



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS
GRAFINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

Valdemaras Tribockis

**KELIO ŽENKLINIMO VERTIKALIŲ JUOSTŲ IR KELIO KRAŠTŲ
ATPAŽINIMAS**

**EXTRACTION OF ROAD VERTICAL LANE MARKERS AND ROAD
BOUNDARIES**

Baigiamasis magistro darbas

Informacinių technologijų studijų programa, valstybinis kodas 621E14004

Multimedijos informacinių sistemų specializacija

Informatikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS
GRAFINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Romualdas Baušys

(Vardas, pavardė)

(Data)

Valdemaras Tribockis

**KELIO ŽENKLINIMO VERTIKALIŲ JUOSTŲ IR KELIO KRAŠTŲ
ATPAŽINIMAS**
**EXTRACTION OF ROAD VERTICAL LANE MARKERS AND ROAD
BOUNDARIES**

Baigiamasis magistro darbas

Informacinių technologijų studijų programa, valstybinis kodas 621E14004

Multimedijos informacinių sistemų specializacija

Informatikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

dr. Rytė Žiūrienė

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

doc. dr. Angelė Kaulakienė

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS
GRAFINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

Informatikos inžinerijos studijų kryptis

TVIRTINU
Katedros vedėjas

Informacinių technologijų studijų programa, valstybinis kodas 621E14004

(Parašas)

Multimedijos informacinių sistemų specializacija

Romualdas Baušys

(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.
Vilnius

Studentui Valdemarui Tribockiui

Baigiamojo darbo tema: Kelio ženklavimo vertikalinių juostų ir kelio kraštų atpažinimas patvirtinta 2011 m. lapkričio 5 d. dekanų potvarkiu Nr. 395 fm.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2012 m. gegužės 31 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. Išnagrinėti kelio juostų atpažinime naudojamus metodus, jų privalumus bei trūkumus.
2. Remiantis analize sukurti metodą, sugebantį greitai ir tiksliai atpažinti vertikalios kelio ženklavimo juostas bei kelio kraštus.
3. Aprašyti sukurto metodo veikimo principą, rezultatus, privalumus bei trūkumus.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

doc. dr. Angelė Kaulakienė
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vadovas

.....
(Parašas)

dr. Rytė Žiūrienė
(Moksl. laipsnis , vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

Valdemaras Tribockis
(Vardas, pavardė)

.....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Fundamentinių mokslų fakultetas
Grafinių sistemų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data

Informacinių technologijų studijų programos baigiamasis magistro darbas
Pavadinimas **Kelio ženklavimo vertikaliojo juostų ir kelio kraštų atpažinimas**
Autorius **Valdemaras Tribockis** Vadovas dr. **Rytė Žiūrienė**

Kalba

☒ X

lietuvių

☐

užsienio

Anotacija

Šiame darbe nagrinėjama gatvės vertikaliojo ženklinimo juostų ir kelio kraštų aptikimo ir atpažinimo metodai, veikimo principai, problemos bei jų sprendimo būdai. Kelio vertikaliojo ženklinimo juostų ir kelio kraštų atpažinimas gali būti naudojamas įvairiose srityse: autotransporto priemonės lokalizavimas kelyje, vairuotojo pagalbinė sistema, autonominė transporto priemonės vairavimo sistema.

Šiame darbe gilinamasi į kelio juostų atpažinimo metodus duotame vaizde. Apžvelgiami praktikoje taikomi metodai, veikimo principai, privalumai ir trūkumai. Taip pat šiame darbe aprašomas naujas suformuotas ir įgyvendintas realaus laiko kelio ženklinimo juostų ir kelio kraštų atpažinimo metodas. Pabaigoje pateikiami įgyvendinto metodo rezultatai, privalumai ir trūkumai, tolimesni tobulinimo siūlymai.

Darbą sudaro: įvadas, kelio juostų atpažinimo metodika ir problematika, linijų ir briaunų atpažinimo ir apdorojimo metodai, kelio vertikaliojo ženklinimo juostų ir kelio kraštų atpažinimo metodas, pasiekti rezultatai, išvados, siūlymai ir literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 73 p. teksto be priedų, 52 pav., 6 lent., 39 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: kelio ženklinimo juostų atpažinimas, atvirkštinė perspektyvos transformacija, vertikaliojo linijų filtras, Hough transformacija, RANSAC.

Vilnius Gediminas Technical University

Fundamental Sciences faculty

Graphical Systems department

ISBN ISSN

Copies No.

Date

Engineering Informatics study programme master thesis.

Title **Extraction of road vertical lane markers and road boundaries**

Author **Valdemaras Tribockis**

Academic supervisor dr. **Rytė Žiūrienė**

Thesis language

☒ Lithuanian

☐ Foreign (English)

Annotation

The paper describes algorithm for detecting and extracting road vertical lane markers and road boundaries, operating principles, problems and their solutions. Detection of road vertical lane markers and road boundaries could be used in many areas, such as: vehicle localization on road, a driver assistance system, autonomous, self driving vehicle system.

This paper focuses on the methods of lane detection in a given image. Overviews of methods used in practice are presented, its working principle, advantages and drawbacks. In this work a new improved and implemented real-time road lane markings detection method is presented. Finally, the results, advantages and drawbacks, further development proposals are presented.

Structure: introduction, road lane detection, extraction and lane detection in a given image, extraction of road vertical lane markers and road boundaries, achieved results, advantages and drawbacks, conclusions and suggestions, references.

Thesis consists of: 73 p. text without appendixes, 52 pictures, 6 tables, 39 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords: detection and extraction of road lane markers, Inverse Perspective Mapping, vertical lines filter, Hough transform, RANSAC.

Turinys

Įvadas.....	11
Kelio juostų ir kelio kraštų atpažinimo ir sekimo metodika.....	13
1.1. Kelio juostų ir kraštų sekimas.....	16
1.2. Kelio juostų ir kraštų pozicijos prognozavimas.....	18
2. Briaunų ir linijų vaizde atpažinimo metodai.....	19
2.1. Briaunų ir linijų atpažinimo gradiento operatoriai	22
2.2. Briaunų ir linijų atpažinimo algoritminiai metodai	27
2.2.1. Canny briaunų atpažinimo metodas	27
2.2.2. Laplaso ir Gauso briaunų atpažinimo metodas	30
2.3. Hough transformacija	34
2.4. RANSAC metodas.....	36
3. Kelio vertikalių ženklavimo juostų ir kelio kraštų atpažinimo metodas	43
3.1. Realizavimo priemonės ir technologijos	43
3.2. Metodo architektūra.....	44
3.2.1. Metodo parametrai	45
3.2.2. Atvirkštinė perspektyvos transformacija.....	46
3.2.3. Glodinimo ir vertikalių linijų operatorių taikymas	51
3.2.4. Vertikalių kelio juostų ir kraštų atpažinimo metodas.....	53
3.3. Metodo rezultatai, privalumai ir trūkumai, tolimesnis tyrimas	61
Išvados ir rezultatai.....	69
Literatūros sąrašas	70
Priedai	73

