

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 1645

**IDENTIFIKACIJA I KOREKCIJA
SVJETLOSNOG PRIGUŠENJA NA SLICI**

Hrvoje Krsnik

Zagreb, siječanj 2011.

Sadržaj

1.	Uvod	3
2.	Problem	4
2.1	Uzroci	4
2.2	Fizički model	6
2.3	Metode korekcije	11
3.	Postupak.....	14
4.	Rezultat	21
5.	Zaključak	23
6.	Literatura	24
7.	Sažetak.....	25
8.	Abstract	26

1. Uvod

Fotografija je danas na vrhuncu popularnosti. Napredak koji je digitalna fotografija donijela rezultirala je da se kamere ugrađuju u širok spektar uređaja kojima to nije primarna namjena, te je donijela još kvalitetnije i mogućnostima bogatije profesionalne fotoaparate. Digitalizacijom fotografije razvila se i obrada fotografije putem računala. Mogućnosti manipulacije fotografijom danas su gotovo bezgranične te dostupne svakome. Sukladno tome, primjene u kojima se fotografija koristi su široke. Zbog raznovrsnosti primjene te usprkos napretku u samoj tehnologiji moderni fotografski sustavi i dalje nisu imuni na probleme i neželjene pojave.

Fotografija objekta nastaje detektiranjem svjetlosti koje predmeti odbijaju na senzoru u fotoaparatu. Svjetlost pritom od predmeta putuje kroz sustav leća prije nego što dođe do samog senzora. Na tom putu svjetlost može biti blokirana ili se njene karakteristike mogu promijeniti te zbog toga može doći do pojave svjetlosnog prigušenja prema rubovima slike (eng. vignetting). U nedostatku prikladne hrvatske riječi u daljnjem tekstu ću tu pojavu nazivati njezinim engleskim nazivom koji je široko prihvaćen i uvriježen.



Slika 1 - Fotografija s vignettingom

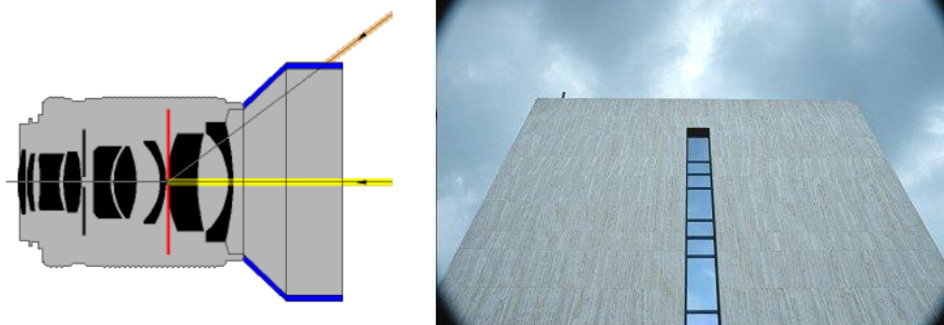
Cilj ovog rada je objasniti razloge pojave vignettinga te opisati pojavu matematičkim i fizikalnim modelima. Također, objasniti ću metode identifikacije modela prigušenja i njegove korekcije korištenjem programskog sustava Matlab te korištenje tog modela korekcije na fotografijama zvjezdanog neba.

2. Problem

Engleski naziv pojave – vignetting je proizašao iz francuske riječi vignette koja se odnosi na dekorativni rub u knjigama. Sukladno tome pojava vignettinga u fotografiji odnosi se na opadajuću svjetlinu i zasićenost fotografije prema rubovima slike, te se zaista ponekad koristi radi umjetničkog efekta i privlačenja pažnje na centar slike. Pojava je veliki problem u polju računalnog vida koje se oslanja na preciznost distribucije intenziteta. U sljedećim poglavljima je detaljno opisana pojava vignettinga: uzroci nastanka, fizikalni i matematički modeli koji ju opisuju, mogućnosti identifikacije i korekcije te problem te pojave pri fotografiranju zvjezdanog neba.

2.1 Uzroci

Vignetting je najčešće nepoželjan efekt nastao zbog neprikladnosti i ograničenja leće ili postavki kamere. Postoji nekoliko mogućih uzroka. Korištenje neodgovarajućih dodataka na leći uzrokuje mehanički vignetting, optički i prirodni vignetting nastaju zbog samog dizajna leće dok je vignetting na pikselima svojstven digitalnoj fotografiji.



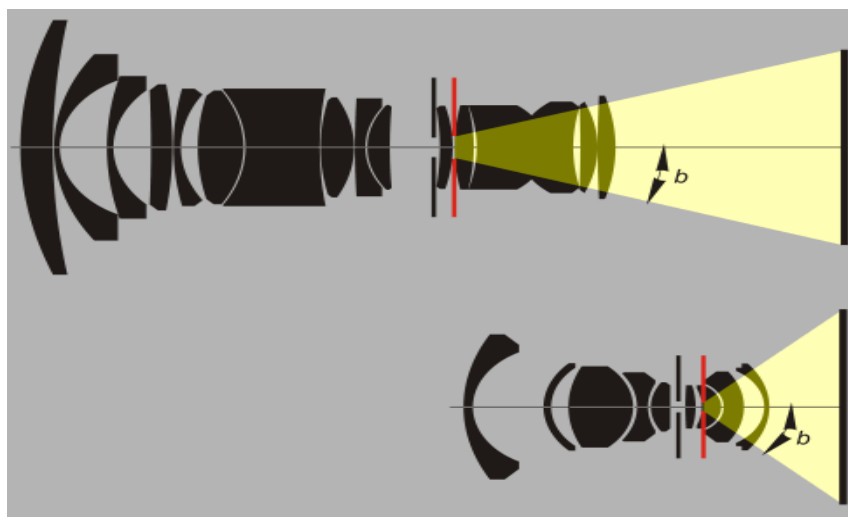
Slika 2 - a) Prikaz objektiva koji uzrokuje mehanički vignetting

b) Primjer mehaničkog vignettinga

Mehanički vignetting je pojava kada su svjetlosne zrake odbijene od predmeta udaljenih od centralne osi djelomično blokirane vanjskim objektima poput sekundarnih leća, širokih filtara i neodgovarajućih pokrova objektiva. Zbog toga se ulazna optička slika sustava leća mijenja sa kutom upada. Zatamnjenje može biti postupno ili naglo, ovisno o otvoru objektiva. Razina opadanja svjetline

sa rastom kuta je tim veća što je otvor objektiva manji. Moguće je i potpuno zatamljenje kada rub slike zapravo prikazuje unutrašnjost pokrova leće. Primjer objektiva koji blokira zrake svjetlosti pod kutom je dan na Slika 2 - a) Prikaz objektiva koji uzrokuje mehanički vignetting a). Plava linija označava dodatak objektivu koji blokira zraku svjetlosti označenu narančastom bojom koja dolazi pod nekim većim kutom prema ulaznoj zjenici objektiva.

Optički vignetting je uzrokovan fizičkim dimenzijama objektiva sa višestrukim elementima. Elementi koji su ispred zasjenjuju stražnje elemente, što uzrokuje smanjenje otvora leće za svjetlost koja dolazi pod kutom. Intenzitet svjetlosti zbog toga postupno pada prema rubu. Najjače je izražen kada je otvor blende skroz otvoren, dok se smanjenjem otvora blende može najčešće u potpunosti eliminirati. Pojava je često neprimjetna, no postaje vidljivija što je veći kontrast scene. Optički vignetting je najprimjetniji kod širokokutnih objektiva i pri velikim otvorima blende. Na manjim otvorima blende putovi kojim zrake mogu proći kroz dijafragmu do senzora ili filma su jednolikije distribuirani te time smanjuju pojavu. Predimenzionirani prednji ili stražnji elementi leće pomažu umanjiti ovaj efekt, što se često primjenjuje pri dizajniranju širokokutnih objektiva. Osim opadanja svjetline prema rubovima slike, optički vignetting može uzrokovati i efekt mačjeg oka na objektima koji nisu u fokusu. Ova vrsta vignettinga je poznat kao i umjetni vignetting.



