

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 391

**Pronalaženje prometnog traka korištenjem
upravljivih filtara**

Ante Majić

Zagreb, siječanj 2009

Sadržaj

1	Uvod.....	2
2	Dvodimenzionalno linearno filtriranje.....	3
2.1	Osnovni pojmovi.....	4
2.2	Filtar G_{xx}	4
3	Upravljivi filter temeljen na drugoj derivaciji Gaussove funkcije	7
3.1	Rotacija filtra G_{xx}	7
3.2	Maksimalni i minimalni odziv	10
3.3	Debljina filtra	13
4	Programska implementacija	14
4.1	Redoslijed piksela u slici	14
4.2	Izračun broja piksela okoline	15
4.3	Izračun filtera.....	16
4.4	Generiranje izlaznih slika	16
4.5	Skaliranje slika dobivenih filtriranjem	17
4.6	Programsko uklanjanje trokuta nastalih inverznom perspektivnom transformacijom ...	17
5	Eksperimentalni rezultati.....	18
5.1	Uklanjanje trokuta nastalih inverznom perspektivnom transformacijom	19
5.2	Utjecaj odabira parametra σ	20
5.3	Subjektivna procjena ispravnosti.....	21
6	Zaključak	24
7	Literatura	25

1 Uvod

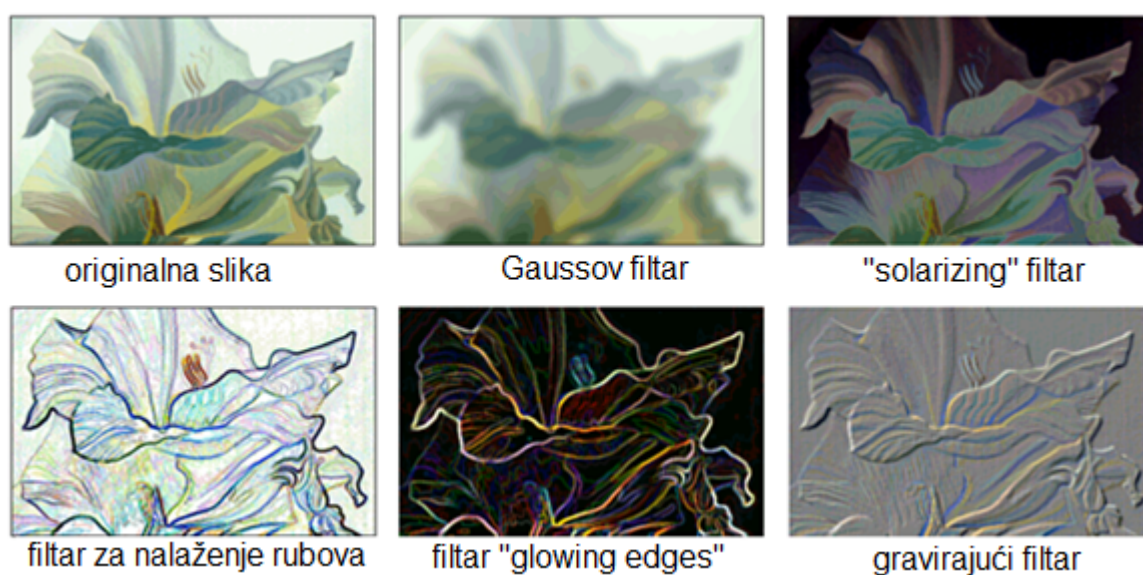
Korištenjem motornih vozila u svakodnevnom životu postavilo se pitanje do kada će čovjek morati upravljati vozilima da dođe do odredišta. Ponajprije se misli na teretna vozila, taxi ili autobuse, tj. prijevoz ljudi i dobara. Drugim riječima, kada će upravljanje motornim vozilom postati automatizirano, gdje bi čovjek samo zadao svoje krajnje odredište ili kad bi postojala nekakva samopomoć koja bi aktivirala alarm kada bi postojala opasnost da vozilo sleti sa kolnika. Zasigurno bi jedan od prvih koraka u tom smjeru bio nekakav sustav koji bi morao moći pronaći i raspoznati signalizaciju na kolniku, a zatim i pored njega.

Pod raspoznavanjem signalizacije na kolniku najvažniji dio je pronalaženje prometnog traka kojim će se vozilo kretati. Njegovom pronalaženju prethodi pronalaženje prometnih linija kojima je trak omeđen. Čovjeku je lako vizualizirati i pronaći prometne linije na kolniku, dok kod računala nije tako. Računalne metode detekcije prometnih trakova koriste se kontrastom u odnosu na (sivi) asfalt. Jedna od tih metoda za detekciju tog kontrasta je upravljivi filter temeljen na drugoj derivaciji Gaussove funkcije.

Struktura rada je organizirana na način da se najprije, u poglavlju 2, kaže par riječi općenito o filterima. Nakon toga u poglavlju 3 slijedi opis upravljivog filtra temeljenog na drugoj derivaciji Gaussove funkcije. U 4. poglavlju se nalazi programska implementacija, u kojoj su opisani bitni dijelovi programa zajedno sa definicijama funkcija. Naposljetku u poglavlju 5 su dani eksperimentalni rezultati sa subjektivnom ocjenom rezultata metode detekcije prometnih trakova.

2 Dvodimenzionalno linearno filtriranje

Riječ filter je dosta široki pojam koji postoji u mnogim granama znanosti te nije usko vezan ni za jednu od njih. Tako na primjer postoje različiti filteri u kemiji i inženjerstvu (vodeni filteri, zračni filteri), optici (infracrveni filteri), računarstvu (filteri u elektroničkoj pošti, internet filteri), filteri nad signalima (analogni i digitalni filteri)... Iako ima dosta slično značenje u većini grana, ipak postoje nijanse zbog kojih se filter jedne grane razlikuje od filtera druge [3]. Primjeri filtriranja u domeni obrade slike su prikazani na slijedećoj slici:



Slika 1: Primjeri filtriranja

Na slici 1 je prikazano pet različitih odziva pet različitih filtera nad istom ulaznom slikom. Svaki od tih filtera daje drugačiji rezultat od ostalih, čineći ga jedinstvenim.

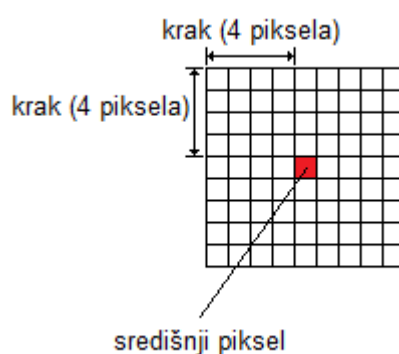
U ovom radu će biti više riječi o digitalnom filtriranju. Digitalni filter provodi matematičke operacije nad diskretiziranim signalom u cilju potiskivanja ili naglašavanja nekih njegovih aspekata. Takvo filtriranje se može podijeliti na jednodimenzionalno (linearno) i na dvodimenzionalno [7]. Linearni filter se može izraziti sljedećim izrazom; ako se na ulazu filtera nalazi x_i tada se izlaz filtera računa prema:

$$y_i = \sum_{t=i-k}^{i+k} x_t \cdot a_{i-t} \quad (1)$$

Izračun dvodimenzionalnih filtara je nešto složeniji, te će biti prikazan kroz ovaj rad na principu upravljivog filtra. Također, bit će prikazani različiti izlazi za različita filtriranja nad jednom zajedničkom ulaznom slikom, gdje će ta filtriranja služiti za detekciju prometnog traka. Više o upravljivom filtru će biti u poglavlju 3.

2.1 Osnovni pojmovi

Prilikom računanja odziva filtra potrebno je posebno računati vrijednost svakog izlaznog piksela koji ovisi o skupu piksela na ulaznoj slici. To znači da će prilikom izračuna vrijednosti intenziteta piksela izlazne slike imati utjecaj svi pikseli u okolini promatranog piksela ulazne slike. Udaljenost u pikselima, od promatranog (središnjeg) do krajnjeg piksela iz njegove okoline, koji će se uzeti u obzir prilikom izračuna vrijednosti tog piksela u izlaznoj slici, naziva se veličina filtra ili „krak“. „Krak“ je jednak u sva četiri smjera u odnosu na središnji piksel, te ovisi o parametru σ (sigma). Primjer jednog središnjeg piksela i njegove okoline, pri čemu je vrijednost „kraka“ 4, dan je slijedećom slikom:



Slika 2: Prikaz okoline središnjeg piksela

Iz prethodne slike je vidljivo kako ovisnost o broju piksela okoline ovisi o veličini „kraka“, a on ovisi o parametru σ . Dakle, što je vrijednost σ veća, veći će biti „krak“, a time i sama okolina oko središnjeg piksela.