Paveikslėlių sąrašas

1 pav. Skaliarinio lauko gradientas.....	21
2 pav. Paveiksluko sąsūkos kaukės naudojimas.....	21
3 pav. Skirtumai tarp idealios ir realios briaunos	22
4 pav. Robertso operatoriaus stulpelių ir eilučių kaukės – G_x ir G_y	23
5 pav. Sobelio operatoriaus stulpelių ir eilučių kaukės – G_x ir G_y	24
6 pav. Previto operatoriaus stulpelių ir eilučių kaukės - G_x ir G_y	25
7 pav. Paveiksluko spalvos intensyvumo kitimo funkcija gradientas	8 pav. Apskaičiuotas funkcijos gradientas 25
9 pav. Laplaso antros eilės išvestinės grafikas	25
10 pav. Kiršo kompasos kaukės	26
11 pav. Robinsono kompasos kaukės	26
12 pav. Gauso glodinimo filtro operatoriaus kaukė	28
13 pav. Canny algoritmo briaunos krypties nustatymas.....	29
14 pav. Vienmatis (kairėje) ir dvimatis (dešinėje) Gauso funkcijos pasiskirstymas, kai vidurkis $x = 0$, $y = 0$, standartinis nuokrypis $\sigma = 1$	30
15 pav. Laplaso ir Gauso operatoriaus kaukės	31
16 pav. Laplaso ir Gauso pasiskirstymo funkcija.....	32
17 pav. Laplaso ir Gauso glodinimo filtro operatoriaus kaukė	32
18 pav. a) – diskrečioji parametrų aibė, b) ir c) – galimi tiesių linijų variantai	34
19 pav. a) – tiesi linija, išreikšta atstumu nuo linijos iki koordinatinių pradžios – r , kampų tarp X ašies ir vektoriaus r ; b) Hough parametrų erdvėje taškai A , B ir C transformuoti į sinusoidines kreives.....	35
20 pav. Hough transformacijos parametrai.....	35
21 pav. Duomenų aibė D . Tiesi 2D linija	37
22 pav. Klaidingų duomenų įvertinimo funkcija.....	38
23 pav. Įvertinimo funkcija: didelių reikšmių mažesnė įtaka.....	38
24 pav. RANSAC metodo etapas I	25 pav. RANSAC metodo etapas II.....
26 pav. RANSAC metodo etapas III	27 pav. RANSAC metodo etapas IV
28 pav. RANSAC metodo etapas V	29 pav. RANSAC metodo etapas VI
30 pav. Kelio ženklavimo vertikalinių juostų ir kelio kraštų atpažinimo metodo schema	44
31 pav. Kelio juostų atpažinimo parametrų įvesties vartotojo grafinė sąsaja	45
32 pav. IPM koordinatės. Kairėje: koordinatinių – pasaulio, kameros ir paveiksluko - ašys. Dešinėje: posvyrio ir posūkio kampų apibrėžimai	47

33 pav. Vaizdo perspektyvos nykstamasis taškas	49
34 pav. IPM transformacija. Kairėje pradinis vaizdas, dešinėje vaizdas po transformacijos. VP – nykstamasis taškas, OP – optinis centras, FL – židinio nuotolis	49
35 pav. Dvitiesis interpoliacijos procesas.....	50
36 pav. Glodinimo ir vertikalių kelio juostų išskyrimas	52
37 pav. Maksimalių reikšmių filtro taikymas.....	53
38 pav. Tiesės modelio įvertinimas esant klaidingiems duomenims.....	54
39 pav. Paveiksluko stulpelio reikšmių sumos transformaciją į vektorių	55
40 pav. Paveiksluko stulpelių reikšmių intensyvumo grafikas	55
41 pav. Paveiksluko intensyvumo reikšmių lokalūs maksimumai po ribinės reikšmės operacijos ..	56
42 pav. Paveiksluko intensyvumo reikšmių lokalūs maksimumai po grupavimo operacijos	56
43 pav. Paveiksluko intensyvumo reikšmių lokalių maksimumų nagrinėjama sritis.....	56
44 pav. Atstumas nuo taško iki dviem taškai aprašytos tiesės.	58
45 pav. Nagrinėjamų sričių RANSAC metodo taikymo rezultatai	59
46 pav. Vertikalių linijų atpažinimo metodo rezultatai	59
47 pav. Atbulinės perspektyvos transformacijos rezultatai	60
48 a) pav. Metodo veikimo bandymas: kelio juostos aiškiai matomos, užmiesčio kelias	62
48 b) pav. Metodo veikimo bandymas: kelio juostos aiškiai matomos, užmiesčio kelias	62
49 a) pav. Metodo veikimo bandymas: kelio juostos aiškiai matomos, šešėlyje, užmiesčio kelias...	63
49 b) pav. Metodo veikimo bandymas: kelio juostos aiškiai matomos, šešėlyje, užmiesčio kelias ..	63
50 a) pav. Metodo veikimo bandymas: kelio juostos blankios, šešėlyje, kelias vingiuotas, šlapias, miesto kelias	64
50 b) pav. Metodo veikimo bandymas: kelio juostos blankios, šešėlyje, kelias vingiuotas, šlapias, miesto kelias	64
51 a) pav. Metodo veikimo bandymas: kelio juostos automagistralėje.....	65
51 b) pav. Metodo veikimo bandymas: kelio juostos automagistralėje	65
52 pav. Metodo veikimo sparta keičiant paveiksluko IPM transformacijos mastelio dydį.....	67

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Canny algoritmo briaunos krypties kampo nustatymas	29
2 lentelė. Briaunų bei linijų atpažinimo metodų savybės	33
3 lentelė. Minimalus bandymų skaičius $n_{\min}$, reikalingas bent vienam modelio sprendiniui rasti, kai minimali tikimybė - $P_{\min}$, paklaidos procentinė išraiška – ϵ , atsitiktinių duomenų kiekis $M = 2$	42
4 lentelė. 3 lentelės duomenys. Atsitiktinių duomenų kiekis $M = 5$	42
5 lentelė. Borkar A. ir Hayes M. (2009) kelio juostų atpažinimo metodo RLDT-RK tikslumas.....	66
6 lentelė. Įgyvendinto kelio juostų ir kelio kraštų atpažinimo metodo tikslumas	66

