

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

SEMINAR

**Detekcija prometnog traka u sljedovima slika iz
perspektive vozača**

Siniša Louč

Voditelj: *Siniša Šegvić*

Zagreb, travanj, 2010

Sadržaj

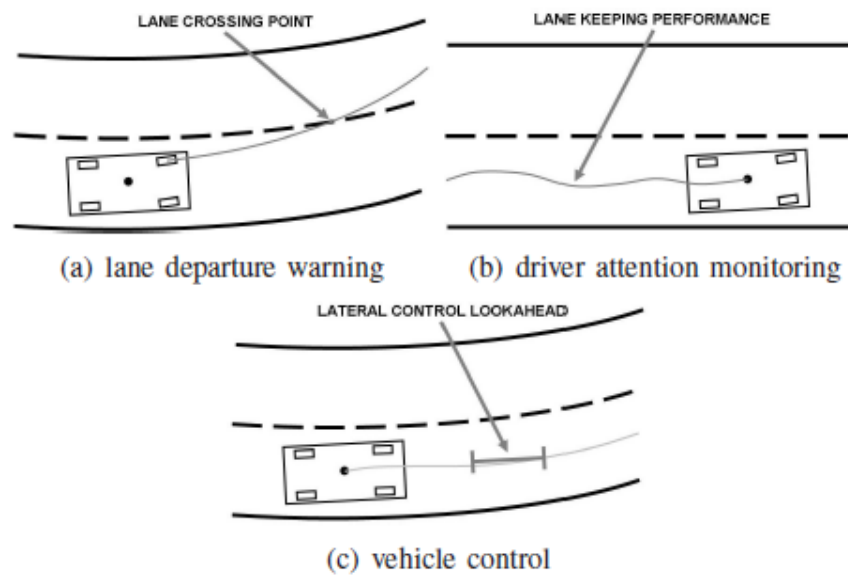
1	Uvod.....	1
2	Detekcija prometnog traka	3
2.1	Vertikalna distribucija intenziteta.....	3
2.2	Analiza područja prometnog traka.....	4
2.3	Detekcija rubova	5
2.4	Distribucija rubova.....	7
2.5	Inverzna perspektivna transformacija.....	7
2.6	Upravljivi filtri	9
3	Praćenje prometnog traka	12
3.1	Model ceste i vozila.....	15
3.2	Izlučivanje prometnih oznaka.....	16
4	VioLET :	18
4.1	Model ceste i vozila:.....	19
4.2	Izlučivanje značajki ceste	21
4.3	Procjena zakrivljenosti ceste.....	21
4.4	Praćenje položaja vozila	23
4.5	Eksperimentalna evaluacija	25
5	Zaključak.....	29
6	Literatura.....	30
7	Sažetak	32

1 Uvod

Sustavi koji služe kao pripomoć vozaču u vožnji cestovnim vozilom već su dugo aktivno područje istraživanja. Ti sustavi razmatraju sprječavanje blokiranja kotača prilikom kočenja (ABS) ili pronalaženje najkraćeg puta do odredišta (GPS). U ovom radu razmatrat će se računalni sustav koji putem senzora prima signale iz okoline (najčešće video kamera), obrađuje primljene signale i potom poduzima određene akcije. To može biti upozorenje vozaču (npr. obavijest o prekoračenju brzine), podešavanje određenih mehanizama i sustava (npr. automatsko paljenje svjetala za maglu ako uvjeti na cesti to nalažu) ili čak upravljanje vozilom (npr. kočenje u slučaju predviđanja sudara).

Jedna od osnovnih zadaća opisanog sustava jest detekcija i praćenje prometnog traka. Primjena detekcije i praćenja prometnog traka je najčešće u vidu jednog od slijedeća tri zadatka:

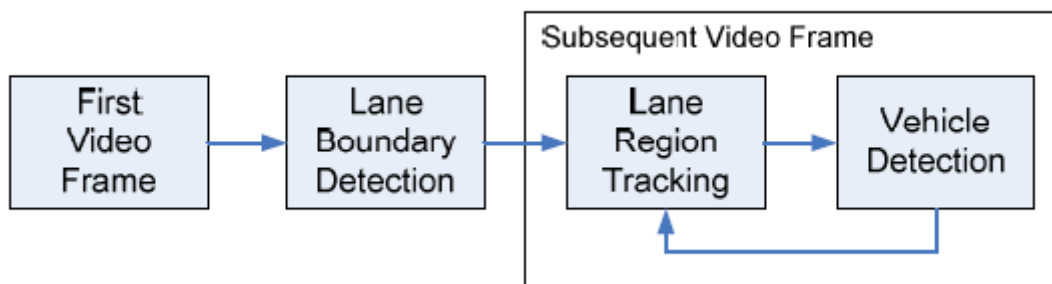
- a) Upozorenje o napuštanju traka – važno predvidjeti kretanje vozila u odnosu na prometni trak.
- b) Praćenje budnosti vozača – primjerice, praćenje preciznosti vožnje unutar traka.
- c) Automatsko upravljanje vozilom – praćenje stanja na cesti u cilju sprječavanja sudara.



Slika 1.1: Tri osnovna zadatka sustava za pripomoć u vožnji zasnovanog na detekciji i praćenju prometnog traka [1]

2 Detekcija prometnog traka

Detekcija prometnog traka je, logično, prvi korak u sustavu pripomoći u vožnji kakav se opisuje u ovom radu. Slika 2.1 prikazuje mogući dijagram toka rada takvog sustava [4].



Slika 2.1: Generalizirani dijagram toka sustava detekcije i praćenja prometnog traka

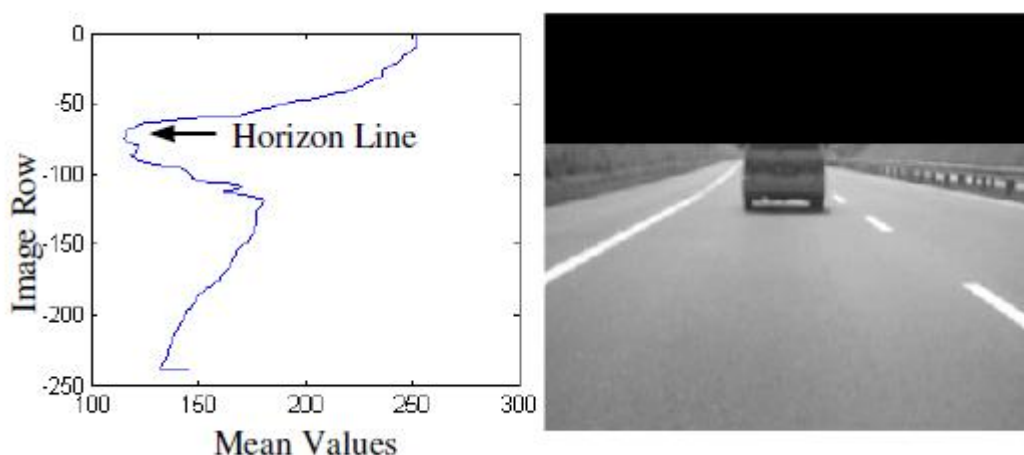
Neke metode uključuju i detekciju vozila, kao na slici 2.1, a neke se zasnivaju isključivo na detekciji prometne signalizacije - linije, kružne refleksijske oznake¹, rub kolnika i sl. Međutim, to je nevažno za sam postupak detekcije prometnog traka koji je većinom prva faza u radu sustava za pripomoć vozaču u vožnji. Nakon inicijalne detekcije, nastavak rada se svodi na praćenje prometnog traka.

2.1 Vertikalna distribucija intenziteta

U postupku detekcije prometnog traka, nebo kao područje na slici nije potrebno. Stoga se u pretprocesiranju slika često dijeli na područje neba i područje ceste pomoću vertikalne distribucije usrednjenih intenziteta.

¹ Kružne refleksijske oznake su malo nezgodan prijevod (eng. circular reflection markers), ali u Hrvatskoj nema takvih oznaka pa stoga ni odgovarajućeg prijevoda. Radi se o signalizacijskim svjetlima okruglog oblika postavljenim na linije na kolniku. Takva svjetla predstavljaju izvrsnu prometnu signalizaciju za slučajeve kad su linije na kolniku slabo vidljive ili oštećene. U nastavku rada koristi se termin "kružna signalizacijska svjetla".

Potrebno je pronaći srednje vrijednosti intenziteta piksela po retcima slike (distribucija srednjih vrijednosti redaka slike prikazana je na slici 2.2 lijevo). Granica između neba i ceste u slici je na grafu vidljiva kao minimum u krivulji vertikalne distribucije. Pikseli neba većinom imaju veći intenzitet od piksela ceste pa stoga na liniji horizonta dolazi do naglog prijelaza iz visoke srednje vrijednosti intenziteta u nisku. Svi pikseli koji su na slici iznad retka koji predstavlja granicu mogu se postaviti u nulu.

