz prikaz slike svakom je pikselu dodijeljena numerička reprezentacija koja jedinstveno opisuje koje je boje taj element. Slika može biti crno-bijela. U tom slučaju vrijednost piksela označava nijansu sive boje koja se nalazi u rasponu od crne, najmanje moguće vrijednosti, do bijele, najviše moguće vrijednosti. Za sliku u boji sastav postaje složeniji. Postoje mnogi načini prikazivanja boja, ovisno o mediju prikaza i svrsi. Kako informacije o boji tvore veću količinu podataka od nijanse sive u crno-bijeloj slici, podiže se i pitanje efikasnosti. Mnoga rješenja pronađena su za opis slike što manjom količinom podataka. Cilj je što točnije predstaviti sliku ljudskom promatraču. Samo

poznavanje kompresije nije dovoljno, već je potrebno i pomno proučiti ulogu ljudskog vizualnog sustava, čime se bavi poglavlje 1.1.

1.1. Čovjekova percepcija boje

Ljudski vizualni sustav (*Human Visual System*, HVS) povezuje procese koji se događaju u osjetilnom organu, oku, i središnjem živčanom sustavu. Oko prima svjetlosne podražaje iz svoje okoline. Optički put uključuje mrežnicu, optički živac i trakt te vidni korteks. Elementi vidnog sustava surađuju na kompleksan način kako bi čovjeku omogućili osjetilo vida.

Nakon susreta s površinom oka, slika dopijeva u rožnicu. Ona pomaže fokusiranjem svjetla. Slika prolazi kroz zjenicu, središnji okrugli otvor u centru šarenice. Zjenica može kontrolirati veličinu kako bi odredila koliko svjetla treba proći. Leća oka se prilagođava ovisno o udaljenosti promatrane slike. Informacije nakon prolaska kroz leću konačno stižu do mrežnice. Slika dopire do fotoreceptora, receptora osjetljivih na svjetlost. Za pravilan vid, ljudima su potrebne dvije vrste, štapići i čunjići. Oni su završeci živaca koji svjetlost pretvaraju u elektrokemijske signale. Štapići se koriste za percepciju razine osvijetljenosti, a čunjići za razlikovanje boja. Signali putuju do optičkog živca, koji ih zatim šalje u vizualni centar mozga [1].

Za optimalan prikaz boja na ekranu bitno je shvatiti građu mrežnice. Štapići su značajno brojniji od čunjića, mrežnica ih sadrži oko 120 milijuna. Čunjića ima 6 do 7 milijuna. Fotoreceptori nisu ravnomjerno raspoređeni u mrežnici. Štapići su raspoređeni izvan centra mrežnice i zaslužni su za vid u mraku, detekciju pokreta te periferni vid. Čunjići su prisutni u cijeloj mrežnici, ali njihova najveća gustoća je u samom centru, u žutoj pjegi također zvanoj makula. Centar žute pjege, fovea, je točka promjera 0.3 mm u kojoj nema štapića, već samo skupina gusto zbijenih čunjića [2]. Dio viđene slike koji padne točno na foveu bit će najoštrije te imati najveći raspon boja.

Štapići nisu osjetljivi na boju, ali su vrlo efikasni u percepciji luminancije. U optimalnim uvjetima mogu detektirati individualni foton, od štapića su osjetljiviji više od tisuću puta [2]. Odgovorni su za vid prilagođen mraku, skotopski vid.

Čunjiće mrežnice može se podijeliti na tri vrste ovisno o osjetljivost na različite valne duljine. Crvenih čunjića ima 64%, zelenih 32%, a plavih 2%. Čunjići osjetljivi na plavu boju su najosjetljiviji i većinom se nalaze izvan fovee. Unatoč tome, u konačnoj percepciji boja osjetljivost na plavu nije umanjena [2]. Čunjići su najosjetljiviji na valne duljine oko 555

nm, žuto-zelene boje. Uz pomoć tri vrste čunjića ljudsko oko može percipirati jako velik broj nijansi boja. Kako bi se ugodilo ljudskom vizualnom sustavu pri prikazu boja na ekranu, razvile su se razne metode. U pitanje nije došla samo tema kako prikazati što više boja, već i kojim ih je sustavom najbolje definirati.

1.2. Prostor boja

Prostor boja organizira boje u specifično definiranom sustavu. Služi kako bi se boje mogle lakše i preciznije reproducirati u različitim analognim i digitalnim okruženjima. Prostori boja mogu biti strukturirani pomoću matematičke pozadine kako bi se optimizirao i pojednostavnio budući prikaz. Za korištenje u grafičkom dizajnu i analognim primjenama nekada se koriste proizvoljni prostori boja, koji se sastoje od seta diskretnih nijansi boja dostupnih tijekom rada, primjerice s tkaninama. Tekst u nastavku se orijentira na prvu vrstu prostora boja, kojima se barata tijekom prikaza digitalnih slika na ekranu.

Jedan od prvih pokušaja stvaranja prostora boja baziranog na ljudskom vizualnom sustavu je CIE 1931 XYZ prostor boja. Razvila ga je Međunarodna komisija za rasvjetu (*Commission internationale de l'éclairage*, CIE). Smatra se bazom većine današnjih prostora boja i sadrži sve boje koje ljudsko oko može razlikovati. Većina boja ne može se prikazati na ekranu ili ispisati pisačem [3]. Ekрани imaju različite mogućnosti prikazivanja sličnih nijansi. Usporedbom prostora boja karakteristike se mogu objektivno usporediti. Ograničen podskup boja koji je moguće prikazati određenim medijem zove se gamut. Gamut je različit za uređaje kao što su ekрани različitih uređaja, svojstava i proizvođača. Svaka boja koja je van gamuta mora se povezati s nekom bojom unutar gamuta kako bi se cijela slika mogla prikazati [4]. Iz CIE XYZ razvili su se novi prostori boja koji prikazu boja prilaze novim matematičkim konceptima i načinima.

1.2.1. RGB prostor boja

RGB prostor boja osnovan je na pravilima RGB modela boja. U RGB modelu tri su primarne boje – crvena, zelena i plava. Odabir primara povezan je s ljudskim vizualnom sustavom, u kojem su svi čunjići najosjetljiviji na jednu od te tri boje. Različitim kombinacijama primara dobivaju se sve boje koje je moguće prikazati. Model je aditivan, najmanji intenzitet triju primarnih boja rezultira crnom bojom, a najveći intenzitet bijelom [5]. RGB je najčešći način

za pohranu podataka o bojama slike. Za svaki dio spremaju se tri vrijednosti; količina crvene, zelene i plave boje u toj točki.

RGB model osnova je za različite RGB prostore boja, koji se razlikuju po kromatičnosti primara, bijeloj točki i gama kompresiji primara [5]. Kromatičnost je objektivna specifikacija kvalitete boje. Primari prolaze kroz gama kompresiju kako bi se što „prirodnije“ prikazale različite svjetline boje. Bijela točka označava točan set vrijednosti primara kojim se u sustavu dobiva bijela boja. Neki od često korištenih RGB prostora boja su sRGB, CIE RGB i Adobe RGB. sRGB je najčešće korišten RGB prostor za obradu slike [5]. Ima ograničen gamut kojim se slika može prikazati efikasno, no zbog toga gubi mogućnost prikazivanja određenih vrlo zasićenih boja.

1.2.2. CIELAB i YUV prostori boja

CIELAB i YUV prostore boja definirala je CIE [6]. Sličniji su načinu na koji funkcionira ljudski vizualni sustav od RGB prostora boja. Oba prostora opisuju se pomoću jednog luminantnog i dva krominantna kanala. Razdvajanje informacija o osvjetljenju i nijansi boje olakšava kompresiju. Ljudski vid vrlo je osjetljiv na promjene osvjetljenja i luminantni kanal treba sadržavati detaljne informacije. Razlikovanje boja u usporedbi nema jednako velik utjecaj na subjektivni doživljaj kvalitete pa se nad dva krominantna kanala može vršiti veća kompresija.

CIELAB se označava i kao $L^*a^*b^*$, u kojoj L^* , a^* i b^* predstavljaju vrijednosti kojima se mjeri i računa određena boja. Kanal L^* označava svjetlinu slike u razini između crne i bijele na skali od 0 do 100. a^* je kromatski kanal čija negativna vrijednost predstavlja zelenu, a pozitivna crvenu boju. Kanal b^* također je kromatski. Njegova negativna vrijednost predstavlja plavu, a pozitivna žutu boju [6]. Parovi zelena-crvena i plava-žuta u ovom se modelu smatraju parovima suprotnih boja. Osi nisu linearne, stoga je prostor teško prikazati dijagramom. Prostor je dobiven nelinearnom transformacijom RGB prostora. Percepcijski je uniforman, što znači da udaljenost dvije boje u prostoru boja odgovara doživljaju prosječnog promatrača [7].

Analogno, YUV prostor boja koristi Y^* , u^* i v^* kao oznake svojih kanala. Iz RGB kanala dobiven je linearnom transformacijom te mu se osi kojima se opisuju krominantne komponente razlikuju od CIELAB osi. Nije percepcijski uniforman.

1.3. Promjena kromatskih komponenti slike

Promjena kromatskih komponenti slike može se provesti u različitim dimenzijama. U ovom radu promatrat će se promjene zasićenja i vrste boje. Također je moguće mijenjati osvjetljenje slike ili više dimenzija odjednom.

Ovisno o drastičnosti promjene, ljudski promatrač neke promjene primjećuje lagano, dok druge ne može opaziti. Razlika boje također se može detektirati i opisati pomoću alata i programske podrške. Vektorskop je vrsta osciloskopa, instrument koji grafički prikazuje audio- ili videosignale koje mjeri. Pri mjerenju slike koristi oznake kojima opisuje zasićenje i nijansu boje. Središte prikaza označava bijelu boju, nultu nijansu i zasićenost. Boja se prikazuje vektorski. Potrebna su dva signala, signal razlike crvene komponente i luminantnog signala, te signal razlike plave komponente i luminantnog signala. Za svaki piksel dva signala stvaraju vektor koji sadrži informaciju o boji. Promjena nijanse (vrste) boje očituje se kružnim pomicanjem na prikazu vektorskopom dok se promjena zasićenja prikazuje promjenom duljine vektora [13].

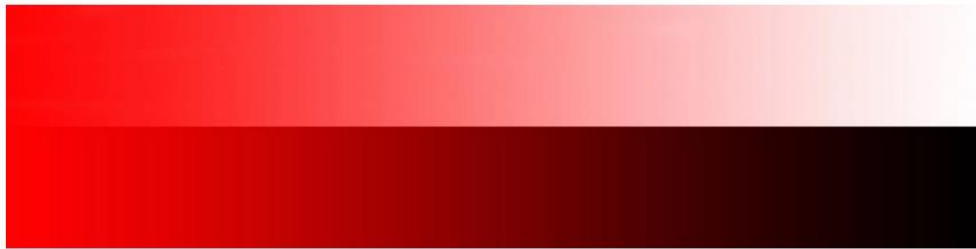
Vektorskopski prikaz slika u ovom radu stvoren je pomoću implementacije u programskom jeziku MATLAB [14]. Implementacija omogućuje učitavanje vlastite slike ili korištenje jednog od primjera. Vektorskopom se može izračunati za cijelu sliku ili željeni isječak. Pri korištenju u sklopu ovog rada, promatraju se vektorskopi cijelih slika. Usporedba vektorskopa originalne slike i izmijenjene efikasno prikazuje promjene u korištenim vrijednostima boja.

1.3.1. Promjena zasićenja boje

Zasićenje boje opisuje čistoću izvora boje. Ljudsko oko privučeno je jarkim bojama pa zasićenje igra veliku ulogu u čovjekovom doživljaju slike [9].

Slika 1.1 prikazuje primjer smanjenja zasićenja boje. U RGB prostoru boja svaki kanal može poprimiti vrijednost između 0 i 255. Lijevi kraj slike prikazuje čistu crvenu boju, maksimalno zasićenu. Crveni kanal poprima najveću vrijednost, 255, a zeleni i plavi poprimaju najnižu vrijednost, 0. Ove boja može se prikazati oznakom (255, 0, 0). Gornja traka prikazuje što se događa kada zelena i plava vrijednost rastu do najviše vrijednosti te krajnja bijela boja predstavlja nijansu (255, 255, 255). Donja traka prikazuje situaciju u kojoj se smanjuje vrijednost crvenog kanala do konačne crne boje, (0, 0, 0). U oba slučaja nijansa crvene postepeno postaje manje zasićena. Boje čije su tri RGB vrijednosti jednake

predstavljaju nijanse sive boje. Stoga, promjena kanala prema sličnijim vrijednostima na slici prikazuje se približavanjem sivoj boji iz čiste crvene. Dodavanjem sive zasićenje se snižava, a oduzimanjem sive boje zasićenje raste.



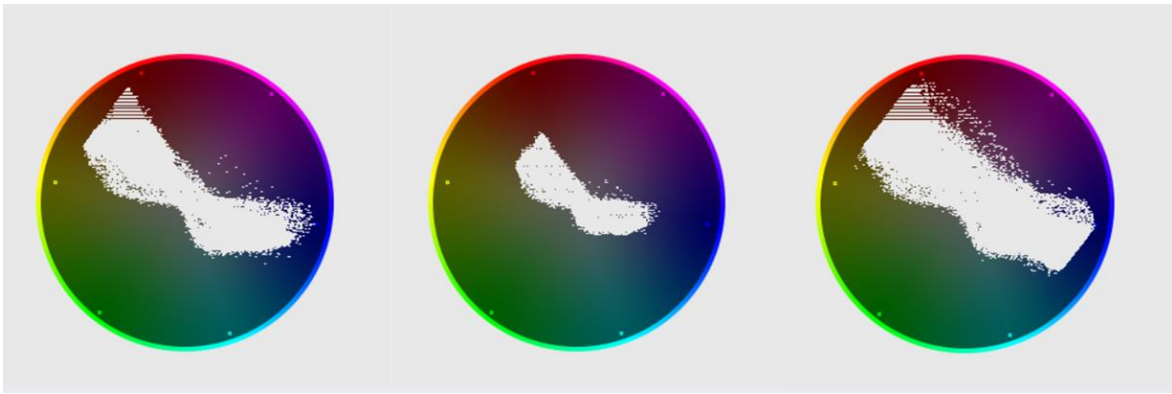
Slika 1.1 Gradijent crvene boje [9]

U LAB i YUV prostorima boja tijekom modifikacije zasićenja mijenjaju se vrijednosti krominantnih osi kako bi se tonovi približili ili udaljili od prikaza sivih tonova.

Vektorski prikaz promjene zasićenja (Slika 1.3) prikazuje različite razine boja na slikama prikazanim na Slika 1.2. Slika 1.2(a), fotografirana referentna slika, promatrana vektorskopom sadrži mnogo narančaste i plave boje. Slika 1.2(b) je zasićenje smanjeno. Kroz vektorskop se vidi kako slika još uvijek sadrži najviše narančaste i plave boje, ali u ne u najjarkijim nijansama na rubu vektorskopa. Raspon boja je manji i one su bliže centru, odnosno bijeloj boji i nijansama sive. Slika 1.2(c) ima povećano zasićenje boja u odnosu na referentnu (a) sliku. Na vektorskopu je prikazan veći broj piksela koji su bliži rubu, odnosno boje postaju jarkije i čišće. Površina korištenih vektora proširila se ulijevo i udesno te slika sada koristi više različitih vrijednosti boja, raspon je veći.