Santrumpų sąrašas

- BMA – angl. *Block Matching Algorithm* – srities atitikimo algoritmas
- DoG - angl. *Difference of Gaussians* - Gauso filtrų skirtumų metodas
- EKF – angl. *Extended Kalman Filter* – išplėstinis Kalmano filtras
- FLTK – angl. *Fast Light Toolkit* – programinių įrankių rinkinys
- GPS – angl. *Global Positioning System* – globalios padėties nustatymo sistema
- HT – angl. *Hough Transform* – Hough transformacija
- IBM – angl. *International Business Machines* – IBM įmonės pavadinimas
- IPM – angl. *Inverse Perspective Mapping* – atvirkštinė perspektyvos transformacija
- LIDAR - angl. *Light Detection and Ranging* – lazerinė objektų sekimo sistema
- MHT – angl. *Multidimensional Hough Transform* – daugiamatė Hough transformacija
- OpenCV – angl. *Open Source Computer Vision* – atvirojo kodo kompiuterinė analizė
- PPHT – angl. *Progressive Probabilistic Hough Transform* – progresyvi tikimybinė Hough transformacija
- RANSAC – angl. *Random Sample Consensus* – atsitiktinio modelio parinkimo metodas
- RGB – angl. *Red, Green, Blue* - spalvų maišos metodas, atitinkamai: raudona, žalia, mėlyna
- RLDT-RK – angl. *Robust Lane Detection and Tracking with RANSAC and Kalman filter*
- ROI – angl. *Region of Interest* – (paveikslėlio) aktuali sritis
- RPM – angl. *Reverse Perspective Mapping* – atstatomoji perspektyvos transformacija
- SHT – angl. *Standard Hough Transform* – standartinė Hough transformacija

Ivadas

Besivystant žmonijai, auga ir jos poreikiai – tobulėja technologijos, atsiranda poreikis jas tikslingai realizuoti, atsiranda paklausa ir pasiūla. Bene sparčiausiai tobulėjanti šaka šiuolaikinių mokslų srityje yra informacinės technologijos. Atsirado galimybė perkelti sudėtingus matematinių ir fizikinių algoritmų veiksmus į aukštesnį lygmenį – kompiuterinę erdvę.

Šiais laikais kelio ženklinimo juostų ir kelio kraštų atpažinimas pasitelkiant kompiuterinę įrangą yra labai svarbus aspektas kuriant autonomines transporto priemones bei pagalbines sistemas vairuotojui. Iš tikrųjų, ši sritis yra gan plačiai išnagrinėta, tačiau tik iš dalies.

Autonominės transporto priemonės reikalingos įvairiose srityse – paciento transportavimas į ligoninę, sandėlių automatizavimas, pavojingų medžiagų transportavimas, pagalba vairuotojui, kai kompiuteris yra greitesnis bei efektyvesnis nei žmogaus instinktai. Dauguma šių sričių aplinkų nėra susistemintos ir dažnai kintančios, todėl kelio radimas bei žvalgos kontrolė įgyvendinama analizuojant informaciją, gautą iš transporto priemonėse įtaisytų jutiklių, dažniausiai vaizdo kamerų. Jutiklių informacija naudojama svarbios informacijos gavybai – transporto priemonės pozicijos bei krypties nustatymui, kelio ženklinimo juostų bei ribų segmentacijai. Pastaroji dalis kelia didžiausią susidomėjimą. Kadangi užfiksuotoje medžiagoje yra triukšmo, iškreipiančio svarbius duomenis, yra sukurta daug algoritmų šio triukšmo šalinimui ir apdorojimui.

Darbo tikslas. Sukurti metodą, sugebantį automatiškai atpažinti vertikalias kelio ženklinimo juostas ir kelio kraštus vaizdų sekoje.

Atpažinimo metodo rezultatai neturi būti įtakojami aplinkos veiksnių – eismo intensyvumo, šalikelėse parkuojamų transporto priemonių, šešėlių, kelio krypties pokyčių, nežymaus kelio ženklinimo, kintamos šviesos intensyvumo tarp aukštų pastatų.

Norint pasiekti šį tikslą, reikia atlikti šiuos uždavinius:

- Sprendžiant kelio juostų atpažinimo realiu laiku problemas yra sukurta daug algoritmų ir būdų. Kadangi sunku įvertinti šių algoritmų taikymo principus, reikia išnagrinėti kelio juostų ir kelio kraštų atpažinimo metodus, jų privalumus bei trūkumus.
- Praktikoje konkretaus probleminio uždavinio sprendimui būtina parinkti tinkamiausią algoritmą, paremtą testavimo rezultatais. Dažniausiai taikomas algoritmas yra sudarytas iš skirtingų žinomų algoritmų kombinacijų. Būtina šių etapų analizė.
- Remiantis analize, sukurti metodą, gebantį greitai ir tiksliai atpažinti vertikalias kelio ženklavimo juostas bei kelio kraštus.
- Aprašyti sukurto metodo veikimo principą, rezultatus, privalumus bei trūkumus, tolimesnius metodo tobulinimo būdus.

Mokslinis naujumas. Šiame darbe kelio juostų ir kraštų atpažinimo metodikoje pristatomi trys nauji etapai: kelio vaizdo projekcijos transformacija į paukščio skrydžio projekciją – tokiu būdu iš vaizdo pašalinamas nykstamojo taško egzistavimo pojūtis, todėl kelio juostos bei kraštai tampa lygiagretūs stebėtojo atžvilgiu; pristatomas naujas preliminarinių kelio juostų ir kraštų aptikimo algoritmas, mažinantis vaizdo apdorojimo operacijų skaičių; pristatomas patobulintas preliminarinių kelio juostų bei kraštų įvertinimo algoritmas.

Tyrimo objektas ir metodai. Darbe analizuojami pagrindiniai kelio juostų ir kraštų atpažinimo metodai, briaunų ir linijų paveikslėlyje išskyrimo algoritmai, jų privalumai ir trūkumai. Didžiausias dėmesys koncentruojamas ties metodais, sprendžiančiais kelio kraštų bei juostų sekimo, atpažinimo bei klasifikavimo problemas.

Praktinis pritaikymas. Vairuotojo saugumas kelyje visada buvo pagrindinis tikslas, kadangi vairuotojo išsiblaškyimas ir nesugebėjimas laiku reaguoti į avarines situacijas yra viena iš pagrindinių nelaimingų atsitikimų kelyje priežasčių. Saugumo sistemų diegimas į transporto priemones yra vienas iš vairuotojo išankstinio informavimo būdų apie susidariusią pavojingą situaciją. Dauguma saugumo sistemų kelio ženklavimui atpažinti naudoja kameras, lazerinius diapazono vaizdus bei GPS įrangą. Šiame darbe aprašomas metodas naudoja vaizdo kameros fiksuotą medžiagą ir gali būti diegiamas kaip atskiras saugumo sistemos komponentas.

Baigiamajame darbe aprašytas sukurtas metodas bei rezultatai aprobuoti 15-tojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“, VGTU, Vilnius, balandžio 17 d., 2012.