Slika 3 - Ilustracija ovisnosti pada svjetline s kutom upada

Prirodni vignetting za razliku od prethodna dva nije uzrokovan blokiranjem zraka svjetlosti, već je opadanje svjetline uzrokovano kutom pod kojim zrake

padaju na senzor. Opadanje svjetline je proporcionalno $\cos^4(b)$. Rezultat je broj u granicama $[0,1]$ gdje 1 dobivamo za kut 0° , a 0 za kut od 90° (što realno nije izvedivo, već samo matematički). Najzahvaćeniji tim problemom su kompaktni fotoaparati i širokokutni objektivi, no u principu sve leće pate od ovog problema. Sivi filter koji je tamniji u centru i svjetliji prema rubovima ili naknadna obrada može ispraviti ovu vrstu vignettinga. Neki moderni objektivi su dizajnirani tako da zrake svjetlosti na izlazu budu paralelne, te time eliminiraju problem (telecentrične leće).

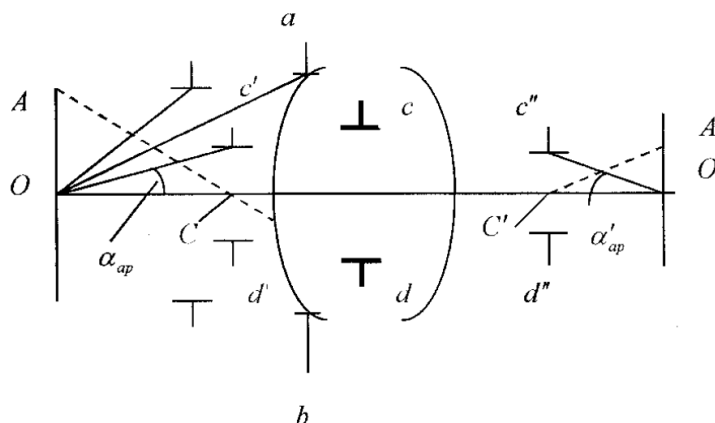
Vignetting na pikselima se javlja samo kod digitalne fotografije. Uzrokovan je digitalnim senzorima, odnosno njihovom osjetljivošću na kut upada svjetlosnih zraka. Pošto same fotodiode nisu smještene na površini senzora već u udubini, svjetlosne zrake moraju proći kroz tunel od površine senzora da bi došle do fotodiode. Pošto se razvojem skaliranja tehnologije smanjuje veličina samih piksela ili se dodaje više tranzistora piksel, tuneli kroz koji zrake prolaze postaju sve duži i uži. Zrake koje ne padaju pod pravim kutom se odbijaju od zidova tunela te oslabljuju. Time zrake koje padaju pod pravim kutom uzrokuju jači signal nego zrake koje padaju pod manjim kutom. Efekt na samoj fotografiji je sličan efektima koji nastaju optičkim i prirodnim vignettingom. Većina digitalnih kamera kompenzira vignetting na pikselima i optički vignetting kada prebacuju podatke sa senzora u standardni format slike. Korištenje mikroleća koje izravnavaju zrake ispred senzora tako da one ulaze okomitije također može reducirati vignetting na pikselima.

Svi tipovi vignettinga najviše dolaze do izražaja kada je leća fokusirana u beskonačnost. Pri bliskom fokusu vidljivi kut je manji te je veličina kruga slike kojeg određuje optički vignetting veća. Time je područje zahvaćeno vignettingom efektivno maknuto van kadra. Osim eliminacije optičkog i mehaničkog vignettinga, tada se reducira i efekt prirodnog vignettinga.

2.2 Fizički model

Veličina optičkih elemenata u sustavu utječe na količinu svjetlosne energije koja prolazi kroz sustav, kvalitetu slike te cijenu sustava. Od svih geometrijskih parametara najvažniji je radni promjer, jer se ponaša kao transparentni optički objekt. Nekada se u sustav dodaje dodatni fizički element koji ima konačnu

veličinu promjera otvora i zanemarivu debljinu koji se naziva zaslon (eng. diaphragm). Jedan takav element koji ograničava količinu svjetlosnih zraka koje prolaze kroz sustav je blenda, te je samim time odgovoran za količinu energije koja prolazi kroz sustav i koja se skuplja u svakoj točki slike. Blenda je prikazana na slijedećoj slici:

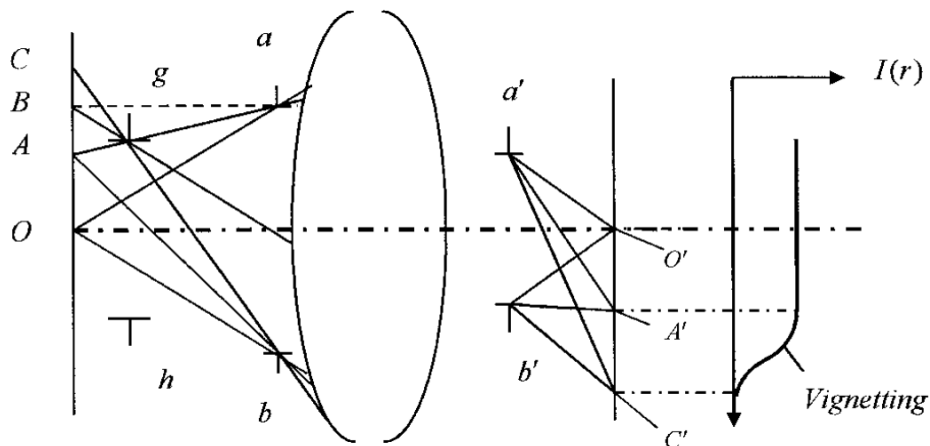


Slika 4 - Blenda i ulazna i izlazna zjenica

Pretpostavka je da se sustav sastoji od više elemenata (od čega su na slici prikazani prvi i zadnji zakrivljeni element u sustavu) i same blende označene sa c i d . Granice svake optičke površine se također smatraju zaslonima. Prvo prebacujemo sve zaslone u predmetni prostor, odnosno nalazimo veličinu i lokaciju slike svake dijafragme nastalu prolaskom kroz elemente nalijevo. Zrake svjetlosti putuju sa desna na lijevo. Takva slika blende c i d je označena na slici sa c' i d' . Slika prvog optičkog elementa a i b je također a i b pošto ne postoji element lijevo od njega. Treća dijafragma prikazana na slici je slika neke druge optičke površine. Spojimo zraku od centralne točke predmeta O do strane svake slike i nađemo kut svake zrake u odnosu na optičku os. Najmanji kut, koji je u našem primjeru kut zrake Oc' , se naziva kut otvora α_{ap} a odgovarajući optički element je blenda (na slici označena c i d). Njezina slika u prostoru objekta se naziva ulazna zjenica a njena slika u prostoru slike se naziva izlazna zjenica (na slici c' i d' te c'' i d''). Kut otvora definira maksimalnu količinu svjetlosnih zraka koje polaze od točke O te prolaze kroz sustav bez prepreke do točke O' . Odgovarajući kut α'_{ap} je kut otvora u prostoru slike. Crtanjem zraka koje spajaju bilo koju drugu točku objekta sa ulaznom zjenicom nalazimo odgovarajuću količinu svjetlosti koja sudjeluje u stvaranju slike te točke. Zraka koja spaja točku A sa centrom C ulazne

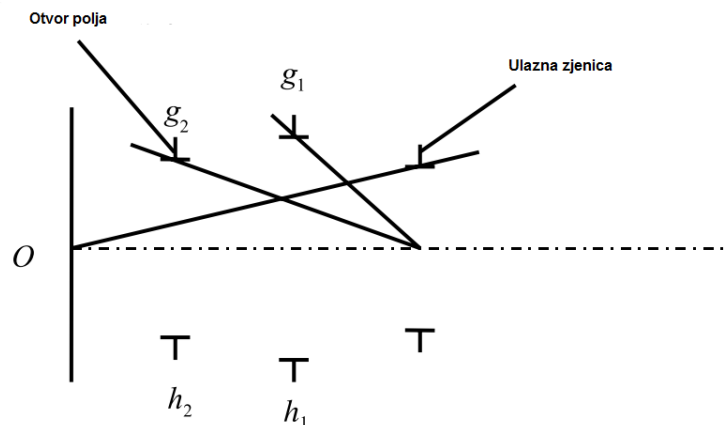
zjenice se naziva glavna zraka (prikazana isprekidanom linijom na slici). Njezin položaj u prostoru slike je $C'A'$.