Slika 1.2 (a) izvorna slika, (b) slika sa smanjenim zasićenjem, (c) slika s povećanim zasićenjem



Slika 1.3 (a) vektorskop izvorne slike, (b) vektorskop slike sa smanjenim zasićenjem, (c) vektorskop slike s povećanim zasićenjem

1.3.2. Promjena vrste boje

Vrsta boje opisana je dominantnom valnom duljinom podražaja. Vrsta boje je dimenzija koju čovjek prvu svjesno primijeti, prije zasićenja ili svjetline boje [10].

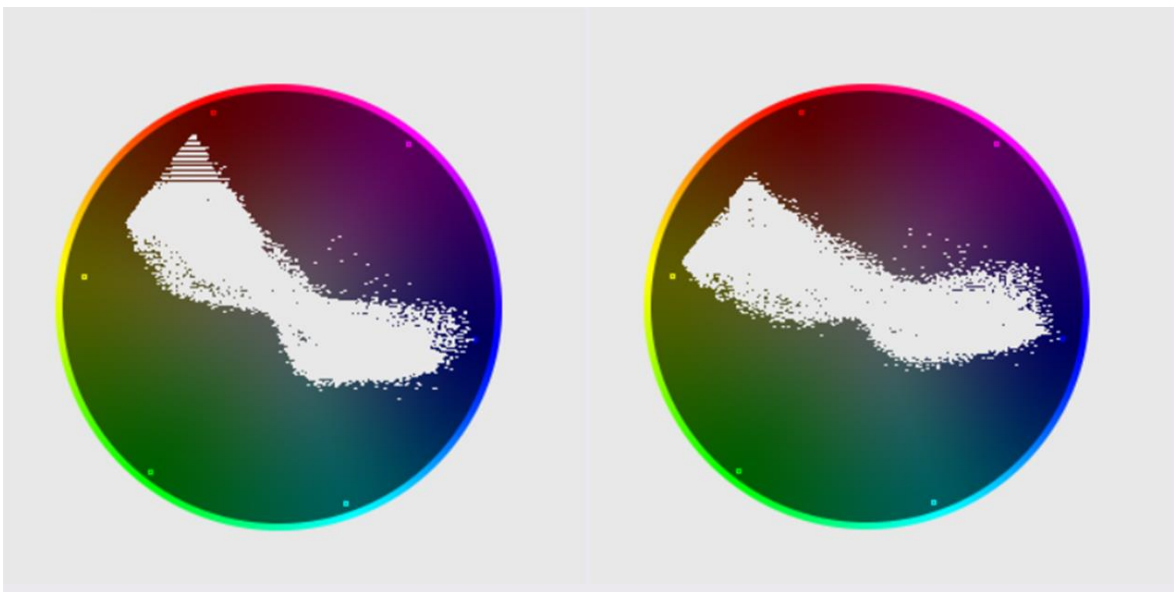
RGB prostor kao tri primarne vrste uzima crvenu, zelenu i plavu boju. Miješanjem čistih primarnih boja dobivaju se sekundarne boje: žuta (crvena + zelena), magenta (crvena + plava) i cijan (zelena + plava). Između primarnih i sekundarnih boja nalazi se mnogi drugi tonovi. Korištenjem različitih vrijednosti crvenog, zelenog i plavog kanala, moguće je proizvesti sve vrste boja prikazive RGB sustavom.

LAB i YUV prostori boja imaju dva kanala koja se koriste za prikaz boja. Promjenom vrijednosti a^* i b^* kanala u LAB prostorima te u^* i v^* u YUV prostorima mijenja se vrsta boje. Luminancija je opisana zasebnim kanalom koji se u tom slučaju ostaje nepromijenjen.

Slike Slika 1.4 i Slika 1.5 prikazuju utjecaj promjene vrste boje na izgled slike te na vektorski prikaz boja. Slika 1.4(a) prikazuje plave i narančaste naočale te je na prikazu vektorskopom vidljivo kako je najviše piksela upravo u nijansama te dvije boje. Slika 1.4(b) vrste boja su promijenjene, nijanse narančaste postale su više žute, a nijanse plave više ljubičaste. Ovakva promjena na vektorskopu je vidljiva kao zakretanje vektorskog prikaza ulijevo (Slika 1.5(b)). Ostao je gotovo istog oblika, no kut je promijenjen u skladu s novim stanjem boja. U slučaju kada bi se vektorskowski prikaz originalne slike zakrenuo udesno, promjena bi se prikazala crvenijim nijansama narančaste i zelenijim nijansama plave boje.



Slika 1.4 (a) izvorna slika, (b) slika s promijenjenom vrstom boje



Slika 1.5 (a) vektorskop izvorne slike, (b) vektorskop slike s promijenjenom vrstom boje

1.4. Evaluacija kvalitete slike

Digitalna slika koristi se u mnogim područjima. Od slikanja do krajnje upotrebe njezina se kvaliteta na mnogo načina može degradirati. Primjerice, tijekom slikanja kamera može koristiti neadekvatne postavke ili se pri spremanju vrši kompresija te u procesu izgubi dio informacija. Evaluacija kvalitete slike vrlo je bitan proces jer narušena kvaliteta može rezultirati radom s netočnim podacima i formiranjem krivih zaključaka.

Evaluacija kvalitete slika može biti objektivna ili subjektivna. Kako su krajnji korisnici digitalnih slika većinom ljudi, subjektivna evaluacija je najpouzdanija metoda dobivanja informacija o slici. Negativne karakteristike takve evaluacije su dugo trajanje, velika količina potrebne opreme i velik broj ispitanika. Također, tijekom provođenja evaluacije bitno je pobrinuti se da je svaki ispitanik u istim uvjetima, što može uzrokovati daljnje

teškoće. Zbog svega navedenog razvilo se područje objektivne evaluacije slike. Cilj objektivnih metoda je stvoriti matematički model koji točno i brzo procjenjuje kvalitetu slike [11]. Rezultati modela trebali bi biti što sličniji odgovorima ljudskih promatrača. Obje vrste metoda imaju svoje vrline i mane te raznovrsne varijacije kako bi bile upotrebive u specifičnim situacijama. Njihove pojedinosti istražiti će se pomnije u poglavljima 2 i 3.

2. Subjektivne metode evaluacije slike

U subjektivnim metodama evaluacije slike određen broj ljudi podijeli svoje mišljenje o kvaliteti fotografije. Informacije se prikupe i analiziraju. Kako bi se osigurala vjerodostojnost rezultata, stvoreni su standardi da za subjektivnu evaluaciju.

Standard ITU-R BT.500-14 [12] opisuje metode za subjektivnu evaluaciju kvalitete slike na televizijskom ekranu. Osim samih metoda, opisuje kakvi bi uvjeti trebali postojati tijekom evaluacije, kako sastaviti instrukcije za ispitanike i kako prezentirati rezultate. Uvjeti tijekom evaluacije odnose se na osvjetljenje prostorije, postavke ekrana na kojem se slika prikazuje, udaljenost ispitanika od ekrana i kut gledanja. Navodi se da ispitanici ne bi trebali biti ljudi koji direktno rade na ispitanim slikama te je poželjno odabrati ljude koji nisu stručnjaci u tom području. Broj potrebnih ispitanika ovisi o svrsi i opsegu projekta, u većini slučajeva trebao bi biti minimalno petnaest. Prije evaluacije poželjno je provjeriti imaju li ispitanici normalnu vidnu oštrinu i vid boja. Instrukcije dane ispitanicima prije evaluacije moraju objasniti kako funkcionira metoda evaluacije, na koje čimbenike kvalitete trebaju pripaziti, ljestvicu ocjenjivanja i trajanje evaluacije. Prihvatljivo trajanje evaluacije je do pola sata. Slike se prikazuju nasumično kako specifični redoslijed slika ne bi mogao igrati ulogu u ocjenama [12]. U praksi se najčešće koriste standardizirane metode opisane u potpoglavljima 2.1. – 2.3.

Subjektivne metode evaluacije atraktivne su jer dobivene vrijednosti ovise o ljudskom vizualnom sustavu, koji može biti teško pravilno opisati matematičkim modelom. Ipak, takav pristup donosi značajne prepreke. Ocjene pojedinca u ispitivanju mogu ovisiti o njegovom raspoloženju i uvjetima u kojima se nalazi. Standardima poput ITU-R BT.500-14 utjecaj uvjeta okoline se pokušava neutralizirati. Ostala moguća odstupanja koja dolaze s ljudskim čimbenikom umanjuju se korištenjem velikog broja ispitanika. Proces subjektivne evaluacije zahtjevan je i dugotrajan.

2.1. Metode pojedinačnog podražaja

U metodama pojedinačnog podražaja svaka slika se pojedinačno prikazuje, nestaje te se od ispitanika traži da ocjeni sliku na skali. Svaka slika može se prikazati jednom ili više puta. Osim slika koje se ispituju, moguće je koristiti i dodatne referentne slike. Tipično se nakon

svake slike prikazuje neutralno sivo polje kako bi se ljudskom oku nova slika prezentirala u što sličnijim uvjetima.

Skala za ocjenu slike može biti kontinuirana ili nuditi određen broj diskretnih vrijednosti, primjerice ocjene od 1 do 5. Pri korištenju diskretnih vrijednosti ocjene mogu koristiti i riječima opisane razine kvalitete, od loše do odlične [12].

2.2. Metode dvostrukog podražaja

Metode dvostrukog podražaja u izvedbi slične metodama pojedinačnog podražaja. Bitna razlika je što se slika koja se evaluira prikazuje istovremeno s referentnom slikom. Nakon što se slike prestanu prikazivati, ispitanik sliku koja se evaluira ocjenjuje na skali. Dvije vrste ove metode su ocjena kvalitete sa skalom izobličenja i ocjena kvalitete slike s kontinuiranom skalom.

Pri ocjenjivanju kvalitete sa skalom izobličenja ispitaniku se prikazuju referentna slika i slika narušene kvalitete. Narušene slike mogu biti oštećene na razne načine i različitih intenziteta. Ispitanik ocjenjuje razinu izobličenosti narušene slike imajući na umu referentnu. Korištena skala razine izobličenja je diskretna, s vrijednostima od „vrlo smetajuće“ (1) do „neprimjetno“ (5).

Tijekom procesa ocjenjivanja kvalitete slike s kontinuiranom skalom neoštećene slike služe kao referentne, ali ispitaniku nije dana informacija koja slika je koja. Redoslijed oštećena-neoštećena slika je nasumičan. Nakon promatranja obje slike, ispitanik ocjenjuje kvalitetu obje slike pomoću dvije kontinuirane skale s vrijednostima od loše do odlične. Unatoč korištenju zasebnih skala, ovo nije metoda kojom se ocjenjuje apsolutna kvaliteta svake pojedinačne slike. Rezultat izveden iz ove metode je razlika vrijednosti između oštećene i neoštećene slike [12].

2.3. Metode usporedbe podražaja

Metode usporedbe podražaja od zahtijevaju da ispitanik vrijednošću na skali opiše odnos između slika. Tijekom evaluacije istovremeno se prikazuju dvije slike. Ako je vremenski moguće, prikazuju se sve moguće kombinacije parova slika. Ako nije, uzima se uzorak parova.

Ispitaniku se daje skala koja kao vrijednosti koristi različite mogućnosti odnosa dvije slike. Moguće je imati skalu u kojoj dvije krajnosti predstavljaju sentimente „slike su jednake“ i „slike su potpuno različite.“ Druga mogućnost je skala s vrijednostima od „lijeva slika je puno lošija od desne“ (-3) do „lijeva slika je puno bolja od desne“ (+3) [12].

3. Objektivne metode evaluacije slike

Objektivne metode za evaluaciju slike proizašle su iz automatizacije procesa evaluacije. Idealna objektivna metoda može točno i precizno oponašati vrijednosti koje bi proizveo prosječni ljudski promatrač. Lakše ih je implementirati od subjektivnih metoda, no njihova funkcionalnost može varirati. Ovisno o sastavu slike i njezinoj svrsi, potrebno je odabrati prikladnu metodu. Različite podjele objektivnih metoda detaljnije su razrađene u potpoglavljima 3.1 i 3.2.

Objektivne metode široko su primjenjive. Primjerice, mogu pratiti kvalitetu slika u sustavima kontrole kvalitete. Primjenjuju se kako bi potrebni slikovni podaci bili što kvalitetniji. Također se koriste za usporedbu različitih algoritama za obradu slike. Rezultati algoritama koji ljudskom oku izgledaju isto računalo se mogu razlikovati. U tehnologijama telekomunikacija koriste se kako bi se optimizirali koderi i dekoderi u sustavima za prijenos slike. Algoritmi, sustavi i procesi mnogih se područja pomoću objektivnih metoda mogu optimizirati [11].

3.1. Podjela metoda ovisna o dostupnosti referentne slike

3.1.1. Metode koje zahtijevaju pristup potpunoj referentnoj slici

Kod metoda koje zahtijevaju pristup potpunoj referentnoj slici kvaliteta se računa u odnosu na referentnu sliku. Ove metode su relativne i koriste usporedbu vrijednosti dviju slika. Najbolja kvaliteta koju ispitna slika može postići je jednaka kvaliteti referentne slike [5].

Neke od često korištenih metoda s pristupom potpunoj referentnoj slici su srednja kvadratna pogreška (*Mean Square Error*, MSE), odnos signal-šum (*Peak Signal-to-Noise Ratio*, PSNR) i indeks strukturne sličnosti (*Structural Similarity Index*, SSIM).

3.1.2. Metode koje zahtijevaju pristup dijelu informacija referentne slike

U nekim slučajevima cijela referentna slika nije dostupna, ali dio informacija o slici jest. Tad se za ocjenu kvalitete koriste metode koje zahtijevaju pristup dijelu informacija referentne slike. Značajke su analizirane u obje slike te uspoređene kako bi se dobio konačan rezultat.

Metode bi trebale biti osjetljive na različite vrste distorzija i trebale bi uspješno sažeti važne dijelove slike. Važni aspekti mogu biti prostorni, primjerice grupe piksela, ili frekvencijske, primjerice informacija o tome ima li puno visokih ili niskih frekvencija. Što više značajki referentne slike je dostupno, toliko će metoda biti preciznija [11].

3.1.3. Metode koje ne zahtijevaju pristup referentnoj slici

Metode koje ne zahtijevaju pristup referentnoj slici su apsolutne i najčešće detektiraju specifične vrste distorzije. One se koriste u mnogim primjenama u kojima referentna slika nije dostupna [5], kao što je ocjenjivanje podvodnih slika (u kojima voda uvijek stvara nesavršenosti). Za stvaranje matematičkih modela takve su metode najkompleksnije, dok prosječni ljudski promatrač evaluaciju kvalitete bez referentne slike može obaviti vrlo efikasno. Ovaj raskorak vjerojatno postoji jer ljudski mozak sadrži puno prethodnih informacija i znanja o izgledu stvarnog svijeta, kao i prikazu svijeta na fotografijama [11].