2.2 Filtar Gxx

Nakon što su prikazani uvodni pojmovi vezani za filtre, slijedi izvod komponente filtra Gxx. Taj filter se dobije kao rezultat druge derivacije Gaussove funkcije, te najviše

ovisi o udaljenosti trenutnog piksela iz okoline do središnjeg piksela po x-osi [5] [6]. Izvod filtra Gxx iz Gaussove funkcije [2] slijedi:

$$G(x, y) = a \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad a = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial G}{\partial x} = G(x, y) \cdot \frac{-x}{\sigma^2} \quad (3)$$

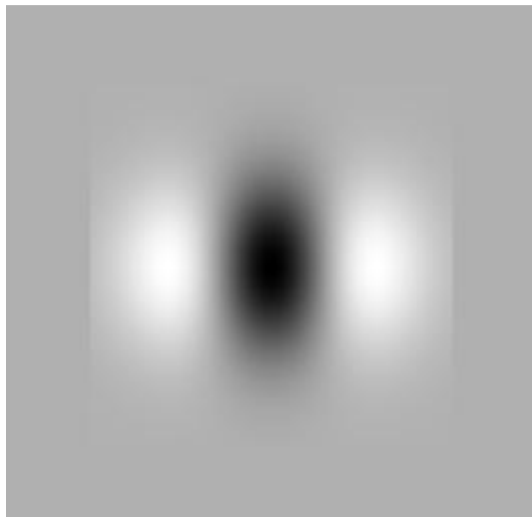
$$\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} = G(x, y) \cdot \frac{-x}{\sigma^2} \cdot \frac{-x}{\sigma^2} + G(x, y) \cdot \frac{-1}{\sigma^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} = \frac{x^2 - \sigma^2}{\sigma^4} \cdot G(x, y) \quad (5)$$

$$G_{xx}(x, y) = \frac{x^2 - \sigma^2}{2 \cdot \pi \cdot \sigma^6} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (6)$$

Iz finalne jednadžbe (6) može se vidjeti kako filter Gxx ovisi o parametru σ . U toj jednadžbi x je udaljenost po x-osi od središnjeg piksela do piksela za koji se računa vrijednost filtra, dok je y ista takva udaljenost, samo po y-osi [4].

Nakon što je dobiven izraz za filter Gxx, slijedi prikaz njegovog impulsnog odziva [1]. To je zapravo izlazna slika koja je nastala utjecajem filtra Gxx na ulaznu sliku koja se sastoji od jedne bijele točke na crnoj slici. Kako to izgleda prikazano je na slici 3:

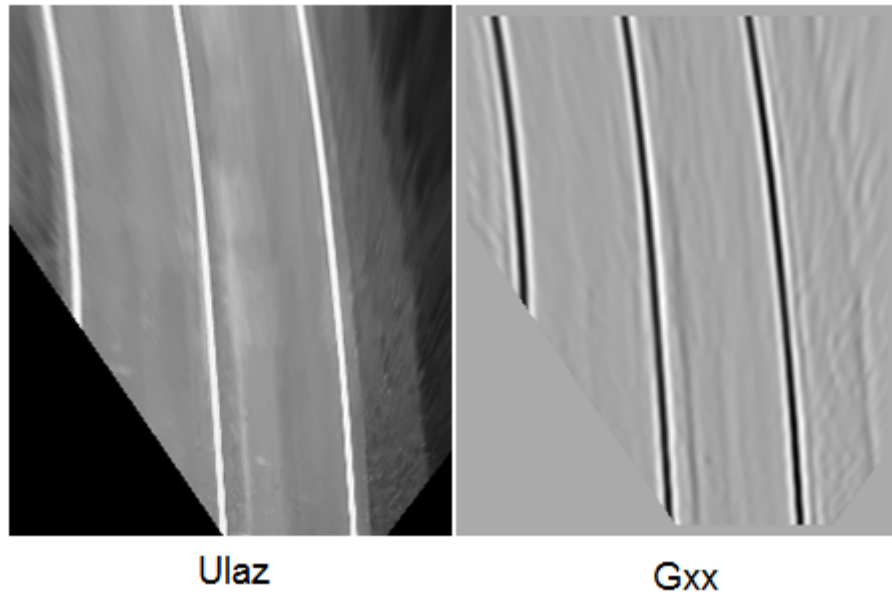


Slika 3: Impulsní odziv filtra Gxx

Vrijednost sive boje na slici 3 je jednaka nuli, dok je vrijednost crne boje manja od nule, a bijele veća od nule. Također se može primijetiti kako u izlaznoj slici nije došlo samo do

promjene središnjeg piksela koji je bio bijeli u ulaznoj slici, već do većeg skupa piksela koji se nalaze u okolini središnjeg piksela. Razlog tome je upravo to što izračun intenziteta svakog piksela ovisi o njegovoj okolini.

Kako bi prikazali kako filter Gxx reagira na realnom primjeru, na slici 4 su dane ulazna slika i odziv filtra Gxx. Potrebno je napomenuti kako je ulazna slika dobivena inverznom perspektivnom transformacijom, o čemu će biti više u nastavku.



Slika 4: Odziv filtra Gxx nad ulaznom slikom

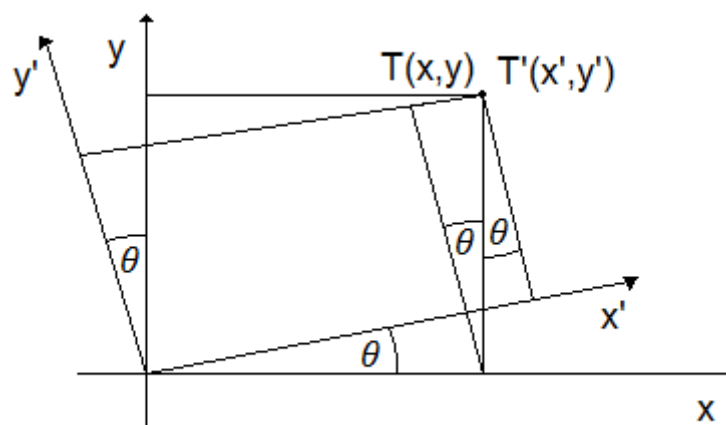
Kao što je i očekivano, najveći odziv na izlaznoj slici se dogodio upravo kod promjene intenziteta piksela. Na slici se to vidi kod prometnih linija, jer se na tim mjestima mijenja intenzitet asfalta i intenzitet bijele boje koja označava prometne linije. Takva promjena rezultira crnom bojom na mjestima gdje se na ulaznoj slici nalaze prometne linije. Pošto na ostatku slike nema tolikih promjena intenziteta, tada je ostatak slike sive boje, tj. odziv je jednak nuli.

3 Upravljivi filter temeljen na drugoj derivaciji Gaussove funkcije

Upravljivi filteri (eng. steerable filters) služe za detekciju linearnih struktura u slici. Glavno svojstvo upravljivog filtera je da se analitički može odrediti kut rotacije filtera za kojeg se postiže maksimalni odziv. U nastavku će biti prikazana rotacija filtera G_{xx} kao i izvodi pomoćnih filtera koji su potrebni da bi se izračun rotacije filtera G_{xx} mogao izvesti.