Sada promatramo ulaznu zjenicu $a b$ zajedno sa bilo kojim drugim optičkim elementom ili njegovom slikom $g h$ u predmetnom prostoru.



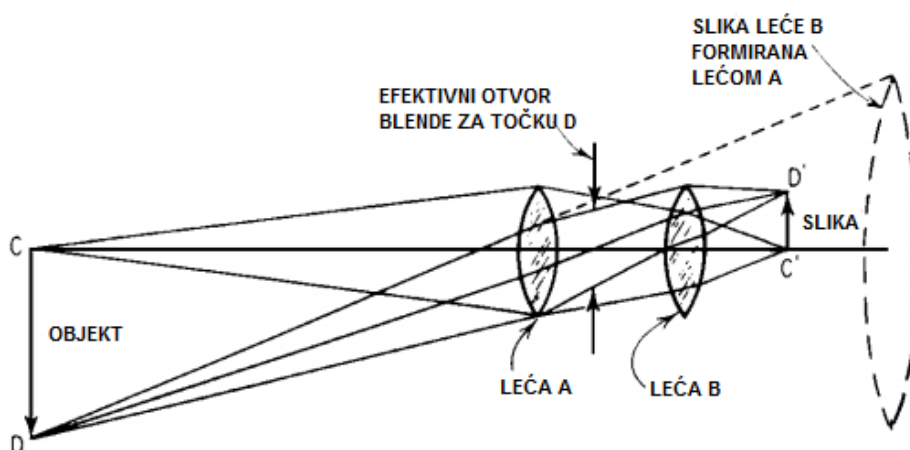
Slika 5 - Vidljivi kut i vignetting

Podrazumijeva se da zaslon $g h$ uopće ne utječe na čunjasti skup zraka koje izvire iz točke O objekta. Isto vrijedi za bilo koju drugu točku prostora objekta između točaka O i A gdje kroz A svjetlost prolazi kroz strane a i g oba zaslona. Za udaljene točke iznad A , poput točke B , čunjasti skup zraka svjetlosti koje ulaze na ulaznu zjenicu su djelomično odrezane elementom $g h$ te se isprekidana linija iz B ne može prenijeti. Ovo znači da se količina čunjastog skupa zraka svjetlosti koje prolaze kroz sustav postupno smanjuje kako se približavamo točki C . U točki C više niti jedna zraka ne može proći kroz sustav. Zrake koje proizlaze iznad točke C ne mogu uopće doći do ravnine slike. Stoga formiranje slike može biti ostvareno samo za dio predmetne ravnine i to za krug polumjera OC . Ovaj dio predmetne ravnine je širina vidljivog kuta a element gh se naziva otvor prostora. Ako je gh slika pravog fizičkog zaslona GH koja se nalazi negdje u sustavu, onda se GH naziva blenda prostora.



Slika 6 - Nalaženje otvora prostora

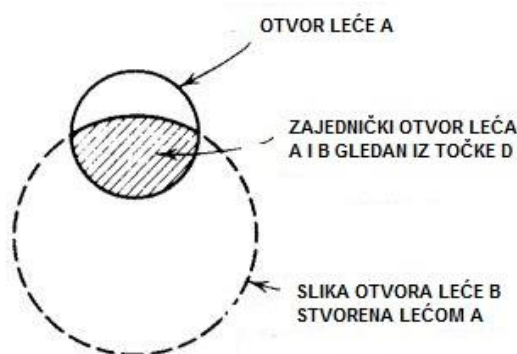
Smanjenje čunja zraka svjetlosti kako se mičemo od optičke osi uzrokuje smanjenje svjetline slike u odgovarajućim dijelovima ravnine slike odnosno vignetting, kao što je prikazano na grafu intenziteta na slici 7. Čak i ako je predmetna ravnina ravnomjerno osvjetljena doći će do redukcije svjetline u ravnini slike. Kako bi našli otvor prostora nužno je naći slike svih zaslona u sustavu u predmetnom prostoru, izračunati veličine i lokacije svake slike te nacrtati zraku koja spaja centar ulazne zjenice sa krajnjom točkom svake slike i izračunati odgovarajući kut u odnosu na optičku os. Minimalni kut definira otvor prostora, i samim time i blendu prostora. Ova procedura je prikazana na slici, gdje je $g_2 h_2$ otvor prostora. Da bi se izbjegao vignetting nužno je pozicionirati blendu prostora u ravninu izravne slike sustava.



Slika 7 - Vignetting u sustavu s razdvojenim komponentama

Sustav na Slika 7 se sastoji od dvije leće. Za skupinu zraka na osi vrijedi da je otvor blende cijeli otvor leće A, ulazna zjenica je na leći A i izlazna zjenica je slika promjera leće A formirana lećom B. Za zrake udaljene od središnje osi

situacija je drastično drugačija. Količina energije primljena od točke D je ograničena na svojem donjem rubu donjim rubom leće A, a na gornjem rubu gornjim rubom leće B. Prihvaćena količina energije od točke D je manja nego što bi bio da je promjer leće A jedini ograničavajući faktor. Rezultat je vignetting u točki slike D'. Očito je da za neku točku dalje od osi od točke D kroz sustav ne bi uopće prošla energija, te stoga nema blende prostora u ovom prikazanom sustavu.



Slika 8 - Otvori leća gledani iz točke D

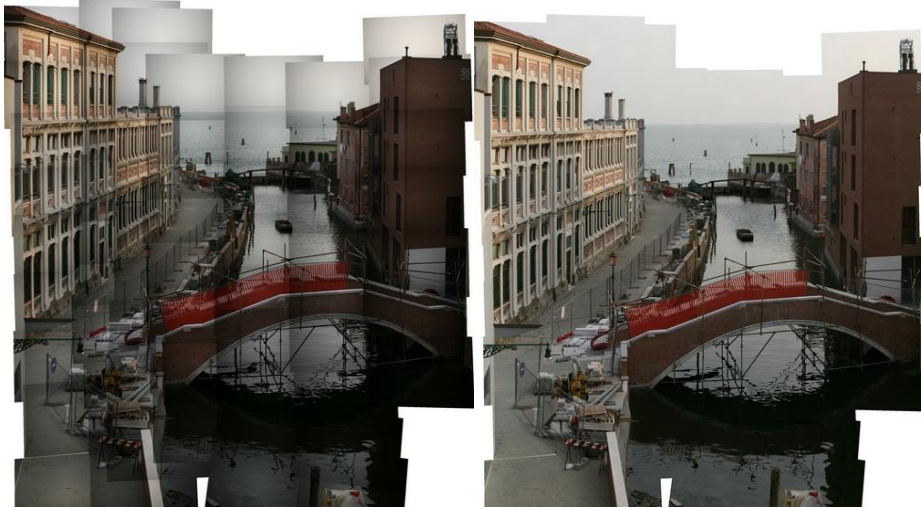
Slika sustava kada se gleda iz točke D je prikazana na Slika 8. Ulazna zjenica je postala zajedničko područje oba kruga, jednog od izavnog promjera leće A, i drugog od slike promjera leće B nastale kroz leću A. Isprekidana linija pokazuje poziciju i veličinu te slike leće B, dok crte ukazuju na realni otvor blende koji ima veličinu, oblik i poziciju u potpunosti drugačiju od one kada zrake dolaze iz ravnine optičke osi. U fotografskoj leći sa podesivom udaljenošću zaslona, njezina lokacija bi trebala biti takva da kada se promjer smanji da je izravni otvor leće centriran u vignettiranoj kosoj zraci.