3.2. Podjela metoda ovisna o području na kojem se temelje

3.2.1. Metode temeljene na ljudskom vizualnom sustavu

Metode temeljene na ljudskom vizualnom sustavu koriste matematičke modele koji se mogu pronaći u vizualnom sustavu ljudi, HVS-u. Većinom koriste inženjerski pristup i mjere prag vidljivosti signala i šuma. Pri mjerenju se u obzir uzima i sastav slike: kontrast, svjetlina, prostorne frekvencije i sl. Prag se koristi kako bi se normalizirala greška između referentne i modificirane slike. Mogućnost opisanih metoda da oponašaju ljudski vizualni sustav je ograničena. Mnogi dijelovi ljudskog vizualnog sustava nisu linearni i ne mogu se jednostavno opisati matematičkim modelom u praksi [13].

3.2.2. Metode temeljene na strukturnoj sličnosti

Dijelovi slika koji su blizu jedni drugima imaju visoku međusobnu ovisnost, odnosno visoko su strukturirani. Vjerojatnije je da će susjedni pikseli naličiti jedni drugima, nego da su veoma različitih vrijednosti. Metode temeljene na strukturnoj sličnosti ovu činjenicu koriste kako bi ocijenili kvalitetu. Ljudski vizualni sustav je vrlo prilagodljiv pri izvlačenju strukturnih informacija iz scena koje vidi i to je karakteristika koju ove metode imitiraju.

Metode temeljene na strukturnoj sličnosti definiraju strukturna i nestrukturna izobličenja te način da ih razdvoji. Nestrukturna izobličenja ne mijenjaju strukturu scene. Cilj ovih metoda je definirati nestrukturna izobličenja i ostala klasificirati kao strukturna. Neke od često korištenih metoda koje se temelje na strukturnoj sličnosti su indeks strukturne sličnosti (SSIM) i višerazinski indeks strukturne sličnosti (*Multiscale Structural Similarity Index*, MS-SSIM) [13].

3.2.3. Metode temeljene na informacijsko-teorijskom pristupu

Metode temeljene na informacijsko-teorijskom pristupu modeliraju degradaciju i prikaz slike kao komunikacijski kanal. Tijekom prenošenja informacija kanalom kapacitet prijenosa ograničen je i često dolazi do gubitka dijela podataka. U slučaju prijenosa slike ulazna informacija je referentna slika, a izlazna informacija je slika koju se testira. Metode se fokusiraju na kvalitetu kao količinu dijeljene informacije između testne i izvorne slike.

U metodama temeljenim na informacijsko-teorijskom pristupu temeljni je koncept vjerodostojnost informacija. Mjeri se sličnost slike narušene kvalitete i referentne slike te se izmjerena vrijednost kvantificira kroz koncept zajedničke informacije. Zajednička informacija je statistička mjera vjerodostojnosti informacije i ograničava količinu informacija dostupnih u slici. U slučaju kada je slici kvaliteta vrlo narušena, deformacija kanala je visoka i zajednička informacija niska. Tada ljudski promatrač ima velike teškoće s dobivanjem informacija sa slike, objekti su nejasni. Jedna od popularnih metoda temeljenih na informacijsko-teorijskom pristupu je indeks vizualne informacije (*Visual Information Fidelity Index*, VIF) [13].

3.3. Pregled korištenih objektivnih metoda za evaluaciju kvalitete slike

Kroz razvoj područja digitalne slike neke su metode za ocjenu kvalitete proizašle kao efikasnije od drugih. Točnost i performanse važne su karakteristike pri biranju metode. One popularnije često se implementiraju u bibliotekama programskih jezika koje su namijenjene za rad s digitalnim slikama. Poglavlje 3.3 daje pregled metoda odabranih za daljnju implementaciju u radu.

3.3.1. MSE i PSNR

Srednja kvadratna pogreška (MSE) i odnos signal-šum (PSNR) dugo su vremena neke od dominantnih metoda korištenih za obradu signala. U kontekstu slike, mjere promatraju vrijednosti piksela crno-bijelih slika. Jednostavne su i lagane za implementirati u programskim jezicima. MSE je definirana formulom (3.1), a PSNR formulom (3.2):

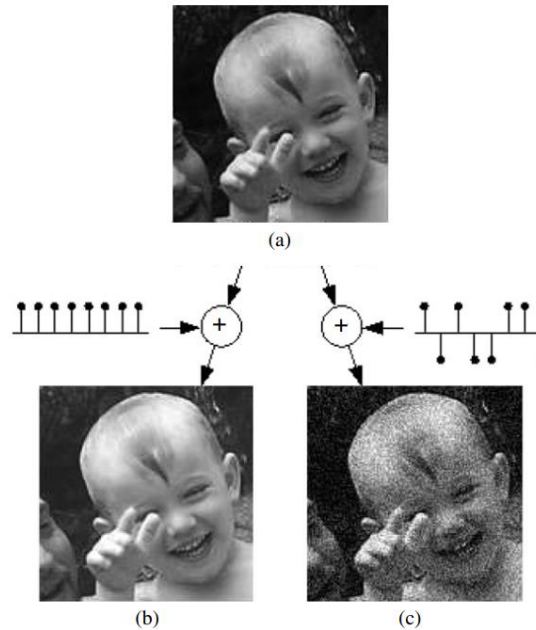
$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2 \quad (3.1),$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{L^2}{MSE} \quad (3.2).$$

U formuli (3.1) N je broj piksela u slici, a x_i i y_i su vrijednosti i -tih piksela dvije slike koje se uspoređuju. PSNR u formuli (3.2) koristi ocjenu metode MSE i L , raspon mogućih vrijednosti piksela, odnosno dinamički raspon.

MSE i PSNR ocjenjuju kvalitetu slike ovisno o devijaciji piksela, koja se još naziva i šum. Informacije iz slike čitaju se slijedno u redovima i stvaraju 1-D niz vrijednosti. Zbog jednostavnog računanja i male složenosti prikladne su metode za neke primjene u obradi slika. Korelacija metoda s ljudskom percepcijom najčešće je niska jer formule ne uzimaju u obzir sadržaj slika i vrijednosti susjednih piksela [5]. Zbog 1-D prikaza područje šuma koje zahvaća više redova ili stupaca piksela neće se registrirati kao takvo. Područje šuma velike površine ocijenit će se isto kao veći broj samostalnih piksela na kojima se javlja šum, dok bi ljudski promatrač zasigurno primijetio razliku.

Razlika metoda i ljudske percepcije može se proučiti pomoću primjera na Slika 3.1. Referentna slika Slika 3.1(a) modificirana je na dva načina. U slučaju Slika 3.1(b), vrijednosti svakog piksela dodana je konstanta. Rezultat dodavanja konstante je promjena svjetline cijele slike. U slučaju Slika 3.1(c), svakom pikselu konstanta je dodana s nasumičnim predznakom. Vrijednosti svih piksela Slika 3.1(b) i Slika 3.1(c) su jednako odmaknute od vrijednosti na Slika 3.1(a) i stoga su rezultati metoda MSE i PSNR slika jednake. Subjektivnom procjenom lako je vidljivo da je Slika 3.1(b) kvalitetnija od Slika 3.1(c), što nije moguće saznati samo objektivnim metodama MSE i SSIM.



Slika 3.1 (a) originalna slika, (b) slika dobivena dodavanjem konstante, (c) slika dobivena dodavanjem konstante nasumičnog predznaka [13]

3.3.2. SSIM

Indeks strukturne sličnosti (SSIM) pretpostavlja da je ljudski vizualni sustav vrlo dobro prilagođen raspoznavanju strukturalnih informacija u slici. Modelirajući tu značajku, metoda uzima u obzir ovisnost vrijednosti susjednih piksela. Zaključuje da važnost ne nosi samo pojedinačan piksel, već da i vrijednosti okoline sadrže veliku količinu informacije. Metoda temeljena na strukturnoj sličnosti zbog ovakvog modeliranja može dobro aproksimirati percipirano izobličenje slike. SSIM razdvaja tri usporedbe – usporedbe osvjjetljenja, kontrasta i strukture. Rezultati usporedbi kombiniraju se u jedinstvenu mjeru [11] te se izraz može opisati formulom (3.3).

$$S(x, y) = f[l(x, y), c(x, y), s(x, y)] \quad (3.3)$$

Formula (3.3) opisuje usporedbu referentnog signala i onog koji sadrži izobličenje, x i y . Usporedba osvjjetljenja opisana je izrazom $l(x, y)$, usporedba kontrasta izrazom $c(x, y)$ i usporedba strukture izrazom $s(x, y)$. Komponente su relativno neovisne, osvjjetljenje i kontrast imaju vrlo malen utjecaj na strukturu objekata na slici. Indeks strukturne sličnosti treba zadovoljavati tri uvjeta:

1. Simetričnost: $S(x, y) = S(y, x)$. Promjena redoslijeda ulaznih argumenata ne smije utjecati na rezultat.

2. Ograničenost: $S(x, y) = 1$. Maksimalna ocjena iznosi 1 i označava savršenu identičnost dva signala. Minimalna vrijednost, 0, označava potpuno različite slike.
3. Jedinostvenost maksimuma: $S(x, y) = 1$ ako i samo ako $x = y$. Iznos može biti maksimalan ako i samo ako su ulazni signali potpuno identični. Mjera treba detektirati bilo kakvu razliku signala.

Jednadžbe za osvjetljenje, kontrast i strukturu kombiniraju se kako bi se dobila jednadžba SSIM-a (3.4)

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \quad (3.4)$$

gdje μ_x i μ_y predstavljaju srednje intenzitete, σ_x , σ_y i σ_{xy} standardne devijacije, a C_1 i C_2 konstante. Konstante koje se koriste u praksi su predefinirane.

Pri korištenju mjere SSIM za evaluaciju kvalitete slike, slici se pristupa kao manjim blokovima, umjesto gledajući cjelinu. Bitan je razlog što se pri promatranju slike čovjek može pažljivo fokusirati na malo područje slike, svi dijelovi se ne doživljavaju u jednakoj rezoluciji. Korištenjem SSIM na manjim blokovima više informacija o slici postaje dostupno i moguće je napraviti mapu područja jačih i slabijih izobličenja. Idealna veličina blokova nije jednaka u svakom slučaju, već ovisi o sastavu slike i namjeni korištenja algoritma [11].

Za prosječan pregled SSIM vrijednosti cijele slike koristi se srednja vrijednost svih SSIM ocjena slike definirana jednadžbom (3.5):

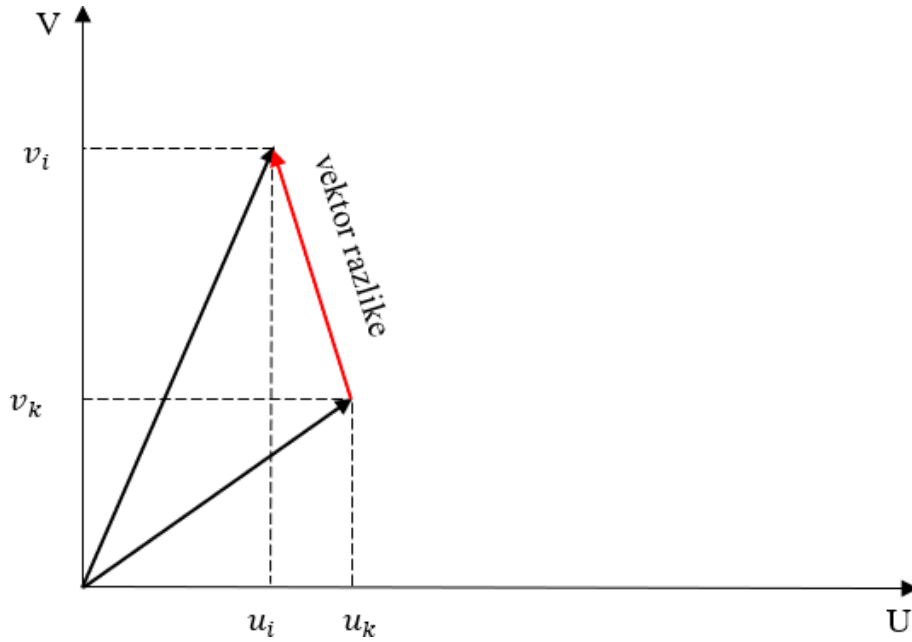
$$MSSIM(X, Y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M SSIM(x_j, y_j), \quad (3.5)$$

gdje X i Y predstavljaju referentnu i izobličenu sliku, M predstavlja broj blokova u slici, a x_j i y_j predstavljaju vrijednosti j -tog lokalnog prozora u objema slikama [13].

3.3.3. CER

Omjer pogreške boje (*Chroma Error Ratio*, CER) metoda je temeljena na usporedbi vektora boja izvorne i izmijenjene slike. Razvijena je u kontekstu analize objektivnih mjera za ocjenu kvalitete koloriziranih slika. Kao takva, stvorena je za rad sa slikama u boji, za razliku od prethodno spomenutih metoda. Brza je i jednostavna te su njezini rezultati u korelaciji s rezultatima mjera PSNR i SSIM.

CER je razvijen za upotrebu u YUV prostoru boja. YUV prostor dijeli kanale slike na jedan luminantni i dva krominantna te se u nastavku procjena kvalitete temelji isključivo na krominantnim komponentama. Slika (Slika 3.2) prikazuje krominantne vrijednosti pomoću koordinatnog sustava u kojem je vrijednost krominantnog kanala u^* na x osi, a vrijednost kanala v^* na y osi. Crni vektori su vektori boja dvije slike, izvorne (u_i, v_i) i kolorizirane (u_k, v_k) . Crveni vektor razlike opisuje koliko se izvorna i kolorizirana slika razlikuju u dvije krominantne komponente.



Slika 3.2 Grafički prikaz krominantnih vektora dvije slike i vektora razlike

CER brojkom opisuje odnos vektora boja dvije slike. Osnove metode su dvije formule, veličina vektora pogreške (*Error Vector Magnitude*, EVM) i omjer pogreške modulacije (*Modulation Error Ration*, MER). Omjer pogreške boje CER opisan je formulom (3.6).

$$CER(dB) = 10 \log \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [u_k^2 + v_k^2]}{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [(u_i - u_k)^2 + (v_i - v_k)^2]} \quad (3.6)$$

u_i i v_i označavaju U i V vrijednosti piksela izvorne slike, u_k i v_k označavaju U i V vrijednosti piksela izobličene slike, a N označava broj piksela u slici [13].

Mjera u obzir ne uzima luminantnu komponentu i stoga se ne može efektivno primijeniti za računanje sveukupne kvalitete slike. Ako se izobličenje u YUV prostoru realizira samo u promjeni luminantne komponente, CER ga neće detektirati. Napravljena je specifično kako bi ocijenila kvalitetu kolorizacije uspoređivanjem krominantnih komponenata dviju slika.

3.3.4. UCIQE

Utvrđivanje kvalitete podvodne slike vrlo je bitna komponenta obrade i analize podvodne fotografije. Fotografiranje pod vodom se susreće s lošom vidljivošću, niskim kontrastom, zamućivanjem i šumom zbog lošeg osvjetljenja objekata, raspršenja i apsorpcije. Navedeni problemi ovise o osvjetljenju, okolini i kompleksnim faktorima ovisnima o specifičnoj situaciji. Prethodno opisane mjere za evaluaciju slike, kao i mnoge druge, ne prilagođavaju se efektivno situaciji podvodnog fotografiranja, već pružaju generičko rješenje primjenjivo u što većem broju područja [15].