Kelio juostų ir kelio kraštų atpažinimo ir sekimo metodika

Sekimo metodų tikslas yra surasti bei sekti vaizdo sritis, kurias reikia atpažinti. Objektų, tokių kaip kelio juostos bei krašto, sekimas ir klasifikavimas yra svarbi užduotis. Biologinėms sistemoms – žmogui ar gyvūnui – objekto atpažinimas yra natūralus procesas, tačiau dirbtinėse kompiuterizuotose sistemose ši užduotis yra labai sunki dėl vienai kategorijai priklausančių objektų – kelio juostų bei kraštų – vaizdinių skirtumų. Be to, tas pats objektas, pateiktas kompiuterizuotai atpažinimo sistemai skirtingomis vaizdavimo sąlygomis, tokioms kaip – lyjant lietui ar šviečiant saulei, esant kelio asfalto atspalvio tipų skirtumams, transporto priemonių bei kitų objektų šešeliams – gali grąžinti didesnius skirtumus, negu du vienai kategorijai priklausančys objektai, pateikti vienodomis vaizdavimo sąlygomis.

Šiame skyriuje aprašomi dažniausiai naudojami metodai kelio juostų ir kelio kraštų atpažinimui, sekimui ir prognozavimui, jų naudojimo sritys, privalumai bei trūkumai. Remiantis literatūros analize išrenkamas ir aprašomas tiksliausias ir greičiausias kelio juostų ir kelio kraštų atpažinimo metodas bei veikimo etapai.

Iki šiol sukurta daug kelio ženklavimo ir ribų nustatymo algoritmų. Vienas iš fundamentalių kelio juostų atpažinimo metodų yra Hough transformacijos (angl. *Hough Transformation*) (toliau - HT) taikymas paveiksliukui, kuris buvo apdorotas briaunų išskyrimo operatoriumi, kadangi HT transformacija operuoja tik tiesioms linijoms priklausančiais taškais ir nesugeba įvertinti pašalinių duomenų (Bahgat 2008; Mori 2004; Amemiya 2004; Schreiber 2005; Assidiq 2008). Vienas žinomiausių ir optimaliausių briaunų aptikimo metodų yra Canny algoritmas. Po HT algoritmo taikymo išrenkama pora kelio juostų, geriausiai atitinkančių tiesios linijos modelį. Viena iš daugelio šios metodikos problemų yra ta, jog briaunų aptikimo metodu apdorotame paveiksliuke esantis triukšmas gali turėti tiesios linijos savybių. Triukšmui paveiksliuke galima priskirti kelio dangos skilimus, senos ir naujos kelio dangos susikirtimo skirtumus, informacinį ženklavimą, tekstą, nurodomąsias rodykles. Tokiais atvejais HT algoritmas gali neteisingai įvertinti šį triukšmą kaip preliminaras kelio ženklavimo juostas.

Kryptinis paveiksliuko nagrinėjimas (angl. *Middle-to-Side*) - dar vienas dažnai naudojamas kelio juostų išskyrimo metodas (Kai 2003; Ieng 2003; Wang 2006). Šis metodas operuoja briaunų operatoriumi apdoroto paveiksliuko duomenimis. Kelio juostai priklausančių pikselių paieška pradedama nuo vidurio į kraštus kol randamas nenulinis pikselis (briauna) arba teigiama/neigiama gradientų pora iš abiejų pusių. Ši operacija atliekama nuo paveiksliuko apačios iki viršaus (Kai 2003; Wang 2006). Šis metodas yra ypač tikslus automagistraliniuose

keliuose, kur kelio danga yra gerai prižiūrima. Daugiausia problemų kyla anksčiau išvardintais atvejais, kai kelio ruožo paveiksliuką sudaro triukšmas (netolygi kelio danga, informacinis ženklėjimas, nurodomosios rodyklės). Taikant šį metodą, triukšmui priskiriami objektai gali būti arčiau vidurio (kelio juostos paieška pradedama nuo vidurio). Tokiu atveju triukšmui priklausantys objektai bus identifikuoti kaip kelio juostos segmentai. Be to šis metodo rezultatai tampa nenuspėjami kai kelio juostos žymėjimas yra brūkšninis.

Spalvinėmis ypatybėmis paremtas kelio juostų atpažinimas. Šis metodas nustato kelio ženklėjimo juostas bei kraštus pagal žemiausio lygio ypatybes – ryškiai nudažytas kelio juostas arba kelio kontūro kraštus, kurių atpažinimui naudojami tradiciniai segmentavimo metodai. Dažniausiai šie metodai yra labai jautrūs pašaliniam triukšmui, todėl blogėja duomenų segmentacijos rezultatai. Kelio juostų žymėjimas yra išskiriamas atliekant operacijas atskirai kiekvienai paveiksliuko spalvinei komponentei (Tsai 2006; Cheng 2006; Li 2003; Chin 2005). Cheng (2006) ir Li (2003) siūlo RGB paveiksliukų konvertavimą į atskirą spalvinę erdvę. Tsai (2006) taip pat siūlo RGB paveiksliukų konvertavimą į atskirą spalvinę erdvę, tačiau ši erdvė neturi priklausyti nuo intensyvumo. Pagrindinė šių spalvinėmis ypatybėmis paremtų metodų problema yra ta, kad kelio ruožo apšvietimas nėra pastovus ir keičiasi kiekviename kadre. Dėl šio faktoriaus, vykdamas kelio juostų spalvinę segmentaciją ir taikant ribinės reikšmės operaciją, dauguma kelio juostai priklausančių pikselių nepatenka į ribinės reikšmės intervalą ir yra atmetami. Chin (2005) siūlo metodą, kuris operuoja tik su iš anksto fiksuotu spalvinių reikšmių intervalu. Tačiau šis metodas tinka tik tam tikro tipo kelio ruožo nagrinėjimui ir netinka atvejais, kai kelio ruožo spalvinės ypatybės staiga keičiasi dėl kelio paviršiaus medžiagos skirtumų.

Kelio juostų atpažinimui yra naudojama globalios padėties nustatymo įrangos (angl. *Global Positioning System*) (toliau – GPS) ir lazerinių sistemų (angl. *Light Detection and Ranging*) (LIDAR) jutiklių duomenys. Pavyzdžiui, Tsogas (2007) siūlo GPS įrangos su skaitmeniniais žemėlapiais pagalba nustatyti transporto priemonės poziciją kelyje ir iš duomenų bazės pagal koordinatas nustatyti kelio juostas. Tačiau GPS įranga turi trūkumų. GPS įranga veikia tik po atviru dangumi ir privalo būti atnaujinta naujausiais skaitmeniniais žemėlapiais. GPS pozicijos nustatymo paklaida svyruoja iki kelių metrų. Ši paklaida yra didelė norint lokalizuoti kelio juostų poziciją. Europos keliuose šiuo metu lazerinė įranga yra naudojama kelio juostų ir kelio kraštų aptikimui (Trzebiatowski 2004; Sparbert 2001). Išilgai kelio kraštų yra statomi lazerio spindulį atspindintys kuoleliai. Šie kuoleliai statomi kas 50 metrų arba tokiu atstumu, kad būtų matomi iš toli. Panašiai kaip ir naudojant GPS įrangą, šis metodas kelio juostų poziciją įvertina pagal grįžtamąją lazerio spindulio informaciją. Tokios metodikos taikymas yra

teisingas tik tuo atveju, kai kelio tipas yra vienos juostos greitkelis. Vienos juostos kelias užtikrina sėkmingą lazerio spindulio grįžimą į siuntėjo sistemą, kadangi nebus kitų kelių užstojančių transporto priemonių. Tai yra pagrindinė šio metodo problema.

