

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br.5064

**ALGORITMI ZA UKLANJANJE IZMAGLICE
U DIGITALNIM FOTOGRAFIJAMA**

Iva Pavić

Zagreb, lipanj 2017.

Zagreb, 8. ožujka 2017.

ZAVRŠNI ZADATAK br. 5064

Pristupnik: **Iva Pavić (0036468700)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Modul: Elektroničko i računalno inženjerstvo

Zadatak: **Algoritmi za uklanjanje izmaglice u digitalnim fotografijama**

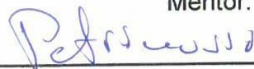
Opis zadatka:

U okviru završnog rada potrebno je istražiti, opisati i usporediti algoritme koji se koriste za poboljšanje digitalnih fotografija uklanjanjem izmaglice u slici. Do pojave izmaglice u fotografiji scene vanjskog prostora dolazi zbog prolaska svjetlosti udaljenog objekta kroz zrak koji sadrži čestice dima ili vodene pare, pri čemu dolazi do atmosferske apsorpcije i raspršenja. Svjetlosno zračenje objekta koje prima senzor u kameri je prigušeno djelovanjem atmosfere, ali je na to zračenje nadodana ambijentalna svjetlost uslijed njenog raspršenja na česticama u zraku koje se stapa u istu dolaznu zraku. Rezultat ovih degradacija su gubitak kontrasta i gubitak točnosti boje. Diskutirati matematičke i fizikalne modele koji se koriste za modeliranje ove pojave, te objasniti postupke za identifikaciju ovih degradacija i njihovo uklanjanje iz slika. Usporediti rad ovih algoritama na primjerima stvarnih fotografija koje sadrže izmaglicu.

Zadatak uručen pristupniku: 10. ožujka 2017.

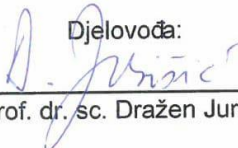
Rok za predaju rada: 9. lipnja 2017.

Mentor:



Prof. dr. sc. Davor Petrinović

Djelovođa:



Prof. dr. sc. Dražen Jurišić

Predsjednik odbora za
završni rad modula:



Prof. dr. sc. Mladen Vučić

Sadržaj

Uvod	1
1. Izmaglica.....	2
1.1. Izmaglica kao prirodna pojava	2
1.2. Izmaglica na fotografijama	2
2. Pretpostavka tamnim kanalom	5
2.1. Općenito	5
2.2. Upotreba tamnog kanala za uklanjanje izmaglice na fotografijama.....	7
2.2.1. Procjena atmosferskog osvjetljenja	8
2.2.2. Procjena mape prijenosa.....	8
2.2.3. Zračenje	10
2.2.4. Daljnje usavršavanje mape prijenosa.....	11
2.2.4.1. Dvostrani filter.....	11
2.2.4.2. Guided filter	12
2.2.4.3. Meko izdvajanje	14
2.2.5. Usporedba filtera za usavršavanje mape prijenosa	16
3. Pretpostavka prigušenjem boja	17
3.1. Općenito	17
3.2. Vraćanje dubine prizora	18
3.2.1. Linearni model.....	18
3.2.2. Prikupljanje podataka.....	19
3.2.3. Strategija učenja.....	19
3.2.4. Procjena podataka o dubini	21
4. Usporedba algoritama.....	23
5. Zaključak.....	24
6. Sažetak	25
7. Summary	25
8. Literatura.....	26
9. Pojmovnik.....	27

Uvod

Različiti vremenski uvjeti kao što su izmaglica, magla, kiša ili smog mogu imati znatne vizualne utjecaje na većim ili manjim dijelovima fotografije ili videa. Smanjena vidljivost najviše utječe na razne primjene računalnog vida u sustavima koji se oslanjaju na izdvajanje slike ili videa radi otkrivanja, praćenja i prepoznavanja objekta ili događaja. Druge posljedice su estetske prirode gdje na fotografijama odnosno videima nije poželjan utjecaj atmosferskih uvjeta osim ako je to dio samog umjetničkog izražaja autora.

Ovaj se rad bavi opisom poznatih algoritama za uklanjanje izmaglice na digitalnim fotografijama, ali budući da se video može promatrati kao slijed slika ili fotografija algoritmi su primjenjivi i na obradi kod videa .

Rad se sastoji od pet poglavlja. U prvom poglavlju detaljnije je objašnjena pojava izmaglice na digitalnim fotografijama s prirodne i fizikalne strane. U drugom poglavlju razmatran je jedan od najraširenijih algoritama za uklanjanja izmaglice na digitalnim fotografijama, pretpostavka tamnim kanalom ("Dark Channel Prior"). Opisani su koraci algoritma i objašnjena je motivacija iza navedenog algoritma. Istaknuta su tri različita filtra i njihovi rezultati. U trećem poglavlju razmatra se pretpostavka prigušenjem boje ("Color Attenuation Prior") i njezini koraci. U četvrtom poglavlju uspoređeni su rezultati dobiveni korištenim algoritmima.

1. Izmaglica

1.1. Izmaglica kao prirodna pojava

Magla je meteorološka pojava u prizemnom sloju troposfere. Sastoji se od sitnih vodenih kapljica ili ledenih kristala koji lebde blizu površine zemlje. Magla se razlikuje od izmaglice samo po svojoj gustoći. Izmaglica smanjuje vidljivost na više od 1 km dok magla smanjuje vidljivost na manje od 1 km. Za potrebe ovog rada, maglu i izmaglicu ćemo smatrati istom pojavom na fotografijama i u daljnjem tekstu će se pod izmaglicom podrazumijevati i magla.

1.2. Izmaglica na fotografijama

Glavni razlog degradacije kvalitete slike u vremenskim uvjetima magle odnosno izmaglice je najvećim dijelom posljedica raspršenja svjetlosti koja se događa zbog velikih količina čestica u zraku (kao što su npr. izmaglica, smog, dim, nečistoće u zraku) prije pada na leću fotoaparata. U pravilu se degradacija kvalitete fotografije prepoznaje smanjenim intenzitetom boje i samog kontrasta fotografije.