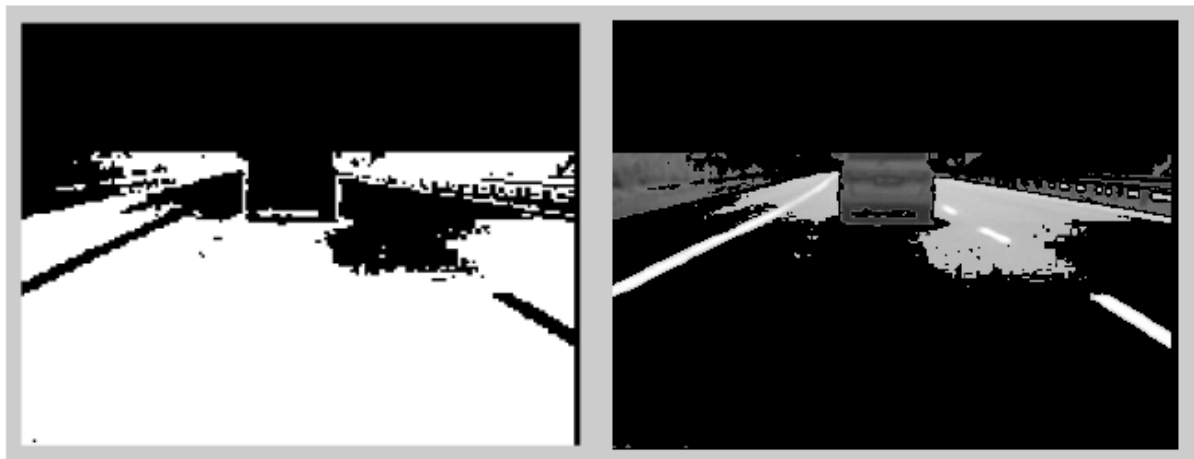


Slika 2.2: Vertikalna distribucija intenziteta

2.2 Analiza područja prometnog traka

U daljnjem tijeku postupka moguće je ukloniti piksele ceste jer mogu smetati pri detekciji prometnog traka. Postupak je jednostavan:

Uzima se nekoliko desetaka donjih redaka slike, pritom ignorirajući prvih nekoliko redaka zbog moguće pojave interijera vozila u slici. Primjerice, uzimaju se retci od 30. do 60. gledano od donjeg ruba slike. U navedenim retcima potrebno je pronaći najveću vrijednost intenziteta piksela, ona predstavlja gornji prag. Donji prag se može ručno inicijalizirati. Sad je moguće formirati binarnu masku koja ima logičku jedinicu (to konkretno najčešće označava maksimalnu moguću vrijednost intenziteta piksela) na mjestima gdje pikseli slike imaju vrijednosti intenziteta između dvaju pragova. Sad je dovoljno sve piksele na čijem mjestu se u masci nalazi logička istina postaviti u nulu.



Slika 2.3: Uklanjanje piksela ceste primjenom binarne maske

Slika 2.3 prikazuje opisani postupak (lijevo se nalazi binarna maska, a desno novodobivena slika).

Budući da se ovaj rad primarno bavi praćenjem prometnog traka, u nastavku je dan samo kratak opis dvaju metoda detekcije prometnog traka. Ostale metode opisane su u literaturi [12].

2.3 Detekcija rubova

Postupak detekcije rubova kao rezultat daje binarnu sliku na kojoj su prikazani rubovi (mjesto nagle promjene intenziteta) u slici. Jedna od mogućnosti jest konvolucija slike s gradijentnom maskom, primjerice Sobelov operator. Sobelov operator se definira pomoću dvaju konvolucijskih matrica, po jedna za svaku dimenziju:

$$G_x = \begin{bmatrix} +1 & 0 & -1 \\ +2 & 0 & -2 \\ +1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix}$$

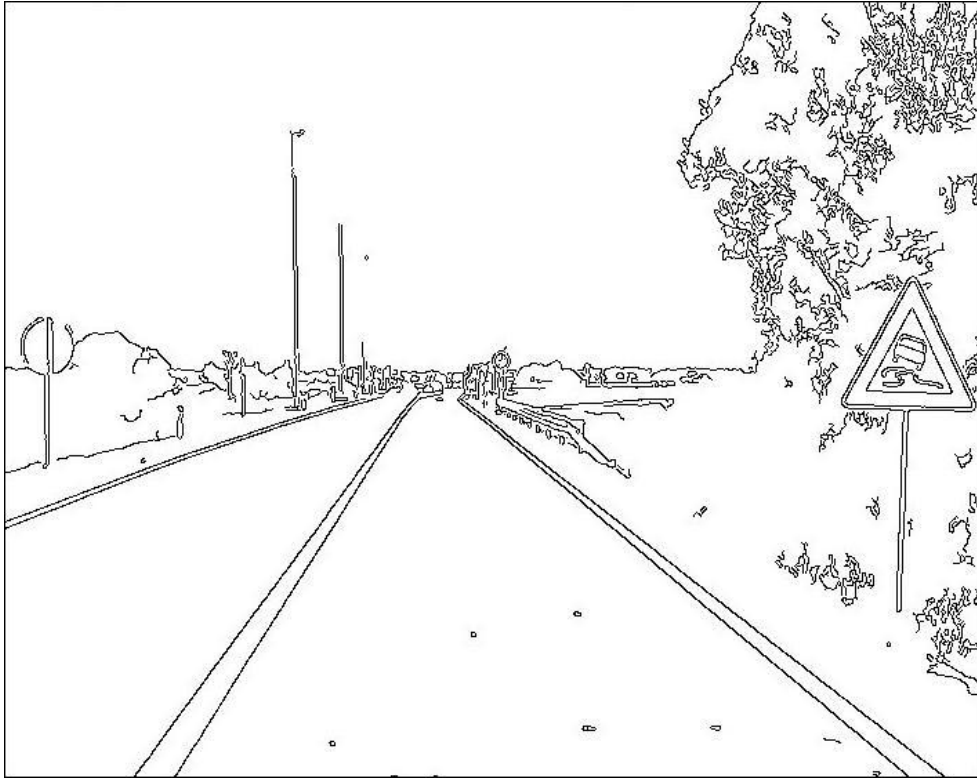
Amplitudu gradijenta moguće je izračunati pomoću:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

Smjer gradijenta moguće je izračunati pomoću:

$$\Theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right)$$

Dobivenu sliku je potrebno binarizirati, primjerice metodom histereze sa dva praga. Histereza se koristi i u Cannyjevom detektoru rubova. [10]



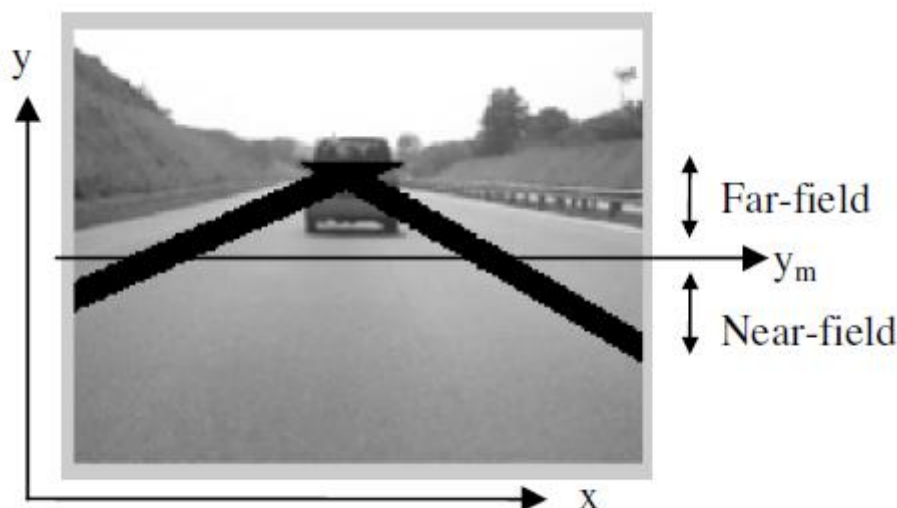
Slika 2.4: Primjer detekcije rubova Cannyjevim algoritmom

Moguće je koristiti i druge operatore, primjerice Robertsov križni operator. Osim toga, Sobelov operator je moguće koristiti kao kompasni operator, dakle osim horizontalne i vertikalne detekcije rubova moguće je koristiti i kosu detekciju (kao primjerice smjer SE-NW na kompasu, otuda i naziv).

Sobelov i Robertsov operator se mogu shvatiti kao filtri koji se primjenjuju na ulaznu sliku. Ukoliko je filter moguće rotirati, i to ne samo kompasno nego za proizvoljan kut, radi se o upravljivom filteru (poglavlje 2.6). Primjena upravljivih filtera zahtijeva da linije budu jednake širine na svim dijelovima. Budući da se kod perspektivne snimke iz vozila linije smanjuju u daljini, koristi se inverzna perspektivna transformacija (poglavlje 2.5). Detalji vezani uz detekciju prometnog traka primjenom upravljivih filtera mogu se pronaći u literaturi [8][9].

2.4 Distribucija rubova

U metodi distribucije rubova slika se horizontalno dijeli na dva dijela, "dalji" i "bliži" (slika 2.5). U bliskom dijelu se koristi linearna funkcija jer se u tom dijelu očekuju pravocrtne linije. U daljem dijelu se koristi parabolička funkcija zbog moguće zakrivljenosti linija.



Slika 2.5: Podjela slike na dalji i bliži dio

Linije koje određuju lijevi i desni rub prometnog traka moguće je detektirati Houghovom transformacijom za pravce [11].

2.5 Inverzna perspektivna transformacija

Postupak koji je vrlo koristan za detekciju, ali i za praćenje prometnog traka jest inverzna perspektivna transformacija [13]. Rezultat transformacije je slika ceste iz ptičje perspektive. Jedno od korisnih svojstava ovakvih slika jest to što su rubovi koji omeđuju linijske oznake kolnika paralelni pa je slika pogodna za obradu upravljivim filtrima (poglavlje 2.6).