Vieni iš populiariausių kelio juostų nustatymo metodų yra ALVINN (Pomerleau 1989; Kluwer 1997), LANA (Kreucher 1999) ir GOLD (Bertozzi^A 1998). Šie metodai paremti neuroninių tinklų idėja. Tai reiškia, kad prieš pradedant kelio juostų atpažinimą, yra privalomas apmokymas ir kelio juostų duomenų bazės sudarymas. Šių metodų algoritmai operuoja labai dideliais kiekiais duomenų, gautais apmokymo metu. Todėl nors kelio juostų atpažinimo rezultatų tikslumas yra aukštas, šie metodai reikalauja pradinių apmokymo duomenų, o algoritmo veikimas gali tapti nenuspėjamas, kai įvesties duomenys neatitiks apmokymo duomenų tipo.

Borkar A. ir Hayes M. (2009) siūlo vieną iš greičiausių ir tiksliausių kelio juostų ir kraštų atpažinimo metodų – angl. *Robust Lane Detection and Tracking with RANSAC and Kalman filter* (toliau – RLDT-RK). Šis metodas yra pritaikytas kelio juostų ir kraštų atpažinimui nakties metu, kai transporto priemonės žibintų šviesa išryškina kelio juostų ir kraštų atspalvius, tačiau pakeitus pradinį vaizdo apdorojimą, šio algoritmo pagrindą galima naudoti kuriant naują kelio juostų ir kelio kraštų atpažinimo metodą. RLDT-RK metodas skirstomas į penkis pagrindinius etapus:

- Paveiksliuko atvirkštinės projekcijos transformacijos taikymas (angl. *Inverse perspective Mapping*) (toliau - IPM) (Mallot 1991; Maud 2004; Bertozzi^B 1998).
- Vaizdo paruošimas. Canny briaunų išskyrimo operatoriaus taikymas (Canny, 1986).
- Standartinės Hough transformacijos taikymas preliminarinių kelio juostų išskyrimui (Umbaugh, 2011).
- RANSAC (angl. *RANdom SAmple Consensus*) metodo taikymas kelio juostų išskyrimui ir neteisingų duomenų šalinimui (Ruzgienė, 2005).
- Kalmano filtro (angl. *Kalman filter*) taikymas kelio juostų ir kraštų sekimui bei pozicijos kitame kadre prognozavimui (Welch, 2006).

IPM transformacija aprašyta skyriuje 3.2.2. Canny briaunų atpažinimo metodas - 2.2.1; Hough transformacija – 2.4; RANSAC metodas – 2.5. Kelio juostų, kraštų sekimas ir prognozavimas naudojant Kalmano filtrą - atitinkamai 1.1 ir 1.2 skyriuose.

1.1. Kelio juostų ir kraštų sekimas

Svarbiausia charakteristika objekto, esančio kelyje, sekimo procese yra tai, jog kelyje šie objektai dažniausiai juda tiek savo, tiek stebėtojo atžvilgiu. Kelio objektas – tai bet koks objektas esantis vaizdą fiksuojančios kameros, nukreiptos kelio kryptimi, matymo lauke. T.y. tiek judančios, tiek stovinčios šalikėlėje transporto priemonės, šviesoforai bei kelio ženklai, pastatai, medžiai bei krūmai. Kelio objektu taip pat vadinamos konkrečios kelio dalys, kaip kelio ženklinimas bei kelio briaunos. Kadangi kelias yra tiesios arba vingiuotos krypties, arba su posūkiais stačiu kampu – sankryžomis, kelio ženklinimas bei briaunos privalo atitikti kelio kryptį.

Transporto priemonė su įmontuota vaizdo kamera, judėdama kelio kryptimi, sudaro atvirkštinį įspūdį – transporto priemonė tampa statišku stebėtoju, o kelio objektai – judančiais, dinamiškais stebimaisiais. Todėl egzistuoja keletas neigiamų aspektų analizuojant tokį judėjimą. Vaizdai yra operuojami tik iš vienos vaizdo kameros, todėl vienintelė turima informacija yra pasaulio projekcija. Perspektyva, pateikiama šios projekcijos, duoda skirtingą judesį skirtinguose vaizdo dalyse. Tai vadinama paralakso (angl. *Parallax*) efektu: objektai, kurie yra arčiau vaizdo kameros, duoda didesnę postūmį vaizde negu objektai, kurie yra toliau nuo tos pačios vaizdo kameros, net jei realiame pasaulyje šių objektų postūmio parametrai yra vienodi (Welsh 2004).

Kelio ženklinimo juostos bei kelio briaunos yra taip pat dinamiško kitimo vaizdo kameros atžvilgiu. Todėl daliniam jų išskyrimui dažnai naudojamas vienas iš judesio išskyrimų algoritmų – fono atimtis (angl. *Font subtraction*). Šis metodas yra gana efektyvus judantiems objektams vaizde išskirti. Fono atimties metodas susiveda į turimo vaizdo atimtį iš fono vaizdo, kuris turi būti išgautas iš anksto, kai jame dar nėra ieškomo objekto. Po atimties rezultato vaizde lieka tik du judantys objektai:

$$|frame_i - background_i| > Th, \quad (1)$$

kur $frame_i$ yra nagrinėjamas naujas vaizdas, $background_i$ - fono vaizdas, Th - pasirinktas slenkstis. Šis metodas ypač gerai tinka taikomųjų programų, kurių nagrinėjamas fonas nesikeičia, realizavimui. Tai galėtų būti kameros vaizdo kelio stebėjimas. Šio metodo pagrindinis privalumas yra tas, kad jis yra greitas skaičiavimo prasme. Tačiau fono atimties metodas turi kelis akivaizdžius trūkumus. Metodas grąžina klaidingus rezultatus, jei, pvz.: objekto, judančio stebėtojo atžvilgiu, taškų reikšmės sutampa su fono taškų reikšmėmis tam tikroje vaizdo srityje arba įvyksta apšvietimo pokyčiai dėl paros laiko pasikeitimo arba dėl nenumatytų priežasčių, pvz., debesys, kitos transporto priemonės, medžiai, pastatų šešėliai. Norint pagerinti fono

atimties metodą, reikia realizuoti fono vaizdo atnaujinimo (prisitaikymo) mechanizmą (angl. *Adaptive background*). Pagrindinis tikslas yra gauti kuo geresnį fono vaizdą. Egzistuoja daug metodų, sprendžiančių šią problemą. Viena iš paprasčiausių idėjų - prilyginti fono vaizdą prieš tai esančiam kadru:

$$|frame_i - frame_{i-1}| > Th, \quad (2)$$

tačiau šis metodas veikia tik tam tikromis sąlygomis, kurios priklauso nuo objekto judėjimo greičio bei kadrų per sekundę skaičiaus (dažnio). Be to, šis metodas yra labai jautrus slenksčio Th reikšmės kitimui. Fono gavimui naudojamas kelių praėjusių kadrų vidurkis arba vidurkis išreikštas šia formule:

$$|background_i = \alpha * frame_i + (1 - \alpha) * background_i|, \quad (3)$$

kur α yra mokymosi tempas (greitis).