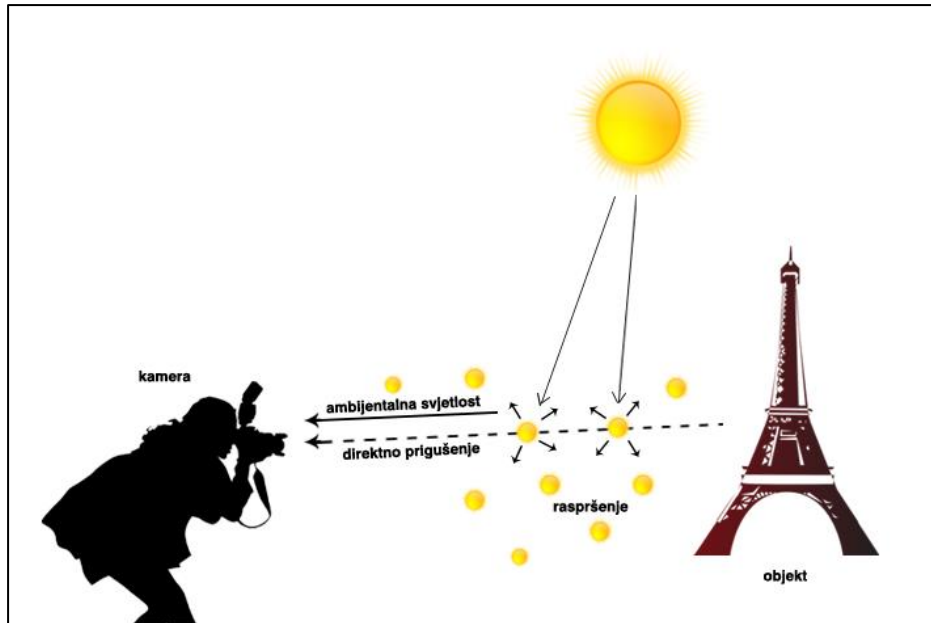
Utjecaj magle uglavnom je posljedica dva fenomena raspršivanja:

1. Prigušenja svjetlosti ("Attenuation")

Svjetlosna zraka koja dolazi iz smjera scene ili objekta koji fotografiramo postaje prigušena zbog raspršenja atmosferskih čestica što kao rezultat daje smanjeni kontrast kadra.

2. Ambijentalne svjetlosti ("Airlight")

Svjetlost iz izvora raspršena je prema kameri što utječe na promjenu boje. Utjecaj magle je funkcija udaljenosti između točke gledanja i gledatelja ili kamere.



Slika 1. Stvaranje izmaglice na fotografiji

Slika na koju je utjecala izmaglica se može matematički izraziti kao:

$$I(x) = J(x)e^{-\beta d(x)} + A(1 - e^{-\beta d(x)}) \quad (1)$$

gdje x predstavlja položaj piksela unutar slike, I promatranu sliku s izmaglicom, J sliku na kojoj je uklonjena izmaglica, A sveukupno atmosfersko osvjetljenje, β koeficijent raspršenja atmosfere, a d dubinu prostora prizora (scene). I , J i A su trodimenzionalni vektori u RGB prostoru. [1] Izraz $e^{-\beta d(x)}$ se često definira kao mapa prijenosa ("transmission map") pa vrijedi jednakost:

$$t(x) = e^{-\beta d(x)} \quad (2)$$

U uvjetima vedrog vremena vrijedi $\beta \approx 0$ iz čega slijedi da je $I \approx J$. Međutim, za slike s izmaglicom β se ne može zanemariti. Pa tako prvi član jednadžbe (1), $J(x)t(x)$ predstavlja ranije spomenuto direktno prigušenje i ono se smanjuje kako se dubina prizora povećava. Suprotno tome, drugi član, $A(1 - t(x))$, koji predstavlja ambijentalnu svjetlost se povećava. Važno je spomenuti da je u procesu uklanjanja izmaglice najvažnija informacija dubina prizora d . Već ranije spomenuti koeficijent raspršenja β je nezanemariv, ali se može smatrati konstantom u homogenim atmosferskih uvjetima. Dakle, mapa prijenosa t se može lako procijeniti koristeći izraz (2) ako je poznata dubina prizora.

U idealnom slučaju, $d(x)$ je u rasponu $[0, +\infty)$ jer neki objekti koji se nalaze na slici (npr. elementi krajolika kao što je primjerice planina) mogu biti iznimno daleko od promatrača tj. $d(x) \rightarrow \infty$ pa iz izraza (1) dobivamo da je:

$$I(x) = A, d(x) \rightarrow \infty \quad (3)$$

Jednadžba (3) pokazuje da intenzitet piksela zbog koje dubina teži beskonačnosti može zamijeniti vrijednost atmosferskog osvjetljenja. Također, ako je $d(x)$ dovoljno velik, prema jednadžbi (2), $t(x)$ teži biti što manji, a $I(x)$ je približno jednak A . Uvodimo novi parametar d_{prag} koji će određivati kada vrijedi jednadžba (3). Stoga, umjesto da izračunamo atmosfersku svjetlost A pomoću jednadžbe (3), možemo procijeniti A po sljedećoj jednadžbi s obzirom na prag:

$$I(x) = A, d(x) \geq d_{prag} \quad (4)$$

U većini fotografija s maglom, fotografija je napravljena na otvorenom prostoru gdje je pozadina kilometrima daleko od promatrača, stoga se gornja tvrdnja lako zadovoljava.

Pretpostavljajući da svaka slika s maglom ima sadržaj udaljeni pogled, atmosfersko osvjetljenje se može aproksimirati sljedećim izrazom:

$$A = I(x), x \in \{x | \forall y: d(y) \leq d(x)\} \quad (5)$$

Uzimajući to u obzir, daljnji postupak uklanjanja izmaglice se može svesti na otkrivanje informacija o dubini.

Naposljetku izražavamo zračenje objekta, odnosno sliku nakon uklanjanja izmaglice:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{t(x)} + A \quad (6)$$

Zaključujemo da je osnovni korak kod procesa uklanjanja izmaglice je procjena atmosferskog osvjetljenja i izračun mape prijenosa. Zatim se s poznatim vrijednostima A i $t(x)$ pomoću izraza (6) dobiva slika bez izmaglice J .

2. Pretpostavka tamnim kanalom

2.1. Općenito

Algoritam pretpostavke tamnim kanalom (u daljnjem tekstu DCP) se temelji na svojstvu tamnih piksela koji imaju iznimno niski intenzitet u barem jednom kanalu boje izuzimajući prostor gdje se nalazi nebo. Naime, na području neba na fotografijama bez izmaglice tamni kanal će najčešće imati visoki intenzitet. Uklanjanje izmaglice ostvareno DCP-om sastoji se od četiri koraka; procjene atmosferskog osvjetljenja, procjene mape prijenosa, usavršavanje mape prijenosa i sama rekonstrukcija slike.

Postoje tamni pikseli čije su vrijednosti intenziteta jako blizu nuli za bar jedan kanal boje unutar slike. Temeljeno na tome, tamni kanal je definiran s:

$$J^{dark}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(y) \right) \quad (7)$$

gdje je J^c intezitet kanala boje $c \in \{r, g, b\}$ RGB slike, a $\Omega(x)$ je okolni uzorak ("local patch") centriran na piksel x . [2] Kao što je vidljivo iz izraza (7), tamni kanal definiramo kao minimalnu vrijednost koja postoji u 3 kanala boje i svih piksela u $\Omega(x)$.