Boje se mijenjaju i nestaju pri različitim dubinama, ovisno o valnoj duljini. Crvenu boju označava najkraća valna duljina i ona nestaje prva. Rezultat ovoga je rijetko pojavljivanje crvene na podvodnim fotografijama i velike količine zelene i plave. Boje su manje zasićene kada je osvjetljenje smanjeno. Kontrast je smanjen zbog raspršenja unatrag, fenomena u kojem se dio svjetlosti reflektira od vode i dolazi do kamere prije svjetlosti reflektirane od samog objekta. Pri raspršenju unaprijed svjetlost nasumično skrene na putu od objekta do kamere. Raspršenje unaprijed rezultira velikim zamućenjem objekata, zbog kojeg detalji i oštri rubovi prestaju biti vidljivi. Netočan prikaz može biti uzrokovan i plutajućim česticama koje apsorbiraju i raspršuju dio svjetlosti. Prikaz boje, oštine i kontrasta vrlo su bitni atributi ljudskom vizualnom sustavu i stoga se analiziraju u mjerama za evaluaciju podvodne slike [13].

Mjera procjene kvalitete podvodnih slika u boji (*Underwater Color Image Quality Evaluation*, UICQE) je bazirana na CIELAB prostoru boja i njegovoj interpretaciji vrste, kontrasta i zasićenja boje. Definirana je formulom (3.7):

$$UCIQE = c_1 * \sigma_c + c_2 * con_1 + c_3 * \mu_s \quad (3.7)$$

gdje σ_c označava standardnu devijaciju vrste boje, con_1 označava kontrast osvjetljenosti, μ_s prosjek zasićenosti boje te c_1 , c_2 i c_3 označavaju težinske koeficijente koji ovise o tipu izobličenja i primjeni.

UCIQE ne koristi referentnu sliku, već rezultat temelji na značajkama koje su često degradirane na podvodnim slikama – boja, zamućenje i šum. Slike fotografirane pod vodom rijetko će imati referentnu sliku kako voda gotovo uvijek unosi izobličenja u prikaz objekta. Slične scene rezultirat će sličnim rezultatima te su dobiveni rezultati bolji od onih

proizvedenih standardnim mjerama za evaluaciju kvalitete. Mjera je brza i stoga dobra za praktičnu primjenu [15].

3.3.5. UIQM

Mjera kvalitete podvodnih slika (*Underwater Image Quality Measure*, UIQM) još je jedna predložena mjera za evaluaciju kvalitete podvodnih slika. Kao i UCIQE, ne koristi referentnu sliku, već samo značajke ispitne slike kako bi ocijenila kvalitetu.

UIQM koristi tri postojeće mjere za dobivanje informacija o atributima koje je potrebno ispitati u podvodnim slikama. Atributi koji se koriste su značajni i ljudskom promatraču te se na ovaj način mjera pokušava rezultatom približiti ljudskom vizualnom sustavu. Mjere koje se koriste su mjera obojenosti podvodnih slika (*Underwater Image Colorfulness Measure*, UICM), mjera oštine podvodnih slika (*Underwater Image Sharpness Measure*, UISM) i mjera kontrasta podvodnih slika (*Underwater Image Contrast Measure*, UIConM). Objedinjuju se u formuli (3.8):

$$UIQM = c_1 * UICM + c_2 * UISM + c_3 * UIConM \quad (3.8)$$

gdje c_1, c_2 i c_3 predstavljaju težine kojima uzimamo u obzir svaki od atributa [16]. Primjerice, fokusira li se projekt na slike visoke oštine, povećat će se vrijednost c_2 kako bi ocjena mjere UISM došla do izražaja. Osim za podvodne slike, koristi se i u području kolorizacije crno-bijelih slika [16].

3.3.6. CCF

CCF još je jedna popularna mjera za ocjenu kvalitete podvodnih slika. Također promatra tri atributa pri evaluaciji kvalitete – punoću boje, kontrast i gustoću plutajućih čestica. Indeks boje opisuje koliko je boje nestalo zbog apsorpcije, indeks kontrasta pomaže detektirati koliko na oštrinu utječe raspršenje unaprijed, a indeks gustoće čestice ocjenjuje količinu „magle“ čestica nastale raspršenjem unatrag. Mjera je izražena formulom (3.9):

$$CCF = \omega_1 * \text{punoća boje} + \omega_2 * \text{kontrast} + \omega_3 * \text{gustoća plutajućih čestica} \quad (3.9)$$

gdje ω_1, ω_2 i ω_3 predstavljaju težinske koeficijente komponenata. Ovisno o primjeni metode, koeficijenti se mogu mijenjati kako bi se istaknula važnost određene komponente.

Efektivna je i ima bolje performanse od mnogih drugih metoda namijenjenih za podvodne slike. Također se može koristiti za evaluaciju metoda obnove i poboljšanja slike [17].

4. Rezultati



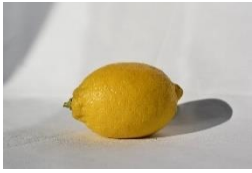



4.1. Uvod







Prije same evaluacije slika i analize rezultata, potrebno je sastaviti optimalnu bazu slika. Izvorne slike korištene u evaluaciji ne dolaze iz postojeće baze slika, već su fotografirane za potrebe rada.

Pri stvaranju baze slika, bitno je imati što raznovrsniji sadržaj. Rad u području evaluacije boja zahtjeva razne ekstreme i nijanse boja objekata. Poželjno je imati jednoboje i raznobojne slike, slike na kojima su boje jarke te slike gdje boje ne dolaze do izražaja. Različito osvjetljenje slike također može utjecati na doživljaj, kao i odsjaj od predmeta u blizini, pa je okolina objekta slike bitna gotovo koliko i objekt sam.

Izvorne slike s korištenim imenima prikazane su u tablici (Tablica 4.1). Baza izvornih slika sastoji se od 12 slika veličine 4496 x 3000 piksela. Fotografirane su kamerom Nikon D5600. Dio slika fotografiran je pred bijelom pozadinom na jakom osvjetljenju kako bi objekt i njegove boje došle do izražaja. Dio slika sadrži scene iz svakodnevnog života – zgrade, ulice, ljude. Takvi prizori sadrže mnogo detalja koji se prilikom obrade slike mogu degradirati, što se u mnogim slučajevima može detektirati objektivnim mjerama evaluacije. Pri jednostavnim scenama ljudski promatrač može lagano primijetiti dio distorzija. Gledajući primjerice prikaz zaposlene ulice neki će mu dijelovi promaknuti ako se ne koncentrira.

Tablica 4.1 Baza izvornih slika






















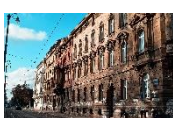








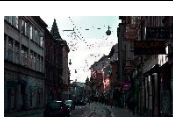









Naziv slike	Slika	Naziv slike	Slika	Naziv slike	Slika
0		1		2	
3		4		5	









6		7		8	
9		10		11	

Izvornim slikama modificiralo se zasićenje i vrsta boje. Utjecaj navedenih promjena na izgled slike i pripadajući vektorski prikaz promjena opisan je u poglavlju 1.3. Za svaku izvornu sliku stvorena je jedna verzija slike sa smanjenim zasićenjem i jedna s uvećanim. Pri jednoj promjeni vrste boje modifikacija je jedva uočljiva, dok je druga promjena veća i lakša za opaziti. Kada se mijenjala vrsta boje, obje promijene su rađene u istom smjeru. Primjerice, na slici s malom promjenom fotografirani limun je malo zeleniji od stvarnog, a na slici s većom promjenom još zeleniji. Promjene vrste i zasićenja boje radile su se neovisno, sve izmijenjene slike su izmijenjene samo na jedan od dva načina. Takvim postupanjem razdvaja se utjecaj dvije modifikacije i omogućuje se usporedba. Sve slike nisu modificirane jednakim odstupanjem od izvorne. Promjena značajki na jednak način nije jednako vidljiva na svakoj slici, već ovisi o promatranoj sceni. U tamnijim scenama boje su manje vidljive pa je moguće da slika treba drastičnije izmijeniti boju kako bi postigla isti „jedva vidljivi“ dojam promjene kao kod bolje osvijetljene scene.

Baza modificiranih slika sastoji se od 48 izmijenjenih slika, 4 izmjene svake izvorne slike. Karakteristike slike promijenjene su pomoću programa Adobe Photoshop, grafičkog programa namijenjenog za obradu slika. Izmijenjene slike s nazivima dostupne su u Tablica 4.2. Ime slike daje informaciju o modifikaciji – „h“ predstavlja promjenu vrste boje (eng. *hue*), a „s“ promjenu zasićenja (eng. *saturation*). Krajnji broj s predznakom predstavlja odmak od izvorne vrijednosti, iznos za koji je vrsta ili zasićenje promijenjeno u Photoshopu.

Tablica 4.2 Baza izmijenjenih slika

Naziv slike	Slika	Naziv slike	Slika	Naziv slike	Slika	Naziv slike	Slika
0-h+10		0-h+23		0-s+30		0-s-30	
1-h-8		1-h-17		1-s+40		1-s-40	
2-h+7		2-h+15		2-s+30		2-s-30	
3-h-9		3-h-18		3-s+30		3-s-30	
4-h+5		4-h+15		4-s+20		4-s-20	
5-h-8		5-h-18		5-s+40		5-s-30	
6-h-8		6-h-18		6-s+30		6-s-30	
7-h-15		7-h-30		7-s+50		7-s-50	
8-h+15		8-h+30		8-s+20		8-s-30	
9-h-8		9-h-15		9-s+30		9-s-30	

10-h-8		10-h-15		10-s+30		10-s-30	
11-h-8		11-h-15		11-s+30		11-s-20	

4.2. Subjektivna evaluacija slika

Subjektivna evaluacija slika provedena je u prostoriji Fakulteta elektrotehnike i računarstva. Evaluacije su provedene na tri jednaka monitora u učionici kako bi uvjeti u kojima se ispitanici nalaze bili što sličniji. Veličina ekrana može imati utjecaj u dojmu promatrane slike pa je korišten monitor velikih dimenzija kako bi se sačuvala što veća razina vidljivih detalja. Monitori su podešeni u skladu sa smjernicama za evaluaciju slike na televizijskom ekranu [12] te su u svim slučajevima bili jednako udaljeni od ispitanika. Značajke poput kontrasta boja i osvijetljenosti ekrana podešene su na srednje vrijednosti kako bi imale što manji utjecaj na ispitne slike.

Metoda koja se koristila za prikaz i ispitivanje naziva se metoda usporedbe podražaja i objašnjena je u poglavlju 2.3. Svi prikazani parovi slika sastojali su se od izvorne slike i izmijenjene slike. Ispitanik je znao da je jedna slika izvorna, ali nije mu poznato koja.

Prikazano je 48 parova, svaka modifikacija iz Tablica 4.2 i njezina izvorna slika iz Tablica 4.1. Svi parovi se prikazuju nasumičnim redoslijedom te je svaki ocjenjivač vidio različit slijed slika. Ako se prikažu sve četiri modifikacije iste originalne slike za redom, ispitanik se može naviknuti na podražaj i biti osjetljiviji na izmjene nego bi inače bio. Korištenim pristupom pokušao se smanjiti utjecaj navikavanja na podražaj na konačnu prosječnu ocjenu slike.

Aplikacija korištena za subjektivnu evaluaciju napravljena je u Angularu, okviru uobičajeno korištenom za razvoj web aplikacija. Angular koristi HTML za opis strukture aplikacije, CSS za oblikovanje izgleda i TypeScript za obradu logike i podataka. Pomoću okvira Electron stvorena je izvršna aplikacija koja je bila dostupna na tri računala korištenih za evaluaciju.

Prvi ekran aplikacije sadrži opis evaluacije i prikazan je Slika 4.1. Objašnjeni su metoda evaluacije, vrsta preinaka slika, način ocjenjivanja i trajanje. Kad ispitanik pročita instrukcije, ispitivanje kreće.

Evaluacija kvalitete slika

Dobrodošli na subjektivnu evaluaciju kvalitete slika.

U ovoj evaluaciji ispituje se utjecaj promjene zasićenja i tona boje na kvalitetu slike. Tijekom evaluacije bit će Vam prezentirani parovi slika, od kojih je jedna slika originalna, dok je drugoj izmijenjeno zasićenje ili ton.

Slika A (lijeva slika) i slika B (desna slika) prikazat će se istovremeno u trajanju od 15 sekundi, nakon čega slijedi sivi neutralni podražaj u trajanju od 4 sekunde. Svaki par slika A i B prikazat će se samo jednom, nakon čega slijedi idući set. Informacija o tome koja je slika u paru originalna neće biti dostupna.

Na desnoj je strani ekrana klizna skala kojom trebate ocijeniti koja Vam se slika više sviđa. Skala označava vrijednosti od -3 (slika B ima puno lošije boje od slike A) do +3 (slika B ima puno bolje boje od slike A). Na kraju evaluacije otvorit će se prozor za spremanje datoteke s odgovorima. Potrebno je samo stisnuti "Spremi."

Evaluacija traje 16 minuta.

Kreni

Slika 4.1 Aplikacija za subjektivnu evaluaciju - početne instrukcije

Prvi korak ispitivanja je formular koji traži osobne informacije ispitanika, vidljiv na Slika 4.2. Dob i spol korisne su informacije koje pri analizi mogu koristiti kao kategorije prema kojima se rezultati grupiraju i uspoređuju. Kako se evaluacija bavi doživljajem boja, provjerava se i ima li ispitanik daltonizam. Daltonizam, poremećaj raspoznavanja boja, mogao bi znatno utjecati na odgovore ovakve evaluacije.

Molim Vas unesite osnovne osobne informacije. Ove informacije ostaju anonimne i koriste se u statističke svrhe.

Dob
24

Spol: ☐ Muški ☒ Ženski

Mogu normalno raspoznavati boje (nemam daltonizam). ☒ Da ☐ Ne

Pokreni evaluaciju

Slika 4.2 Aplikacija za subjektivnu evaluaciju - unos osobnih informacija

Nakon ispunjavanja osobnih podataka počinje prikaz setova slika. Slika 4.3 prikazuje jedan od ekrana s parom slika. Skala za ocjenjivanje kvalitete je kontinuirana i ocjenjuje kvalitetu slike B (desne slike) u usporedbi sa slikom A (lijevom slikom). Vrijednosti se kreću od sentimenta „kvaliteta slike B je puno lošija od slike A,“ na dnu skale, do sentimenta „kvaliteta slike B je puno bolja od slike A,“ na vrhu skale. Ispod skale nalazi se traka prikaza

tijeka kako bi ispitanik imao osjećaj napretka u procesu i znao koliko je setova preostalo do kraja. Set je na ekranu prikazan petnaest sekundi tijekom kojih ispitanik treba ocijeniti odnos slika skalom. Period prikazivanja setova nije standardiziran za sve subjektivne evaluacije, važno je izabrati trajanje prikladno implementaciji. Koristi li se prekratko vrijeme prikaza, ispitanik može imati dojam da nije imao dovoljno vremena za donošenje prave odluke. Pri prikazu velikih scena ili scena s mnogo detalja, ispitaniku treba dati dovoljno vremena. U slučaju kad se koristi predugi period, ljudski vizualni sustav može se previše naviknuti na sliku. Kada se idući put prikaže modifikacija iste izvorne slike, ispitanik će lakše razabrati izvornu sliku koju je već vidio, što može utjecati na danu ocjenu.