Određivanje vignettinga u optičkom sustavu može biti ostvareno praćenjem samo dvije paraksijalne zrake. Prvo se odrede snage, udaljenosti i izravni otvori leće sustava. Zatim se prati osna paraksijalna zraka od podnožja objekta sa visinom 1.0 na prvom elementu. Izračuna se y/ca za svaki element i otvor leće. Promjer sa najvećim y/ca je otvor blende. Pomnože se vrijednosti dobivene praćenjem zraka sa ca/y da bi se dobio podatak o graničnoj zraci. Prati se kosa zraka kroz centar otvora blende pod odgovarajućim nagibom, primjerice 0.1. Izračuna se y_p/ca za svaki element i otvor leće. Onaj s najvećom vrijednošću je otvor blende. Podaci se skaliraju sa ca/y_b kako bi se dobila glavna zraka. Sjecište te zrake sa objektom i ravninom slike daje veličinu polja. Dvije zrake se mogu

kombinirati da bi se dobili podaci o bilo kojoj daljnjoj zruci bez ponovnog praćenja zraka. Gornji i donji rub podataka o zruci je $(y_p \pm y)$ i $(u_p \pm u)$. Ako visina zrake nadmašuje izravni otvor leće događa se vignetting. Količina vignettinga je ukazana onim dijelom visine osne zrake koji će tvoriti visinu koja ne premašuje izravni otvor leće kada je kombinirana sa visinom glavne zrake.

2.3 Metode korekcije

Postoje karakteristike koje su zajedničke svim vrstama vignettinga. Prva karakteristika je da je intenzitet pada svjetline simetričan i radijalan u odnosu na centar slike. Druga karakteristika je da je ovisan samo o fizičkim karakteristikama kamere (leći, zaslonu, senzoru i bilo kakvim dodacima koji blokiraju svjetlost). Ta karakteristika nam omogućava da se pojava izmjeri, no mjerenje je izrazito kompliciran proces ako gore navedene fizičke karakteristike nisu poznate. Postoje razni pristupi otkrivanja parametara vignettinga kako bi se uklonila razlika u intenzitetu svjetlosti računanjem inverzne funkcije. Neke metode zahtijevaju fotografiranje specifičnih scena, koje najčešće moraju biti ravnomjerno osvijetljene. Druge metode zahtijevaju više djelomično preklapajućih slika ili sekvence fotografija uzetih sa različitim postavkama ekspozicije i otvora blende. U prvom slučaju, pošto su objekti na svakoj fotografiji na drugoj poziciji također su drugačije svjetline zbog vignettinga te se informacija o padu svjetline sa svih slika koristi kako bi se vignetting precizno ispravio. Obje vrste metoda zahtijevaju poznavanje kamere kojom su napravljene fotografije ili više preklapajućih fotografija, te nisu prikladne za slike preuzete iz nepoznatog izvora. Treće vrste metoda zahtijevaju isključivo jednu fotografiju, te time omogućuju primjenu na svim vrstama fotografija. Prve dvije vrste metoda dobivaju informaciju o vignettingu od piksela sa istim karakteristikama ali različitim svjetlinama, dok je u trećoj vrsti metoda tu informaciju teže dobiti zbog nepoznavanja scene.



Slika 9 - Slaganje preklapajućih fotografija sa vignettingom u uniformnu fotografiju
 Najjednostavniji način za izračunati parametre je korištenjem referentne

fotografije uniformno osvijetljene bijele podloge te proučiti vignetting na toj slici. Iz te slike onda možemo jednostavno izvesti funkciju slabljenja intenziteta u ovisnosti o radijusu. Ta funkcija se zatim može koristiti kao referenca za sljedeće fotografije kako bi se ocijenio realni nivo intenziteta piksela, te smo time efektivno izvršili kalibraciju leće. Problem sa ovim pristupom je da bi trebao biti učinjen više puta za različite kombinacije geometrijskih postavki leće, te bi se za sve nepoznate kombinacije parametri trebali interpolirati iz najbliže poznate kombinacije.

Jednu metodu predlažu Goldman i Chen. Oni su definirali sljedeću funkciju:

$$Q_d(a, \beta, t_i, L_x) = \sum_{x_i, d} d \left[P_{x_i} |, R \left(t_i L_x M_a(r_{x,i}) \right) \right] \quad (1)$$

Ova formula procjenjuje sumu udaljenosti između stvarne vrijednosti intenziteta piksela $P_{x,i}$ (gdje je x pozicija u slici, i je broj slike) i očekivane vrijednosti krivulje odziva R sa parametrima vrijednosti ekspozicije t_i , vrijednost intenziteta osvijetljenja piksela L_x i funkcije vignettinga $M_a(r_{x,i})$ gdje je r udaljenost piksela od centra fotografije. Održavanjem postavki leće stalnim tijekom fotografiranja i podrazumijevanjem da se ulazna svjetlina od svake pojedine točke scene ne mijenja između uzastopnih fotografiranja, pokušava se kalibrirati funkcija vignettinga. Funkcija $M_a(r)$ se aproksimira kao šesti stupanj polinoma $1+a_2r^2+a_4r^4+a_6r^6$. Nakon izračuna svih parametara koji uzrokuju vignetting, svaka nova, ispravljena vrijednost piksela može biti izračunata po sljedećoj formuli:

$$P_{x,t}^{nova} = R_{\beta} \left(\frac{t_{nova} R_{\beta}^{-1}(P_{x,t})}{M_a(r_{x,t}) t_t} \right) \quad (2)$$

$P_{x,i}^{nova}$ je nova vrijednost intenziteta piksela u slici, M_a je funkcija vignettinga, R_β je izračunata krivulja odziva a t_i , t_{nova} su vrijednosti ekspozicije. Valja napomenuti da je krivulja odziva ovisna o radijusu. Za svaku vrijednost radijusa, pridružuje joj se vrijednost intenziteta. Općenito, opisuje slabljenje svjetline kako raste radijus.

Sličnom metodom, Yu, Chung i Soh aproksimiraju distorziju vignettinga sa hiper-kosinus funkcijom udaljenosti piksela od centra fotografije za svaku liniju nakon što je kamera kalibrirana, korištenjem ravnomjerno osvijetljenog papira. Druge funkcije distorzije vignettingom od drugih istraživača su uglavnom polinomske kao npr. Bastuscheckova ili Chen i Mudunurijeve eksponencijalne funkcije.

Zanimljiva metoda za korekciju vignettinga je ona koja ispravlja vignetting na jednoj slici bez ikakve prijašnje kalibracije ili bilo kakvog prethodnog znanja o funkciji vignettinga, korištenim postavkama ili tipu leće, koju su razvili Zheng, Lin i Kang. Ta metoda pokušava procijeniti parametre lokaliziranih zaobljenih linija u svakoj regiji slike, koristi segmentaciju slike baziranu na tim parametrima te korištenjem Kang-Weissova model vignettinga otkriva najbolju korekciju za svaku regiju slike.