Od 5000 tamnih kanala slika bez izmaglice, pokazano je da oko 75% piksela unutar kanala ima vrijednosti nula dok 90% piksela ima vrijednosti manje od 35 (kada zanemarimo područje neba sa slike). [3] Smanjeni intenzitet je posljedica:

- i. sjena, kao što su na primjer sjene drveća u ruralnom području (slika 2)
- ii. raznobojnih objekata ili površina (slika 3)
- iii. tamnih objekata ili površina



Slika 2. (a) Fotografija šume bez izmaglice (b) Tamni kanal



Slika 3. (a) Fotografija bez izmaglice (b) Tamni kanal

Temeljem tih promatranja vrijednost pojedinog piksela u tamnom kanalu može biti aproksimirana s:

$$J^c \approx 0.$$

Tako navedenu aproksimaciju nazivamo pretpostavkom tamnim kanalom .

S druge strane, vrijednosti piksela u tamnim kanalima na slikama s izmaglicom su daleko iznad nule. Globalno atmosfersko osvjetljenje je obično akromatsko i žarko, a kad na to nadodamo ambijentalnu svjetlost i direktno prigušenje, minimalna vrijednost tri kanala u boji se značajno povisi. Primjećujemo da pomoću vrijednosti u tamnim kanalima možemo procijeniti gustoću magle što se pokazuje kao vrlo korisno svojstvo u daljnjoj obradi slike s izmaglicom. To svojstvo ćemo koristiti za procjenu atmosferske svjetlosti i mape prijenosa.

2.2. Upotreba tamnog kanala za uklanjanje izmaglice na fotografijama

U algoritmima koji se temelje na DCP-u, tamni kanal je konstruiran prema izrazu (7). Jedini parametar koji je potrebno odrediti je veličina $\Omega(x)$ odnosno karakteristični uzorak danog prostora. Iako veličina uzorka utječe na aproksimaciju tamnog kanala, pokazano je da je manji uzorak dovoljan, štoviše i poželjan zbog smanjenja vremena izvođenja koda. Vrijedi napomenuti da je za slike na kojima se nalaze dijelovi složenije teksture preporučljivo uzeti veći karakterističan uzorak.[2] Kako bi se osigurala dobra aproksimacija tamnog kanala ovdje je korišten uzorak veličine 15×15 .



Slika 6. (a) Prizor s izmaglicom

(b) Tamni kanal



Slika 7. (a) Prizor s izmaglicom

(b) Tamni kanal

Prijašnja teza koju smo postavili je potvrđena dobivenim tamnim kanalom slike 6(a). Ako obratimo pažnju primijetit ćemo da je na slici izmaglica kao i sam prizor jednoliko gradirana od dna prema vrhu fotografije. Na dnu fotografije je izmaglica vrlo slaba pa su tamo i vrijednosti piksela unutar tamnih kanala niske vrijednosti (tamni pikseli). Suprotno

tome, kako se izmaglica povećava prema vrhu fotografije tako se i tamni kanali pune odnosno poprimaju sve veću vrijednost (slika 6(b)). Isto primjećujemo na slici 7(b) gdje su pikseli s najvišim intenzitetom upravo oni koji prikazuju najudaljeniji prizor odnosno oni s najvećom koncentracijom magle.

2.2.1. Procjena atmosferskog osvjetljenja

Sljedeći korak u algoritmu uklanjanja izmaglice je procjena atmosferskog osvjetljenja. U većini prijašnjih metoda, za izračun atmosferskog osvjetljenja koristio se piksel s najvećom koncentracijom izmaglice. Problem se javlja kada u slikama postoje bijeli objekti čiji su pikseli sami po sebi najvećeg intenziteta. Srećom, kako smo zaključili i u poglavlju 2.1. upotrebom DCP-a možemo s popriličnom sigurnošću procijeniti gustoću izmaglice i time poboljšati procjenu atmosferskog osvjetljenja. Odabiremo 0.1% najsvjetlijih piksela u tamnom kanalu jer oni prikazuju najgušću izmaglicu. Zatim se između navedenih piksela odabiru oni s najvišim intenzitetom kako bi naposljetku njihovom srednjom vrijednošću dobili atmosfersko osvjetljenje. [3]

2.2.2. Procjena mape prijenosa

Nakon što smo procijenili atmosfersku svjetlost u mogućnosti smo isto napraviti s mapom prijenosa. Izraz $I(x) = J(x)t(x) + A(1 - t(x))$ dijelimo s A^c i uzimamo minimalni intenzitet lokalnog uzorka svakog od tri kanala boja i dobivamo:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \frac{I^c(y)}{A^c} = \tilde{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} \frac{J^c(y)}{A^c} + (1 - \tilde{t}(x)) \quad (8)$$

Pretpostavljamo da je prijenos okolnog uzorka $\Omega(x)$ konstanta i dalje je označavamo kao $\tilde{t}(x)$. [2] Zatim primjenjujemo minimalizaciju po svim trima kanala boje:

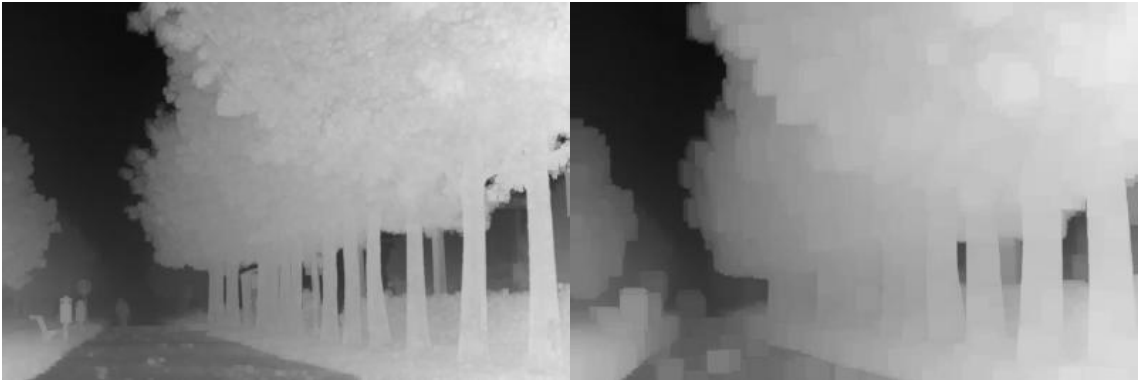
$$\min_c \left(\min_{y \in \Omega(x)} \frac{I^c(y)}{A^c} \right) = \tilde{t}(x) \min_c \left(\min_{y \in \Omega(x)} \frac{J^c(y)}{A^c} \right) + (1 - \tilde{t}(x)) \quad (9)$$