Slika 4.3 Aplikacija za subjektivnu evaluaciju - evaluacija seta

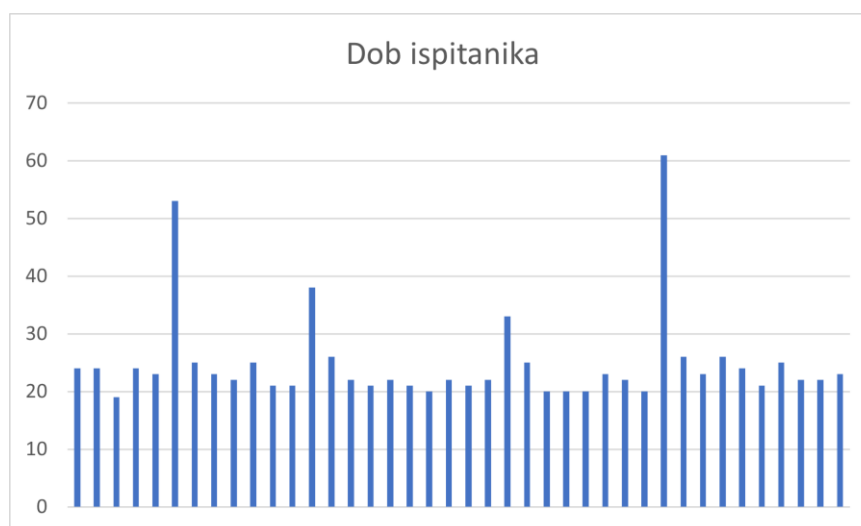
Između prikazivanja svaka dva seta slika, preko cijelog ekran prikaže se neutralni sivi podražaj u trajanju četiri sekunde. Primjer korištenog sivog podražaja nalazi se na Slika 4.4. Koristi se kako bi se vidni sustav vratio u „neutralno stanje“ i vidio svaki sljedeći set pod što sličnijim uvjetima. Korištena nijansa sive ima RGB vrijednosti (118, 118, 118) i predstavlja srednju vrijednost između crne i bijele boje.



Slika 4.4 Aplikacija za subjektivnu evaluaciju - neutralni sivi podražaj

Na kraju evaluacije ocjene svakog seta slika spremaju se u tekstualnu datoteku. Sve tekstualne datoteke sakupljene su i analizirane pomoću koda pisanog u programskom jeziku Python.

Subjektivnoj evaluaciji pristupilo je 45 ispitanika. Od 45, 25 ih je bilo muškog spola, a 20 ženskog spola. Kako bi usporedba prema spolu bila uravnotežena, odabrao se isti broj ispitanika oba spola, dvadeset. Zadnjih pet evaluacija ispitanika muškog spola ne ulazi u buduću obradu vrijednosti subjektivnih ocjena. Dob ispitanika grafički je prikazana Slika 4.5. Prosječna dob skupine ispitanika iznosi 25 godina. Većina ispitanika je slične dobi te se iz provedene evaluacije ne može napraviti usporedba dobnih skupina. Svi ispitanici mogu normalno raspoznavati boje, nemaju daltonizam.



Slika 4.5 Grafički prikaz ispitanika subjektivne evaluacije po dobi

Ocjene slika s kontinuirane skale transformira se u brojčanu vrijednost između -50 (izmijenjena slika je puno bolje kvalitete) i 50 (izvorna slika je puno bolje kvalitete).

Središnja vrijednost, nula, poručuje da su slike podjednake subjektivne kvalitete. Podaci svakog ispitanika normaliziraju se na navedeni raspon. Prosječna ocjena i standardna devijacija ocjene svake slike vidljiva je u Tablica 4.3. Stupci označavaju prosječnu ocjenu i standardnu devijaciju svi ispitanika te rezultate podijeljene po spolu. Najviša i najniža ocjena obje grupe istaknute su. Rezultati se većinom sastoje od pozitivnih prosječnih ocjena, odnosno ispitanici preferiraju izvorne slike. Promatrajući rezultate za cijelu skupinu ispitanika, od 24 promjene vrste boje, samo pet prosječnih ocjena su negativne. U svim slučajevima to su slike kojima je neznatno promijenjena boja te još uvijek izgledaju realistično. Ispitanicima se mnogo više sviđala izvorna slika u slučajevima kada je vrsta boje znatno promijenjena i stoga izgleda manje realistično od izvorne. U tablici rezultata može se primijetiti da je devet od dvanaest slika s povećanim zasićenjem ocijenjeno bolje od originala, dok nijedna od dvanaest slika sa smanjenim zasićenjem nije. Takav ishod slaže se s rezultatima prethodnog istraživanja koje je došlo do rezultata da ljudi preferiraju zasićenije slike, bile one stvarne ili modificirane [22].

Tablica 4.3 Rezultati subjektivnog ispitivanja

Naziv slike	Pros. ocjena (svi)	St. dev. (svi)	Pros. ocjena (Ž)	St. dev. (Ž)	Pros. ocjena (M)	St. dev. (M)
0-h+10	-0.1339	21.5433	1.2293	24.6691	-1.5689	18.2533
0-h+23	36.5535	24.6232	37.4133	24.4925	35.6938	25.3589
0-s+30	-8.3922	19.6136	-10.5364	19.0228	-6.2479	20.4472
0-s-30	10.9735	20.6512	10.8879	24.5723	11.0548	16.7604
1-h-17	18.4798	28.2183	22.5929	27.2884	14.3667	29.2262
1-h-8	5.6975	24.8762	9.2598	25.9114	2.3134	24.0176
1-s+40	7.4692	31.5220	5.3050	31.1693	9.6333	32.5298
1-s-40	27.8985	25.4346	32.8910	23.6743	23.1556	26.7257
2-h+15	-8.0268	31.8032	-7.5528	29.2892	-8.5271	35.1147
2-h+7	-10.4492	25.6877	-11.4041	28.9793	-9.4944	22.6436
2-s+30	-4.2712	23.0039	-6.9205	22.8636	-1.4825	23.4385
2-s-30	20.0747	20.8353	21.1580	22.0291	18.9915	20.1143
3-h-18	36.3571	19.9741	37.7052	22.5700	35.0765	17.6576
3-h-9	23.4630	18.0167	26.9401	11.4994	20.1598	22.3685
3-s+30	13.1395	21.5287	10.8701	19.0942	15.4089	23.9986
3-s-30	15.5958	23.4344	15.5805	21.9849	15.6118	25.4788
4-h+15	3.4265	31.8950	-1.5150	34.2085	8.6281	29.2693
4-h+5	-4.0873	20.9004	-3.8621	20.8158	-4.3125	21.5231
4-s+20	-11.4269	20.8522	-9.2589	25.3392	-13.7090	15.1484

4-s-20	18.1506	20.1373	15.4591	22.7831	20.8421	17.2971
5-h-18	22.4983	24.6188	19.9883	25.7591	25.0083	23.8176
5-h-8	7.7232	24.6530	1.1054	29.1901	14.3411	17.4147
5-s+40	-0.6451	29.7545	3.0819	31.8945	-4.5682	27.6329
5-s-30	13.3179	25.2289	21.0816	24.8401	6.3306	24.0609
6-h-18	29.1837	24.4424	27.1534	27.7374	31.2140	21.1721
6-h-8	14.1060	18.9789	11.1385	20.6426	17.0735	17.1667
6-s+30	-9.3857	25.9766	-8.3419	28.0186	-10.3773	24.5706
6-s-30	15.2942	22.4750	18.6243	18.7324	11.7888	25.8975
7-h-15	5.4823	22.3828	0.7333	24.3110	10.2313	19.7444
7-h-30	17.6010	26.3448	12.7885	28.0321	22.1729	24.4642
7-s+50	-10.7078	24.7573	-10.5376	23.2424	-10.8779	26.7925
7-s-50	27.1509	18.8270	25.4280	22.1095	28.8738	15.2474
8-h+15	12.3886	29.2171	0.8070	27.5495	23.9702	26.6616
8-h+30	8.3078	30.2851	4.1307	32.7148	12.4848	27.8508
8-s+20	3.2164	21.0035	3.0724	20.7201	3.3604	21.8209
8-s-30	18.3184	21.8107	16.5110	23.5396	20.1259	20.3827
9-h-15	4.5274	21.1231	5.0137	24.4193	4.0410	17.8985
9-h-8	-0.1985	20.9708	-1.6601	23.5428	1.2632	18.5797
9-s+30	-2.6569	25.2649	-2.0464	27.1152	-3.2369	24.0700
9-s-30	17.5042	20.8985	19.8637	24.4295	15.1447	17.0060
10-h-15	14.4033	24.9969	15.4765	24.3978	13.2109	26.3025
10-h-8	4.3001	24.1741	14.5678	18.2978	-5.4542	25.4167
10-s+30	-4.6445	26.3746	-10.8035	25.4831	1.5146	26.4311
10-s-30	23.2552	18.9366	23.8584	20.8961	22.6520	17.3118
11-h-15	22.8802	23.2744	20.5250	23.6197	25.4970	23.2742
11-h-8	6.7313	24.7878	13.3532	21.4983	-0.2390	26.6323
11-s+30	-4.7940	26.1297	0.4348	30.0046	-9.7613	21.4316
11-s-20	17.1402	16.7314	18.2227	15.4802	16.1119	18.1816

4.3. Objektivna evaluacija slika

Objektivna evaluacija slika obuhvaća sedam korištenih mjera – MSE, PSNR, SSIM, CER, UCIQE, UIQM i CCF. Teorija iza mjera objašnjena je u poglavlju 3.3. Odabrane mjere građene su na različitim teorijama i imaju različite prednosti i mane. Cilj je bio napraviti pregled mjera koje vrednuju različite značajke.

MSE i PSNR orijentiraju se na svaki piksel pojedinačno, čime detektiraju šum bez vrednovanja mogućeg većeg izobličenja. SSIM metoda računa ocjenu na suprotan način, fokusirajući se ne samo na piksel, već i na strukturu okolnog područja. U obzir uzima strukturu slike, osvijetljenost i kontrast, pomoću kojih se želi približiti načinu na koji funkcionira ljudski vizualni sustav. Tri navedene mjere originalno su namijenjene crno-bijelim slikama i kao takve ne pridaju boji digitalne slike važnost. CER se, suprotno od prethodne tri mjere, izričito fokusira na boju slike dok ignorira vrijednost luminantne komponente. Iako je pri generalnoj ocjeni kvalitete slike osvjetljenje vrlo bitno, u istraživanju utjecaja boje CER može biti od velikog značenja i donijeti novi uvid u informacije na slici.

Mjere koje koriste referentnu sliku uvijek ju uspoređuju s izvornom, no u nekim situacijama izvorna slika nije dostupna ili ne postoji. UCIQE, UIQM i CCF mjere su koje ne koriste referentne slike i stoga iza njih stoje drugačiji procesi. Mjere bez referentne slike gledaju značajke i sastav scene kako bi proizvele konačnu ocjenu. Kroz metode koje koriste referentnu sliku najviša kvaliteta koja se može postići je limitirana kvalitetom referentne slike. U tri zadnje navedene metode ne postoji takvo ograničenje već se svaka slika promatra potpuno neovisno.

Implementacija MSE, PSNR, SSIM i CER metoda ostvarena je u programskom jeziku Python. Za rad sa slikama korištene su biblioteke OpenCV [18] i sewar [19]. OpenCV koristi se za mnoge funkcije u obradi, evaluaciji i modifikaciji slike. Sewar je biblioteka različitih metoda za ocjenu kvalitete slika. Pomoću OpenCV slika se učitava iz direktorija i mijenja joj se prostor boja, dok se metodama biblioteke sewar ocjenjuje kvaliteta.

Pri računanju MSE, PSNR i SSIM metode koristila su se sva tri prethodno navedena prostora boja, RGB, YUV i LAB. Primjer implementacije za prostor boja LAB i metodu MSE prikazan je kodom 4.1. Analogni postupak koristi se za sve mjere i prostore boja. Korištene metode zahtijevaju učitavanje referentne i izmijenjene slike. Prvi korak bio je napraviti kopije slike početnog BGR prostora boja u drugim prostorima. Kako su metode sewara namijenjene za crno-bijele ulazne slike, tri kanala su se razdvojila u zasebne varijable. Ocjena se izračuna za svaki kanal odvojeno, a konačna ocjena slike dobiva se računanjem prosjeka kanala. Kako se rad bavi utjecajem boja, iz RGB prostora ocijenjeni su svi kanali. U YUV i LAB razmatrane su samo ocjene krominantnih kanala – u^* i v^* , odnosno a^* i b^* . Dok su MSE i PSNR jednostavne i brze metode, računanje SSIM ocjena izvodilo se dugo zbog veće složenosti kao i velikih dimenzija slika.

```

image_original=cv2.imread(filename.path)
image_modified=cv2.imread(filename2.path)
lab_img1 = cv2.cvtColor(image_original, cv2.COLOR_BGR2LAB)
l1, a1, b1 = cv2.split(lab_img1)
lab_img2 = cv2.cvtColor(image_modified, cv2.COLOR_BGR2LAB)
l2, a2, b2 = cv2.split(lab_img2)
mse_a = sewar.full_ref.mse(a1, a2)
mse_b = sewar.full_ref.mse(b1, b2)
mse_ab = (mse_a + mse_b)/2
print(mse_ab)

```

Kôd 4.2 MSE ocjena slike u LAB prostoru boja

Metoda CER razvijena je izričito za YUV prostor boja. Slike se učitavaju u BGR prostoru te mijenjaju u YUV analogno kodu 4.2. Koristi se implementacija metode iz rada u kojem je predložena [13], modificirana za potrebnu veličinu slike. Kôd 4.2 prikazuje algoritam računanja ocjene. Broju prolazaka kroz petlju je velik, ali je korištena logika jednostavna te je metoda brža od kompleksnijih metoda iz biblioteke sewar (npr. SSIM).

```

while (counter < 13488000):
    u_orig = niz_ul[counter]
    v_orig = niz_v1[counter]
    u_met = niz_u2[counter]
    v_met = niz_v2[counter]
    vector=math.sqrt((u_orig-u_met)**2+(v_orig-v_met)**2)
    pom1=u_met**2+v_met**2
    suma1=suma1+pom1
    pom2=(u_orig-u_met)**2+(v_orig-v_met)**2
    suma2=suma2+pom2
    vector_sum = vector_sum + vector
    vector_array.append(vector)
    counter=counter+1
print(vector_sum)
cer=10*math.log10((suma1 / 13488000)/(suma2 / 13488000))
print(cer)

```

Kôd 4.2 CER ocjena slike

Računanje ocjena metoda UCIQE, UIQM i CCF provelo se pomoću Platforme za evaluaciju kvalitete podvodnih slika [20], koja nudi online program za evaluaciju učitanih slika navedenim metodama.