3.1 Rotacija filtera G_{xx}

Filter G_{xx} je dobar za situacije kada je prometnica na slici vertikalna, ali to nije uvijek slučaj. Upravo zbog toga je potrebno rotirati G_{xx} kako bi dobili filter G_{xx}^θ koji bi davao maksimalan ili minimalan odziv za neki kut rotacije. Na slici 5 je prikazana točka T sa koordinatama $T(x,y)$. U zarotiranom koordinatnom sustavu za kut θ se nalazi točka T' sa koordinatama $T'(x',y')$:



Slika 5: Prikaz točke T' u zarotiranom koordinatnom sustavu

Koordinate točke $T'(x',y')$ je moguće izraziti pomoću koordinata točke $T(x,y)$. Primjenom trigonometrijskih formula izvedene su formule za x' i y' :

$$x' = x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta) \quad (7)$$

$$y' = -x \cdot \sin(\theta) + y \cdot \cos(\theta) \quad (8)$$

Njihovim uvrštavanjem u filter G_{xx} umjesto x i y i daljnjim izvodom dolazi se do jednadžbe za filter G_{xx}^θ :

$$G_{xx}(x', y') = \frac{x'^2 - \sigma^2}{2 \cdot \pi \cdot \sigma^6} \cdot e^{-\frac{x'^2 + y'^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} G_{xx}^\theta(x, y) &= \frac{x^2 \cdot \cos^2(\theta) + 2 \cdot x \cdot \cos(\theta) \cdot y \cdot \sin(\theta) + y^2 \cdot \sin^2(\theta) - \sigma^2}{2 \cdot \pi \cdot \sigma^6} \\ &\cdot e^{-\left(\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2} + \frac{y^2}{2 \cdot \sigma^2}\right)} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} G_{xx}^\theta(x, y) &= G_{xx} \cdot \cos^2(\theta) + G_{yy} \\ &\cdot \sin^2(\theta) + 2 \cdot G_{xy} \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \quad (11)$$

No, pošto je rotiran koordinatni sustav (a ne točke), u formulu je potrebno uvrstiti negativnu vrijednost kuta rotacije filtra θ . Uvrštavanjem njegove negativne vrijednosti dobije se slijedeća formula:

$$\begin{aligned} G_{xx}^\theta(x, y) &= G_{xx} \cdot \cos^2(\theta) + G_{yy} \\ &\cdot \sin^2(\theta) - 2 \cdot G_{xy} \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \quad (12)$$

U jednadžbi 12 se osim filtra G_{xx}^θ pojavljuju filtri G_{yy} i G_{xy} , koji se također dobiju derivacijom Gaussove funkcije. Jednadžba filtra G_{yy} se dobije na sličan način kao što se dobila i jednadžba filtra G_{xx} , samo što se umjesto dvostruke derivacije Gaussove funkcije po x-u, treba derivirati po y-u [6]. To znači da bi se u koracima izvoda za filter G_{xx} (jednadžbe redom od jednadžbe (2) do jednadžbe(6)) na svakom mjestu gdje se nalazi x trebalo zamijeniti sa y i obrnuto. Tada bi se dobila slijedeća jednadžba za G_{yy} :

$$G_{yy}(x, y) = \frac{y^2 - \sigma^2}{2 \cdot \pi \cdot \sigma^6} \cdot e^{-\frac{x^2 + y^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (13)$$

Filtar G_{xy} podjednako ovisi o udaljenosti piksela okoline do središnjeg piksela po x-osi i y-osi. Upravo zbog toga taj se filter dobije kao posljedica parcijalne derivacije Gaussove funkcije najprije po x-u, a zatim po y-u. Izvod toga filtra dan je u nastavku:

$$G(x, y) = a \cdot e^{-\frac{x^2 + y^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad a = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma^2} \quad (14)$$

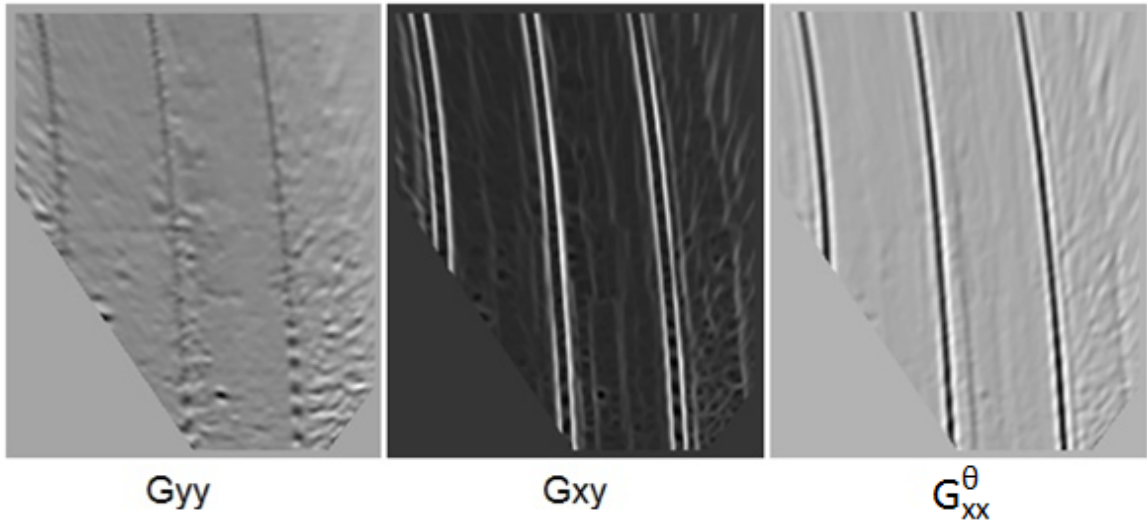
$$\frac{\partial G}{\partial x} = G(x, y) \cdot \frac{-x}{\sigma^2} \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 G}{\partial x \partial y} = G(x, y) \cdot \frac{-x}{\sigma^2} \cdot \frac{-y}{\sigma^2} \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 G}{\partial x \partial y} = G(x, y) \cdot \frac{x \cdot y}{\sigma^4} \quad (17)$$

$$G_{xy}(x, y) = \frac{x \cdot y}{2 \cdot \pi \cdot \sigma^6} \cdot e^{-\frac{x^2 + y^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (18)$$

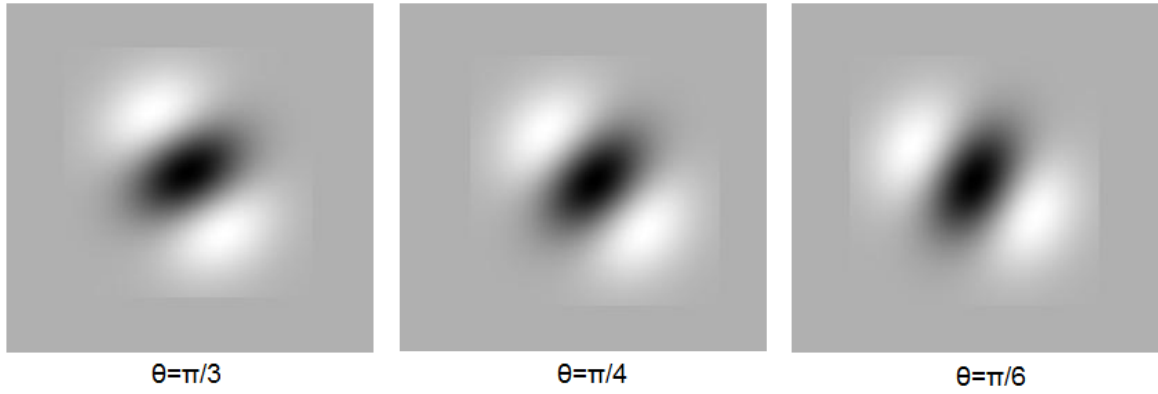
Filtar G_{xx}^θ u ovom radu služi samo kako bi se vidjelo kakav će odziv biti ukoliko se na ulaznu sliku primjeni filtar u kojem je zadan kut rotacije. Primjeri odziva filtara G_{yy} , G_{xy} i G_{xx}^θ za ulaznu sliku, koja je prikazana na slici 4, su dani u nastavku:



Slika 6: Odzivi filtara G_{yy} , G_{xy} i G_{xx}^θ ($\theta=\pi/4$)

Na slici 6 je prikazan odziv filtra G_{yy} . Na njemu se dosta slabo vide prometne linije zato jer s trak pruža na izvornoj slici u vertikalnom smjeru, a pošto filtar G_{yy} prilikom izračuna više ovisi o y-osi nego o x-osi, nema tolike promjene intenziteta u njegovom odzivu. Na istoj slici je prikazan odziv filtra G_{xy} . Na njoj se vide tanke bijele linije na mjestu gdje se na ulaznoj slici nalaze prometne linije. Razlog tome je to što je na tim mjestima došlo do najveće promjene intenziteta. Slika 6 prikazuje i filtar G_{xx}^θ , pri čemu je kut rotacije bio jednak $\pi/4$.

U nastavku su dani impulsni odzivi filtra G_{xx}^θ za različite kutove rotacije. Ulazna slika se sastoji od jedne bijele točke na crnoj.