Kao što smo zaključili u poglavlju 2.1., vrijednost piksela u tamnom kanalu, J^{dark} teži nuli, a kako je atmosfersko osvjetljenje po kanalima A^c uvijek pozitivno, slijedi da i J^c/A^c teži nuli. Uzimajući u obzir prethodnu tvrdnju i izraz (9) dobivamo prijenos okolnog uzorka:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_c \left(\min_{y \in \Omega(x)} \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \quad (10)$$

Kao što je spomenuto ranije, DCP nije efikasan na području neba. Srećom, boja neba je dovoljno slična atmosferskom osvjetljenju A na slikama s izmaglicom čime član $\min_c(\min_{y \in \Omega(x)} \frac{I^c(y)}{A^c})$ teži u nulu iz čega slijedi da za područje neba vrijedi:

$$\tilde{t}(x) \approx 0.$$



Slika 8. (a) Mapa prijenosa, okolni uzorak 3×3 (b) okolni uzorak 15×15

Dodatan faktor koji treba uzeti u obzir je da čak i na vedre dane bez izmaglice, atmosfera sadrži razne čestice što ipak rezultira izmaglicom kada fotografiramo udaljene objekte.

Međutim, prisutnost magle je veliki faktor u ljudskom percipiranju dubine. Ukoliko uklonimo izmaglicu u potpunosti, fotografija se može činiti neprirodna. Kako bi zadržali manji dio izmaglice uvodimo parametar ω u izraz (10):

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_c \left(\min_{y \in \Omega(x)} \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \quad (11)$$



Slika 9. (a) Originalna fotografija (b) $\omega = 0.9$ (c) $\omega = 0.95$ (d) $\omega = 1$

Za potrebe ovog rada, za parametar ω izabrana je vrijednost 0.9. Kao što je vidljivo na slikama 9, uz veći ω smanjuje se kvaliteta slike nakon primijenjenog algoritma pa vrijedi da je znatost koja je vidljiva na području neba proporcionalna s vrijednošću parametra ω . Zaključujemo da se najbolji rezultat postiže vrijednošću 0.9.

Time smo obuhvatili sve aspekte izračuna prijenosa i uz postupak procjene atmosferskog osvjetljenja A iz 2.1.1. možemo dobiti mapu prijenosa.

2.2.3. Zračenje

Koristeći izraz (1) s poznatom mapom prijenosa lako možemo vratiti zračenje (radiance) scene. Međutim, direktno vraćeno zračenje je podložno šumu jer direktno prigušenje $J(x)t(x)$ može biti vrlo blizu nule kada je prijenos blizu nule. Zato je potrebno ograničiti prijenos $t(x)$ na manji iznos t_0 čime manji dio izmaglice ostaje očuvan u područjima najgušće izmaglice. Zračenje vraćamo preko sljedećeg izraza:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (12)$$

gdje je vrijednost t_0 najčešće 0.1. Zračenje vraćamo nakon primjene mape prijenosa i opet nakon primjene jednih od filtera kojima usavršavamo mapu prijenosa.

2.2.4. Daljnje usavršavanje mape prijenosa

Kriva procjena mape prijenosa može rezultirati nevjerodostojnom teksturom, a postupak minimizacije izraza (4) smanjuje razlučivost tamnog kanala što za posljedicu ima nejasnu mapu prijenosa. Zbog toga su razvijene metode filtriranja kojima se poboljšava točnost mape prijenosa. Neke od metoda, kao što je dvostrani filter, koriste samo mapu prijenosa dok druge, kao što su meko izdvajanje i guided filter koriste i samu sliku s izmaglicom u boji kao signal smjernicu.

2.2.4.1. Dvostrani filter

Dvostrani filter ("bilateral filter") je u širokoj upotrebi kao filter koji zaglađuje istovremeno održavajući jasnoću rubova na slici. Navedeni filter koristi težinske vrijednosti susjednih piksela s prostornim i udaljenostima:

$$\hat{t}(x) = \frac{1}{\sum_{y \in \Omega_x} G_{\sigma_s}(\|x - y\|) G_{\sigma_r}(\|I(x) - I(y)\|)} \cdot \sum_{y \in \Omega_x} G_{\sigma_s}(\|x - y\|) G_{\sigma_r}(\|I(x) - I(y)\|) \tilde{t}(y) \quad (13)$$

gdje G_{σ_s} i G_{σ_r} označavaju funkciju prostora i udaljenosti sa standardnim odstupanjima σ_s i σ_r . Budući da su susjedni pikseli koji imaju sličnu vrijednost kao središnji piksel težinski, rubovi u \tilde{t} se mogu očuvati dok ublažavamo područja koja su pogođena šumom. Rezultati pokazuju da dvostrani filter nije učinkovit za kvantitativna izvođenja. Na slici 10 vidimo usavršenu mapu prijenosa koristeći dvostrani filter.



Slika 10. Mapa prijenosa nakon ugađanja dvostranim filtrom

2.2.4.2. Guided filter

Kako bi ubrzali usavršavanje mape prijenosa kao zamjena se uvodi guided filter. U njemu se također koristi slika s izmaglicom I kao smjernica, ali se uvodi sljedeći linearni model:

$$\hat{t} \cdot (y) = a_x I(y) + b_x, \forall y \in \Omega_x \quad (14)$$

gdje pretpostavljamo da su koeficijenti a_x i b_x konstantni u Ω_x i dobiveni minimizacijom sljedećeg izraza:

$$E(a_x, b_x) = \sum_{y \in \Omega_x} (a_x I(y) + b_x - \tilde{t}(y))^2 + (\varepsilon a_x)^2, \forall y \in \Omega_x \quad (15)$$

gdje je ε parametar regulacije koji regulira a_x . Naposljetku se (a_x, b_x) mogu izraziti kao:

$$a_x = \frac{\frac{1}{|w|} \sum_{y \in \Omega_x} I_y \tilde{t}(y) - \mu_x \bar{t}(x)}{\sigma_x^2 + \varepsilon}, b_x = \bar{t}(x) - a_x \mu_x \quad (16)$$

gdje su μ_x i σ_x^2 srednja vrijednost odnosno varijanca ulazne slike I u prostoru Ω_x . $|w|$ predstavlja broj piksela u Ω_x , a za $\bar{t}(x)$ vrijedi $\bar{t}(x) = \frac{1}{|w|} \sum_{y \in \Omega_x} \tilde{t}(y)$.

Uzimajući u obzir područja koja se preklapaju tijekom računanja a_x i b_x , tako usavršena mapa prijenosa iznosi:

$$\hat{t}(x) = \bar{a}_x \tilde{t}(x) + \bar{b}_x \quad (17)$$

gdje su $\bar{a}_x = \frac{1}{|w|} \sum_{y \in \Omega_x} a_y$ i $\bar{b}_x = \frac{1}{|w|} \sum_{y \in \Omega_x} b_y$ i označavaju srednju vrijednost svih koeficijenata dobivenih preko x piksela.