Ocjene kvalitete slika dobivene metodama MSE i PSNR nalaze se u Tablica 4.4. MSE tijekom ocjenjivanja zbraja kvadrata razlika između vrijednosti piksela izvorne i ispitne slike. Niži rezultat označava manju razliku slika, odnosno višu kvalitetu. PSNR u izračunu koristi vrijednost $\frac{1}{MSE}$ pa je viša kvaliteta slike opisana višom PSNR ocjenom. U tablici su istaknuti najkvalitetniji rezultati za svaku metodu i prostor boja. Kako je PSNR ovisi o rezultatu MSE metode, za isti prostor boja ista slika ima obje najbolje ocjene. U YUV i LAB prostoru razlikuje se najkvalitetnija slika, unatoč činjenici da obje računaju kvalitetu krominantnih komponenti bez luminantne. Do takvih rezultata dolazi zbog korištenja različitih osi za opisivanje boja. Najbolji rezultat metode u RGB prostoru podudara se s vrijednosti u YUV prostoru. Unatoč tome, kako RGB pri ocjenjivanju koristi i informacije o osvjetljenju slike, rezultati ova dva prostora nisu uvijek vrlo slična.

Tablica 4.4 Rezultati objektivnog ispitivanja metodama MSE i PSNR

Naziv slike	MSE(rgb)	MSE(u*v*)	MSE(a*b*)	PSNR(rgb)	PSNR(u*v*)	PSNR(a*b*)
0-h+10	6.6534	3.5299	3.3149	43.2336	43.3740	43.8513
0-h+23	21.7460	16.7720	13.2188	36.5188	38.2279	38.6713
0-s+30	15.4467	9.3045	5.5770	36.3821	38.5994	40.8855
0-s-30	13.7671	7.1607	4.4367	36.9342	39.5865	42.0754
1-h-17	71.2446	39.3426	44.2260	35.2565	33.0481	32.3866
1-h-8	17.3023	9.2638	10.2462	39.1735	39.2873	38.6458
1-s+40	172.1829	87.3858	72.7527	26.1420	28.9498	31.1113
1-s-40	88.0006	44.2482	42.8047	29.0191	31.9322	33.8528
2-h+15	57.7860	31.6176	31.0738	39.0974	34.0086	34.5282
2-h+7	13.1907	6.7562	6.9030	43.2926	40.5003	40.9448
2-s+30	75.4741	37.2963	14.0480	30.1953	32.7414	38.5398
2-s-30	49.1052	24.0859	15.3760	31.8834	34.8175	40.1984
3-h-18	61.2222	32.7944	41.7883	37.5516	33.7110	32.4758
3-h-9	16.1522	8.5718	10.9336	40.7968	39.5401	38.2654
3-s+30	62.0556	32.9178	26.4258	30.9469	33.0326	35.3849
3-s-30	36.5778	19.1846	17.2740	33.1362	35.3844	37.6576
4-h+15	27.2497	20.2019	13.1434	36.7481	37.5549	39.5592
4-h+5	4.3184	2.4447	1.9124	45.1423	45.0169	45.8742
4-s+20	19.2928	9.7323	7.1506	35.4570	38.5290	42.0191
4-s-20	17.5850	9.3326	7.2238	35.7524	38.4333	40.8883
5-h-18	69.4199	35.9978	48.4258	40.5087	33.2633	31.4942
5-h-8	14.2417	7.3154	9.9814	43.4644	40.1640	38.3562
5-s+40	88.7972	46.1978	38.0549	29.7379	31.6264	35.4837

5-s-30	38.8703	20.3036	15.2547	33.5351	35.1089	39.5415
6-h-18	45.1534	32.0596	26.3592	35.4197	35.7591	35.5764
6-h-8	10.9310	6.8530	5.0719	40.3521	42.4134	42.5559
6-s+30	68.2941	29.0611	34.6221	30.0597	36.2416	33.8930
6-s-30	39.8114	16.3223	24.1842	32.2765	38.8164	35.5260
7-h-15	2.8779	1.3468	2.5831	45.2464	47.3316	44.1762
7-h-30	9.1023	4.5737	8.3417	41.6025	41.9910	39.0679
7-s+50	20.0272	10.7645	12.6003	35.5433	37.8179	37.7506
7-s-50	7.3560	3.7360	4.4101	39.8889	42.4147	42.2318
8-h+15	19.9437	10.5724	9.9039	41.3129	38.4838	39.0715
8-h+30	79.5594	42.1317	41.7882	37.3682	32.5515	32.9301
8-s+20	11.6710	8.4695	4.8712	37.6870	40.3611	41.2563
8-s-30	18.6454	13.7974	8.4230	35.7239	38.2321	38.8772
9-h-15	73.8749	37.4600	55.3622	36.4972	33.1546	30.8463
9-h-8	22.9825	11.0100	16.0931	38.3587	38.4175	36.2114
9-s+30	107.0384	57.3867	43.7110	29.4971	30.5814	33.3235
9-s-30	54.1406	28.5649	20.8111	32.5671	33.6091	37.8903
10-h-15	73.4043	36.8733	56.1667	36.6099	33.1357	30.8498
10-h-8	23.0351	11.7279	17.1240	38.4775	38.0302	35.9938
10-s+30	112.0671	55.8123	50.9659	28.7006	30.8594	32.6236
10-s-30	55.8919	29.5122	24.2399	31.7068	33.5793	37.4345
11-h-15	40.0120	26.4132	19.5797	33.7442	36.5127	36.6954
11-h-8	15.7549	8.5680	6.1714	37.2391	40.3501	40.8787
11-s+30	72.5508	31.4866	36.2314	29.8521	35.6667	33.5908
11-s-20	21.6337	8.5099	12.1634	34.9396	40.9184	38.2373

Ocjene dobivene metodama SSIM i CER u nalaze se u Tablica 4.5. U obje metode veća ocjena označava višu kvalitetu. U SSIM rezultatima podudaraju se najbolje ocijenjene slike u YUV i LAB prostorima, dok se RGB rezultat razlikuje. Nakon usporedbe s Tablica 4.4 vidljivo je da se slike najviše kvalitete rijetko ponavljaju između stupaca. Metode ocjenjuju različite karakteristike slika. Korištenjem CER metode, najbolje ocijenjena slika jednaka je kao i pri korištenju MSE i PSNR metoda za isti prostor boja (YUV). Rezultat metoda sličan je, ali ne uvijek jednak. U CER metodi osim korištenja razlike vrijednosti piksela dviju slika, koristi se i zbroj.

Tablica 4.5 Rezultati objektivnog ispitivanja metodama SSIM i CER

Naziv slike	SSIM(rgb)	SSIM(u*v*)	SSIM(a*b*)	CER
0-h+10	0.9890	0.9956	0.9961	36.6537

0-h+23	0.9884	0.9933	0.9937	29.8524
0-s+30	0.9720	0.9877	0.9907	32.4934
0-s-30	0.9832	0.9937	0.9949	33.5972
1-h-17	0.9931	0.9712	0.9620	26.3291
1-h-8	0.9977	0.9895	0.9862	32.4595
1-s+40	0.9678	0.9138	0.9228	22.5649
1-s-40	0.9885	0.9565	0.9540	25.5838
2-h+15	0.9829	0.9929	0.9934	26.9564
2-h+7	0.9902	0.9958	0.9962	33.7469
2-s+30	0.9424	0.9794	0.9880	26.4363
2-s-30	0.9781	0.9927	0.9944	28.2960
3-h-18	0.9877	0.9807	0.9660	27.1223
3-h-9	0.9948	0.9916	0.9847	32.8629
3-s+30	0.9699	0.9639	0.9626	26.9535
3-s-30	0.9854	0.9799	0.9751	29.2820
4-h+15	0.9710	0.9930	0.9942	28.9761
4-h+5	0.9889	0.9965	0.9971	38.2438
4-s+20	0.9732	0.9899	0.9932	32.3028
4-s-20	0.9744	0.9938	0.9953	32.4579
5-h-18	0.9928	0.9862	0.9774	26.6250
5-h-8	0.9962	0.9940	0.9897	33.5144
5-s+40	0.9744	0.9640	0.9633	25.5028
5-s-30	0.9900	0.9862	0.9818	29.0546
6-h-18	0.9875	0.9613	0.9618	26.8519
6-h-8	0.9955	0.9879	0.9871	33.4177
6-s+30	0.9675	0.9664	0.9638	26.8827
6-s-30	0.9847	0.9778	0.9720	29.6869
7-h-15	0.9924	0.9951	0.9877	40.8709
7-h-30	0.9872	0.9908	0.9794	35.5362
7-s+50	0.9530	0.9691	0.9562	31.9107
7-s-50	0.9823	0.9896	0.9818	36.4423
8-h+15	0.9904	0.9962	0.9960	31.9441
8-h+30	0.9866	0.9922	0.9923	25.8662
8-s+20	0.9831	0.9914	0.9927	33.0318
8-s-30	0.9840	0.9938	0.9944	30.8236
9-h-15	0.9784	0.9878	0.9804	26.2992
9-h-8	0.9804	0.9916	0.9864	31.7326
9-s+30	0.9735	0.9831	0.9783	24.7981

9-s-30	0.9787	0.9898	0.9856	27.6685
10-h-15	0.9902	0.9757	0.9589	26.4378
10-h-8	0.9936	0.9866	0.9802	31.4521
10-s+30	0.9835	0.9651	0.9663	24.8129
10-s-30	0.9906	0.9823	0.9818	27.4685
11-h-15	0.9910	0.9670	0.9670	27.6221
11-h-8	0.9944	0.9818	0.9795	32.4216
11-s+30	0.9823	0.9560	0.9503	26.5239
11-s-20	0.9920	0.9859	0.9805	32.4548

Rezultati ispitivanja kvalitete metodama UCIQE, UIQM i CCF, koje ne koriste referentnu sliku, dostupni su u Tablica 4.6. Najbolje ocijenjena slika nijedne od tri metode nije prethodno ocijenjena kao slika najviše kvalitete. UCIQE i CCF istu su sliku odabrali kao najkvalitetniju. Može se primijetiti kako su u prethodnim metodama najbolje ocijenjene slike uvijek imale promijenjenu vrstu boje („h“ u nazivu), dok su tri posljednje metode najvišu ocjenu dale slikama povišenog zasićenja („s“ u nazivu, nakon kojeg slijedi broj s pozitivnim predznakom). Fenomen se može objasniti činjenicom da su ove metode stvorene za evaluaciju kvalitete podvodnih slika u kojima često nedostaje oštrina i razlika među nijansama boja. Pri ocjenjivanju visoko vrednuju detalje i šarenilo. Slike s visokim zasićenjem te scenama parka i drveta ističu se u navedenim značajkama.

Tablica 4.6 Rezultati objektivnog ispitivanja metodama UCIQE, UIQM i CCF

Slike	UCIQE	UIQM	CCF
0-h+10	0.4861	0.4351	13.7089
0-h+23	0.4803	0.4342	13.5337
0-s+30	0.4974	0.4555	17.5914
0-s-30	0.4775	0.4192	9.0757
1-h-17	0.6500	0.7551	48.8003
1-h-8	0.6447	0.7551	49.0920
1-s+40	0.6738	0.8126	51.7233
1-s-40	0.6080	0.7185	47.4727
2-h+15	0.4739	0.3486	8.6534
2-h+7	0.4777	0.3442	8.7030
2-s+30	0.4998	0.3954	32.4801
2-s-30	0.4627	0.3123	7.1859
3-h-18	0.6522	0.7983	34.4393

3-h-9	0.6463	0.7988	34.6537
3-s+30	0.6701	0.8379	38.2037
3-s-30	0.6170	0.7699	32.6601
4-h+15	0.5054	0.3612	16.1094
4-h+5	0.5192	0.3750	16.2404
4-s+20	0.5346	0.4191	23.2068
4-s-20	0.5109	0.3562	7.2445
5-h-18	0.6503	0.8532	36.7208
5-h-8	0.6458	0.8431	36.9694
5-s+40	0.6733	0.8820	40.9182
5-s-30	0.6192	0.8134	36.1407
6-h-18	0.6360	0.7958	45.9124
6-h-8	0.6302	0.7945	46.4114
6-s+30	0.6407	0.8150	48.3839
6-s-30	0.6050	0.7776	44.8621
7-h-15	0.5786	0.7048	22.7864
7-h-30	0.5783	0.7033	22.7570
7-s+50	0.6051	0.7296	28.6321
7-s-50	0.5554	0.6924	20.3470
8-h+15	0.4450	0.3086	9.5027
8-h+30	0.4350	0.2927	9.4731
8-s+20	0.4662	0.3568	12.0726
8-s-30	0.4416	0.3086	7.2532
9-h-15	0.6345	0.7486	20.8059
9-h-8	0.6312	0.7475	20.8038
9-s+30	0.6469	0.8025	21.4966
9-s-30	0.6074	0.7107	20.2776
10-h-15	0.6525	0.8412	32.1768
10-h-8	0.6488	0.8353	32.2566
10-s+30	0.6697	0.9088	35.4659
10-s-30	0.6188	0.7890	30.1217
11-h-15	0.6481	0.8597	46.1371
11-h-8	0.6448	0.8617	46.2889
11-s+30	0.6570	0.8967	47.7685
11-s-20	0.6239	0.8467	44.0543

4.4. Usporedba i analiza rezultata

Analiza podataka predstavljenih u poglavljima 4.2 i 4.3 vršila se pomoću SPSS Statistics, programa koji je razvio i održava IBM. SPSS platforma nudi funkcionalnosti vizualizacije, pripremanja, obrade i pohrane podataka [21]. Pri usporedbi subjektivnih i objektivnih rezultata koriste se Kendallov tau i Spearmanov ro koeficijent. Oba koeficijenta su neparametarske mjere, odnosno ne ovise o distribuciji rezultata koje analiziraju [23]. Kendallov tau proučava odnos ovisnosti između dviju varijabli [24], a Spearmanov ro promatra devijacije u vrijednostima. Kendallov tau rezultira nižim koeficijentom od Spearmanovog roa i manje je osjetljiv na greške i odstupanja. U većini situacija mjere će rezultirati istim zaključkom [23]. Ipak, postoje rubni slučajevi u kojima dolazi do neslaganja je li korelacija značajna. Računajući oba koeficijenta, u rezultat je moguće dobiti bolji uvid i imati više povjerenja.