Slika 7: Impulsni odziv filtra G_{xx}^θ za različite kutove rotacije

Na slici 7 dani su impulsni odzivi filtra G_{xx}^θ za kutove rotacije $\pi/3$, $\pi/4$ i $\pi/6$. Na tim slikama se može vidjeti kako je s obzirom na taj kut odziv filtra drugačiji. Vidljivo kako su područja bijelo-crno-bijelo zakrenuta za zadani kut u odnosu na vertikalni smjer [1].

3.2 Maksimalni i minimalni odziv

Nakon što je prikazan filter G_{xx}^θ koji filtrira ulazne slike sa mogućnošću zadavanja kuta rotacije, ono što slijedi je izračun kuta θ , za kojeg će filter dati maksimalni, odnosno minimalni odziv, što je i sama suština upravljivog filtra. Time će nam biti omogućeno da prikazemo filter G_{max} , koji leži upravo na maksimalnom odzivu. Izračun ta dva odziva kreće deriviranjem dvostrukog integrala (integral po x -u i y -u) konvolucije zarotiranog filtra (G_{xx}^θ) i slike (I). Jednadžbe tog izračuna su dane u nastavku:

$$h_\theta(x_0, y_0) = \int_x \int_y G_{xx}^\theta(x, y) \cdot I(x_0 + x, y_0 + y) \quad (19)$$

Ono što slijedi je deriviranje jednadžbe (19). Tom prilikom će se nad tim izrazom primijeniti Leibniz-ovo pravilo.

$$\frac{\partial h_\theta}{\partial \theta}(x_0, y_0) = \int_x \int_y \frac{\partial G_{xx}^\theta}{\partial \theta} \cdot I(x_0 + x, y_0 + y) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_\theta}{\partial \theta}(x_0, y_0) = & 2 \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta (A_{yy} - A_{xx}) - 2 \\ & \cdot (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta \cdot A_{xy}) \end{aligned} \quad (21)$$

U gornjoj jednadžbi su uvedene tri zamjene, pri čemu je A_{yy} odziv filtra G_{yy} , A_{xx} odziv filtra G_{xx} , a A_{xy} odziv filtra G_{xy} :

$$A_{yy} = \int_x \int_y G_{yy}(x, y) \cdot I(x_0 + x, y_0 + y) \quad (22)$$

$$A_{xx} = \int_x \int_y G_{xx}(x, y) \cdot I(x_0 + x, y_0 + y) \quad (23)$$

$$A_{xy} = \int_x \int_y G_{xy}(x, y) \cdot I(x_0 + x, y_0 + y) \quad (24)$$

Radi pojednostavljenja biti će uvedene još dvije zamjene:

$$Q = A_{yy} - A_{xx} \quad (25)$$

$$R = A_{xy} \quad (26)$$

Uvođenjem tih zamjena i sređivanjem izraza (20) slijedi novi izraz:

$$\frac{\partial h_\theta}{\partial \theta}(x_0, y_0) = \sin(2\theta) \cdot Q - 2 \cdot \cos(2\theta) \cdot R \quad (27)$$

Da bi dobili kut θ potrebno je gornji izraz izjednačiti sa nulom i naći njegove nul-točke.

Znači, u nastavku slijedi:

$$\sin(2\theta) \cdot Q - 2 \cdot \cos(2\theta) \cdot R = 0 \quad (28)$$

Iz ove jednadžbe slijede tri rješenja:

1. Rješenje uz uvjet da je $R=0$. Iz toga slijedi da je:

$$\sin(2\theta) \cdot Q = 0 \quad (29)$$

Iz gornje jednadžbe se može izračunati kako kut θ može imati tri rješenja: $\theta_1 = 0$,

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} \text{ i } \theta_3 = -\frac{\pi}{2}.$$

2. Slijedeće rješenje slijedi iz uvjeta da je $Q=0$. Odatle slijedi:

$$2 \cdot \cos(2\theta) \cdot R = 0 \quad (30)$$

Rješavajući tu jednadžbu ponovno dolazimo do četiri moguća rješenja: $\theta_1 = \frac{3\pi}{4}$,
 $\theta_2 = -\frac{3\pi}{4}$, $\theta_3 = \frac{\pi}{4}$ i $\theta_4 = -\frac{\pi}{4}$.

3. Posljednje rješenje slijedi iz uvjeta da su R i Q različiti od nule. Iz toga slijedi da moraju biti i $\sin(2\theta)$ i $\cos(2\theta)$ različiti od nule. U tom slučaju se nastavlja sa izvršavanjem jednadžbe (28). Tada slijedi:

$$\sin(2\theta) \cdot Q = 2 \cdot \cos(2\theta) \cdot R \quad (31)$$

Zatim se cijela jednadžba podijeli izrazom $Q \cdot \cos(2\theta)$. Iz toga slijedi:

$$\operatorname{tg}(2\theta) = \frac{2 \cdot R}{Q} \quad (32)$$

Vraćanjem vrijednosti R i Q iz zamjene dobije se:

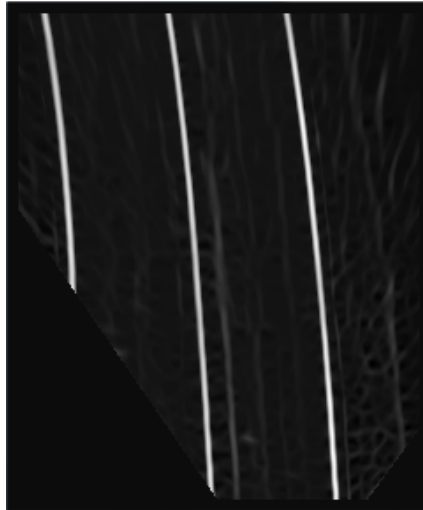
$$\operatorname{tg}(2\theta) = \frac{2 \cdot A_{xy}}{A_{yy} - A_{xx}} \quad (33)$$

Rješavanjem gornje jednadžbe dobiju se dvije vrijednosti kuta θ :

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \cdot \arctan \frac{2 \cdot A_{xy}}{A_{yy} - A_{xx}} + \frac{\pi}{2} \quad (34)$$

$$\theta_2 = \frac{1}{2} \cdot \arctan \frac{2 \cdot A_{xy}}{A_{yy} - A_{xx}} - \frac{\pi}{2} \quad (35)$$

Nakon što se izračunaju ta dva kuta, moguće je izračunati i odziv za njih. To se računa na jednak način kao što se računala vrijednost intenziteta piksela kod filtra G_{xx}^{θ} (jednadžba (12)), samo što se za vrijednost θ uvrste dobiveni kutovi. Uvrštavanjem kutova u tu formulu dobiju se dva odziva, i tek njihovom usporedbom se može zaključiti koji kut odgovara maksimalnom, a koji minimalnom odzivu. Tada se može izračunati odziv filtra $G_{\max}$ i to na način da mu se za svaki piksel pridruži negativna vrijednost minimalnog odziva, jer je uzorak kolnika tamno – svjetlo – tamno (prometni trak – linija – trak) te se zbog toga pridružuje negativni odziv najveći prema apsolutnoj vrijednosti. Na slici 8 je prikazana izlazna slika filtra $G_{\max}$ nad ulaznom slikom koja je prikazana na slici 4.



Slika 8: Odziv filtra Gmax

3.3 Debljina filtra

Ono što je još bitno prilikom računanja filtara je odabir parametra σ . Prilikom izračuna odziva filtra ta vrijednost je fiksna. Upravo to onemogućuje pravilno filtriranje slika koje su snimane iz vozila u pokretu, jer primjer takvog odziva slike je sljedeći:



Slika 9: Primjer filtriranja bez prethodne transformacije

Zbog toga se poseglo za slikama nastalima inverznom perspektivnom transformacijom [8], jer je upravo kod njih debljina prometnih linija fiksna, te ne varira kao što je prikazano na slici 9. Više o utjecaju parametra σ , kao i primjeri sa različitim vrijednostima istog parametra u podpoglavlju 5.2.

4 Programska implementacija

Eksperimentalni dio Završnog rada je rađen u programskom jeziku C++. Korišten je prevodilac MSVC. Prilikom programiranja bila je korištena programska ljuska cvsh koja je razvijena na Zavodu za Elektroniku, Mikroelektroniku, Računalne i Inteligentne Sustave (ZEMRIS) na fakultetu FER. Ljuska je uvelike pomogla rukovanjem slikama nad kojima se vršilo filtriranje [9].