Slika pribavljena perspektivnom kamerom predstavlja transformaciju (preciznije rečeno, projekciju) trodimenzionalne scene u dvodimenzionalni prostor slike. Nemoguće je obaviti inverznu transformaciju budući da funkcija preslikavanja nije

injektivna jer postoje točke u 3D sceni koje se preslikavaju u isti piksel slike. Ono što je moguće napraviti jest prikazati površinu ceste iz ptičje perspektive. Takva transformacija naziva se inverzna perspektivna transformacija.

Neka je $\mathbf{q}_R$ vektor koji predstavlja točku u ravnini ceste s homogenim koordinatama $[x, y, 1]$, pri čemu su x i y koordinate točke u uobičajenom Kartezijevom koordinatnom sustavu u Euklidskom prostoru. Projekcije tih točaka u ravninu slike pribavljene kamerom neka su $\mathbf{q}_P$, a točke projicirane u inverznu perspektivnu ravninu $\mathbf{q}_I$. Tada je moguće obaviti bijektivno preslikavanje:

$$\mathbf{q}_{Pi} = \mathbf{H}_{RP} \cdot \mathbf{q}_{Ri}, \forall i$$

$$\mathbf{q}_{Ii} = \mathbf{H}_{RI} \cdot \mathbf{q}_{Ri}, \forall i$$

Matrice $\mathbf{H}$ su matrice homografije [15]. Dalje slijedi:

$$\mathbf{q}_{Ii} = \mathbf{H}_{IPM} \cdot \mathbf{q}_{Pi}, \forall i$$

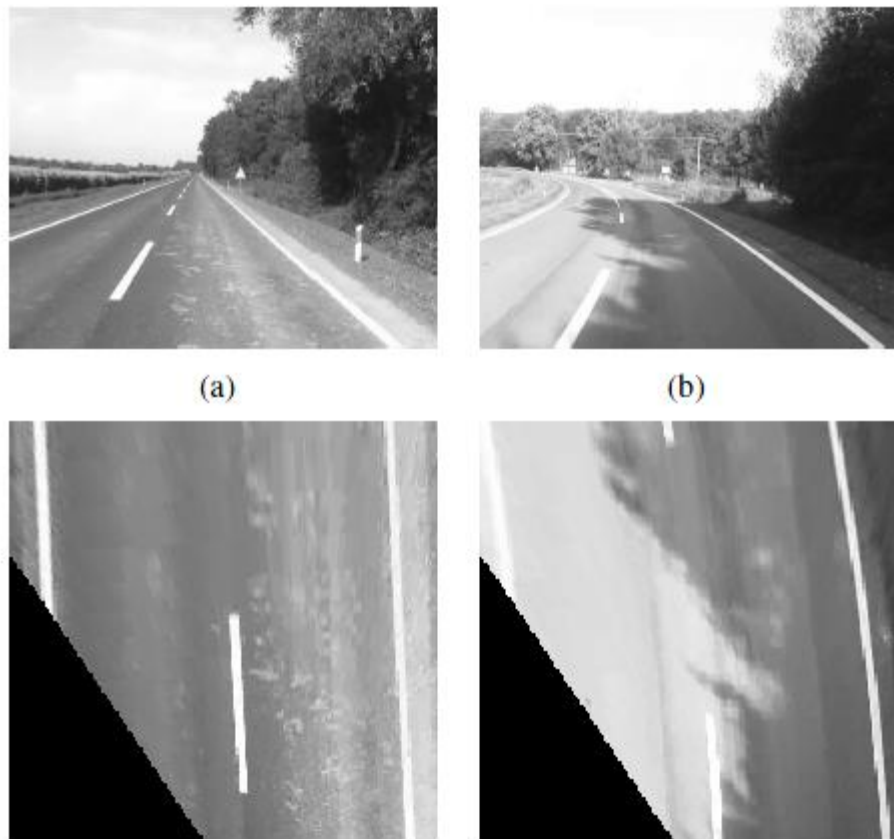
$$\mathbf{H}_{IPM} = \mathbf{H}_{RI} \cdot \mathbf{H}_{RP}^{-1}$$

Jednom kad je poznata matrica $\mathbf{H}_{IPM}$ inverznu perspektivnu sliku (ptičja perspektiva) je lako izračunati kao:

$$\mathbf{I}_{INV}(\mathbf{q}) = \mathbf{I}_{PERSP}(\mathbf{H}_{IPM}^{-1} \cdot \mathbf{q}), \forall \mathbf{q} \in \mathbf{I}_{INV}$$

Računanje matrice $\mathbf{H}_{IPM}$ se može obaviti na više načina. Postupak je opisan u literaturi [13].

Slika 2.6 prikazuje rezultate obavljanja inverzne perspektivne projekcije nad dvjema slikama pribavljenim iz kamere u vozilu [13].



Slika 2.6: Inverzna perspektivna transformacija

2.6 Upravljivi filtri

Upravljivi filtri [12,15] se koriste kako bi se ulazna slika snimljena iz vozila u pokretu filtrirala i na izlazu dobila slika na kojoj je detektiran prometni trak.

Upravljivi filter detektira linearne strukture na slici. U poglavlju 2.3 je već spomenuto da je važno da struktura koja se detektira bude jednake širine na svim dijelovima. U ovom slučaju struktura je prometna linija. Na slikama snimljenim kamerom iz vozila u pokretu linije se sužavaju odozdo prema gore jer su nastale projekcijom iz 3D prostora (u kojem se udaljavaju po z-osi) u 2D prostor. Ovaj problem se rješava prethodno opisanom inverznom perspektivnom transformacijom.

Svaka od komponenti upravljivog filtra ima jednadžbu prema kojoj se računa njen odziv na izlaznoj slici [12]:

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

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

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

$$G_{xx}^\theta(x, y) = G_{xx} \cdot \cos^2(\theta) + G_{yy} \cdot \sin^2(\theta) - 2 \cdot G_{xy} \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta)$$

Pomoću prikazanih jednadžbi se računa odziv komponenta upravljivog filtra. Komponenta G_{xx}^θ koristi komponente G_{xx} , G_{yy} i G_{xy} te ovisi o kutu θ . Iznos komponente se dobije rotacijom filtra G_{xx} . Jednadžba za kut θ je [12]:

$$\theta_{1,2} = \frac{1}{2} \cdot \tan^{-1} \frac{2 \cdot A_{xy}}{A_{yy} - A_{xx}} \pm \frac{\pi}{2}$$

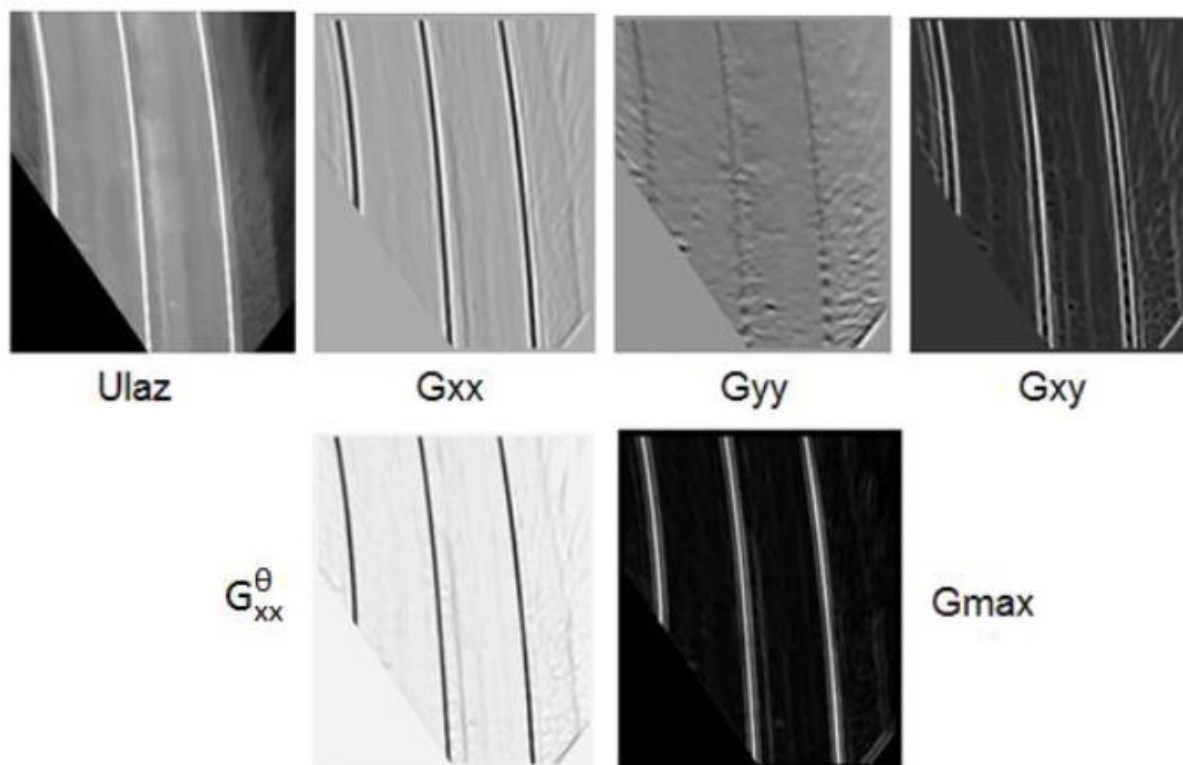
pri čemu vrijedi

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

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

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

Dobivanjem dviju vrijednosti kuta θ dobivaju se dva odziva, minimalni i maksimalni. Primjeri odziva svih komponenta prikazani su na slici 2.7 [12].