Tablica 4.7 predstavlja Kendallove i Spearmanove koeficijente korelacije subjektivnih i objektivnih ocjena kvalitete pri promjeni zasićenja. Oznaka „*“ uz broj označava da je korelacija statistički značajna uz p-vrijednost 0.05, a „***“ označava da je korelacija statistički značajna uz p-vrijednost 0.01. Svi takvi slučajevi korelacije subjektivnih i objektivnih rezultata su naglašeni u tablici. Slika 4.6 i Slika 4.7 grafički prikazuju koeficijente korelacije. Pri promjeni zasićenja boja statistički značajna korelacija subjektivne i objektivne ocjene ne pojavljuje se pri gotovo nijednoj mjeri. Većina koeficijenata blizu su nule, koja označava nepostojanje povezanosti. Jedina metoda sa značajnom korelacijom je SSIM korišten na RGB prostoru boja. Ocjene koreliraju za oba spola te za prosječnu ocjenu svih ispitivača. Pozitivni koeficijent označava da se ljudima više sviđa izvorna slika kada je izmijenjena slika više kvalitete. Ispitivači preferiraju izmijenjenu sliku kada je ona niže kvalitete prema SSIM-u. Ljudima se većinom sviđaju slike zasićenijih boja [22] pa su slike šarenije i zasićenije slike često bolje ocjenjivali (devet od dvanaest slika s povećanim zasićenjem bolje su ocijenjene od originala). Pri računanju ocjene SSIM se u ovom primjeru najviše približio ljudskim odgovorima. Jedna od značajki na koju se metoda fokusira je kontrast boja, koji se mijenja pri promjeni zasićenja. Metode za ocjenu kvalitete podvodnih slika također vrednuju kontrast, no nisu toliko uspješne, moguće zbog algoritma koji je podešen vidu boja pod vodom. Informacije o bojama bez luminantnosti u YUV i LAB prostoru nisu dovoljne za značajnu korelaciju pri korištenju

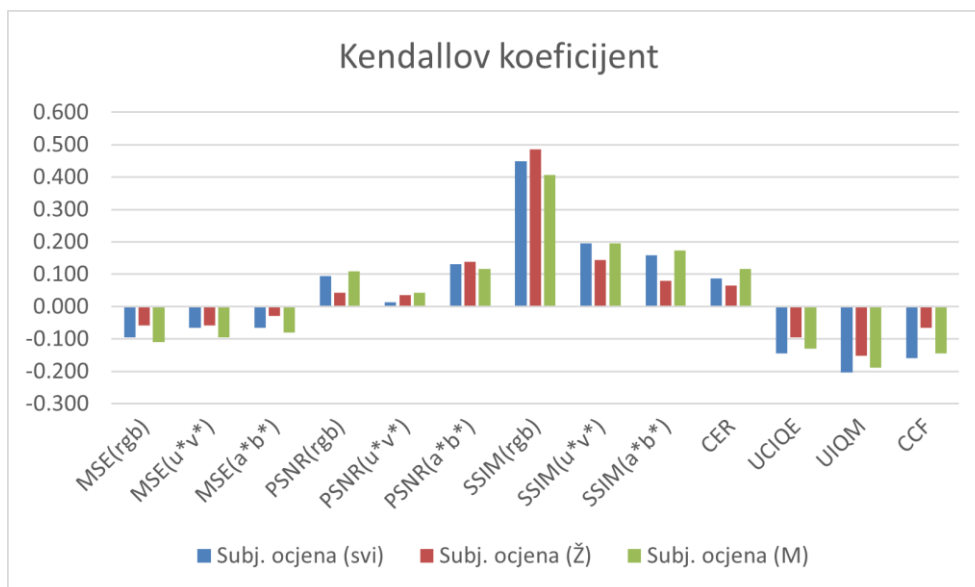
SSIM metode. Iako je boja utjecajna, bez informacije o luminantnom kanalu SSIM nema dovoljno informacija da ocjenu približi ljudskom mišljenju.

Tablica 4.7 Koeficijenti korelacije subjektivne i objektivne evaluacije kvalitete slike pri promjeni zasićenja boje

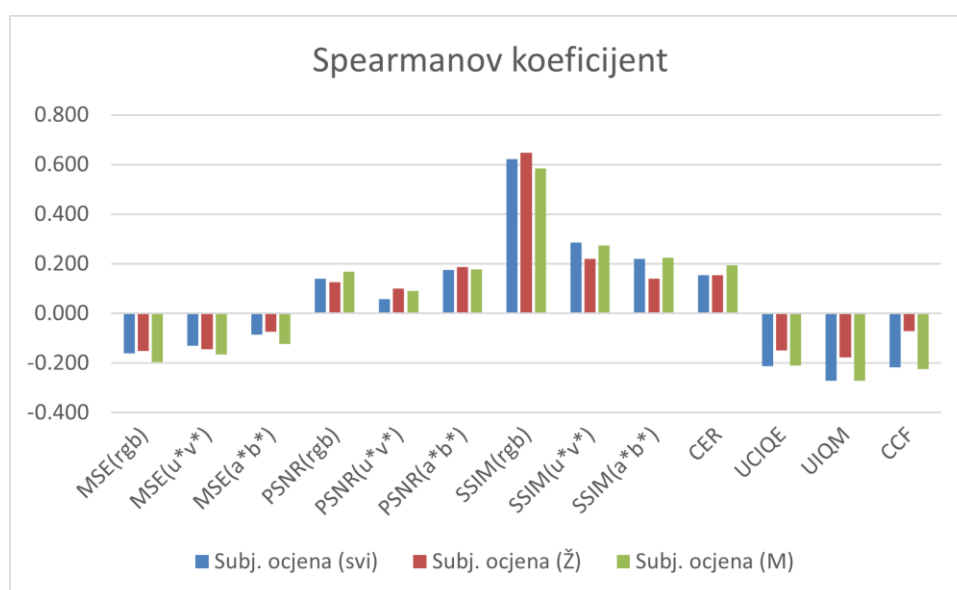
	Kendallov tau-b			Spearmanov ro		
	Subj. ocjena (svi)	Subj. ocjena (Ž)	Subj. ocjena (M)	Subj. ocjena (svi)	Subj. ocjena (Ž)	Subj. ocjena (M)
Subj. ocjena (svi)	1.000	,804**	,870**	1.000	,938**	,972**
Subj. ocjena (Ž)	,804**	1.000	,674**	,938**	1.000	,859**
Subj. ocjena (M)	,870**	,674**	1.000	,972**	,859**	1.000
MSE(rgb)	-0.094	-0.058	-0.109	-0.162	-0.151	-0.196
MSE(u*v*)	-0.065	-0.058	-0.094	-0.131	-0.143	-0.165
MSE(a*b*)	-0.065	-0.029	-0.080	-0.086	-0.075	-0.123
PSNR(rgb)	0.094	0.043	0.109	0.139	0.125	0.168
PSNR(u*v*)	0.014	0.036	0.043	0.058	0.101	0.091
PSNR(a*b*)	0.130	0.138	0.116	0.176	0.187	0.178
SSIM(rgb)	,449**	,486**	,406**	,621**	,647**	,585**
SSIM(u*v*)	0.196	0.145	0.196	0.286	0.219	0.274
SSIM(a*b*)	0.159	0.080	0.174	0.220	0.140	0.225
CER	0.087	0.065	0.116	0.154	0.153	0.195
UCIQE	-0.145	-0.094	-0.130	-0.212	-0.150	-0.210
UIQM	-0.203	-0.152	-0.188	-0.272	-0.177	-0.272
CCF	-0.159	-0.065	-0.145	-0.217	-0.072	-0.224

** . Korelacija je značajna uz p-vrijednost 0.01.

* . Korelacija je značajna uz p-vrijednost 0.05.



Slika 4.6 Grafički prikaz Kendallovog koeficijenta subjektivne i objektivne evaluacije kvalitete slike pri promjeni zasićenja boje



Slika 4.7 Grafički prikaz Spearmanovog koeficijenta subjektivne i objektivne evaluacije kvalitete slike pri promjeni zasićenja boje

U Tablica 4.8 prikazani su Kendallovi i Spearmanovi koeficijente korelacije subjektivnih i objektivnih ocjena kvalitete pri promjeni vrste boje. Oznake „*“ i „**“ kao u prethodnoj tablici, označavaju statističku značajnost uz p-vrijednosti 0.05 i 0.01. Slika 4.8 i Slika 4.9 grafički prikazuju koeficijente korelacije. Statistička značajnost može se pronaći u više

metoda, ali u različitim razinama značajnosti. SSIM jedna je od najuspješnijih mjera te postiže korelaciju u YUV i LAB prostorima, ali ne i u RGB. Negativni iznosi ovih korelacija označavaju da se ispitanicima više sviđaju izmijenjene slike više kvalitete, odnosno slike sličnije izvornima. Bolje ocjenjene izmijenjene slike one su koje izgledaju prirodno. Rezultati SSIM-a koreliraju s objektivnima kada se ukloni luminantna komponenta. Pri promjeni vrste boje metoda je efektivna kada nema informacije o osvjetljenju, koja je uvijek prisutna u RGB prostoru. Druge metode u kojima se koriste samo krominantni kanali ne postižu koeficijente na razini SSIM-a, što pokazuje da je on primjerenija metoda za ovakav tip ocjenjivanja kvalitete i bliži ljudskim rezultatima. U recima MSE metode za YUV i LAB prostore, PSNR za RGB i LAB prostore te mjera za ocjenu kvalitete podvodnih slika dolazi do neslaganja prosječnih ocjena muškog i ženskog spola. Odnos muških i ženskih ocjena analizirat će se pomoću t-testa (Tablica 4.9). Pri velikom neslaganju između prosječne ocjene spolova u pitanje se dovodi valjanost i korisnost subjektivne ocjene svih ispitivača. Zbog razlike nije moguće donijeti čvrst zaključak o uspješnosti nabrojenih metoda, već je potrebno daljnje istraživanje.

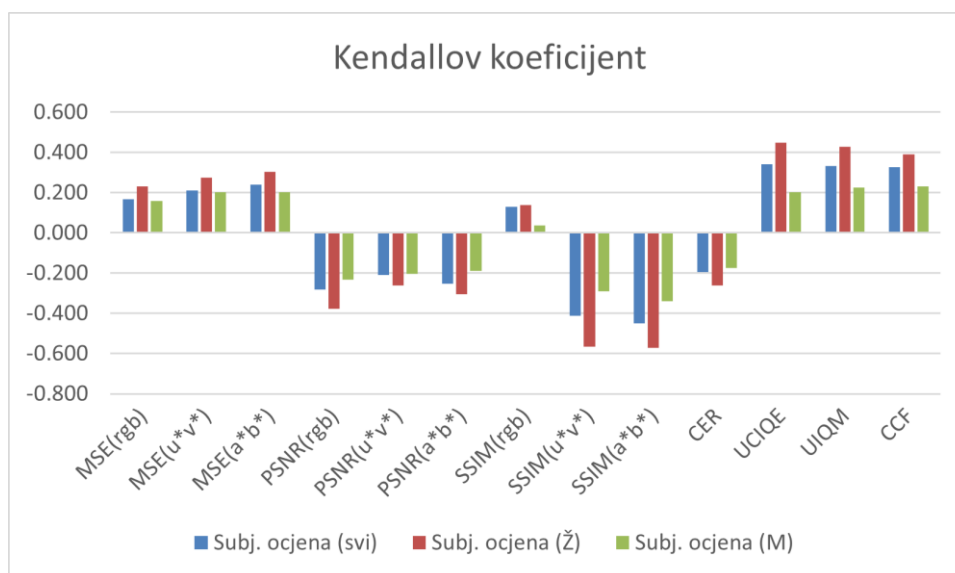
Tablica 4.8 Koeficijenti korelacije subjektivne i objektivne evaluacije kvalitete slike pri promjeni vrste boje

	Kendallov tau-b			Spearmanov ro		
	Subj. ocjena (svi)	Subj. ocjena (Ž)	Subj. ocjena (M)	Subj. ocjena (svi)	Subj. ocjena (Ž)	Subj. ocjena (M)
Subj. ocjena (svi)	1.000	,775**	,804**	1.000	,899**	,937**
Subj. ocjena (Ž)	,775**	1.000	,580**	,899**	1.000	,730**
Subj. ocjena (M)	,804**	,580**	1.000	,937**	,730**	1.000
MSE(rgb)	0.167	0.232	0.159	0.300	0.367	0.243
MSE(u*v*)	0.210	0.275	0.203	0.372	,428*	0.314
MSE(a*b*)	0.239	,304*	0.203	0.368	,450*	0.300
PSNR(rgb)	-0.283	-,377**	-0.232	-,416*	-,545**	-0.325
PSNR(u*v*)	-0.210	-0.261	-0.203	-0.337	-0.394	-0.277
PSNR(a*b*)	-0.254	-,304*	-0.188	-0.362	-,452*	-0.271
SSIM(rgb)	0.130	0.138	0.036	0.213	0.256	0.063
SSIM(u*v*)	-,413**	-,565**	-,290*	-,561**	-,733**	-0.391
SSIM(a*b*)	-,449**	-,572**	-,341*	-,616**	-,737**	-,460*

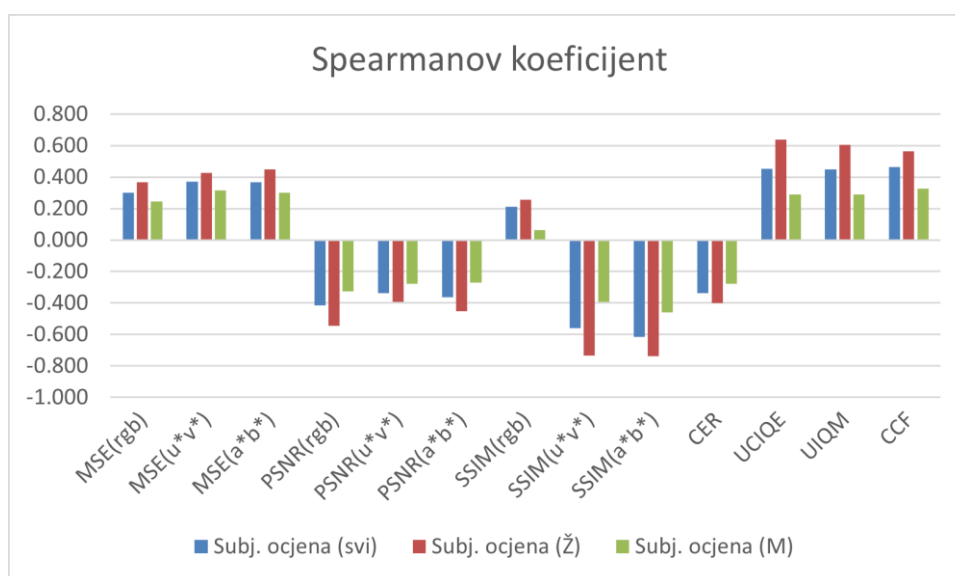
CER	-0.196	-0.261	-0.174	-0.339	-0.401	-0.280
UCIQE	,341*	,449**	0.203	,454*	,636**	0.290
UIQM	,333*	,428**	0.225	,449*	,606**	0.288
CCF	,326*	,391**	0.232	,465*	,565**	0.325

** . Korelacija je značajna uz p-vrijednost 0.01.

* . Korelacija je značajna uz p-vrijednost 0.05.



Slika 4.8 Grafički prikaz Kendallovog koeficijenta subjektivne i objektivne evaluacije kvalitete slike pri promjeni vrste boje



Slika 4.9 Grafički prikaz Spearmanovog koeficijenta subjektivne i objektivne evaluacije kvalitete slike pri promjeni vrste boje

Zbog neslaganja prosječne ocjene ženskih i muških ispitanika proveo se t-test, koji analizira je li razlika između njih statistički značajna. Neovisnost odgovora ispitanika muškog i ženskog spola testira se analizom svih danih odgovora. Kao uzorak rezultata, testiraju se ocjene sve četiri izmijenjene slike dobivene iz izvorne slike 0. Rezultati se nalaze u Tablica 4.9. Točnost premise provjerava se p-vrijednošću – razlika ocjena je statistički značajna ako je p-vrijednost manja od 0.05. Vrijednosti iz tablice mnogo su veće od te granice. Razlika korelacije ocjena ispitanika i ispitanica iz Tablica 4.8 stoga se ne objašnjava kao značajna.