Ovako usavršena mapa prijenosa zbog niske složenosti algoritma uvelike skraćuje vrijeme izvođenja algoritma. Guided filter je brz linearno vremenski algoritam. Sam filter ima $O(N)$ vrijeme izvođenja (gdje je N broj piksela) za slike u sivim tonovima i za one u boji.

Slike prikazuju rezultat primjene guided filtra. Budući da je usavršena mapa prijenosa u potpunosti dobivena pomoću slike s izmaglicom, ona sadrži sličnu razinu oštrote kao i slika s izmaglicom bez da stvara značajnije pogrešne teksture. Slika pokazuje utjecaj parametra ε na mapu prijenosa, ali i krajnji rezultat uklanjanja izmaglice. Vidljivo je da je mapa prijenosa s manjim ε nejasnijih rubova i jačom izmaglicom, ali je s druge strane krajnja slika jasnija i sama je izmaglica bolje uklonjena. Iz tog razloga kao ε uzimamo vrijednost 0.01.



Slika 11. (a) Usavršena mapa prijenosa s $\varepsilon = 0.001$ (b) Slike bez izmaglice $\varepsilon = 0.001$



Slika 12. (a) Usavršena mapa prijenosa s $\varepsilon = 0.01$ (b) Slika bez izmaglice s $\varepsilon = 0.01$

2.2.4.3. Meko izdvajanje

Dvostrani filter učinkovit je u uklanjanju pogrešno obojenih tekstura u mapi prijenosa. Međutim, za uklanjanje izmaglice, mapa prijenosa bi trebala imati sličnu razinu oštine kao i slika s koje želimo ukloniti izmaglicu. Zbog toga mapu prijenosa usavršavamo izdvajanjem.

Opažamo da izraz kojim opisujemo sliku s izmaglicom ima sličan oblik kao i izraz za izdvajanje na slici. Mapa prijenosa je upravo alpha mapa¹ stoga primjenjujemo algoritam mekog izdvajanja [4] kako bi pročistili mapu prijenosa. Pročišćenu mapu prijenosa označavamo s $t(x)$. Zatim zapisujemo $t(x)$ i $\tilde{t}(x)$ u vektorskom obliku kao t i \tilde{t} i minimiziramo sljedeću funkciju:

$$E(t) = t^T L t + \lambda (t - \tilde{t})^T (t - \tilde{t}) \quad (18)$$

gdje je L Laplaceova matrica izdvajanja [7] koja se izračuna preko slike s izmaglicom, a λ parametar regulacije. Prvi član ima funkciju ugađivanja, a drugi predstavlja podatke.

Element (i,j) matrice L je definiran kao:

$$\sum_{k|(i,j) \in w_k} \left(\delta_{ij} - \frac{1}{|w_k|} \left(1 + (\mathbf{I}_i - \mu_k)^T \left(\Sigma_k + \frac{\varepsilon}{|w_k|} U_3 \right)^{-1} (\mathbf{I}_j - \mu_k) \right) \right) \quad (19)$$

Gdje su \mathbf{I}_i i \mathbf{I}_j boje ulazne slike \mathbf{I} u pikselima i,j , δ_{ij} je Kroneckerova delta funkcija, μ_k i Σ_k su matrica srednje vrijednosti i matrica kovarijance boja u prozoru w_k , U_3 je jedinična matrica 3×3 , ε je parametar regulacije, a $|w_k|$ je broj piksela u prozoru w_k .

Optimalni prijenos može se izraziti preko:

$$(L + \lambda U) \mathbf{t} = \lambda \tilde{\mathbf{t}} \quad (20)$$

gdje je U jedinična matrica jednake veličine kao L . Za vrijednost λ je ovdje uzeta 10^{-4} kako bi \mathbf{t} bio slabo ograničen s $\tilde{\mathbf{t}}$. Kao što je vidljivo iz slike, na ovim postupkom usavršenoj mapi prijenosa uspješno su izoštreni nejasni rubovi i ocrtani profili objekata.

Slike 13 prikazuju kako odabir karakterističnog okolnog uzorka utječe na mapu prijenosa. Vidljivo je da su nakon primijene mekog izdvajanja mutni rubovi oštiri. To se izuzetno dobro primjećuje na mapi prijenosa gdje je odabran okolni uzorak veličine 15×15 .



Slika 13. (a) mapa prijenosa okolnog uzorka 3×3 (b) meko izdvajanje 3×3
(c) mapa prijenosa 15×15 (d) meko izdvajanje 15×15

¹ **Alpha mapiranje** je tehnika u 3D računalnoj grafici gdje je slika dodijeljena 3D objektu, a određena područja objekta su transparentna odnosno prozirna

2.2.5. Usporedba filtera za usavršavanje mape prijenosa



Slika 14. Mapa prijenosa nakon (a) dvostranog filtera (b) guided filtera (c) mekog izdvajanja



Slika 15. Slika s uklonjenom izmaglicom koristeći (a) dvostrani filter (b) guided filter (c) meko izdvajanje

Kao što je vidljivo na slikama 14 i 15, najjasnije rubove na mapi prijenosa stvara metoda mekog izdvajanja. Vidljivo je da jasnije rubove ocrtavaju filteri koji koriste sliku s izmaglicom (meko izdvajanje, guided) dok dvostrani filter to radi nešto lošije. Od primijenjenih filtera, najučinkovitijim za uklanjanje izmaglice se pokazao guided filter, dok najbolju procjenu mape prijenosa daje meko izdvajanje. Što se tiče zahtjevnosti izvedbe, najviše vremenski zahtjevno se pokazalo meko izdvajanje i dvostrani filter, a najmanje guided filter. Guided filter je također i računalno najmanje zahtjevan proces.

3. Pretpostavka prigušenjem boja

3.1. Općenito

Drugi algoritam koji će biti opisan u ovom radu kao pretpostavku kojom uklanja izmaglicu koristi prigušenje boje. Navedeni algoritam predlažu O.Zhu, J.Mai, L.Shao [5] koji su iskoristili svojstvo da se promjenom gustoće izmaglice intenzitet svjetlosti i zasićenost piksela slike s izmaglicom znatno mijenjaju.

Pokazano je da je na području gdje ne postoji izmaglica zasićenost prizora prilično visoka dok je intenzitet svjetlosti umjeren, a razlika između zasićenosti i intenziteta svjetlosti je približno nula. Približavanjem području s više izmaglice boje blijede što rezultira naglim smanjenjem zasićenosti, a istovremeno se intenzitet svjetlosti povećava time stvarajući veliku razliku između zasićenja i intenziteta svjetlosti. Primjećujemo da tri svojstva (intenzitet svjetlosti, zasićenost i razlika između navedenoga) variraju ovisno o gustoći magle na slici.