Slika 2.7: Odzivi pojedinih komponenti upravljivog filtra

3 Praćenje prometnog traka

U sustavima praćenja prometnog traka vrlo često se koriste barem neke, a nerijetko i sve od slijedećih pretpostavki:

- a) Tekstura prometnog traka, odnosno ceste je konstantna.
- b) Širina prometnog traka, odnosno ceste je lokalno konstantna.
- c) Prometne oznake poštuju određena pravila vezano uz izgled i/ili položaj.
- d) Cesta je ravna površina (nema pomaka po vertikalnoj osi) ili postoji precizan model za promjenu visine.

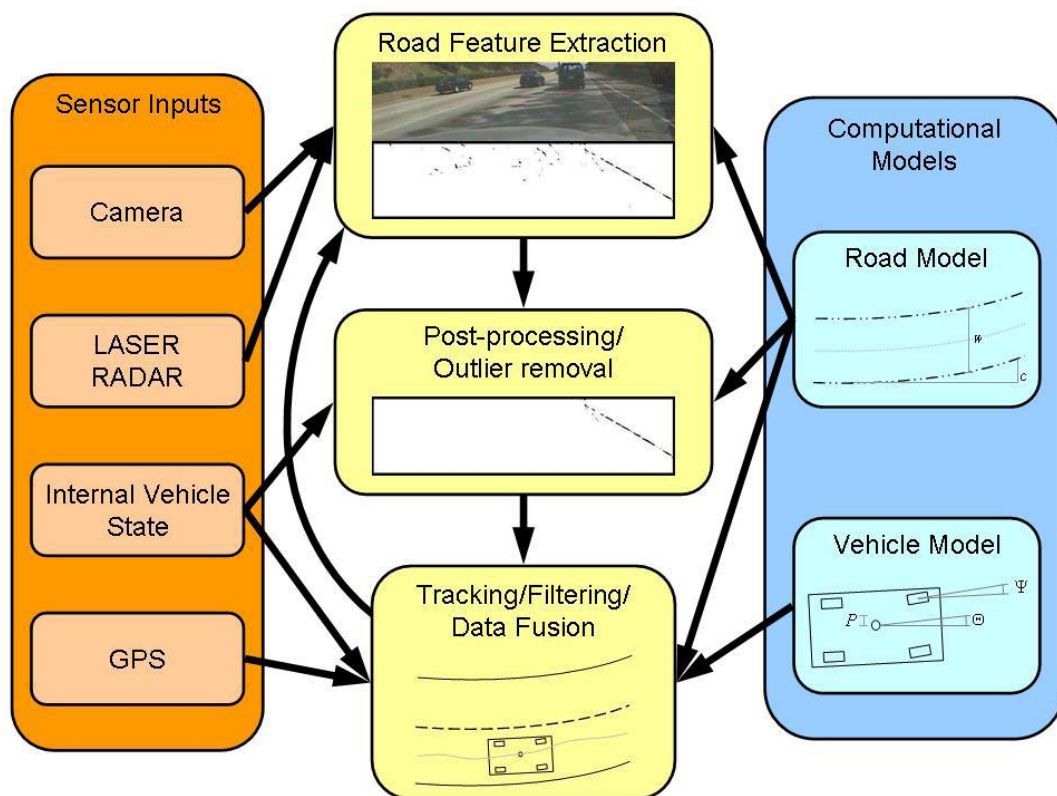
Pretpostavka o konstantnoj teksturi ceste je korisna jer je tada cijela površina ceste korisna kao značajka, a ne samo cestovne oznake. U situacijama gdje su cestovne oznake oštećene ili ih nema, tekstura ceste može puno pomoći u procjeni položaja prometnog traka. Naravno, mjesta na kojima se kolnik popravljiva i održava predstavljaju problem. To je rizik koji se mora prihvatiti ukoliko se odluči koristiti ova pretpostavka.

Pretpostavka o konstantnoj lokalnoj širini prometnog traka može se također pokazati korisnom, međutim ovu pretpostavku nije pretjerano dobro koristiti. Naime, u gradskoj vožnji i dijelovima autoceste (npr. ulazak/izlazak sa autoceste) cesta nema jednoliku širinu zbog razdvajanja prometnih trakova, a upravo to su situacije u kojima su sustavi detekcije i praćenja prometnog traka najviše potrebni.

Za cestovne oznake se pretpostavlja da su pune linije svijetle, a površina ceste tamna. Ukoliko se dogodi slučaj da linija bude tamnija od površine ceste doći će do drastičnog pada performansi sustava na tom dijelu ceste, ali takve situacije su vrlo malo vjerojatne te se mogu zanemariti.

Često se pretpostavlja da je površina ceste ravna ploha ili barem da je visina konstantna u zavojima. U većini situacija takav model je točan. Ako dođe do promjene visine u zavoju, sustav će procijeniti zakrivljenost s određenom pogreškom. Potrebno je precizno odrediti količinu greške koju sustav može podnijeti prije odabira modela ceste.

Većina algoritama za praćenje prometnog traka slijedi isti generalizirani postupak (slika 3.1). Prvo je potrebno modelirati vozilo i cestu. Naravno, moguće je koristiti jednostavnije i složenije modele, od ravnih linija do složenih krivulja. Iduća faza jest ekstrakcija značajki koje su dobavljene iz senzora (npr. video kamere). Moguće je koristiti i drugačije senzore, npr. GPS ili LASER. U ovom radu pretpostavlja se da je senzor kamera, dakle ulaz u sustav su slijedovi slika. Ekstrakcija značajki je postupak kojim se iz slijedova slika dobivenih kamerom izlučuju informacije korisne za daljnji postupak, kao što su primjerice rubovi kontura na slici, teksture, vektori kretanja i sl. Dobivene značajke se u daljnjem postupku koriste u kombinaciji s modelom ceste kako bi se što preciznije predvidio položaj prometnog traka. Potom se koristi model vozila kako bi se poboljšala aproksimacija položaja traka.



Slika 3.1: Generalizirani dijagram toka za postupak praćenja prometnog traka [1]

Jedna od mogućih izvedbi sustava za praćenje prometnog traka jest kombinacija sa sustavom detekcije i praćenja položaja okolnih vozila [3]. Osnovna pretpostavka jest da ostala vozila voze u svojem prometnom traku (ne prelaze u druge) te se tada zavoј može predvidjeti praćenjem bočnog pomaka vozila ispred kamere (slika 3.3).

Navedena pretpostavka se matematički može jednostavno formulirati kao:

$$y^i = 0$$

gdje je y^i bočna pozicija vozila i . Pritom se pozicija računa u odnosu na prometni trak (slika 3.3).



Slika 3.2: Primjer zavoja

U ovakvom modelu važno je razlikovati bočni pomak vozila zbog zavoja od bočnog pomaka prilikom promjene prometnog traka. Zbog toga se u jednadžbe uvodi bijeli šum parametriziran kovarijacijskom matricom Q_{lat} . Potrebno je naći kompromis u količini šuma – mora biti dovoljno malen da ne ometa ispravno praćenje prometnog traka, a opet dovoljno velik da se vozilo koje mijenja prometni trak ne interpretira kao nadolazeći zavoј. Tako jednadžba poprima oblik:

$$y_{t+1}^i = y_t^i + w_t^i$$

pri čemu je w_t^i bijeli Gaussov šum s odstupanjem nula i varijancom Q_{lat} .

Alternativni pristup jest praćenje prometnog traka isključivo na temelju značajki vezanih uz horizontalnu prometnu signalizaciju (npr. VioLET, poglavlje 4.).