Posljednja metoda je također razvijena od strane Zhenga, Lina i Kanga, te se također bazira na korekciji vignettinga na jednoj slici bez prethodnog znanja funkcije, postavki i vrste leće. Za razliku od prethodne metode, ova se bazira na simetriji radijalnog gradijenta u slikama bez vignettinga, te asimetriji u distribuciji tog gradijenta kod slika sa vignettingom. Postoje dvije varijante ove metode, te se obje baziraju na minimiziranju asimetrije radijalnog gradijenta. U usporedbi s prethodnom metodom ova ne uključuje segmentaciju, potrebno je izračunati manje parametara, te su rezultati generalno bolji. Ova metoda je učinkovita za širok spektar fotografija, također vrlo praktična jer ne zahtjeva nikakvo poznavanje sustava kojim je fotografija načinjena te ne zahtjeva više fotografija. Zbog ovih pozitivnih karakteristika, odlučio sam implementirati ovu metodu, te ću je detaljnije opisati u 3. poglavlju.

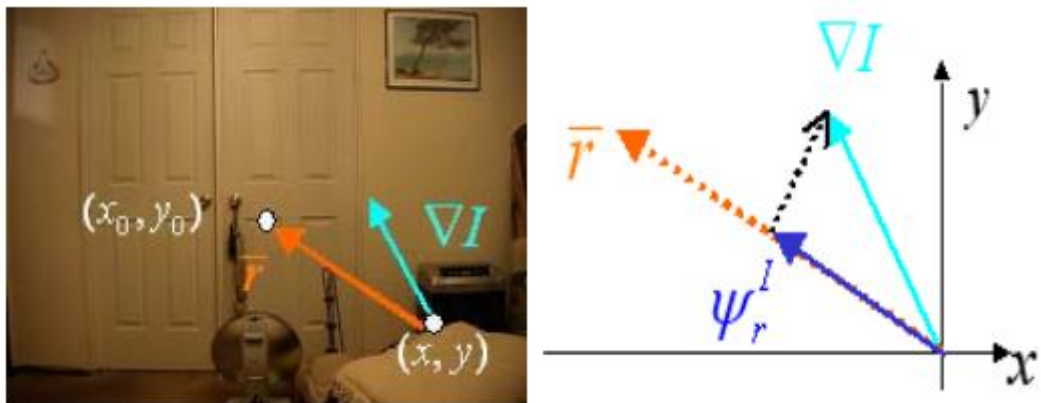
3. Postupak

Glavna ideja iza postupka koji sam odabrao je da pojava ima mnoga radijalna svojstva. Da bi se našao odgovarajući model za vignetting u slici te za uspješnu korekciju koristi se svojstvo simetrije radijalnog gradijenta. Radijalni gradijent je projekcija normalnog gradijenta slike duž vektora u odnosu na centar slike. Istraživanja su pokazala da distribucija gradijenta kod fotografija prirode prati strogo definirani uzorak, te je većina vrijednosti mala. Ako pretpostavimo da je šum u slici zanemariv, distribucija radijalnih gradijenata u različitim slikama će biti slična te će biti izrazito simetrična s obzirom na najveću vrijednost, posebno pri manjim vrijednostima. Nedavni radovi su pokazali da je realno pretpostaviti da je šum u slici simetričan kada je radiometrijski odziv fotoaparata linearan, što upućuje na to da šum u fotografiji ne utječe na simetriju distribucije gradijenta. Navedene karakteristike radijalnog gradijenta su korištene za uklanjanje šuma u slici, micanje zamućenosti i povećanje rezolucije. Radijalni gradijent je definiran sljedećom formulom

$$\psi = \begin{cases} \frac{(\nabla I \cdot \vec{r})}{|\vec{r}|}, & |\vec{r}| > 0 \\ 0, & |\vec{r}| = 0 \end{cases} \quad (3)$$

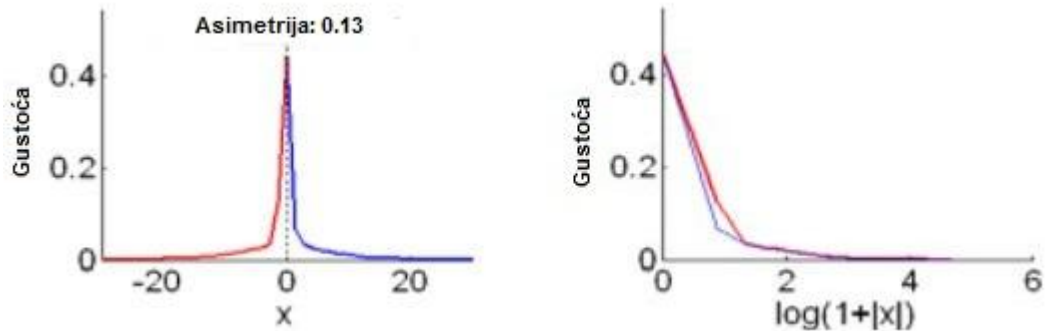
Gradijent se računa za svaki piksel (x,y) s obzirom na centar (x_0,y_0) .

$$\nabla I(x, y) = \left[\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y} \right]^T, \quad \vec{r}(x, y) = [x - x_0, y - y_0]^T \quad (4)$$



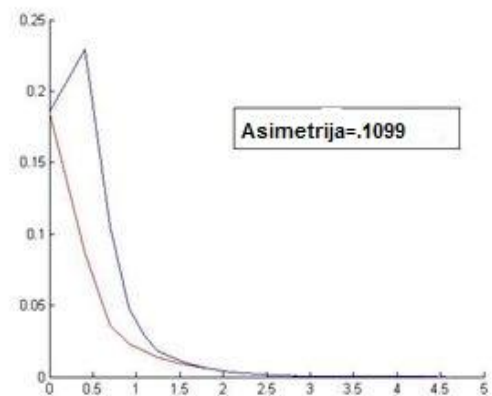
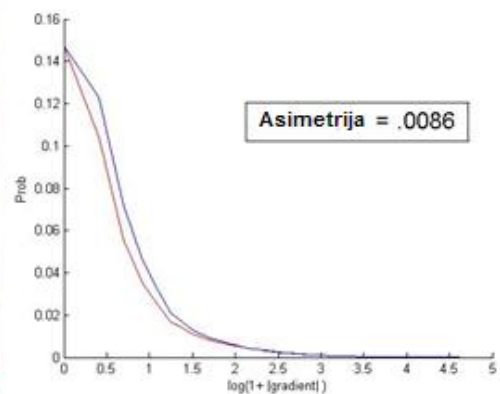
Slika 10 - Prikaz radijalnog gradijenta

Ključna stavka je da je distribucija veličine radijalnog gradijenta približno simetrična za slike bez efekta vignettinga, dok je za slike sa vignettingom ta distribucija neravnomjerna i nesimetrična.



Slika 11 - Histogrami gradijenta

Na Slika 11 su prikazani regularni i $\log(1+|x|)$ histogrami. Logaritamski histogram je dobiven preslikavanjem x na funkciju $\log(1+|x|)$. Takvo preslikavanje dodatno ističe bilo kakvu prisutnu nesimetriju pri vrhu histograma. Negativni x je prebačen na pozitivnu stranu te stoga imamo dvije krivulje; crvenu za negativnu stranu i plavu za pozitivnu.