Kitas būdas, naudojamas sekant judantį objektą, yra optinio srauto skaičiavimas vaizde. Nors metodai, apskaičiuojantys optinį srautą, yra gana lėti skaičiavimo prasme (palyginti su, pvz., fono atimties metodu), tačiau šie metodai grąžina ne tik judesio taškus ir regionus, bet ir judesio vektorius. Tai padidina sugebėjimą aptikti kelio juostas ar briaunas, net jei jos yra dalinai uždengtos kitų transporto priemonių arba kliūčių.

Block Matching Algorithm (toliau - BMA) (Barjatya 2004). BMA padalina nagrinėjamą vaizdą į nedidelius, fiksuoto dydžio blokus ir lygina juos su ankstesniojo kadro blokais. Suformuojamas optinis srautas. Kelio juostos bei briaunos yra aptinkamos grupuojant blokus, turinčius panašius judesio vektorius.

Plačiai žinomas *Horn-Schunck* algoritmas taip pat naudojamas optinio srauto apskaičiavimui (Bruhn 2004). Šis iteracinis metodas priklauso algoritmų klasei, kuri žinoma kaip relaksacijos algoritmų klasė (angl. *Relaxation algorithm class*). Po pirmos iteracijos srauto vektoriai rodo tik kraštų judesį. Kai iteracija tęsiasi, vyksta vektorių išlyginimas. Rezultatas - vektorių laukas. Tačiau šis vektorių laukas turi kur kas daugiau triukšmo ir keli vektoriai būna visiškai neteisingi.

1.2. Kelio juostų ir kraštų pozicijos prognozavimas

Optinio srauto skaičiavimo metodai padidina sugebėjimą vykdyti sėkmingą kelio juostos sekimą, tačiau reikalingas specialus įrankis, sugebantis vykdyti sekimą, jei kelio juostos stebėjimo lauke ilgesniam laikui atsiranda pašalinis objektas - transporto priemonė, aplinkinių objektų šešėliai, arba sekamas objektas yra uždengiamas kitu objektu. Todėl judesio išskyrimo algoritmai negalės aptikti reikiamo objekto. Šiai problemai spręsti yra naudojami duomenų įvertintojai. Po to, kai judesys vaizde yra atpažintas, galima efektyviai sekti judantį arba nekintantį objektą, prognozuojant nekintančio objekto koordinates kitame kadre, remiantis duomenimis iš praeitų kadrų. Šiai prognozei įvykdyti dažnai naudojamas Kalmano filtras (Welch 2006). Šio filtro algoritmas prognozuoja tam tikros sistemos būseną. Kalmano filtras sprendžia bendrą problemą prognozuodamas sistemos būseną X diskrečiajame laiko procese, kuris yra apibrėžiamas tiesine tikimybine lygtimi:

$$x_{k-1} = Ax_k + w_k. \quad (4)$$

Matavimas Z apibrėžiamas:

$$z_k = Hx_k + v_k, \quad (5)$$

kur atsitiktiniai dydžiai w_k ir v_k yra atitinkamai proceso ir matavimo triukšmas. Jie yra nepriklausomi vienas nuo kito, be to, triukšmas yra tolygus su normaliniu tikimybinu pasiskirstymu (angl. *Normal probability distribution*). Kai filtras prognozuoja sistemos būseną, jo parametrai yra koreguojami perskaičiuotais matavimais Z . Vektorius, nusakantis matavimą Z , atitinka sistemos būsenos vektorių. Pradinė sistemos būsena gali būti parinkta atsitiktinai.

Jei lygtis, kuri apibrėžia sistemos būsenos pakeitimą yra netiesinė, naudojamas išplėstinis Kalmano filtras (angl. *Extended Kalman filter*) (toliau - EKF).

Kalmano filtras arba išplėstinis Kalmano filtras naudojami judančio objekto koordinatėms kitame kadre prognozei. Dažniausiai šios koordinatės apskaičiuojamos remiantis judančio objekto greičiu, objekto koordinatėmis vaizde bei kadrų skaičiumi per sekundę. Taip pat Kalmano filtrą galima naudoti kaip uždengimo problemos sprendimo būdą. Vektorius nusakantis sistemos būseną yra apibrėžiamas šiuo būdu:

$$x(k) = (\Delta x_{center(k)}, \Delta y_{center(k)}, \Delta x_{size(k)}, \Delta y_{size(k)})^T, \quad (6)$$

kur $\Delta x_{center(k)}$ ir $\Delta y_{center(k)}$ yra sekamo objekto centro x ir y koordinatų pokytis, o $\Delta x_{size(k)}$ ir $\Delta y_{size(k)}$ yra objekto mastelio pokytis.

Kalmano filtrą galima naudoti ne tik prognozuojant objekto koordinates kitame kadre, bet ir jo kontūrus – kelio juostas arba briaunas. Kontūrų aproksimacijai dažnai naudojami kubinės daugianarės antros eilės išvestinės funkcijos - splainai. Šiam splainui siūloma naudoti 12 kontrolinių taškų. Būtent iš šių x , y koordinatų porų sudaromas būsenos vektorius. Tai paprasčiausias Kalmano filtro panaudojimo atvejis, kai matavimo vektorius atitinka būsenos vektorių. Šis galingas Kalmano filtro realizavimas leidžia sėkmingai spręsti objektų uždengimo problemą.

Apibendrinimas. Kelio ženklavimo juostos yra ne visada ryškios, su laiku tampa išblukusios, pašalinis objektas gali uždengti tam tikros ženklavimo juostos pabaigą ir kito tipo juostos pradžią, o pastaroji bus traktuojama kaip ta pati vientisa juosta. Kelio kraštai bei briaunos dažnai būna nematomos dėl šalikelėje stovinčių transporto priemonių, besikeičiančių oro sąlygų, purvo bei sniego. Dėl šių priežasčių Kalmano filtro rezultatai kelio juostų atpažinime nėra tikslūs realioje, pilnoje pašalinių trukdžių aplinkoje. Šis metodas tinka kelio juostų bei kraštų atpažinimui automagistraliniuose keliuose, kur transporto priemonių eismas nors ir intensyvus tačiau dėl didelio greičio laikomasi didesnio atstumo nei užmiesčio ar miesto keliuose. Be to, Kalmano filtro algoritmas kelio juostų atpažinime sudarytas iš dviejų pagrindinių etapų – kelio juostos atpažinimas viename kadre ir jos sekimas kituose kadruose. Dėl besikeičiančių aplinkos sąlygų, kelio juostos ar krašto sekimas nėra tikslus bei lėtas atliktų operacijų ir rezultatų naudos santykio išraiška.