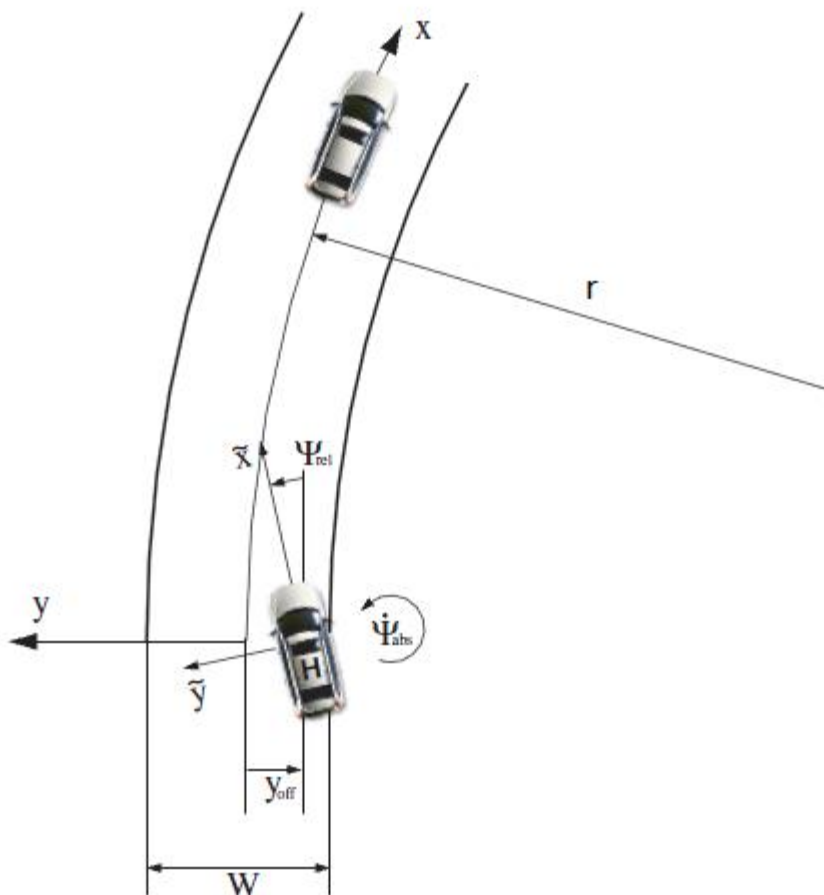
3.1 Model ceste i vozila

Za modeliranje ceste moguće je koristiti široku paletu raznih postupaka. Uzrok tome je uglavnom velika raznolikost cesti. Najbolji izbor zavisi od okoliša koji se očekuje u vožnji. Složeni modeli temeljeni na krivuljama možda nisu optimalan izbor za sustav koji će raditi na autocesti koja ima prilično jednostavnu strukturu. U tom slučaju bi bilo dovoljno aproksimirati idućih 10 metara ceste pa bi linearni model bio zadovoljavajući. Međutim, u sustavu koji upozorava na razdvajanje traka položaj vozila se mora izračunati nekoliko sekundi unaprijed te je potrebno prilično precizno modelirati idućih 30-40 metara ceste, ponekad i više, ovisno o brzini kretanja vozila. U takvim situacijama pogodniji su složeniji modeli temeljeni na krivuljama jer daju točniju aproksimaciju oblika ceste [1].

Kao što je spomenuto u uvodu, važno je naglasiti da se položaj modela vozila određuje relativno u odnosu na koordinatni sustav modela prometnog traka, a ne na koordinatni sustav vozila.

Odabir modela vozila, kao i odabir modela ceste, može se razlikovati ovisno o osnovnom cilju sustava. Za sustave kontrole vozila poželjno je odabrati neki složeniji model kako bi se omogućilo preciznije kretanje. U sustavu koji upozorava o prekidu ili razdvajanju prometnog traka koji se uglavnom koristi na brzim cestama s blagim zavojima poželjno je koristiti jednostavniji model. U takvom sustavu složeniji model ne bi pretjerano povećao performanse sustava u pogledu točnosti, ali bi ih vjerojatno degradirao u pogledu brzine, što na takvim brzim cestama nije poželjno.

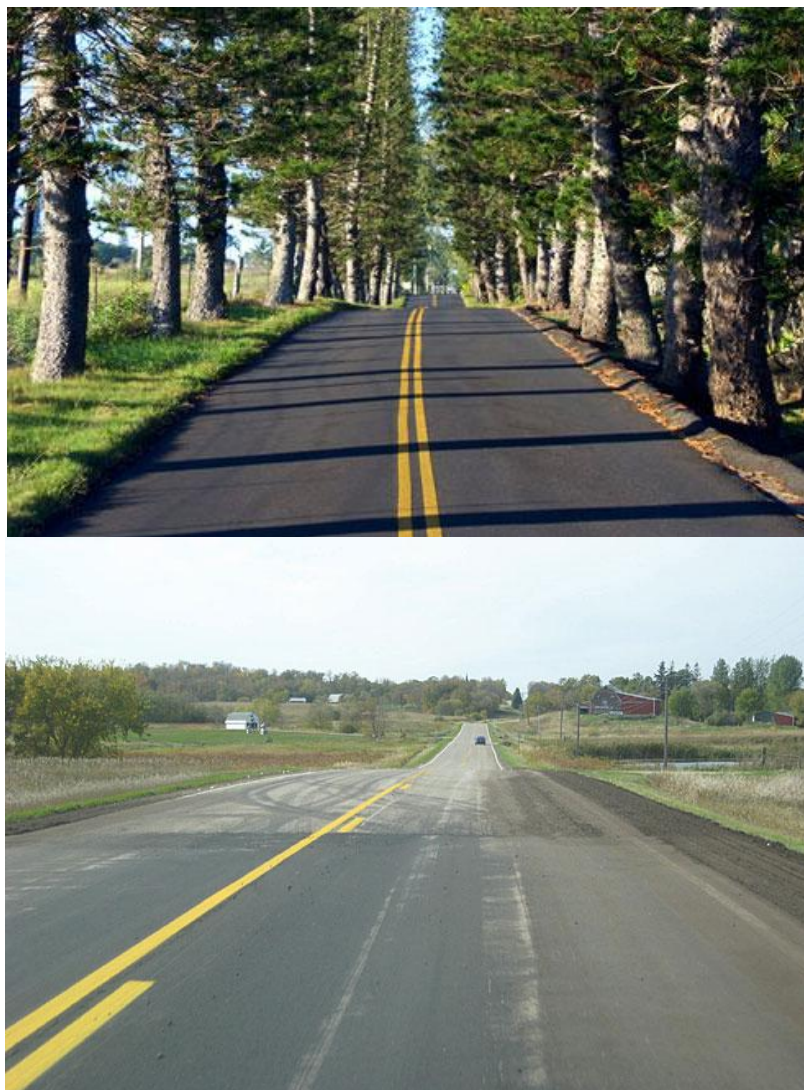
Kako modeliranje vozila i ceste najčešće izgleda u praksi moguće je vidjeti u poglavlju 4.1.



Slika 3.3: Model vozila i ceste – vozilo se modelira u odnosu na koordinatni sustav prometnog traka

3.2 Izlučivanje prometnih oznaka

Oznake ceste i prometnog traka mogu jako varirati od jedne do druge situacije i to nerijetko unutar samo nekoliko stotina metara te je stoga vrlo teško proglašiti jednu metodu standardnom. Tehnike koje se temelje na detekciji rubova rade dobro s punim i isprekidanim linijama, ponekad čak i s kružnim signalizacijskim svjetlima. Međutim, često slike sadrže sjene (slika 3.5 gore) koje uvelike ometaju rad detektora rubova.



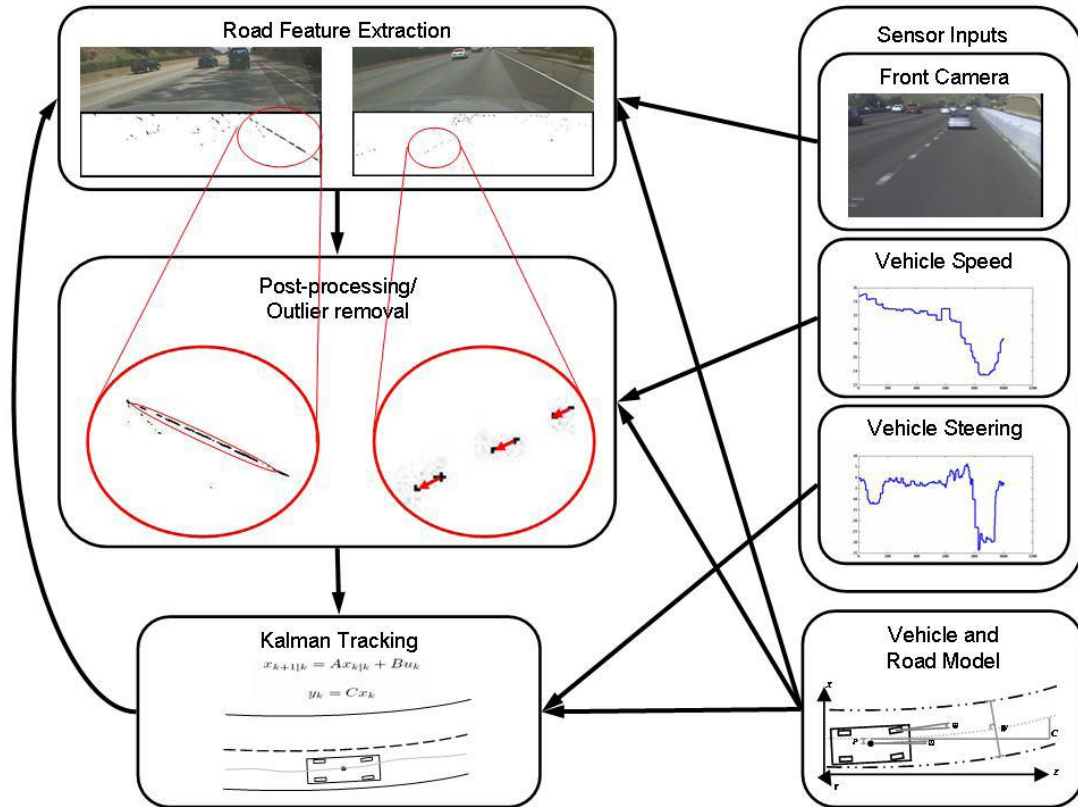
Slika 3.5: Dva primjera uvjeta nepovoljnih za praćenje prometnog traka

Sustav LANA [6] je efikasan za slike s "lažnim" rubovima (npr. rubovi sjena), ali je ograničen na dijagonalne rubove. Ukoliko u nekom trenutku rubovi postanu okomiti (npr. prilikom prelaska u paralelni prometni trak) sustav podbacuje.

Sustav RALPH [7] koristi adaptivni predložak i pretpostavlja konstantnu teksturu ceste pa nije prikladan za situacije kao na slici 3.5 (dolje).

Kao i kod modeliranje ceste, detekcija prometnih oznaka također ovisi o vrsti sustava za koji se koristi, kao i okoliša u kojem će se vozilo najčešće nalaziti. Primjerice, u sustavu koji treba pratiti drugo vozilo nije potrebno pronalaziti sve moguće prometne oznake dokle god je vozilo koje se prati vidljivo.