Slika 12 - Usporedba simetrije radijalnog gradijenta slike bez i sa vignettingom

Obzirom da je vignetting radijalne prirode pogodan je za promatranje u polarnim koordinatama. Možemo definirati sljedeću formulu:

$$Z(r, \theta) = I(r, \theta)V(r) \quad (5)$$

Z predstavlja sliku sa prisutnim vignettingom, I je slika bez vignettinga a V je funkcija vignettinga. V je funkcija ovisna samo o r jer se može pretpostaviti da je rotaciono simetrična. Formula za radijalni gradijent računana u polarnim koordinatama glasi:

$$\frac{dZ(r, \theta)}{dr} = \frac{dI(r, \theta)}{dr}V(r) + I(r, \theta)\frac{dV(r)}{dr} \quad (6)$$

Prvi element s desne strane jednadžbe skalira radijalne gradijente za faktor V. Obzirom da je V radijalno simetričan, skalirana raspodjela prvog elementa bi prema očekivanju trebala biti simetrična. Nasuprot tome, distribucija drugog elementa ne bi smjela biti simetrična. Ovome je uzrok to što vrijednost funkcije vignettinga ravnomjerno pada u radijalnom smjeru, odnosno $dV(r)/dr \leq 0$. Pošto je osvjetljenost scene I uvijek pozitivna, drugi član je uvijek negativan, te je stoga raspodjela drugog člana nesimetrična. Također, što je jači vignetting, to će više distribucija radijalnog gradijenta od Z biti asimetrična. Svjetlije scene sa većim I će uz istu funkciju vignettinga dati veću asimetriju u distribuciji drugog člana. Ovo je u skladu sa činjenicom da je vignetting primjetniji na svjetlijim fotografijama.

U odnosu na radijalni gradijent, vignetting ne utječe na simetriju distribucije horizontalnog i vertikalnog gradijenta u slici. Obzirom da je vignetting radijalno simetričan u odnosu na centar slike, može se vidjeti i kao povećanje vrijednosti horizontalnog i vertikalnog gradijenta na jednoj strani slike, dok se istovremeno smanjuju na drugoj strani slike. Može se pretpostaviti da su distribucije gradijenta svake strane slike u slikama bez vignettinga simetrične, te povećanje ili smanjivanje njihovih veličina neće utjecati na simetriju. Zbog toga, horizontalni i vertikalni gradijent nam ne mogu pružiti podatke o vignettingu koje možemo dobiti iz distribucije radijalnog gradijenta.

Postoje dvije varijante ispravljanja vignettinga ovom tehnikom, obje bazirane na minimiziranju nesimetrije distribucije radijalnog gradijenta. Prva varijanta procjenjuje količinu vignettinga na različitim radijusima oblikujući problem u niz optimizacija najmanjim kvadratom. Druga varijanta prilagođava empirički

model vignettinga nelinearnom optimizacijom. Ja sam se odlučio primijeniti prvu metodu.

Da bi se kvantitativno izmjerila nesimetričnost distribucije koristi se Kullback-Leiblerova divergencija. Definiramo:

$$\begin{aligned}
 H(\psi) &= \text{histogram} \\
 H_+(\psi) &= \begin{cases} \frac{1}{A_+} * H(\psi), & \psi \geq 0 \\ 0, & \psi < 0 \end{cases} \\
 H_-(\psi) &= \begin{cases} \frac{1}{A_-} * H(-\psi), & \psi \geq 0 \\ 0, & \psi < 0 \end{cases}
 \end{aligned} \quad (7)$$

Kullback-Leiblerova divergencija opisuje relativnu entropiju između dvije strane distribucije. H i H_+ su pozitivna i negativna strana distribucije radijalnog gradijenta. A_+ i A_- su faktori normalizacije koji pridružuju histograme funkcijama vjerojatnosti distribucije. Definirani su kao:

$$A_- = \sum_{\psi \leq 0} H(\psi) \quad A_+ = \sum_{\psi \geq 0} H(\psi) \quad (8)$$

Kullback-Leiblerova divergencija mjeri razliku između distribucija vjerojatnosti, te je definirana kao:

$$\Gamma = \sum_{\psi} \left(H_+ * \log \left(\frac{H_+}{H_-} \right) \right) \quad (9)$$

Ovime je definirana mjera simetrije. Valja primijetiti da dva različita histograma svejedno mogu odgovarati dvjema sličnima distribucijama vjerojatnosti nakon normalizacije. Ova razlika se anulira postavljanjem normalizacijskih faktora u mjeru simetrije.

$$\Gamma(I) = \lambda_h \sum_{\psi} \left(H_+(\psi^I) \cdot \log \frac{H_+(\psi^I)}{H_-(\psi^I)} \right) + (1 - \lambda_h) |A_1 - A_2|^{\frac{1}{4}} \quad (10)$$

Ova mjera asimetrije se primjenjuje i na horizontalnu i radijalnu distribuciju gradijenta, te će se koristiti u danjem radu kao $\Gamma_r(I)$ i $\Gamma_h(I)$. Usporedbom tih distribucija na skupu fotografija, uočava se da je Γ_r mnogo osjetljiviji na vignetting. Γ_r je u prosjeku značajno veći od Γ_h . Također, nakon korekcije vignettinga parametar Γ_h je ostao isti, dok je Γ_r značajno pao, te se spustio na razinu Γ_h .

U varijanti sa najmanjim kvadratima na različitim radijusima uzimamo prirodni logaritam jednadžbe:

$$\ln Z(r, \theta) = \ln I(r, \theta) + \ln V(r) \quad (11)$$

Preslikajmo $\mathcal{Z} = \ln Z$, $\ln I$ i $\mathcal{V} = \ln V$. Radijalne gradijente od \mathcal{Z} , $\ln I$ i \mathcal{V} za svaki piksel (r, θ) sa $\Psi_r^{\mathcal{Z}}(r, \theta)$, $\Psi_r^{\ln I}(r, \theta)$ i $\Psi_r^{\mathcal{V}}(r, \theta)$. Onda vrijedi slijedeće:

$$\psi_r^{\mathcal{Z}}(r, \theta) = \psi_r^{\ln I}(r, \theta) + \psi_r^{\mathcal{V}}(r) \quad (12)$$

Kada imamo danu sliku \mathcal{Z} sa prisutnim vignettingom, nalazimo maksimalnu aposteriorono rješenje za \mathcal{V} . Korištenjem Bayesovog pravila, ovo se svodi na rješavanje problema optimizacije.

$$\mathcal{V} = \arg \max_{\mathcal{V}} P(\mathcal{V} | \mathcal{Z}) \propto \arg \max_{\mathcal{V}} P(\mathcal{Z} | \mathcal{V}) P(\mathcal{V}) \quad (13)$$

Promatramo funkciju vignettinga na diskretnim, jednoliko udaljenim radijusima. Sliku razdijelimo u sektore podijeljene duž tih diskretnih radijusa, tako da je radijus r_m unutarnji radijus sektora m . Svaki piksel (r, θ) je povezan sa sektorom u kojem se nalazi, te onda označavamo širinu sektora sa δr .

Funkcija vignettinga je generalno glatka, stoga definiramo glatkoću nad \mathcal{V} :

$$P(\mathcal{V}) = e^{-\lambda_s \sum_{r_t \in S_r} \mathcal{V}''(r_t)^2} \quad (14)$$

Gdje je λ_s odabran tako da kompenzira nivo šuma u slici a \mathcal{V}'' se aproksimira sa sljedećom formulom:

$$\mathcal{V}''(r_t) = \frac{\mathcal{V}(r_{t-1}) - 2\mathcal{V}(r_t) + \mathcal{V}(r_{t+1}))}{(\delta r)^2} \quad (15)$$

Da bi se izračunao $P(\mathcal{Z} | \mathcal{V})$ moramo izračunati:

$$\psi_r^{\ln I}(r, \theta) = \psi_r^{\mathcal{Z}}(r, \theta) - \psi_r^{\mathcal{V}}(r) \quad (16)$$

$$P(\mathcal{Z} | \mathcal{V}) = P(\psi_r^{\ln I}) = e^{-|\psi_r^{\ln I}|^\alpha}, \quad \alpha < 1 \quad (17)$$