Ljuska radi na principu da učitava sliku kao jednodimenzionalno polje. Polje ima tri puta više članova nego što slika ima broj piksela. Razlog tome je što za svaki piksel slike u jednodimenzionalnom polju se nalaze tri vrijednosti: R (red - crveno), G (green - zeleno) i B (blue - plavo). Svaka od tih vrijednosti predstavlja količinu te boje zastupljene u nekom pikselu. Kombinacijom te tri boje (u određenim omjerima) se dobiju ostale boje. Ljuska učitava sliku, poziva korisnički algoritam i iscrtava rezultate obrade (odredišne slike). Korisnički algoritam se poziva preko metode `process` korisničkog razreda `alg_filtar` na sljedeći način:

```
void alg_filtar::process(  
  
    const img_vectorAbstract& src,  
  
    const win_event_vectorAbstract&, int)
```

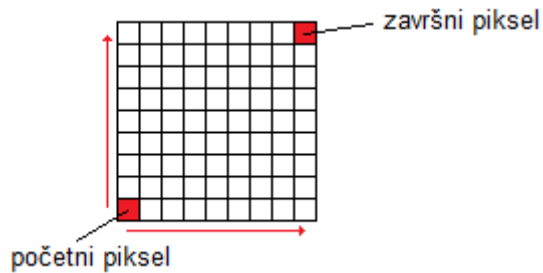
Ono što slijedi je dobavljanje izvorne slike za koju će se vršiti filtriranje. Naš algoritam na izlazu proizvodi sedam slika, od kojih je prva slika kopija ulazne. Druga slika je isto ulazna slika, samo što je pretvorena u crno-bijelu sliku, te će upravo ona poslužiti kao slika nad kojom će se vršiti filtriranje. Ostale slike služe za prikaz odziva G_{xx} , G_{yy} , G_{xy} , G_{xx}^{θ} (kut $\theta = \frac{\pi}{4}$) i G_{max} . Radne slike imaju elemente tipa `double`, te se one prije iscrtavanja pretvaraju u uobičajene slike s elementima tipa `unsigned char`.

4.1 Redoslijed piksela u slici

Slijed piksela slike u ulaznom polju kreće od donjeg lijevog kuta slike. Dalje se redom pikseli nabrajaju s lijeve strane prema desnoj, a kada se dođe do desnog ruba slike,

tada se sljedeći piksel nastavlja sa lijevog ruba slike i to pomaknut za jedan red iznad.

Primjer slijeda piksela na jednostavnoj slici dimenzija 9x9 piksela je dan u nastavku:



Slika 10: Prikaz slijeda piksela na slici

Slika 10 prikazuje slijed piksela slike. Ako su zadane dimenzije slike i ako su poznate koordinate nekog piksela, tada je lako izračunati poziciju tog piksela u jednodimenzionalnom polju. To se računa prema slijedećoj formuli:

$$z = x + y \cdot \text{širina} \quad (36)$$

U toj formuli vrijednost z je mjesto u polju na kojem se nalazi traženi piksel, dok su vrijednosti x i y njegove koordinate na slici. Početne koordinate slike su $(0,0)$, a krajnje su $(\text{širina}-1, \text{visina}-1)$.

4.2 Izračun broja piksela okoline

Zatim slijedi podešavanje vrijednosti σ (sigme) i duljine „kraka“. U programu je zadano da je $krak = 3 \cdot \sigma$, te na taj način dužina „kraka“ izravno ovisi o vrijednosti σ . Mijenjanjem vrijednosti „kraka“, tj. mijenjanjem vrijednost parametra σ mijenja se i broj piksela okoline. Ovisnost piksela okoline o varijabli „kraku“ je kvadratna, te se može izraziti slijedećom jednadžbom:

$$\text{Broj_piksela_okoline} = (2 \cdot krak + 1)^2 \quad (37)$$

Vrijednost broja piksela okoline je takva zbog toga što se određivanjem „kraka“ oko središnjeg piksela formira kvadrat stranice duljine $2 \cdot krak + 1$, te je njegova površina upravo broj piksela okoline (prikaz jednog takvog kvadrata se nalazi na slici 2).

4.3 Izračun filtara

Kada su te vrijednosti definirane, može se krenuti sa računanjem filtara. Prvi korak u tome je definiranje dvodimenzionalnih kvadratnih matrica za svaki filter posebno (čija se veličina određuje formulom (37)), jer je potrebno za svaki piksel okoline, uključujući središnji piksel, izračunati vrijednost filtara G_{xx} , G_{yy} i G_{xy} . Oni se redom računaju prema jednadžbama (6), (13) i (18). Za računanje filtra G_{xx}^{θ} koristi se funkcija `myCalcG2Theta` koja je slijedećeg oblika:

```
double myCalcG2Theta(  
    double pixGxx,  
    double pixGyy,  
    double pixGxy,  
    double theta)
```

U toj funkciji se preko varijabla `pixGxx`, `pixGyy` i `pixGxy` predaju izračunati filtri G_{xx} , G_{yy} i G_{xy} . Uz njih se funkciji predaje i kut θ (theta) pomoću kojeg se zadaje kut rotacije. Vrijednost kuta se zadaje u radijanima, pri tome je potrebno napomenuti da je izvan glavnog programa definirana i globalna konstanta `Pi_` koja pomaže pri upisu vrijednosti kuta u formuli.

4.4 Generiranje izlaznih slika

Nakon što se izračuna vrijednost filtra za neki piksel potrebno je tu vrijednost pomnožiti s vrijednostima piksela ulazne slike da bi se dobila vrijednost piksela izlazne slike. Jednadžba po kojoj se ta vrijednost računa dana je u nastavku:

$$izl_piksel = \sum_{y=-krak}^{krak} \sum_{x=-krak}^{krak} ul_piksel \cdot G_{xx}(x, y), \quad (38)$$

pri čemu je *izl_piksel* vrijednost intenziteta izlazne slike u zadanom pikselu, *ul_piksel* je intenzitet piksela u ulaznoj slici, a $G_{xx}(x,y)$ je vrijednost filtra u točki sa koordinatama (x,y) .

Računanjem filtara G_{xx} , G_{yy} , G_{xy} i G_{xx}^{θ} ostalo je još samo izračunati i prikazati odziv filtra G_{max} . Izvodom jednadžbe (19) dobiveno je više mogućih rješenja koja su nastala

razrješavanjem jednadžbi (29), (30) i (31). Potom se odgovarajuća rješenja kutova, uz ostale parametre, predaju funkciji `myCalcG2Theta` gdje se računaju najveći i najmanju odziv. Ti odzivi se moraju usporediti jer još nije poznato koji od njih je veći. Njihovom usporedbom se veći odziv nazove maksimalnim, a manji minimalnim. Dobivanjem ta dva odziva moguće je prikazati odziv filtra `Gmax`.

4.5 Skaliranje slika dobivenih filtriranjem

Nakon filtriranja vrši se još jedna funkcija, a to je `equalize`. Definicija te funkcije glasi:

```
void equalize(  
    const img_wrap& src,  
    img_wrap& dst)
```

Konstanta `img_wrap& src` predstavlja ulaznu sliku funkcije, dok konstanta `img_wrap& dst` predstavlja izlaznu sliku funkcije. Razlog zašto se koristi ova funkcija je zato što su sve slike odziva filtara popunjene double tipom podataka, te su vrijednosti intenziteta piksela u tim slikama manje i veće od raspona obične slike, čiji je raspon od 0 do 255. Zbog toga je potrebno skalirati te slike kako bi bile čitljive. Ova funkcija to radi na način da najmanju vrijednost slike postavi kao vrijednost 0, a najveću kao vrijednost 255. Sve ostale vrijednosti koje se nalaze između najmanje i najveće vrijednosti slike sa double tipom podataka su skalirane između 0 i 255.