4 VioLET :



Slika 4.1: Dijagram toka za sustav VioLET

VioLET (Video Based Lane Estimation and Tracking System) [1] je sustav čiji je osnovni zadatak pripomoć u vožnji. Preciznije rečeno, sustav VioLET predviđa kretanje vozila unutar prometnog traka s ciljem da upozorava o dijeljenju ili prekidu traka te prati budnost vozača.

Očekivani okoliš jest autocesta u dnevnim ili noćnim uvjetima uz promjenu osvjetljenja, sjene i teksture ceste. Očekuje se prometna signalizacija u vidu kružnih svjetala te punih i isprekidanih linija.

VioLET slijedi generalizirani dijagram toka opisan na početku poglavlja. Konkretniji dijagram toka vezan uz sam sustav prikazan je na slici 4.1.

4.1 Model ceste i vozila:

Zahtijeva se model koji zadržava značajan nivo preciznosti za udaljenosti od 30-40 metara. Naime, u kritičnim situacijama sustav za pripomoć u vožnji mora moći procijeniti kretanje vozila unutar prometnog traka makar jednu sekundu unaprijed. Slika 4.2 prikazuje jednostavan paraboličan model koji uzima u obzir poziciju, kut i zakrivljenost u aproksimaciji krivulje. X_s je bočni pomak duž sredine prometnog traka, Z_s je udaljenost ispred vozila, ϕ je bočna pozicija, θ je kut prometnog traka, C je zakrivljenost prometnog traka, Ψ je kut skretanja vozila, a W je širina traka.

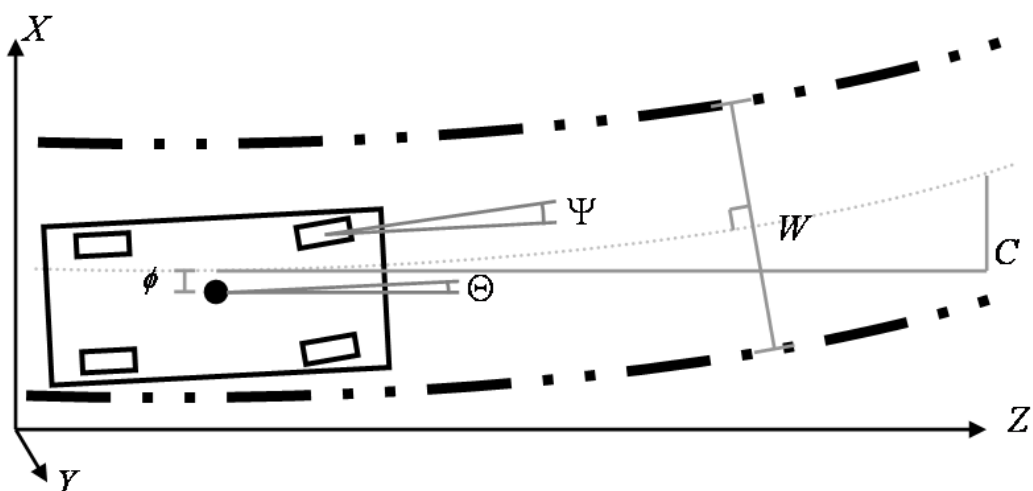
Jednadžba (1) opisuje cestu duž sredine prometnog traka, a jednadžba (2) opisuje cestu na rubovima prometnog traka [1]. Parametar l poprima vrijednost 1 za lijevi trak i -1 za desni trak. Širina traka se pretpostavlja konstantnom, ali se osvježava pomoću Kalmanovog filtra (vidi poglavlje 4.4).

$$X_s(Z_s) = \phi + \theta Z_s + C Z_s^2 \quad (1)$$

$$X_{rub}(Z_s) = \phi + \theta Z_s + C Z_s^2 + \frac{lW}{2(\theta + C Z_s)^2 + 2} \quad (2)$$

$$Z_{rub}(Z_s) = Z_s - \frac{lW(\theta + C Z_s)}{2(\theta + C Z_s)^2 + 2} \quad (3)$$

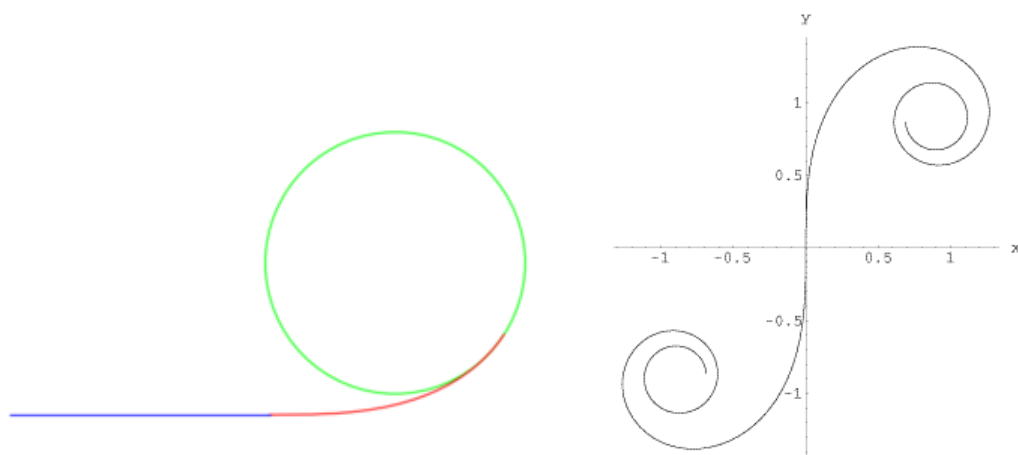
Jednadžbe (1-3) opisuju model ceste korišten u literaturi [1]. Naravno, moguće je koristiti i drugačiji model ukoliko se on pokaže optimalnim za neki sustav.



Slika 4.2: Model ceste i vozila korišten u sustavu VioLET

Za modeliranje ceste, tj. prometnog traka koristi se Eulerova krivulja, tzv. klotoida. Klotoid se koristi u projektiranju cesti i željezničkih pruga pa je stoga vrlo pogodno i modelirati cestu upravo istom krivuljom.

Zašto baš klotoida? Vozilo koje se kreće pravocrtno i počne ulaziti u zavoj ulazi u kružnu putanju te stoga na njega počinje djelovati nagla centripetalna sila u točki tangente, dakle u točki gdje pravac prelazi u krivulju. Pri nešto većim brzinama kretanja to može uzrokovati veliku nelagodu kod putnika (vlak) ili čak izlijetanje vozila s ceste (cestovna vozila). Stoga je bilo potrebno projektirati cestu tako da u zavojima centripetalno ubrzanje raste linearno s prijašnjim putom.



Slika 4.3: Eulerova krivulja (klotoida)

Klotoida upravo ima to svojstvo. Na slici 4.3 lijevo prikazan je općeniti oblik klotoida. Ključni dio obojan je crvenom bojom. To je dio na kojem krivulja prelazi iz pravocrtnog u kružni oblik blagim, linearnim povećavanjem zakrivljenosti.

Gotovo sve današnje željezničke pruge i većina cestovnih prometnica projektirane su prema modelu klotoida te je stoga i u sustavu za praćenje prometnog traka poželjno cestu modelirati prema modelu klotoida.

4.2 Izlučivanje značajki ceste

U cilju postizanja što je moguće veće pouzdanosti i točnosti sustava, izlučivanje značajki ceste mora biti vrlo robusno s obzirom na to da se vozilo kreće u raznim uvjetima osvjetljenja, sjene i tipova ceste. Osim robusnosti, postupak izlučivanja značajki mora biti i brz ukoliko se radi o sustavu koji radi u stvarnom vremenu.