Uvrštavanjem jedne funkcije u drugu dobivamo jednadžbu

$$P(\mathcal{Z} | \mathcal{V}) = e^{-\sum_{(r, \theta)} |\psi_r^{\mathcal{Z}}(r, \theta) - \psi_r^{\mathcal{V}}(r)|^\alpha} \quad (18)$$

gdje je $\psi_r^{\mathcal{V}}(r) = (\mathcal{V}(r_m) - \mathcal{V}(r_{m-1})) / \delta r$, gdje m predstavlja sektor unutar kojeg se nalazi piksel (r, θ) . Cijela jednadžba energije se može zapisati kao

$$\mathcal{O} = \sum_{(r,\theta)} |\psi_r^{\mathcal{Z}}(r, \theta) - \psi_r^{\mathcal{V}}(r)|^\alpha + \lambda_s \sum_{r_t \in S_r} \mathcal{V}''(r_t)^2 \quad (19)$$

Cilj je pronaći vrijednosti $\mathcal{V}(r_t)$, $t=\{0,1,\dots,n-1\}$ koje minimiziraju ovu funkciju. Kako bi učinkovito koristili ovu funkciju energije, mora biti odabran dobar parametar raspršenosti α za distribuciju radijalnog gradijenta \mathcal{J} , te mora biti manji od 1. Ipak, jako male vrijednosti α dozvoljavaju veće vrijednosti šuma koje utječu na postupak. Empirijski je nađeno da vrijednosti α između 0.3 i 0.9 daju dobru procjenu funkcije vignettinga za većinu slika. Za $0 < \alpha < 1$, jednačba za \mathcal{O} nema jedno rješenje.

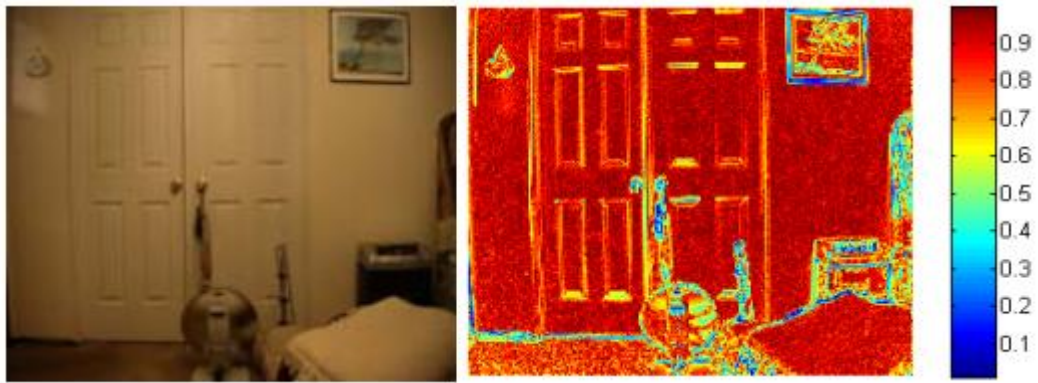
Kako bi optimizirali jednačbu, koristimo tehniku iterativnog računanja najmanjih kvadrata. Ta tehnika optimizira jednačbu računanjem niza standardnih najmanjih kvadrata od kojih svaki koristi težinski faktor baziran na prethodnom rješavanju. Tako se pri k-toj iteraciji funkcija energije može zapisati:

$$\mathcal{O}_k = \sum_{(r,\theta)} w_k(r, \theta) (\psi_r^{\mathcal{Z}}(r, \theta) - \psi_r^{\mathcal{V}_k}(r))^2 + \lambda_s \sum_{r_t \in S_r} \mathcal{V}_k''(r_t)^2. \quad (20)$$

Težinski faktor $w_k(r, \theta)$ se računa iz zadnje iteracije kao

$$\begin{aligned} w_k(r, \theta) &= e^{-S_1} (1 - e^{-S_2}), \\ S_1 &= \left| \psi_r^{\mathcal{Z}}(r, \theta) - \psi_r^{\mathcal{V}_{k-1}}(r) \right| \\ S_2 &= \alpha (S_1)^{\alpha-1}. \end{aligned} \quad (21)$$

Funkcija energije se zatim rješava kao jednačba sa najmanjim kvadratima, što omogućuje da optimiziramo \mathcal{V}_k koristeći faktorizaciju. Dovoljno je da se izračunaju četiri iteracije kako bi se dobili zadovoljavajući rezultati. $w_k(i,j)$ se inicijalno postavlja na 1. Ponovno izračunate težine u svakoj iteraciji k su više u pikselima čiji su radijalni gradijenti u \mathcal{Z} sličniji onima u procijenjenoj vrijednosti \mathcal{V}_{k-t} . Stoga vrijednosti ovog rješenja naginju prema glatkijim regijama čiji su radijalni gradijenti relativno manji. Također, izračunate težine su u granicama $[0,1]$.



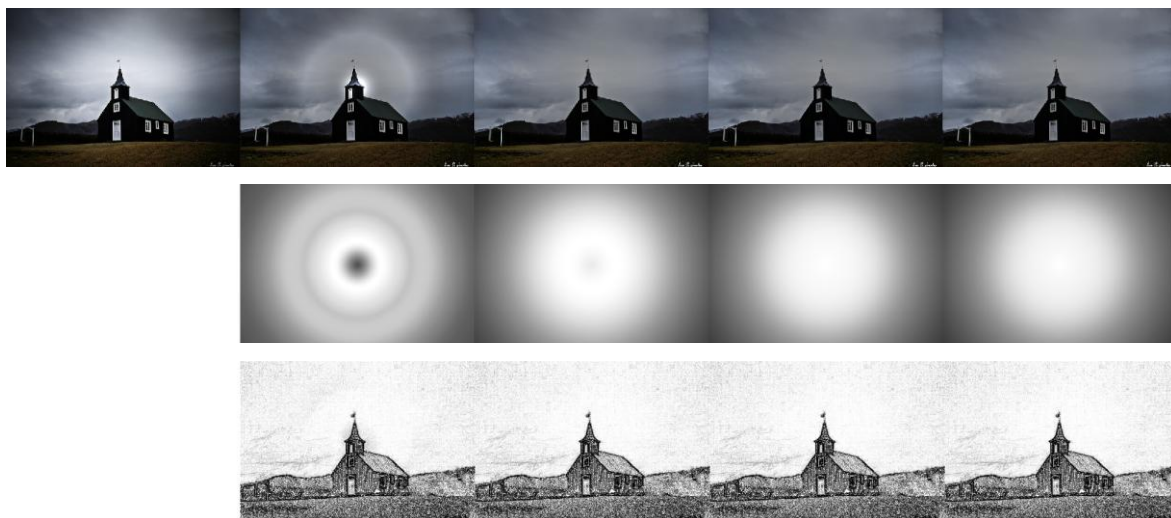
Slika 13 - Izračunate težine za 3. iteraciju

Ovo rješenje zahtjeva odabir odgovarajućeg koeficijenta λ_s da izbalansira glatkoću u V i radijalni gradijent u I . Pošto je odabrana mala vrijednost α , ova procjena vignettinga bolje odgovara glatkijim regijama nego oštrim rubovima.

Prednost ovog rješenja pred metodom baziranom na modelu je da je rješenje linearno i brzo konvergira. Nedostatak je što zahtjeva procjenu mnogo parametara, svaki odgovarajući diskretnoj vrijednosti radijusa.