2. Briaunų ir linijų vaizde atpažinimo metodai

Vaizdų analizė reikalinga naudingos informacijos gavybai iš didelio kiekio žemo lygio vaizdo elementų (pikselių). Šiame skyriuje nagrinėjami kraštų bei linijų nustatymo ir vaizdų segmentacijos metodai, jų svarba kelio ženklavimo juostų bei kelio kraštų atpažinimui.

Vaizdų segmentacijos tikslas yra aptikti sritis, kurios vaizduoja objektus ar reikšmingas jų dalis. Vaizdo dalijimas į sritis pagal tai, koku objektu yra domimasi, yra reikalingas bet kokiai analizei aukštesniame nei pikselių lygyje atlikti. Realių objektų, menamų objektų, šešėlių atpažinimui, kelio juostų, kontūro ar bet kokio kito dominančio objekto radimui yra reikalingos tam tikros segmentacijos formos. Vaizdų segmentacijos metodų efektyvumas išskiriamas pagal vienalytiškumą bei kontrastą tarp objekto kraštų. Dauguma segmentacijos algoritmų yra šių dviejų apibrėžimų modifikacijos, papildymai ar deriniai. Vienalytiškumą ir kontrastingumą

nusako tokie požymiai kaip pilkumo lygis, spalva ar tekstūra. Po pradinės segmentacijos galima atlikti antro lygio segmentacijos procesą, įtraukiantį tokius požymius kaip pilkumo lygis, spalva ar tekstūra. Vėliau galima į segmentacijos procesą įtraukti aukštesnio lygio požymius – formą ir spalvą.

Vaizdų segmentacijos metodai skirstomi į tris pagrindines grupes:

- Sričių didinimas ir mažinimas;
- Grupavimas;
- Ribų nustatymas.

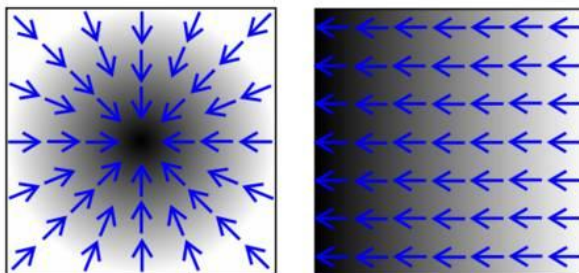
Sričių didinimo ir mažinimo metodai taikomi eilutėmis ir stulpeliais pagrįstiems domenams, tuo tarpu grupavimo metodai gali būti taikomi bet kokios rūšies domenams, kaip pavyzdžiui bet kokio N -mato, spalva ar kita savybe pasižyminti erdvė, kurios komponentai gali būti sudaryti iš erdvinių domenų koordinatų. Todėl sričių didinimas ir mažinimas gali būti laikomas grupavimo metodų poaibiu, bet yra ribojamas erdvinio domeno. Erdviniai domenai vaizduose yra svarbiausi. Ribų nustatymo metodai yra kraštų nustatymo metodų papildymai.

Briauna paveiksluke vadiname:

- objekto ribą;
- taškus (pikselius), ženkliai keičiančius atvaizdo ryškumą;
- atvaizdo funkcijos kitimą kaimyninio taško (pikslio) atžvilgiu;
- vektorinį kitimą (gradiento dydis, briaunos kryptis).

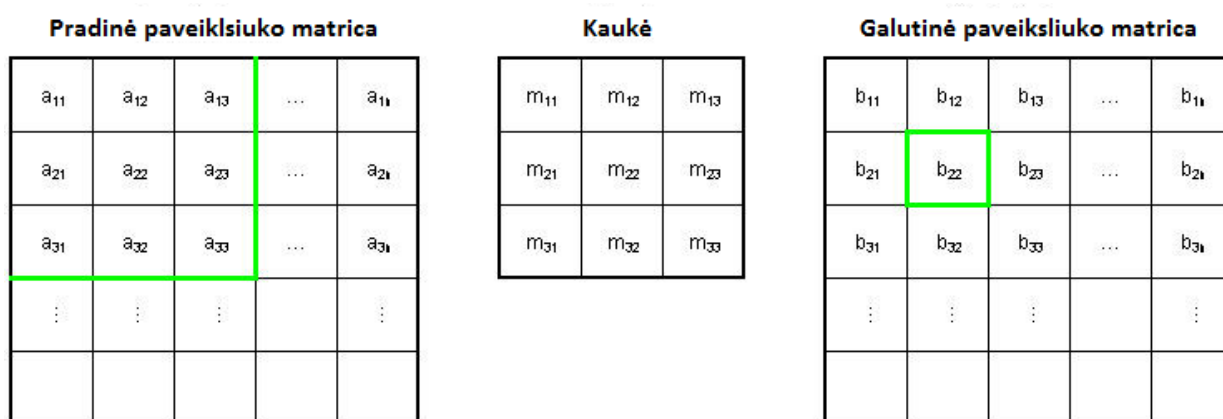
Briaunų ir linijų atpažinimo operatorius – tai metodas, atliekantis tam tikras operacijas su matricos gradientu ir nurodantis intensyvumo funkcijos pokytį tarp skirtingų pikselių reikšmių. Operatorius apskaičiuojamas kaukės matricą centruojant virš kiekvieno pikselio. Jei apskaičiuota matricos ploto reikšmė viršija tam tikrą ribą, centrinis pikselis laikomas briauna arba briaunos dalimi.

Gradientas – tai diferencialinis operatorius, vaizduojantis reikšmių vektorinį išsidėstymą intensyvėjimo kryptimi (1 pav.). Tai yra pagrindinis faktorius, pagal kurį identifikuojama paveiksluko briauna.



1 pav. Skaliarinio lauko gradientas

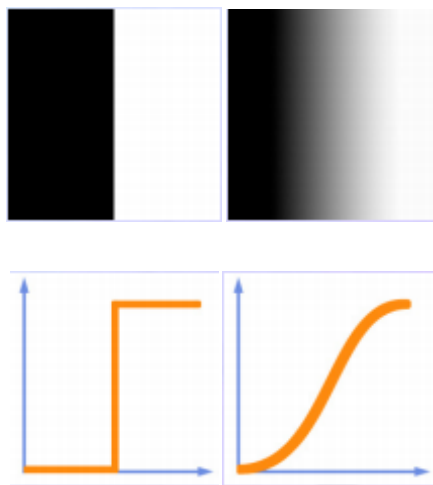
Dauguma briaunų ir linijų nustatymo metodų naudoja sąsūkos (angl. *Convolution*) kaukes – tai koeficientų matricos, dažniausiai žymiai mažesnės dimensijos nei nagrinėjamo paveiksluko (2 pav.).