U uvjetima bez izmaglice, postupak stvaranja slike je sljedeći; objekt koji slikamo reflektira (odbija) energiju koja dolazi iz izvora osvjetljenja (odnosno izravne Sunčeve svjetlosti, raspršene svjetlosti neba i svjetlosti koja se odbila od tla) i izgubljena je vrlo mala količina energije na putu prema objektivu/leći fotoaparata. Slike su najčešće jasnih boja. Međutim, u uvjetima izmaglice to nije slučaj. Kao što je spomenuto u poglavlju 1.2. javljaju se dva fenomena, izravno prigušenje i ambijentalna svjetlost. Izravno prigušenje uzorkovano smanjenjem reflektirane energije dovodi do slabog intenziteta svjetline. S druge strane, bijela ili siva ambijentalna svjetlost koja se stvara raspršenjem svjetlosti okoline, pojačava intenzitet svjetlosti i smanjuje zasićenost. Budući da ambijentalno osvjetljenje ima važniju ulogu u većini slučajeva, područja slike gdje se nalazi izmaglica su karakterizirana visokim intenzitetom svjetlosti i niskom zasićenošću. Štoviše, što je izmaglica gušća, veći je i utjecaj ambijentalne svjetlosti.

To nam omogućuje da iskoristimo razliku između intenziteta svjetlosti i zasićenosti kako bismo procijenili koncentraciju izmaglice.

Budući da se gustoća izmaglice općenito povećava promjenom dubine prizora, možemo pretpostaviti da je dubina scene pozitivno korelirana s koncentracijom maglice:

$$d(x) \propto c(x) \propto v(x) - s(x) \quad (21)$$

gdje je d dubina prizora, c je koncentracija izmaglice, v je intenzitet svjetlosti, a s je zasićenost. Navedeno čini temelj modela pretpostavke prigušenjem boja.

3.2. Vraćanje dubine prizora

3.2.1. Linearni model

Budući da smo pokazali da razlika između intenziteta svjetlosti i zasićenja može približno predstavljati koncentraciju izmaglice, možemo stvoriti linearni model, tj. točniji izraz:

$$d(x) = \theta_0 + \theta_1 v(x) + \theta_2 s(x) + \varepsilon(x) \quad (22)$$

gdje x predstavlja položaj unutar slike, d dubinu prizora, v intenzitet svjetlosti, s zasićenost, $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ nepoznate linearne koeficijente, a ε je slučajna varijabla koja predstavlja slučajnu pogrešku modela. Koristimo Gaussovu razdiobu ($\varepsilon(x) \sim N(0, \sigma^2)$). Prema svojstvima Gaussove distribucije, imamo:

$$d(x) \sim p(d(x)|x, \theta_0, \theta_1, \theta_2, \sigma^2) = N(\theta_0 + \theta_1 v + \theta_2 s, \sigma^2) \quad (23)$$

Jedna od najvažnijih prednosti ovog modela je svojstvo očuvanja rubova. Da bismo ovo ilustrirali, izračunavamo gradijent d u jednadžbi (22) i imamo:

$$\nabla d = \theta_1 \nabla v + \theta_2 \nabla s + \nabla \varepsilon \quad (24)$$

Budući da σ nikada ne može biti prevelik u praksi, vrijednost ε je najčešće vrlo niska i približno jednaka nuli. U ovom slučaju, vrijednost $\nabla \varepsilon$ je dovoljno niska da se može zanemariti. Pokazano je [5] da je razdioba rubova d neovisna ako se odabere mali σ . Osim toga, budući da su v i s zapravo dvije jednokanalne slike (kanal vrijednosti i zasićeni kanal HSV prostora boja) na koje se dijeli maglovita slika, jednadžba (24) osigurava da d ima rub samo ako i dana slika I ima rub.

Usporedbom dviju slika [5], jedne koja prikazuje razdiobu rubova slike s izmaglicom i druge koja prikazuje $\nabla d = \theta_1 \nabla v + \theta_2 \nabla s + \nabla \varepsilon$ (gdje je θ_1 0.1, θ_2 je -0.1, a je ε je neka nasumično odabrana slika) primijećeno je da I i d imaju slične razdiobe rubova. To dodatno osigurava da informacije o dubini mogu biti dobro oporavljene čak i blizu diskontinuiteta dubine u prizoru.

3.2.2. Prikupljanje podataka

Da bi se precizno saznali koeficijenti $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ potrebni su test podaci. U našem slučaju, testni uzorak sastoji se od slike s izmaglicom i odgovarajuće mape dubine. Međutim, mapu dubine je vrlo teško napraviti zbog činjenice da ne postoji pouzdan način za mjerenje dubine u vanjskim prizorima.

Iz tog razloga se izrađuju umjetne mape dubine i odgovarajuće slike s izmaglicom za dobivanje dovoljno uzoraka za ispitivanje. Proces generiranja uzoraka je sljedeći, najprije se za svaku sliku bez izmaglice generira slučajna mapa dubine iste veličine. Vrijednosti piksela unutar mape umjetno stvorenih dubina dobivaju se iz standardne uniformne distribucije na otvorenom intervalu (0, 1). Sljedeći korak je generiranje nasumično odabranog atmosferskog osvjetljenja $A(k, k, k)$ gdje je vrijednost k između 0,85 i 1,0. Konačno, stvara se slika s izmaglicom I sa slučajnom dubinom d i slučajnim atmosferskim osvjetljenjem A prema jednadžbi (1) i jednadžbi (2).

3.2.3. Strategija učenja

Izrazimo zajedničko uvjetovanu koncentraciju:

$$L = p(d(x_1), \dots, d(x_n) | x_1, \dots, x_n, \theta_0, \theta_1, \theta_2, \sigma^2) \quad (25)$$

gdje je n ukupan broj piksela unutar zamagljenih slika, $d(x_n)$ je dubina n -točke scene, a L je vjerojatnost. Pretpostavljajući da je slučajna pogreška na svakoj sceni nezavisna (tj. $p(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) = \prod_{i=1, \dots, n} p(\varepsilon_i)$), možemo ponovno napisati jednadžbu (24) kao:

$$L = \prod_{i=1}^n p(d(x_i) | x_i, \theta_0, \theta_1, \theta_2, \sigma^2) \quad (26)$$

Prema jednadžbi (23) i jednadžbi (26), imamo:

$$L = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{d_{g_i} - (\theta_0 + \theta_1 v(x_i) + \theta_2 s(x_i))}{2\sigma^2}} \quad (27)$$

gdje d_{g_i} predstavlja dubinu i -te točke prizora. Cilj je pronaći optimalne vrijednosti $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ i σ do maksimuma L . Zbog praktičnosti, umjesto da maksimalno povećamo vjerojatnost, povećavamo prirodni logaritam vjerojatnosti $\ln L$. Stoga se problem može izraziti na sljedeći način:

$$\arg \max_{\theta_0, \theta_1, \theta_2, \sigma} \ln L = \sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{d_{g_i} - (\theta_0 + \theta_1 v(x_i) + \theta_2 s(x_i))}{2\sigma^2}} \right) \quad (28)$$