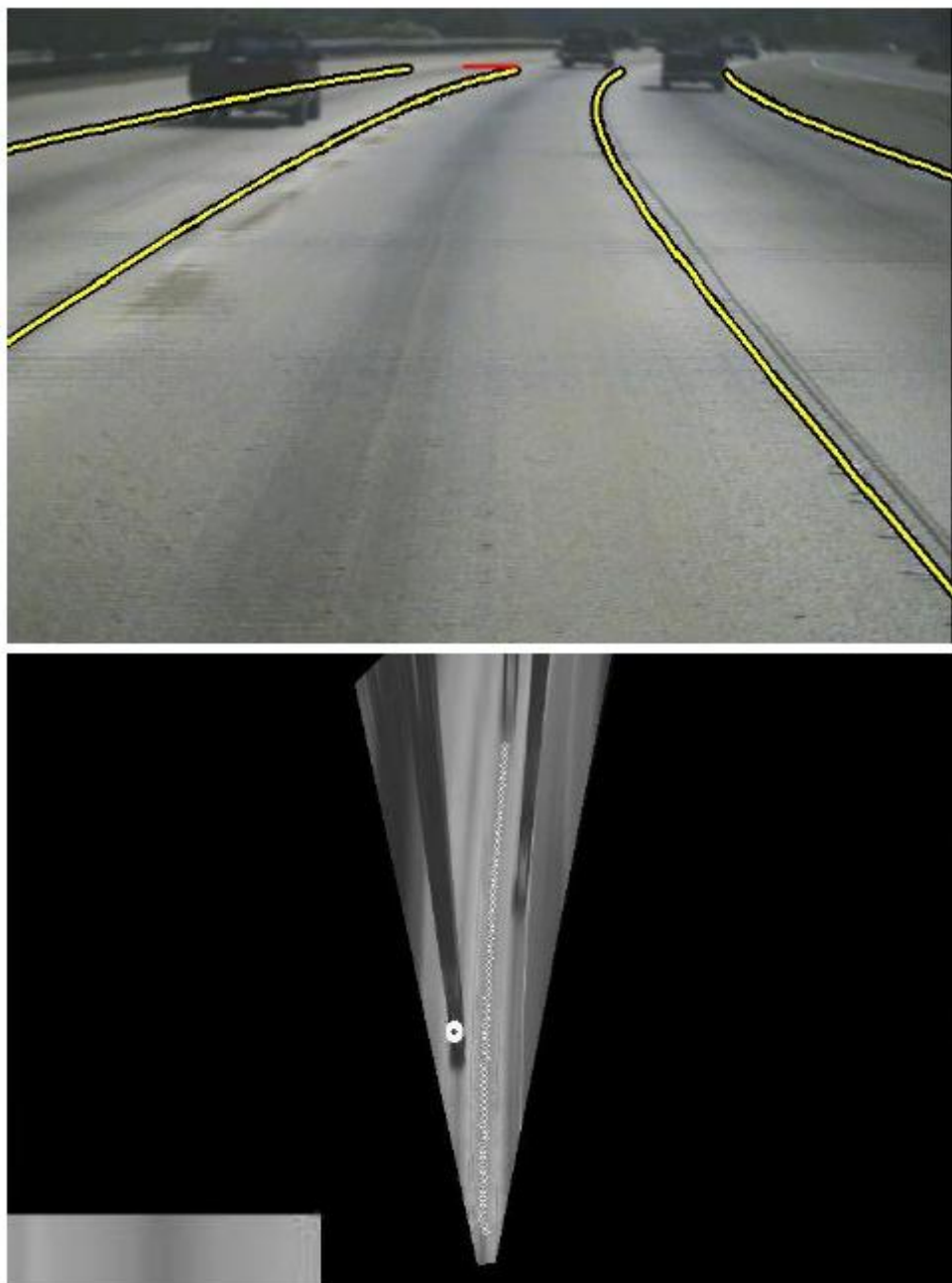
Izlučivanje značajki se u sustavu VioLET obavlja upravljivim filtrima. Budući da je u ovom radu naglasak na praćenju prometnog traka, postupak ovdje nije opisan. Opis detekcije prometnog traka metodom upravljivih filtara može se naći u literaturi [8][9][12].

4.3 Procjena zakrivljenosti ceste

Ponekad je nemoguće izlučiti značajke iz kojih bi se moglo dobiti informaciju o zakrivljenosti ceste nakon idućih 20-ak metara. Tada je položaj ostatka ceste (spomenuto je ranije da je potrebno procijeniti 30-40 metara ceste) potrebno aproksimirati.

Koristi se adaptivni predložak. Predložak se stvara tako što se vrijednosti intenziteta piksela područja prometnog traka u koraku i usrednjavaju s predloškom iz koraka $i-1$. Vrijednosti intenziteta se pribavljaju korištenjem inverzne perspektivne projekcije slike ceste te "rezanjem" pravokutnog dijela slike nekoliko metara ispred vozila. Predložak se zatim uspoređuje s cestom ispred uz minimiziranje kvadratne pogreške u vrijednostima intenziteta inverzne perspektivne transformacije slike. Konačna procjena zakrivljenosti se dobije minimiziranjem kvadratne pogreške između paraboličnog modela ceste i izmjerenih položaja ceste.

Koristi se model prometnog traka opisan u poglavlju 4.1 (slika 4.2).



Slika 4.4: Gore: Detektirani trakovi s linijama zakrivljenosti preklopljenim preko slike. Dolje: Inverzna perspektivna transformacija s detekcijom zakrivljenosti (male bijele točkice) i predloškom (dolje lijevo)

Opisana metoda ne daje uvijek precizne rezultate. Primjerice, ako je tekstura ceste loša, tada adaptivni filter neće dobro aproksimirati cestu ispred vozila jer će se

intenziteti piksela jako razlikovati u dvama uzastopnim koracima (kvadratna pogreška će biti velika). Tada se procjena zakrivljenosti računa pomoću kuta skretanja vozila i druge derivacije položaja (Kalmanove jednadžbe, poglavlje 4.4).

4.4 Praćenje položaja vozila

Praćenje bočnog položaja vozila u odnosu na prometni trak može pružiti dragocjene informacije za sustav. U tu svrhu koriste se Kalmanovi filtri.

Kalmanovi filtri koriste dinamiku modela sustava, poznate ulaze u sustav te mjerenja (najčešće od raznih senzora). Na temelju varijabli poznatih u diskretnom vremenskom trenutku t procjenjuje se stanje sustava u trenutku $t+1$.

Predviđanje idućeg stanja sustava obavlja se težinskim usrednjavanjem s trenutnim stanjem sustava. Težine označavaju koliko neka varijabla zapravo utječe na sam sustav i računaju se iz kovarijance – mjere nesigurnosti predviđanja stanja sustava. Kalmanov filter radi rekurzivno, dakle svako iduće stanje se predviđa samo na temelju trenutnog stanja, a ne čitave povijesti stanja.

Kalmanovi filtri omogućuju optimalnu procjenu željenih varijabli na temelju očitavanja mjerenja uz prisutnost Gaussovog šuma. Osim toga, pružaju procjenu varijabli stanja koje nije moguće izravno promatrati, a mogu biti korisne za sustav.

Kalmanov filter pretpostavlja da je stanje sustava u nekom diskretnom vremenskom trenutku k nastalo iz stanja u trenutku $k-1$ prema [1]:

$$\mathbf{x}_{k+1|k} = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \quad (4)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{M}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (5)$$

pri čemu je

$$\mathbf{x} = [\phi, \dot{\phi}, \ddot{\phi}, W]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} & 0 \\ 0 & 1 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{B}_{u_k} = [0, \Phi \Delta t, 0, 0]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Vektor $\mathbf{x}$ se sastoji od varijabli koje mjerimo i predstavlja stanje sustava.

Matrica $\mathbf{A}$ modelira prijelaze između stanja. Matrica $\mathbf{M}$ preslikava stvarno stanje u promatrano stanje.

Varijable $\mathbf{w}_k$ i $\mathbf{v}_k$ modeliraju šum. Varijabla $\mathbf{w}_k$ je šum procesa za koji se pretpostavlja da je slučajna varijabla normalne distribucije s očekivanjem 0 i varijancom $\mathbf{Q}_k$. Varijabla $\mathbf{v}_k$ je šum mjerenja za koji se pretpostavlja da je slučajna varijabla normalne distribucije s očekivanjem 0 i varijancom $\mathbf{R}_k$. Matrice $\mathbf{Q}_k$ i $\mathbf{R}_k$ su izračunate empirijski.

Varijable stanja Kalmanovog filtra se osvježavaju korištenjem podataka koji su poznati sustavu kao što su procjena položaja prometnog traka i kuta skretanja, brzina okretanja kotača i sl. Filtri se osvježavaju u diskretnim trenucima k .

Vektor $\mathbf{y}_k$ (jednadžba 5) sastoji se od položaja vozila te kuta i širine prometnog traka. Navedeni podaci se pribavljaju korištenjem Houghove transformacije [11] i statistike detekcije prometnih oznaka (oznake se poravnavaju tako da je visoka varijanca u smjeru pružanja prometnog traka i niska u ostalim smjerovima). Houghova transformacija je dobra za slučajeve kad su linije na cesti dobro vidljive, a statistika pomaže kad se ne može detektirati pravilna linija.

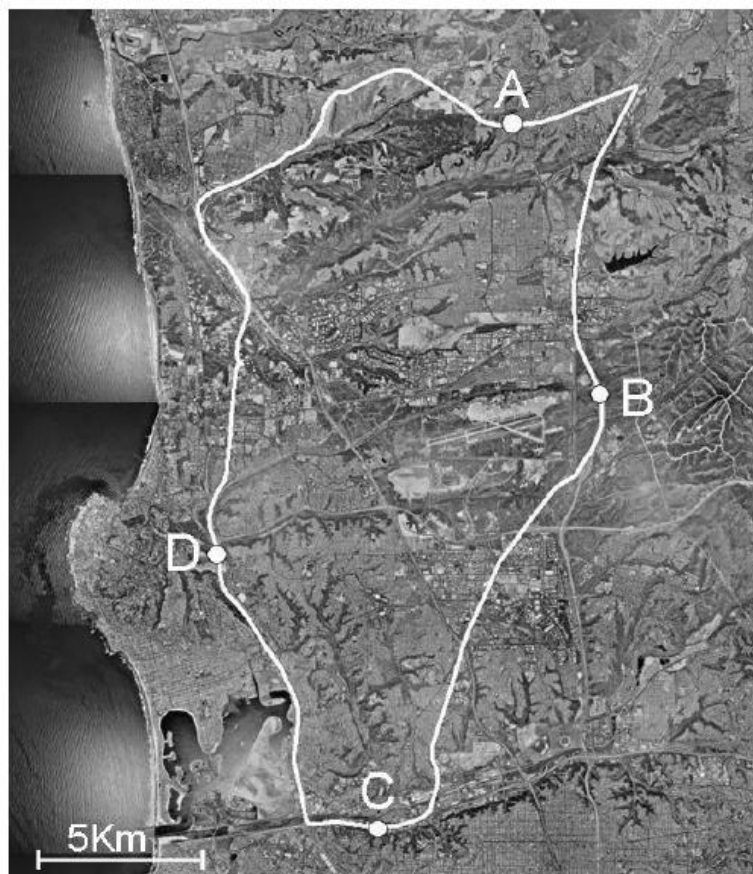
4.5 Eksperimentalna evaluacija

Evaluacija je obavljena pomoću inteligentnog vozila LISA-Q (slika 4.5). Perspektivne slike ceste pribavljene su pomoću kamere pričvršćene na krovu vozila.