4. Rezultat

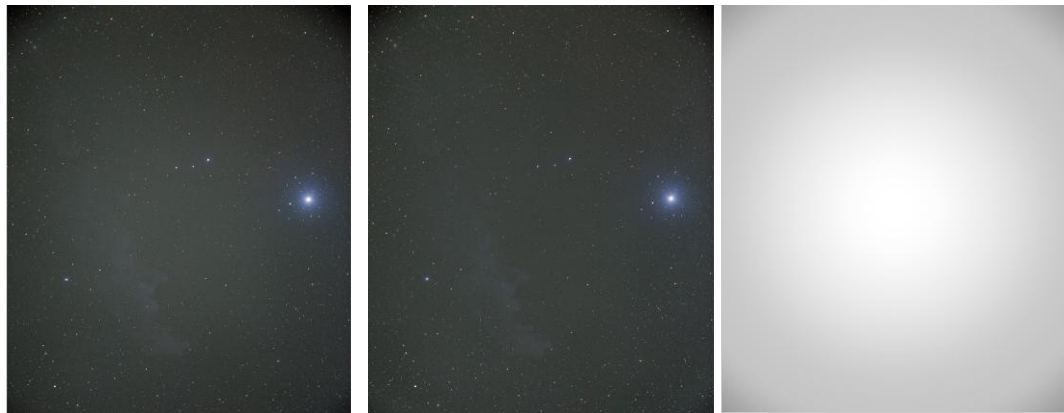
Programsko rješenje je razvijeno u matlabu. Algoritam postiže dobre rezultate sa fotografijama eksterijera. Kod fotografija interijera vignetting je teže procijeniti zbog veće neravnomjernosti osvjetljenja. Budući da je ova metoda bazirana na korekciji nesimetričnosti distribucije gradijenata umjesto na distribuciji intenziteta, metoda je prikladna i za fotografije interijera.



Slika 14 - Odozgora prema dolje: slika sa vignettingom, procjena vignettinga, izračunata težina; prema desno iteracije algoritma

Mnogo prijašnjih metoda se oslanja na robusnu segmentaciju teksturiranih regija, no ova metoda uniformno modelira postupni vignetting i visokofrekvencijske teksture u kontekstu distribucije radijalnog gradijenta. Teksture odgovaraju krajevima krivulje distribucije i vignetting se očitava u nesimetričnosti distribucije. Stoga ova metoda može znatno smanjiti vignetting bez provođenja segmentacije. Ovaj algoritam je prilično brz jer ne zahtjeva iterativnu segmentaciju i korekciju vignettinga. Unatoč solidnim rezultatima, ova metoda ne može u potpunosti ukloniti vignetting kao neke druge metode koje su bazirane na kalibraciji, no ovisno o količini i tipu slike dolazi blizu tome. Primjetno je da algoritam ne može ispraviti vignetting u samim kutovima slike gdje je i najizraženiji. Također, ukoliko je u centru slike neki kružni uniformni objekt, ovaj algoritam će ga prepoznati kao vignetting te ga pokušati ispraviti, iskrivjavajući sliku. Unatoč tome, sve prednosti ovog algoritma i višestruko nadmašuju nedostatke.

Što se tiče fotografija zvjezdanog neba, ova metoda se pokazala umjereno uspješnom. Redukcija vignettinga je primjetna, no u samim kutovima je i dalje primjetno zatamnjenje.



Slika 15 - Slika s vignettingom, ispravljena slika i procjena vignettinga za zvj. nebo

Kod pravih astrofotografija (razne izmaglice i sl.) ova metoda nije prikladna upravo zbog radialnih svojstava koja se koriste. Takve fotografije obično u centru imaju neki oblik kružne disperzije svjetla nastale od nekog zvjezdanog tijela koje ovaj algoritam prepoznaje kao vignetting te time izravnava cijelu sliku mijenjajući djelomično izgled i boje u slici.



Slika 16 - Primjer početne i ispravljene slike

5. Zaključak

U sklopu ovoga rada definirao sam pojavu prigušenja svjetlosnog odziva (eng. vignettinga). Detaljno su opisani najčešći uzroci nastanka, fizikalni model te mogućnosti detekcije i korekcije. Za implementaciju sam odabrao noviji algoritam koji ne zahtjeva nikakvo prethodno znanje o sustavu kojim je uzeta fotografija. Navedeni algoritam sam odabrao radi praktičnosti, brzine i jednostavnosti implementacije, te širokog spektra fotografija na kojima je algoritam uspješan.

Algoritam je programski implementiran u Matlabu te su rezultati zadovoljavajući. Uspješan je u detekciji vignettinga u fotografijama u kojima se u centru ne nalazi neki kružni objekt ravnomjerne iluminacije. Uspješan je u dvije vrlo različite primjene - fotografiji interijera i fotografiji eksterijera. U primjeni na fotografiji zvjezdanog neba su također postignuti zadovoljavajući rezultati, iako efekt nije u potpunosti uklonjen.

6. Literatura

- Smith, W. J.. Modern Optical Engineering: The Design of Optical Systems. Fourth Edition. New York. McGraw-Hill. 2008.
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Vignetting>, siječanj 2011.
- Paul van Walree, <http://toothwalker.org/optics/vignetting.html>, siječanj 2011.
- Fulvio Senore, <http://www.fsoft.it/Imaging/Vignetting.htm>, siječanj 2010.
- Zheng Y., Lin S., Kang S.B.. Single Image Vignetting Correction using Radial Gradient Symmetry. 2008.
- Goldman D.B., Chen J.H.. Vignette and exposure calibration and compensation. 2005.
- Menn, N.. Practical Optics. San Diego. Elsevier Academic Press. 2004.
- <http://www.covingtoninnovations.com/dslr/Vignetting.html>, siječanj 2010.
- Zheng Y., Lin S., Kang S.B.. Single Image Vignetting Correction. 2006.
- Matt BenDaniel, <http://starmatt.com/articles/av.html>, siječanj 2010.
- <http://hugin.sourceforge.net/tech/>, siječanj 2010.
- Laskaris N.. Vignetting. 2009.
- Jenkis F.A., White H.E.. Fundamentals of Optics. Fourth Edition. New York. McGraw-Hill. 2001.

7. Sažetak

Vignetting je pojava u fotografiji kada svjetlina postupno pada prema rubovima fotografije. Nastaje primarno zbog opreme kojom se fotografija radi te prirodnih zakona opadanja svjetline. Neodgovarajući sustav leća je najčešći razlog. Postoje četiri glavne vrste vignettinga. Korištenje neodgovarajućih dodataka na leći uzrokuje mehanički vignetting, optički i prirodni vignetting nastaju zbog samog dizajna leće a vignetting na pikselima je svojstven digitalnoj fotografiji. Zrake svjetlosti koje tvore sliku prolaze kroz sustav leća. Zrake koje padaju koso u odnosu na optičku os, u ovisnosti o kutu ne mogu proći kroz cijeli sustav, ili daju slabiji signal nego zrake paralelne s optičkom osi. Postoji mnogo metoda za detekciju i korekciju vignettinga. Većina metoda zahtjeva poznavanje karakteristika sustava kojim je fotografija uzeta, kalibraciju leće i/ili uzimanje preklapajućih fotografija. Razvijene su metode koje ne zahtijevaju nikakvo poznavanje fotografskog sustava, nego se parametri procjenjuju na temelju same slike. U matlabu je implementirana metoda otkrivanja i korekcije vignettinga iz jedne slike radijalnim gradijentom. Metoda se pokazala uspješna za širok spektar slika, uključujući fotografije zvjezdanog neba.

Ključne riječi: *vignetting, korekcija jednom slikom, radijalni gradijent*

8. Abstract

Vignetting is a phenomenon of brightness attenuation away from the image center. Primary reasons for appearance of this phenomenon are photographic gear with which the photographs are taken and law of natural light falloff. Wrong choice of lens is most common reason. There are four different types of vignetting. Usage of improper attachment to the lens causes mechanical vignetting, optical and natural vignetting are caused by lens design and pixel vignetting is specific for digital photography. Light beams which form a picture are passing through a multiple lens system. Beams that fall at oblique angle, can't travel through whole system or give weaker signal than beams parallel to optical axle, dependant on the angle. There are many methods for vignetting detection and correction. Most methods demand knowledge of characteristics of photographic system with which the photograph was taken, lens calibration and/or taking the sequence of overlapping pictures. There are developed methods that don't presume any prior knowledge of photographic system. Parameters are guessed from the picture itself. Method of single image correction using radial gradient has been implemented in matlab. Method proved successful on wide array of images, including images of starry sky.

Keywords: *vignetting, single image correction, radial gradient*