Najprije izračunavamo parcijalnu derivaciju $\ln L$ po σ i izjednačimo s nulom i dobijemo procjenu maksimalne vjerojatnosti za varijablu σ^2 :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_{g_i} - (\theta_0 + \theta_1 v(x_i) + \theta_2 s(x_i)))^2 \quad (29)$$

Kako bi izračunali linearne koeficijente $\theta_0, \theta_1, \theta_2$, koristimo gradijent kako bismo procijenili njihove vrijednosti. Uzimanjem parcijalnih derivacija $\ln L$ po $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ možemo dobiti izraz kojim izračunavamo svaki od θ koeficijenata:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \theta_0} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n (d_{g_i} - (\theta_0 + \theta_1 v(x_i) + \theta_2 s(x_i)))$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \theta_1} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n v(x_i) (d_{g_i} - (\theta_0 + \theta_1 v(x_i) + \theta_2 s(x_i)))$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \theta_2} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n s(x_i) (d_{g_i} - (\theta_0 + \theta_1 v(x_i) + \theta_2 s(x_i)))$$

Izraz za izračunavanje linearnih koeficijenata može se sažeto izraziti kao:

$$\theta_i := \theta_i + \frac{\partial \ln L}{\partial \theta_i} \quad i \in \{0,1,2\} \quad (30)$$

Važno je napomenuti da u gornjem izrazu zapis: = ne izražava matematičku jednakost, već znači da postavljanje vrijednosti θ_i u lijevom izrazu postaje vrijednost odgovara desnog izraza.

Najbolji rezultat dali su $\theta_0 = 0.121779$, $\theta_1 = 0.959710$, $\theta_2 = -0.780245$, $\sigma = 0.041337$. [5] Nakon što se odrede vrijednosti koeficijenata, one se mogu koristiti za bilo koju sliku s izmaglicom. Ovi parametri će se koristiti za vraćanje dubine prizora slika s izmaglicom u ovom radu.

3.2.4. Procjena podataka o dubini

Nakon što smo našli vezu između dubine scene d , intenziteta svjetlosti v i zasićenosti s te su procijenjeni koeficijenti, možemo vratiti mapu dubine odabrane slike s izmaglicom u skladu s izrazom (21). Međutim, ovaj model možda neće biti primjenjiv u nekim posebnim situacijama. Na primjer, bijeli objekti na slici obično imaju visoku vrijednost intenziteta svjetlosti i niske vrijednosti zasićenja. Stoga, predloženi model često pretpostavlja da je objekt bijele boje daleko. Ovako pogrešna procjena će rezultirati netočnom procjenom dubine u nekim slučajevima.

Da bismo riješili taj problem, moramo razmotriti svaki okolni piksel. Na temelju pretpostavke da je dubina prizora lokalno konstantna, obrađujemo mapu izvorne dubine:

$$d_r(x) = \min_{y \in \Omega_r(x)} d(y) \quad (31)$$

gdje je $\Omega_r(x)$ $r \times r$ područje usmjereno na x , a d_r je mapa dubine s mjerilom r . Neki od rezultata prikazani su na slici 16. Slika 16(a) prikazuje početnu procijenjenu mapu dubine, 16(b) usavršenu mapu dubine, a slika 16(d) prikazuje slika bez izmaglice. Kao što se može vidjeti, restaurirane mape dubina imaju tamniju boju u područjima bez izmaglice, a svjetliju u gustim maglovitim područjima kao što se i očekivalo. S procijenjenom mapom dubina, uklanjanje izmaglice nije teško.

Nakon ovog slijedi procjena atmosferskog osvjetljenja koja je objašnjena u poglavlju 2.2.1., a zatim vraćanje zračenja objašnjeno u poglavlju 2.2.3.