4.6 Programsko uklanjanje trokuta nastalih inverznom perspektivnom transformacijom

Prilikom računanja odziva filtra za svaki piksel ulazne slike treba uzeti u obzir da će se prilikom tog računanja treba zanemariti lijevi donji i desni donji kut koji su nastali inverznom perspektivom transformacijom, jer njihovi pikseli ne predstavljaju cestu. U programu je to napravljeno na način da se nađu pravci koji sijeku rubove slika te koji zajedno sa tim rubovima omeđuju trokute koji ne ulaze u računanje intenziteta piksela. Pravci su izračunati tako da su nađene najprije dvije točke u prvom retku slike (donji redak slike) na način da se tražila promjena intenziteta piksela iz vrijednosti nule u neku

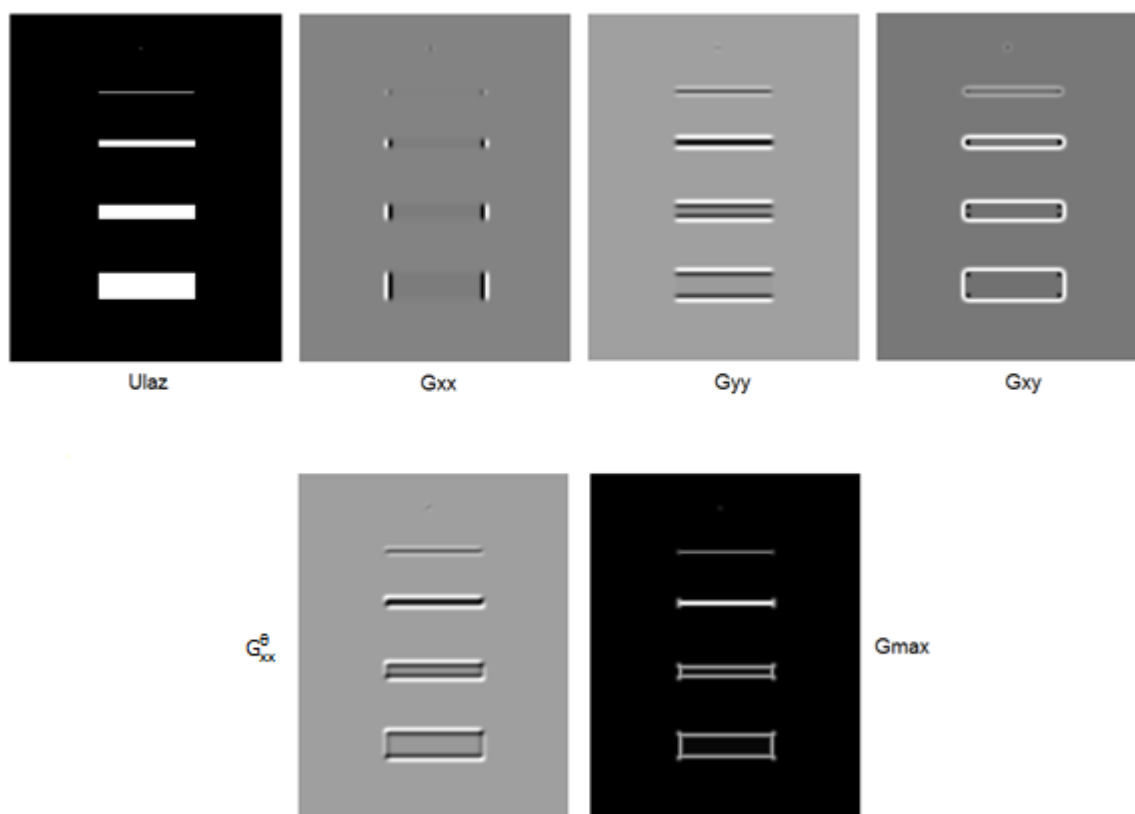
vrijednost (pronalazak prve točke prvog pravca) i obrnuto (pronalazak prve točke drugog pravca). Na sličan način se nalaze druge dvije točke pravaca. Tada je iskorištena jednadžba pravca kroz dvije točke:

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) \quad (39)$$

te su se time dobili traženi trokuti. Svi pikseli koji su bili ispod tih pravaca se bili zanemareni kao i pikseli koji su udaljeni za vrijednost „kraka“ od tih pravaca. Ti pikseli se također zanemaruju jer bi pikseli koji su udaljeni od pravca za vrijednost manju od vrijednosti „kraka“ prilikom računanja filtara koristili intenzitete onih piksela koji se nalaze u rubnim trokutima.

5 Eksperimentalni rezultati

Računanje filtara nije odmah rađeno na realnim slikama na kojima se nalaze prometni trakovi, već slikama na kojima se može vidjeti odziv pojedinih filtara. Tom prilikom eksperimentiralo se sa parametrom σ , tako da su se tada koristile različite vrijednosti tog parametra. Primjer jednog takvog eksperimenta sa slikom koja je napravljena pomoću program Paint:

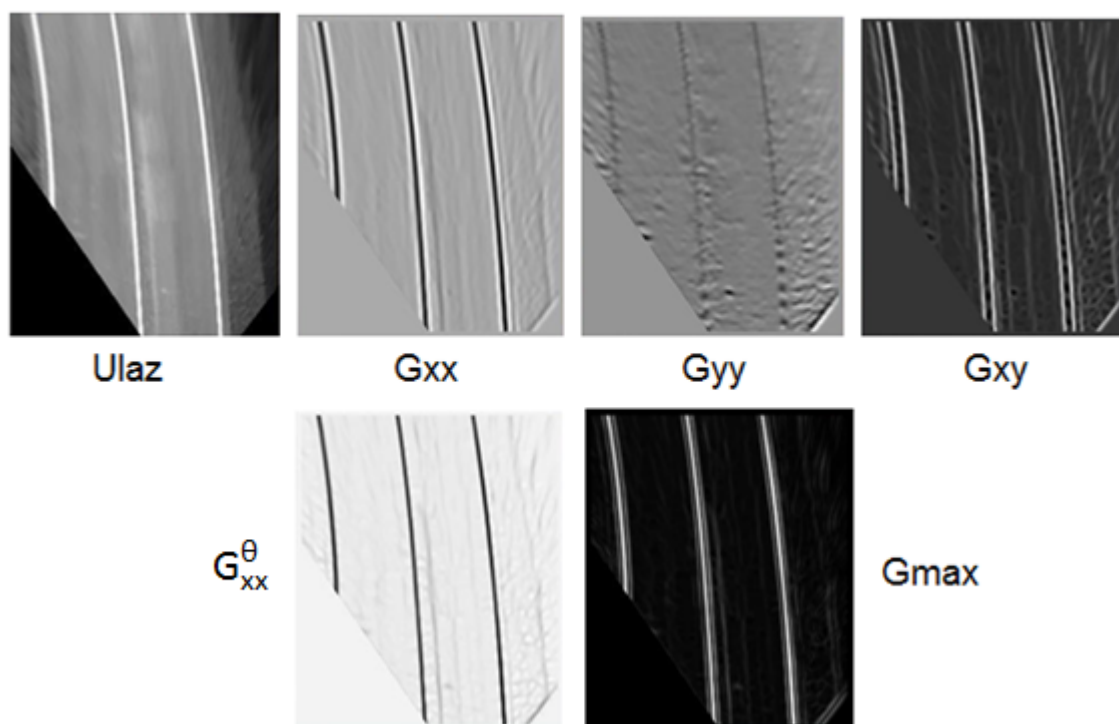


Slika 11: Prikaz odziva filtara na testnoj ulaznoj slici

Na slici 11 se mogu vidjeti odzivi pojedinih filtara za različite debljine horizontalnih linija, pri čemu vrijednost parametra σ određuje za koju će liniju biti najjači odziv. Pri ovom eksperimentu bila je korištena vrijednost $\sigma=2$. Smanjivanjem vrijednosti parametra σ najjači odziv bi se pojavio kod tanjih linija, a njegovim povećavanjem bi najjači odziv bio kod debljih linija. Pošto su linije vodoravne, najgori odziv ima filtar G_{xx} .