Slika 4.5: LISA Q – testno vozilo

Testiranje je provedeno na autocestama južne Kalifornije (slika 4.6). Uvjeti su bili raznovrsni – promjene osvjetljenja zbog nadvožnjaka, sjene okolnih stabala i drugih vozila, promjene u materijalu kolnika i sl. Osim toga, snimanje je obavljano u četiri različita doba dana: zora, podne, kasno popodne/sumrak i noć. Ukupan prijeđeni put je iznosio 65 km.



Slika 4.6: Ruta na kojoj je pribavljena snimka za evaluaciju

Ruta je podijeljena na četiri dijela (slika 4.6). Dio A se sastoji od punih i isprekidanih linija, dijelovi B i C se sastoje od mješavine isprekidanih linija i kružnih svjetala, dok se dio D sastoji samo od kružnih svjetala.

S ciljem što potpunijeg testiranja, odabrana su tri mjerila kvalitete algoritma – apsolutna srednja pogreška u poziciji, standardna devijacija greške u poziciji i standardna devijacija greške u učestalosti promjene bočne pozicije (prva dva su prikazana u tablici 4.1).

Sustav daje bolje rezultate po noći i u zoru nego tokom dana i sumraka. Što se tiče noći, to je sasvim logično budući da je kontrast između prometnih oznaka i ceste veći, a osim toga manje je sjena okolnog drveća i drugih vozila. U zoru je jutarnja magla malo smanjila kontrast, ali također je i pomogla u uklanjanju sjena. Smanjenje kontrasta je zahtijevalo podešavanje parametara algoritma.

Zanimljivo je uočiti da je po noći ukupna standardna devijacija greške veća nego po danu, međutim srednja apsolutna pogreška je manja (tablica 4.1). Najvjerojatnije je razlog tome taj da su noćni uvjeti generalno bolji, ali postoje iznimke u kojima sustav vrlo loše radi. Srednja apsolutna pogreška je manje osjetljiva na ovakva odstupanja od standardne devijacije.

	Standard Deviation of Error (<i>cm</i>)				
	Dawn	Noon	Dusk	Night	Total
Set A	4.5400	11.5700	8.1062	7.9710	8.4221
Set B	8.6041	14.8687	7.9457	3.8871	9.6612
Set C	11.1815	13.5135	29.9347	23.2722	20.8885
Set D	5.1547	10.7514	12.1687	8.3031	9.4761
Totals	7.8460	12.7784	17.1246	13.1261	13.1377

	Mean Absolute Error (<i>cm</i>)				
	Dawn	Noon	Dusk	Night	Total
Set A	3.6497	8.6429	5.5313	6.4720	6.0740
Set B	6.8463	10.6362	5.6768	3.0417	6.5503
Set C	8.1815	10.8677	20.4727	12.9471	13.1173
Set D	4.1713	8.4701	9.8390	6.5232	7.2509
Totals	5.7122	9.6542	10.3800	7.2460	8.2481

Tablica 4.1: Rezultati testiranja podijeljeni po dijelovima puta i dobima dana

Vidljivo je da su rezultati najbolji u dijelu A u kojem se signalizacija sastoji samo od punih i isprekidanih linija. Međutim, ova razlika nije toliko velika kao razlika među pojedinim dijelovima dana, odnosno uvjetima osvjetljenja.

	Metrics		
	Std. Dev. of Error (<i>cm</i>)	Absolute Mean Error (<i>cm</i>)	Std. Dev. of Error in Rate of Change (<i>cm/s</i>)
Lane Keeping	10.4263	8.2661	0.1625
Lane Changing	16.0634	12.4149	0.4653
Combined	13.0060	9.9446	0.3639

Tablica 4.2: Rezultati testiranja za slučaj zadržavanja traka te promjene traka

Tablica 4.2 prikazuje rezultate za dva različita načina vožnje (bolje rečeno, dvije različite situacije u vožnji) – promjena prometnog traka i zadržavanje prometnog traka. U nekim sustavima razlika između ove dvije situacije je vrlo važna, primjerice sustav za upozoravanje prekida/razdvajanja prometnog traka. Podaci korišteni u ovoj evaluaciji su skupljeni po danu i uključuju kružne refleksijske oznake, isprekidane linije, sjene i nadvožnjake. Vidljivo je da performanse padaju u slučaju promjene prometnog traka.

5 Zaključak

Algoritmi detekcije i praćenja prometnog traka vrlo su korisni za primjenu u sustavima za pripomoć vozaču u vožnji. Opisani postupci i algoritmi samo su maleni djelić svih do danas iskušanih metoda. Unatoč uistinu velikoj količini literature koju je moguće pronaći, često izlaze novi radovi s novim poboljšanjima postojećih algoritama ili čak prijedlozima novih.

Kao što to najčešće biva kad se radi o algoritmima računalnog vida, ne postoji ultimativna metoda koja uvijek daje optimalne rezultate. Kroz ovaj rad nekoliko puta je spomenut nedostatak pojedine metode u odnosu na neku drugu. Naravno, nemoguće je mijenjati algoritam pri svakoj promjeni okoline te je stoga potrebno iscrpno istražiti kakva okolina se očekuje u primjeni i u skladu s tim implementirati sustav.

Moguće bi bilo implementirati nekoliko različitih metoda, čime bi se uvelike povećala robusnost sustava. Tamo gdje jedna metoda zakaže, druga bi radila zadovoljavajuće. Naravno, takve kombinacije bi uvelike usporile rad sustava, ali uz odgovarajuće sklopovlje gubici možda i ne bi bili drastični.

6 Literatura

- [1] McCall, Trivedi: *Video Based Lane Estimation and Tracking for Driver Assistance: Survey, System, and Evaluation*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol.: 7, no. 1, pp.: 20-37, ožujak 2006.,
- [2] Wang, Hu, Maeda, Hamada, Uchimura: *Predictive Lane Detection for Simultaneous Road Geometry Estimation and Vehicle Localization*,
- [3] Schon, Eidehall, Gustafsson: *Lane departure detection for improved road geometry estimation*,
- [4] Lim, K.H., Ang, L.M., Seng, K.P., Chin, S.W.: *Lane-Vehicle Detection and Tracking*, Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, Hong Kong, ožujak 2009.
- [5] Jung, C., R., Kelber, C., R., *Lane following and lane departure using a linear-parabolic model*, Image and Vision Computing, Sao Leopoldo, Brazil, srpanj 2005
- [6] C. Kreucher, S. Lakshmanan, *LANA: a lane extraction algorithm that uses frequency domain features*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 15, no. 2, pp. 343–350, travanj 1999.
- [7] D. Pomerleau and T. Jochem, *Rapidly adapting machine vision for automated vehicle steering*, IEEE Expert: Special Issue on Intelligent System and their Applications, vol. 11, no. 2, pp. 19–27, travanj 1996.
- [8] Majić, A.: *Pronalaženje prometnog traka korištenjem upravljivih filtara*, Seminarski rad, Fakultet Elektrotehnike i Računarstva, Zagreb, siječanj 2009
- [9] Gulić, M.: *Pronalaženje prometnog traka u odzivu upravljivog filtra*, Završni rad, Fakultet Elektrotehnike i Računarstva, Zagreb, lipanj 2009
- [10] Bašić, Š., Čepo, P. Š., Dodolović, I., Dostal, D., Grbić, S., Gulić, M., Horvatin, I., S. Louč, S., Sučić, I. *Cannyjev detektor rubova*, tehnička dokumentacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva, siječanj 2009.
- [11] Bing Yu, Weigong Zhang, *A Robust Approach of Lane Detection Based on Machine Vision*, case, pp.195-198, 2009 IITA International Conference on Control, Automation and Systems Engineering (case 2009), 2009
- [12] Majić, A.: *Pregled pristupa za pronalaženje prometnog traka u perspektivnim slikama ceste*, Seminarski rad, Fakultet Elektrotehnike i Računarstva, Zagreb, travanj 2009
- [13] Brkić, K., Sikirić, I., Šegvić, S.: *Recovering a comprehensive road appearance mosaic from video*,
- [14] Šegvić, S., Brkić, K., Kalafatić, Z., Stanisavljević, V., Budimir, D., Dadić, I.: *Towards automatic assessment and mapping of traffic infrastructure by adding vision capabilities to a geoinformation inventory*,

- [15] Dubrofsky, E.: *Homography estimation*, magistrski rad, Sveučilište Carleton, ožujak 2009

7 Sažetak

Seminar razmatra postupke i tehnike za procjenu položaja i praćenje prometnog traka u sljedovima slika. Pretpostavlja se da su slike pribavljene perspektivnom kamerom koja je orijentirana u smjeru kretanja cestovnog vozila. Cilj je što točnije procijeniti trenutni položaj prometnog traka u kojem se vozilo nalazi te predvidjeti njegov budući položaj. Opisuje se princip rada pojedinih algoritama i njihova implementacija te prenose rezultati iz literature.

Ključne riječi:

Detekcija prometnog traka, praćenje prometnog traka, modeliranje dinamike kretanja vozila, modeliranje ceste.