Slika 16. (a) Mapa dubine

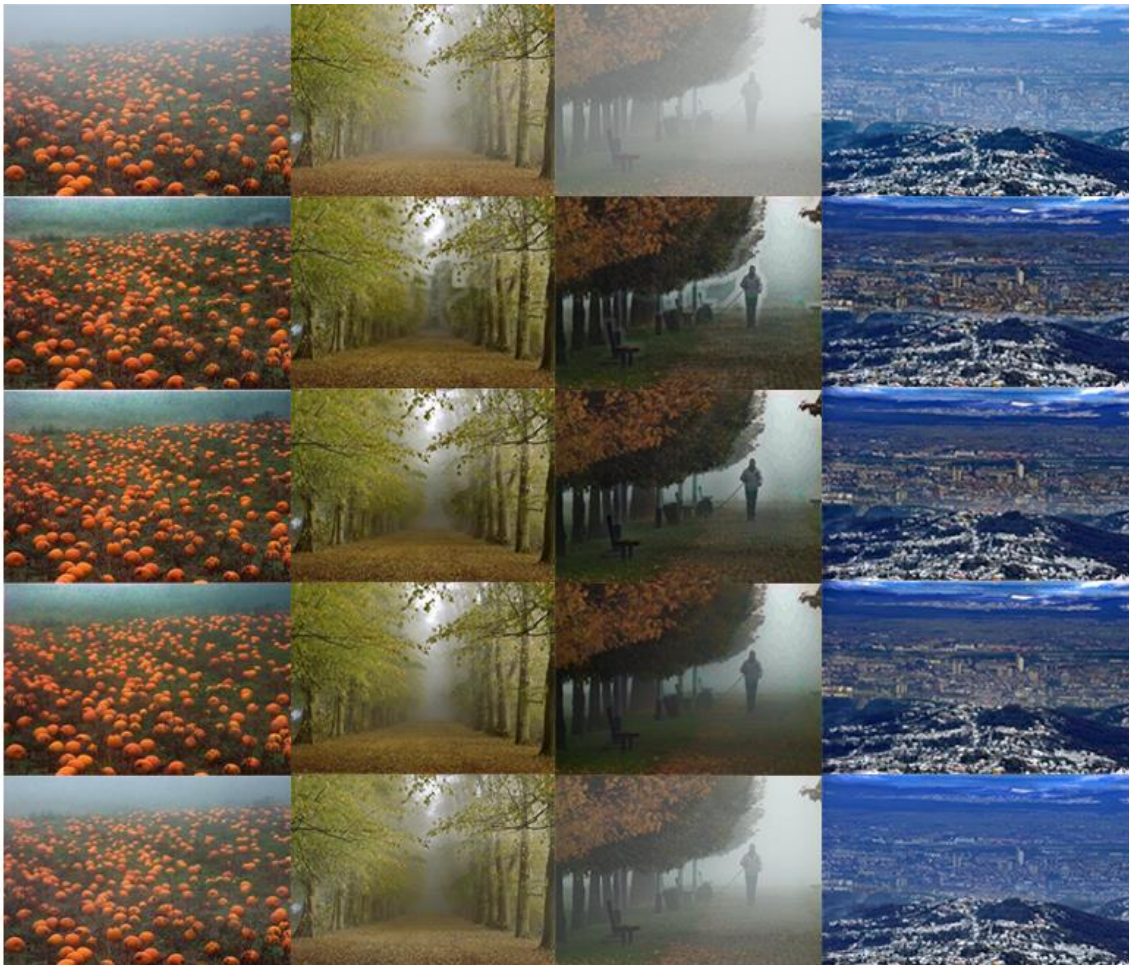
(b) Usavršena mapa dubine



Slika 16. (c) Originalna slika s izmaglicom

(d) Slika s uklonjenom izmaglicom

4. Usporedba algoritama



Slika 17. prvi red: originalne fotografije, drugi red: korišten dvostrani filter, treći red: korišten guided filter, četvrti red: korišteno meko izdvajanje, peti red: korištena pretpostavka prigušenjem boja

Kao što je vidljivo na slici 17, rezultati metoda ovise i o samoj sceni fotografije koja sadrži izmaglicu. Dvostrani filter uspješno uklanja izmaglicu, što se najviše primjećuje na fotografiji panorame grada gdje je upravo rezultat primjene dvostranog filtera najučinkovitiji dok je istovremeno prirodan. Nažalost, u svim fotografijama ovaj filter nailazi na poteškoće na rubovima objekata u izmaglici. S druge strane, guided filter uz skoro jednak rezultat uklanjanja izmaglice, nema takav nedostatak. Nadalje, meko izdvajanje daje nešto slabije rezultate od guided filtera, ali i dalje zadovoljavajuće. Najmanje učinkovito se pokazalo uklanjanje metodom prigušenja boja. Važno je napomenuti da je izmaglica na fotografiji panorame grada stvorena zbog raznih čestica u zraku, a ne prirodnom pojavom. Kao što je vidljivo, ta činjenica ne mijenja rezultat metoda u odnosu na izmaglicu koja se pojavljuje kao prirodna pojava.

5. Zaključak

U ovom radu opisane su dvije metode uklanjanja izmaglice na digitalnim fotografijama, pretpostavka tamnim kanalom i pretpostavka prigušenjem boja. Obje metode učinkovito prepoznaju piksele zahvaćene izmaglicom, ali je po dobivenim rezultatima na različitim tipovima fotografija u ovom radu pokazano da je DCP prilično učinkovitiji u uklanjanju izmaglice. Međutim jedan od njegovih nedostataka je to što kad se radi o području neba na slikama, daje slabije rezultate. Drugi je računalna zahtjevnost iako se mora napomenuti da se korištenjem različitih filtera u postupku obrade mape prijenosa ta zahtjevnost može znatno smanjiti. S druge strane pretpostavka prigušenjem boja je računalno manje zahtjevna, ali i znatno manje učinkovita u uklanjanju izmaglice.

6. Sažetak

Ljudski mozak lako prepoznaje izmaglicu na slikama bez dodatnih informacija, međutim računalu su one nužno potrebne. Ovaj rad se bavi opisom i implementacijom dvaju algoritama koji zasnivaju svoje pretpostavke na parametrima na fotografijama na koje izmaglica ima utjecaj. Pretpostavka tamnim kanalom se zasniva na tamnim pikselima, a pretpostavka prigušenjem boja na zasićenju i intenzitetu svjetlosti piksela. Opisani su matematički modeli iza algoritama i međusobno uspoređeni njihovi rezultati.

Ključne riječi: uklanjanje izmaglice, tamni kanal, prigušenje boja

7. Summary

The human brain easily recognizes the haze in the images without any additional information, however it's necessary for computation. This paper deals with the description and implementation of two algorithms that base their assumptions on parameters in photographs that are affected by haze. Dark channel prior is based on dark pixels while color attenuation prior is based on difference between saturation and brightness. Mathematical models behind algorithms are described and their results are compared.

Keywords: defogging, dehaze, dark channel prior, color attenuation Prior

8. Literatura

- [1] S. K. Nayar, S. G. Narasimhan, Vision in bad weather u Proc. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Vol. 2, 1999.
- [2] Seung-Won Jung, A review on dark channel prior based image dehazing algorithms, EURASIP Journal on Image and Video Processing, prosinac 2016.
- [3] K.He, J.Sun, X.Tang, Single image haze removal using dark channel prior. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 33(12), 2341–2353 (2010)
- [4] Dylan Swigget: Image Matting and Applications
- [5] O.Zhu, J.Mai, L.Shao , A fast single image haze removal algorithm using color attenuation prior“, IEEE Transactions on Image Processing, Volume: 24, Issue: 11, studeni 2015.
- [6] E. J. McCartney: Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles, New York, John Wiley and Sons, Inc. 1976.
- [7] SC.Huang, BH.Chen, WJ.Wang, Visibility restoration of single hazy images captured in real-world weather conditions. IEEE Trans. Circuits Sys. Video Tech. 24(10), 1814–1824 (2014)
- [8] X.Lv, W.Chen, IF.Shen, Real-time dehazing for image and video, in Proceedings of the 18th IEEE Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (HangZhou, 2010), pp. 62–69
- [9] A. Shrivastava, E.R. Kumari, Review on single image fog removal. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. 3(8), 423–427 (2013)
- [10] Z. Lin, X. Wang, Dehazing for image and video using guided filter. Appl. Sci. 2(4B), 123–127 (2012)
- [11] M. K. Saggi, S. Singh: A review on various haze removal techniques for image processing. International Journal of Current Engineering and Technology. 5(3), 1500–1505 (2015)
- [12] A. Levin, D. Lischinski, and Y. Weiss: A closed-form solution to natural image matting. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 30, no.2, pp. 228–242, 2008.
- [13] R. Fattal, Single image dehazing, ACM Transactions on Graphics (TOG), vol. 27, no. 3, pp. 72, 2008.
- [14] J. Long, Z. Shi, W. Tang, Fast haze removal for a single remote sensing image using dark channel prior, in Proceedings of International Conference on Computer Vision in Remote Sensing (CVRS, Xiamen, 2012), pp. 132–135

9. Pojmovnik

Attenuation - prigušenje

Airlight – ambijentalno osvetljenje / atmosfersko osvetljenje

Dark Channel Prior – prepostavka tamnim kanalom (DCP)

Radiance - zračenje

Soft matting – meko izdvajanje

Guided filter

Bilateral filter – dvostrani filter

Color Attenuation Prior – prepostavka prigušenjem boja (CAP)