5.1 Uklanjanje trokuta nastalih inverznom perspektivnom transformacijom

Pošto su ulazne slike, na kojima se nalaze prometni trakovi, nastale inverznom perspektivnom transformacijom, bilo je potrebno zanemariti donje trokute koji tom metodom nastaju. U suprotnom bi se uz hipotenuze tih trokuta javljali odzivi filtara, što se ne bi smjelo događati. Zbog toga se pikseli u tim trokutima zanemaruju prilikom izračuna odziva kao što je rečeno u prethodnom poglavlju. U nastavku su dani primjeri odziva radi usporedbe obrade dvaju trokuta:

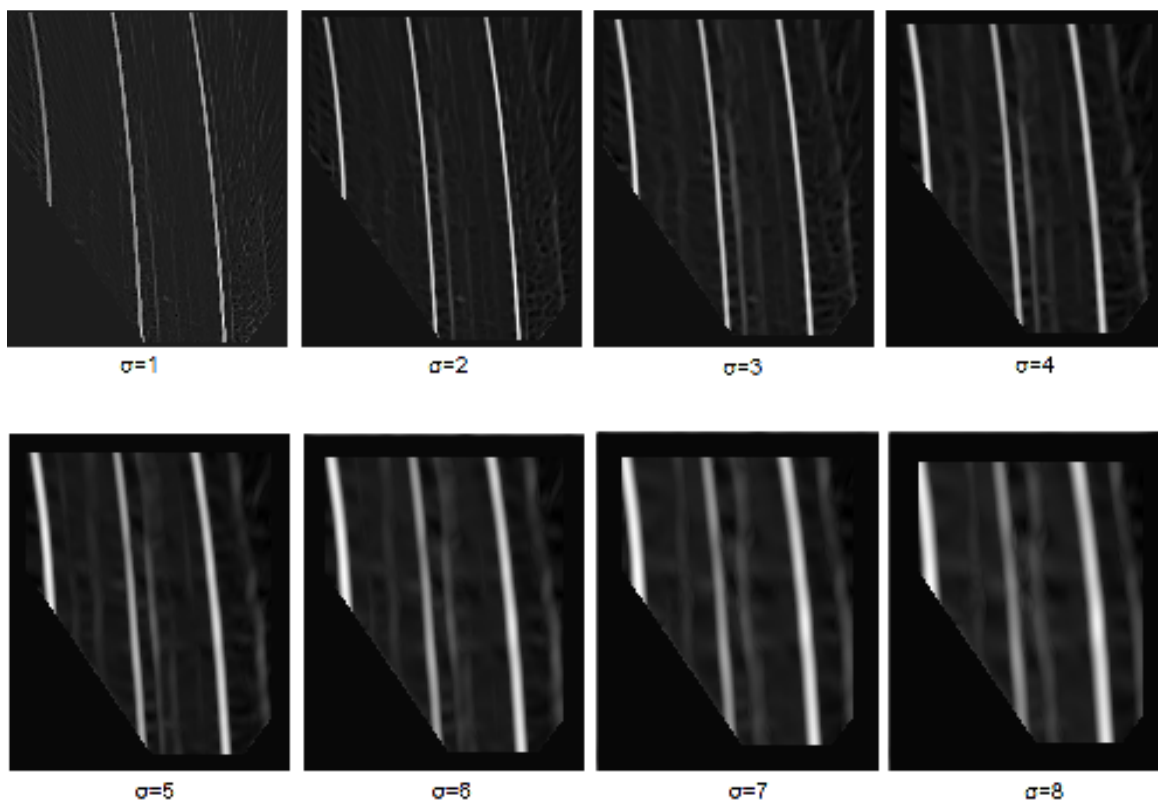


Slika 12: Prikaz odziva filtra u kojima jedan trokut nije uklonjen

Na slici 12 prikazani su odzivi filtara, s time da je naglasak na donja dva trokuta. Pri tome, lijevi trokut je dobro obrađen, te se na njemu ne pojavljuju odzivi filtara, dok desni nije. Na njegovoj hipotenuzi su jasno vidljivi odzivi.

5.2 Utjecaj odabira parametra σ

Prilikom izvođenja algoritma vrlo je bitno odabrati parametar koji odgovara debljini linije prometnog traka. Korištenjem eksperimentalnih rezultata dolazi se do zaključka kako za korišteni slijed slika filter daje najbolji odziv uz vrijednost $\sigma=2$. Primjeri odziva filtra $G_{\max}$ za vrijednosti parametra σ od 1 do 8:



Slika 13: Primjeri odziva filtra Gmax nad ulaznom slikom sa slike 12 za različite vrijednosti parametra σ

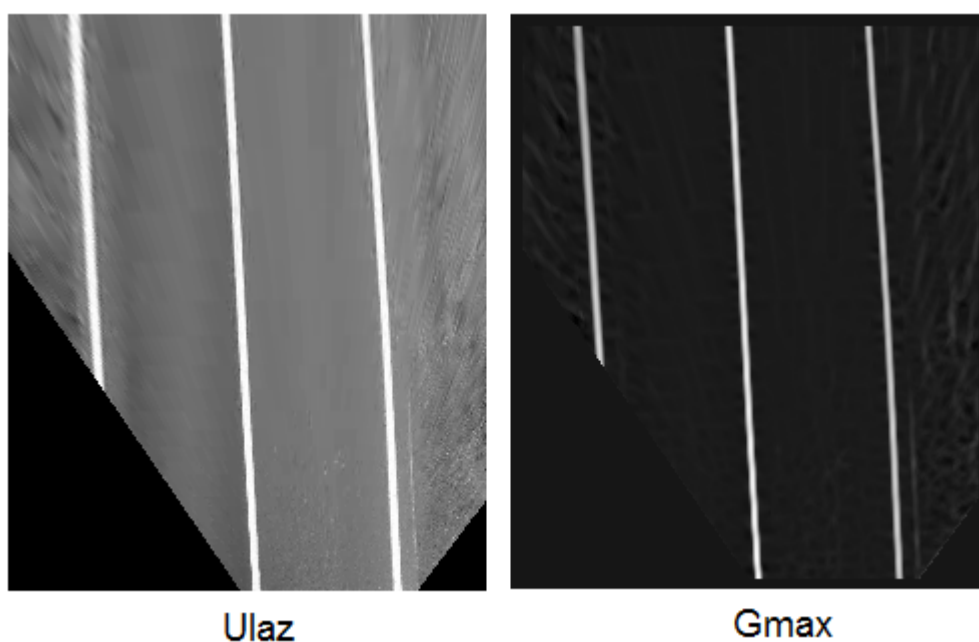
Slika 13 prikazuje kako se mijenja odziv filtra Gmax mijenjanjem vrijednosti parametra σ . Smanjivanjem vrijednosti σ filtriranje ne daje tražene rezultate te pronalaženje prometnih linija postaje otežano, dok povećanjem σ odzivi filtriranja postaju mutniji i nejasni. Povećanje parametra σ se negativno odražava na brzinu izvođenja algoritma, jer je u tom slučaju potrebno uzeti u obzir veći broj piksela okoline prilikom računanja vrijednosti intenziteta piksela. Npr. izvođenje programa u kojem je $\sigma=2$ traje 0.4 s, dok izvođenje programa u kojem je $\sigma=6$ traje 2 s, a programa gdje je $\sigma=10$ traje 4.3 s. Smanjivanjem te vrijednosti algoritam se ubrzava: za $\sigma=0.5$ vrijeme izvođenja algoritma je 0.1 s.

5.3 Subjektivna procjena ispravnosti

Rezultati detekcije prometnog traka se mogu podijeliti u tri skupine:

- Dobri rezultati
- Krive detekcije (eng. false positive)
- Propuštene detekcije (eng. false negative)

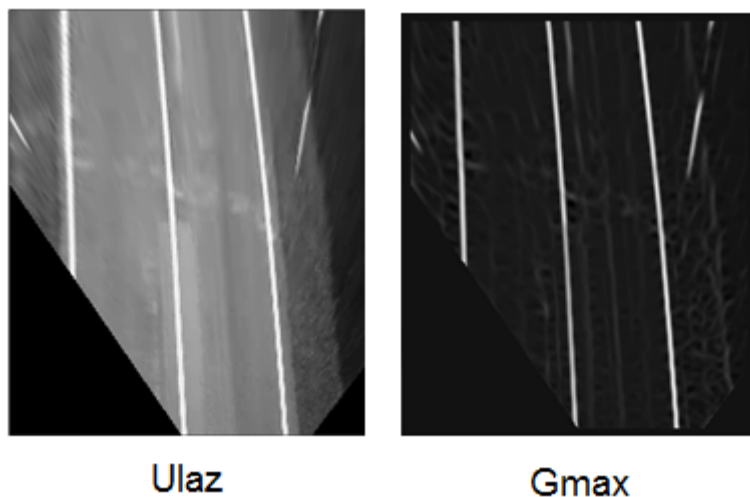
Filtar daje dobre rezultate kada je stanje na kolniku idealno, tj. kada je intenzitet boje asfalta duž cijelog prometnog traka približno jednak, kao što vrijedi i za intenzitet boje prometnih linija. Kada je osvjetljenje duž cijelog prometnog traka jednako, te kada nema stvari i pojava na kolniku zbog kojih dolazi do neočekivanog odziva filtra (snijeg, prometni stupovi pored kolnika...). Primjer takvog dobrog rezultata je dan u nastavku:



Slika 14: Primjer dobrog rezultata detekcije

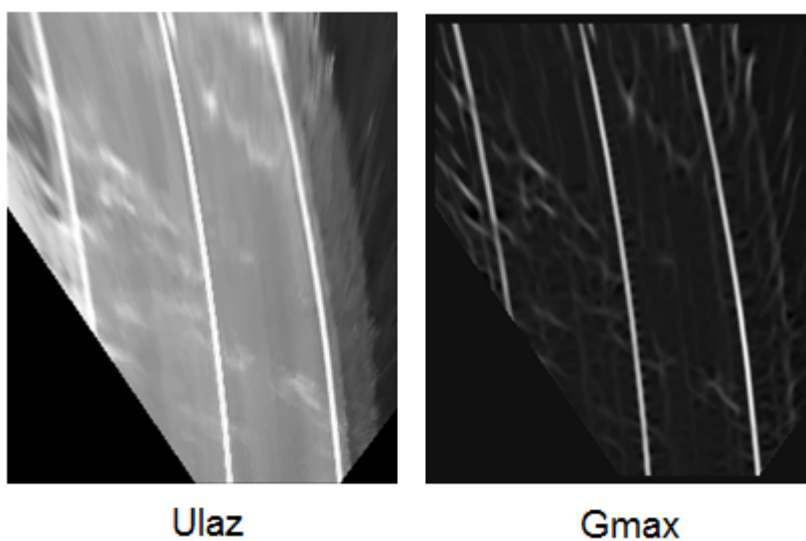
Na slici 14 je prikaz odziva filtra Gmax u idealnom slučaju. Na ulaznoj slici nema nikakvih smetnji koje bi uzrokovale nepoželjni odziv filtra Gmax.

Iako se na odzivima filtara dosta jasno vide prometne linije, postoje slučajevi u kojima su filtri ometani. To se događa kada se na kolniku (ili uz kolnik) nalaze stvari ili pojave nad kojima se pojavljuje odziv filtra, koji na tim mjestima ne bi smio biti, te se na takvim odzivima javljaju krive detekcije. Prije svega to su signalizirajući stupovi pored kolnika te sjena koja se pojavljuje na kolniku. Problemi se također javljaju ako se kolnik sastoji od različitih tipova asfalta koji su različite boje ili ako je prometna linija na nekim mjestima izblijedila. U nastavku je dana ulazna slika i odziv filtra Gmax kao primjer odziva prometnog traka i signalizirajućih stupova:



Slika 15: Prikaz odziva filtra Gmax na kojem se vide prometni stupovi

Na prethodnoj slici je jasno vidljiv odziv za signalizirajuće stupove s obje strane kolnika. Pošto su bijele boje, te su približne debljine (u pikselima) kao i prometne linije, filtriranjem su jednako označeni kao prometne linije. Daljnji problem je sa sjenama na kolniku, kao što je prikazano u nastavku:



Slika 16: Prikaz odziva filtra Gmax na kojem se vide sjene krošnje drveća

Na slici 16 je prikazan odziv filtra nad prometnim trakovima sa sjenama. Na odzivu to rezultira na način da su na trakovima izražena područja na kojima sunčeve zrake prodiru kroz krošnju drveta, jer su zbog nje prometni trakovi nešto tamniji od mjesta gdje sunce prodire.

Potrebno je napomenuti kako u ovom radu nije bilo slučaja propuštene detekcije.

6 Zaključak

U ovom radu razmatrana je primjena upravljivog filtra temeljenog na drugoj derivaciji Gaussove funkcije za detekciju linije prometnog traka. Taj filter je prikladan za detekciju linearnih struktura konstantne širine. Zato su slike prikupljene iz vozila u pokretu prethodno podvrgnute postupku inverzne perspektivne transformacije.

Algoritam za pronalazak prometnog traka daje najbolje rezultate kada postoji kontrast između boje asfalta i boje prometne linije te kada su intenziteti svih točaka asfalta što sličniji. Isto vrijedi i za prometne linije. Utjecajem nepovoljnih čimbenika dolazi do nezadovoljavajućih rezultata algoritma. Neki od tih čimbenika su sjene na kolniku i usred kojih se mijenja intenzitet boje asfalta i prometnih linija, prometni stupovi kraj kolnika koji se pojavljuju u odzivu filtera, blijedenje prometnih linija sa vremenom kao i krpanje prometnih trakova, što uzrokuje razliku u intenzitetu boje asfalta.

Kada bi se takav sustav koristio za detekciju prometnog traka u stvarnom vremenu (real-time) javila bi se dva problema: inverznom perspektivnom transformacijom bi se dobio samo dio kolnika nad kojim bi se vršila detekcija, pa bi kod većih brzina vozila bilo vrlo teško provoditi algoritam. Drugi problem je i sama brzina izvođenja algoritma, jer je prije proračuna upravljivih filtera potrebno napraviti inverznu perspektivnu transformaciju. No vjerojatno se i tim problemima može doskočiti na način da se računalo sklopovski prilagodi takvoj detekciji.

7 Literatura

- [1] William T. Freeman , Steerable filters example, 2.10.2001.,
<http://people.csail.mit.edu/billf/steer.html>, 17.09.2008.
- [2] Gaussian function, 01.12.2008., *Wikipedia, the free encyclopedia*,
http://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_function, 2.10.2008.
- [3] Filter definition, *PCmag.com Encyclopedia*,
http://www.pcmag.com/encyclopedia_term/0,2542,t=filter&i=43200,00.asp,
27.11.2008.
- [4] Freeman, W. T. i Adelson, E. H., The design and use of steerable filters, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 13, no. 9, str. 891 - 906, Rujan, 1991.
- [5] McCall, J. C. i Trivedi, M. M., Video-based lane estimation and tracking for driver assistance: Survey, system, and evaluation, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, str. 20-37, godina 2006.
- [6] McCall, J. C., Trivedi, M. M., Wipf, D. i Rao, B., Lane Change Intent Analysis Using Robust Operators and Sparse Bayesian Learning, *IEEE International Workshop On Machine Vision For Intelligent Vehicles In Conjunction With IEEE CVPR*, str. 1-7, lipanj, 2005.
- [7] Zisserman, A., Two-Dimensional Signal Analysis, *Lecture Works*,
www.robots.ox.ac.uk/~az/lectures/sa/lect12.pdf, 2003
- [8] Simond, N., Obstacle Detection from Inverse Perspective Mapping and Super-Homography, http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/16/58/00/PDF/iros07_nsimond.pdf
- [9] Babić, T., Lukinić, T., Kovač, D., Popović, K., Rojković, D., Šverko, M., Prepoznavanje znakova, Tehnička dokumentacija za predmet Projekt iz programske potpore, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2008.

Pronalaženje prometnog traka korištenjem upravljivih filtara

Sažetak

Ovaj rad razmatra primjenu upravljivog filtra za detekciju prometnih linija. Korišteni upravljivi filtar temelji se na drugoj derivaciji dvodimenzionalne Gaussove funkcije. Rad uključuje matematičke izvode filtra, njegovu programsku implementaciju, te eksperimentalnu evaluaciju razvijenog postupka. U radu se nalaze opisi građevnih komponenti upravljivog filtra (G_{xx} , G_{yy} , G_{xy} , G_{xx}^{θ} i G_{max}), kao i opisi važnijih dijelova programa. Eksperimentalni rezultati nad slikama pribavljenih iz vozila u pokretu su prikazani i komentirani.

Ključne riječi: računalni vid, upravljivi filtri, detekcija prometnih trakova, obrada slike.

Traffic lane detection using steerable filters

Summary

This work considers usage of a steerable filter for traffic lane detection. The employed steerable filter is based on the second derivation of two-dimensional Gaussian function. The work contains mathematical derivations of the considered filter, its program implementation, and an experimental evaluation of the developed code. The work also explains steerable filter structural components (G_{xx} , G_{yy} , G_{xy} , G_{xx}^{θ} , G_{max}), and describes important parts of the developed program. The experimental results obtained on images acquired from vehicle in motion are provided and discussed.

Keywords: computer vision, steerable filters, traffic lane detection, image processing.