Tablica 4.9 Rezultati t-testa ocjena ženskih i muških ispitanika subjektivne evaluacije za pojedinačne slike

Naziv slike	Srednja ocjena(Ž)	St. dev.(Ž)	Srednja ocjena(M)	St. dev.(M)	t	df	p-vrijednost
0-h+10	1.229	24.669	-1.569	18.253	0.401	37	0.691
0-h+23	37.413	24.493	35.694	25.359	0.218	38	0.828
0-s+30	-10.536	19.023	-6.248	20.447	-0.687	38	0.496
0-s-30	10.888	24.572	11.055	16.760	-0.025	37	0.980

Proveden je i t-test za sve ocjene koje su ispitanici dodijelili svim setovima slikama. Rezultati prikazani u Tablica 4.10. Dobivene srednje ocjene žena i muškaraca vrlo su slične, razlikuju se za 0.2845 na skali od 100. Obje srednje vrijednosti pozitivne su, što ukazuje na veću sklonost prirodnim slikama u odnosu na izmijenjene. p-vrijednost velika je, kao i u prethodnoj tablici. Ni gledajući sve rezultate skupno ne može se utvrditi statistički značajna razlika. Može se zaključiti da je razlika slučajna i da se dogodila zbog specifične grupe sudionika, odnosno da se muška i ženska grupa prosječno ne bi trebale značajno razlikovati.

Tablica 4.10 Rezultati t-testa ocjena ženskih i muških ispitanika subjektivne evaluacije za sve slike

Srednja ocjena(Ž)	St. dev.(Ž)	Srednja ocjena(M)	St. dev.(M)	t	df	p-vrijednost
9.4943	27.5105	9.7788	26.1348	-0.230	1873.079	0.818

Provedene su subjektivna evaluacija 40 ispitanika i objektivna evaluacija koristeći 13 kombinacija metode i 3 prostora boje. Pri promjeni zasićenja slike, samo je SSIM korišten u RGB prostoru rezultirao statistički značajnim koeficijentom korelacije. Koeficijenti ove kombinacije metode i prostora boja su znatno veći od ostalih. Konzistentni su u obje metode računanja korelacije, Kendalllovoj i Spearmanovoj, i značajni su za ocjene oba spola te

ocjene svih ispitivača zajedno. Zbog takvog poklapanja može se donijeti zaključak da pri promjeni zasićenja SSIM ocjena u RGB prostoru vrlo dobro opisuje ocjene ljudskih ispitanika. Dobiveni koeficijent označava da su ispitivačima atraktivnije bile slike manje SSIM kvalitete, različitije od originala. U rezultatima ocjena promjene vrste boje istaknula se SSIM metoda implementirane u LAB prostoru. Drugom najuspješnijom metodom pokazao se SSIM u YUV prostoru boja. Ispitivači su bolje ocijenili slike promijenjene vrste boje ako su bile visoke SSIM kvalitete, sličnije izvornoj slici. Visoka korelacija označava da je SSIM prikladan i pri promjeni vrste boje, ali u drugačijim prostorima boje nego pri promjeni zasićenja. MSE u RGB prostoru boja, PSNR u YUV prostoru i CER nisu pokazale korelaciju pri ispitivanju slika promijenjene vrste boje, kao ni pri izmjeni zasićenja. Metode MSE (u YUV i LAB prostorima), PSNR (u RGB i LAB prostorima), UCIQE, UIQM i CCF pri promjeni vrste boje rezultirale su korelacijom s odgovorima ženskog dijela subjektivne ispitne grupe, ali ne i s muškim. U metodama za podvodne slike, UCIQE, UIQM i CCF, izračunata je i značajna korelacija s ocjenom cjelokupne grupe ispitivača. Daljnjim provođenjem t-testa zaključeno je da razlika muških i ženskih odgovora slučajna, odnosno da nije statistički značajna. Zbog ovakvog rezultata, metode kod kojih postoje neslaganja trebala bi se pomnije istražiti. Detaljnije istraživanje moglo bi koristiti veći broj ispitanika za subjektivnu evaluaciju. Baza slika mogla bi se povećati koristeći više različitih izmijenjenih slika.

Zaključak

U ovom radu ispitan je utjecaj promjene vrste i zasićenja boje na kvalitetu slike. Vrsta boje određena je dominantnom valnom duljinom izvora svjetlosti. Zasićenje boje opisuje čistoću pobude izvora boje. Kvaliteta slike može se utvrditi subjektivnim i objektivnim metodama. Subjektivni način zahtjeva ljudske promatrače. Kako su ljudi većinom konačni korisnici digitalnih slika, njihovo mišljenje o kvaliteti vrlo je bitno. Mana subjektivnih metoda je kompleksnost izvedbe. Objektivne metode stoga koriste matematičke modele kako bi proizveli ocjenu kvalitete što sličniju ljudskoj na automatiziran način.

U ovom radu subjektivno se i objektivno ocjenjivala kvaliteta slika. Stvorena je baza slika s promjenama zasićenja i vrste boje. U subjektivnom ispitivanju sudjelovalo je 40 ispitanika. Slike su objektivno ocijenjene pomoću metoda MSE, PSNR, SSIM, CER, UCIQE, UIQM i CCF. Objektivne metode implementirane su u tri prostora boja – RGB, YUV i LAB.

Analiza rezultata razdvojena je za dvije izmjene – izmjenu zasićenja i vrste boje. Rezultati su promatrani za sve ispitanike, kao i za podskupine podijeljene po spolu. Pri promjeni zasićenja, metoda SSIM korištena u RGB prostoru pokazala je vrlo značajnu korelaciju s rezultatima subjektivnog ispitivanja. Rezultati su značajni u muškoj i ženskoj skupini, kao i gledajući cijelu grupu. Pri promjeni vrste boje, rezultati su u svim grupama značajni pri korištenju metode SSIM u LAB prostoru boja. SSIM (u YUV prostoru), MSE (u YUV i LAB prostorima), PSNR (u RGB i LAB prostorima), UCIQE, UIQM i CCF metode rezultirale su ocjenama koje koreliraju sa ženskim dijelom ispitne skupine, ali ne i s muškim dijelom. Daljnjom statističkom analizom utvrdilo se da razlika podskupina nije statistički značajna, odnosno da muškarci i žene kao grupe nisu različiti. Kako se rezultati ispitanika u ovom istraživanju ipak razlikuju između spolova, prije zaključka o uspješnosti metoda evaluacija bi se mogla ponoviti s većim brojem ispitanika i više modificiranih slika. MSE (RGB prostor), PSNR (YUV prostor) i CER nisu pokazale korelaciju ni pri jednoj modifikaciji slike.

SSIM metoda pokazala se najuspješnijom, no ni ona ne rezultira korelacijom u svim prostorima boja na jednak način. Uspjeh joj također ovisi o vrsti modifikacije slike. Testirane objektivne ocjene kvalitete ne pokazuju znatni uspjeh pri oponašanju ljudskog vrednovanja boje. Ljudski vizualni sustav vrlo je kompleksan i neki mu se dijelovi ne mogu opisati efikasnim objektivnim metodama. Već pri dvije različite modifikacije boje slike (vrsta i

zasićenje) vidljiva je nemogućnost objektivnih metoda da točno ocjene utjecaj promjene na ljudski doživljaj kvalitete.

Literatura

- [1] WebMD Editorial Contributors, Seltman, W., *Vision Basics: How Does Your Eye Work?*, WebMD, (2021, studeni). Poveznica: <https://www.webmd.com/eye-health/amazing-human-eye>; pristupljeno 23. studenog 2022 .
- [2] Nave, R., *The Rods and Cones of the Human Eye*, HyperPhysics. Poveznica: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/rodcone.html>; pristupljeno 23. studenog 2022.
- [3] *CIE 1931 Color Space*, Color Laboratory at the Department of Psychology. Poveznica: <https://www.mathpsy.uni-tuebingen.de/colorlab/theory.html>; pristupljeno 29. studenog 2022.
- [4] Lee, H. *Introduction to Color Imaging Science*. 1. izdanje. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [5] Preiss, J. *Color-Image Quality Assessment: From Metric to Application*. Doktorski rad. Tehničko sveučilište u Darmstadtu Odjel za strojarstvo, 2015.
- [6] Phillips, K., *What is CIELAB Color Space?*, HunterLab, (2022, listopad). Poveznica: <https://www.hunterlab.com/blog/what-is-cielab-color-space/>; pristupljeno 30. studenog 2022.
- [7] Hel-Or, H., *Information on the CIE LUV color space*, Color Vision Imaging Science & Technology. Poveznica: <http://cs.haifa.ac.il/hagit/courses/ist/Lectures/Demos/ColorApplet/me/infoluv.html>; pristupljeno 1. prosinca 2022.
- [8] Westland, S., Ripamonti, C. *Computational Colour Science using MATLAB*. 1. izdanje. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [9] Manickam, M., *What is Saturation? And How to Get Optimal Saturation*, Photography Life, (2019, travanj). Poveznica: <https://photographylife.com/what-is-saturation-and-how-to-get-optimal-saturation>; pristupljeno 10. siječnja 2023.
- [10] Cotnoir, L., *Hue, Value, Saturation*, Learn. Poveznica: <http://learn.leighcotnoir.com/artspcak/elements-color/hue-value-saturation/>; pristupljeno 10. siječnja 2023.
- [11] Mohammadi, P., Ebrahimi-Moghadam, A., Shirani, S. *Subjective and Objective Quality Assessment of Image: A Survey*. Sveučilište Ferdowsi u Mashhadu Odjel za elektrotehniku, Sveučilište McMaster Odjel za elektrotehniku i računarstvo, 2014.
- [12] *Recommendation ITU-R BT.500-14 Methodologies for the subjective assessment of the quality of television images*. Geneva: Electronic Publication, 2020.
- [13] Bilanović, N. *Objektivne mjere za ocjenu kvalitete koloriziranih crno-bijelih slika*. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2022.
- [14] Laguerre, S., *Vectorscope Image Analyzer*, MathWorks, (2016, svibanj). Poveznica: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/56546-vectorscope-image-analyzer>; pristupljeno 14. siječnja 2023.
- [15] Yang, M., Sowmya, A. *An Underwater Color Image Quality Evaluation Metric*, IEEE Transactions on Image Processing, 24, 12 (2015), str. 6062-6071

- [16] Panetta, K., Gao, Ch., Agaian, S. *Human-Visual-System-Inspired Underwater Image Quality Measures*, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 41, 3 (2016), str. 541-551
- [17] Wang, Y., Li, N., Li, Z., Gu, Z., Zheng, H., Zheng, B., Sun, M. *An imaging-inspired no-reference underwater color image quality assessment metric*, Computers & Electrical Engineering, 70 (2018), str. 904-913
- [18] OpenCV Team, *opencv-python*, PyPI, (2022, prosinac). Poveznica: <https://pypi.org/project/opencv-python/>; pristupljeno 22. siječnja 2023.
- [19] Khalel, A., *sewar*, PyPI, (2022, ožujak). Poveznica: <https://pypi.org/project/sewar/>; pristupljeno 22. siječnja 2023.
- [20] Li, C. Y., Mazzon, R., Cavallaro, A., *Underwater image filtering: methods, datasets and evaluation*, Platform for Underwater Image Quality Evaluation, (2020, prosinac). Poveznica: <https://puiqe.eecs.qmul.ac.uk/>; pristupljeno 22. siječnja 2023.
- [21] *IBM SPSS Software*, IBM. Poveznica: <https://www.ibm.com/spss>; pristupljeno 22. siječnja 2023.
- [22] Kumakura, E., Schmid, K., Yokosawa, K., Werner, A. *Subjective evaluation of natural high-saturated images on a wide gamut display*, Color Research and Application, 44 (2019)
- [23] *Kendall's Tau and Spearman's Rank Correlation Coefficient*, Statistics Solutions. Poveznica: <https://www.statisticssolutions.com/free-resources/directory-of-statistical-analyses/kendalls-tau-and-spearman-rank-correlation-coefficient/>; pristupljeno 30. siječnja 2023.
- [24] *Kendall's Tau (I)*, Economy-Pedia. Poveznica: <https://hr.economy-pedia.com/11036078-kendall39s-tau-i>; pristupljeno 30. siječnja 2023.

Sažetak

Subjektivna i objektivna evaluacija utjecaja zasićenja i vrste boje na kvalitetu slike

Zasićenje opisuje čistoću boje izvora svjetlosti. Vrsta boje određena je dominantnom valnom duljinom izvora svjetlosti. Zasićenje i vrsta boje značajke su slike koje znatno utječu na percepciju scene. U radu je promatran utjecaj promjene zasićenja i vrste boje na kvalitetu slike. Objašnjeni su pojmovi i vrste subjektivne i objektivne evaluacije kvalitete slike. Dan je pregled odabranih metoda za objektivnu evaluaciju kvalitete – MSE, PSNR, SSIM, CER, UCIQE, UIQM i CCF. Opisani su prostori boja u kojima je provedena objektivna evaluacija – RGB, YUV i CIELAB. Stvorena je baza slika s modificiranim zasićenjem i vrstom boje. Nad bazom je provedena subjektivna i objektivna evaluacija kvalitete slike. Uspoređeni su rezultati i učinkovitost metoda.

Ključne riječi: kvaliteta slike, zasićenje boje, vrsta boje, prostor boja, subjektivna evaluacija, objektivne metode, MSE, PSNR, SSIM, CER, UCIQE, UIQM, CCF

Summary

Subjective and objective evaluation of color saturation and hue effects on image quality

Saturation describes the color purity of a light source. Hue is decided by dominant wavelength of a light source. Saturation and hue are image characteristics that significantly affect the perception of a scene. This paper observes the impact of changing the hue and the saturation of an image. Concepts and types of subjective and objective image quality assessment methods are explained. An overview is given of the chosen methods for objective quality evaluation – MSE, PSNR, SSIM, CER, UCIQE, UIQM and CCF. The color spaces in which the objective evaluation was carried out are described - RGB, YUV and CIELAB. A database of images with modified saturation and hue was created. A subjective and objective evaluation of image quality was performed on the database. The results and efficiency of the methods are compared.

Keywords: image quality, color saturation, hue, color space, subjective evaluation, objective measures, MSE, PSNR, SSIM, CER, UCIQE, UIQM, CCF

Skraćenice

CER	Chroma Error Ratio	omjer pogreške boje
CIE	Commission internationale de l'éclairage	Međunarodna komisija za rasvjetu
EVM	Error Vector Magnitude	veličina vektora pogreške
HVS	Human Visual System	ljudski vizualni sustav
MER	Modulation Error Ratio	omjer pogreške modulacije
MSE	Mean Squared Error	srednja kvadratna pogreška
MS-SSIM	Multiscale Strucural Similarity Index	višerazinski indeks strukturne sličnosti
PSNR	Peak Signal-to-Noise Ratio	odnos signal-šum
SSIM	Structural Similarity Index	indeks strukturne sličnosti
UCIQE	Underwater Color Image Quality Evaluation Metric	mjera procjene kvalitete podvodnih slika
UIQM	Underwater Image Quality Measure	mjera kvalitete podvodnih slika
VIF	Visual Information Fidelity Index	indeks vjerodostojnosti vizualne informacije