2 pav. Paveiksluko sąsūkos kaukės naudojimas

Briaunų nustatymo būdai naudojami kaip pirmas žingsnis linijų nustatyme. Kraštų nustatymas taip pat naudojamas ieškant sudėtingo objekto ribų žymint galimus kraštų taškus atitinkamose atvaizdo vietose, kur yra smarkus ryškumo pakitimas. Triukšmas vaizde yra nereikalinga informacija, iškreipianti vaizdo vientisumo funkciją. Triukšmas vaizde gali sukelti problemų daugeliui kraštų nustatymo operatorių. Todėl geriausia triukšmą pašalinti arba sumažinti kiek įmanoma daugiau. Dirbant su triukšmo efektais reikia rasti kompromisą tarp kraštų nustatymo jautrio ir tikslumo. Pavyzdžiui, jei parametrai yra tokie, kad kraštų nustatymas turi būti labai jautrus, tai reikės rasti daugybę kontūro taškų, kurie priklausys triukšmui. Jei parametrai įtakoja briaunų nustatymo metodo mažesnį jautrumą, galima netekti reikalingos kontūro dalies. Didelė kraštų nustatymo kaukė arba aukštesnis pilkumo lygių slenkstis sumažina triukšmo efektą, tačiau rezultate galima netekti svarbių ir reikalingų kontūro taškų. Briaunų nustatymo operatoriai yra paremti idėja, kad informacija apie kontūrą vaizde yra randama ieškant

ryšio tarp kaimyninių pikselių. Jei pikselio pilkumo lygmens reikšmė yra panaši į aplinkinių pikselių, tai greičiausiai tame taške jokio kontūro nėra, tačiau jei kaimyninių pikselių pilkumo lygių reikšmės yra labai skirtingos, tai gali reikšti, kad taškas priklauso kontūrai. Kitaip tariant, kontūrai aptinkami remiantis pilkumo lygių reikšmių nevientisumu, skirtingumu. Idealu - kai briauna skiria du skirtingus, ryškius objektus. Praktikoje, kontūro atskyrimo priežastimi dažniausiai būna spalvos, tekstūros arba ryškus paveikslėlio apšvietimo pasikeitimas. 3 pav. iliustruoja skirtumą tarp idealaus ir realaus kontūro. Staigus ryškumo pasikeitimas charakterizuoja idealų kontūrą. Dešinesniuose paveiksluose vaizduojamas realus, palaipsniui kintantis vaizdas.



3 pav. Skirtumai tarp idealios ir realios briaunos

Toks laipsniškas kitimas yra neryškaus kontūro atsiradimo priežastis. Kairysis paveikslas iliustruoja idealią briauną, kai pikselių spalvų reikšmės kardinaliai skiriasi.

Briaunų aptikimo metodai yra skirstomi į dvi pagrindines grupes (Umbaugh 2011):

- gradiento operatorius;
- algoritminius metodus.

Operatoriai atlieka tik vieną etapą – briaunų išskyrimą. Algoritminiai metodai atlieka keletą vaizdo apdorojimo, įvertinimo ir briaunų išskyrimo etapų.

2.1. Briaunų ir linijų atpažinimo gradiento operatoriai

Gradiiento operatoriai yra paremti pilkumo lygio funkcijos pirmos ir antros eilės išvestinėmis. Išvestinė rodo funkcijos kitimo greitį – briaunos pilkumo lygio kitimą. Kai pilkumo lygis yra konstanta – pirmos eilės išvestinė lygi nuliui, o kai tiesinis - ji lygi nuolydžiai tiesiai

linijai. Antros eilės išvestinė yra teigiama pasikeitimo tamsioje briaunos pusėje, neigiama – pasikeitimo šviesioje pusėje, ir nulis visur kitur (Umbaugh 2011).

Dauguma gradiento operatorių briaunų ir linijų atpažinimui naudoja pirmos eilės pilkumo lygio funkcijos išvestinę.

Robertso operatorius (angl. *Roberts operator*) – tai paprastas vaizdo pirmos eilės išvestinės įvertinimas. Šis metodas paryškina kraštų taškus, negrąžina jokios informacijos apie briaunų kryptį. Tai yra pati paprasčiausia briaunų aptikimo operacija, kuri geriausiai veikia su dvejetainiais paveikslėliais (pilko atspalvio paveikslėliai gali būti konvertuojami naudojant ribinės reikšmės filtravimo operaciją ir dvejetainį paveikslėlį). Šio metodo operatorius sudarytas iš poros kvadratinų sąsūkos kaukių (4 pav.). Antroji kaukė yra paprasčiausiai statmenai pasukta pirmoji. Šios kaukės skirtos reaguoti į briaunas einant 45 laipsnių kampu abejomis statmenomis kryptimis. Šios dvi kaukės gali būti taikomos tiek paveikslui, tiek atskirai, norint gauti gradiento reikšmes kiekviena kryptimi. Taip galima šias kaukes apjungti norint gauti absoliučią gradiento reikšmę kiekviename pikselioje ir gradiento kryptį.

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

4 pav. Robertso operatoriaus stulpelių ir eilučių kaukės – G_x ir G_y

Gradiiento absoliuti reikšmė apskaičiuojama:

$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}. \quad (7)$$

Tačiau aproksimuotą reikšmę galima apskaičiuoti žymiai greičiau:

$$|G| \approx |G_x| + |G_y|. \quad (8)$$

Briaunos orientacijos kampas apskaičiuojamas:

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) - \frac{3\pi}{4}. \quad (9)$$

Egzistuoja dvi Robertso operatoriaus formos. Pirmoji susideda iš keturkampių sumos pagrindo, t.y. susumotos skirtingų įstrižų kaimynų keturkampių, kaip pavyzdžiui:

$$\sqrt{[I(r,c) - I(r-1, c-1)]^2 + [I(r,c-1) - I(r-1, c)]^2}. \quad (10)$$

Antroji Robertso operatoriaus forma yra skirtingų ryškių įstrižų kaimynų suma:

$$|I(r,c) - I(r-1, c-1)| + |I(r,c-1) - I(r-1, c)|. \quad (11)$$

Antroji lygties forma dažnai naudojama praktikoje dėl skaičiavimų efektyvumo - kompiuteriui yra lengviau ir greičiau apskaičiuoti absoliutinę nei kvadratinę reikšmę.

Sobelio operatorius (angl. *Sobel operator*) – apskaičiuoja gradientą, naudodamas eilučių bei stulpelių kaukes. Operatorius sudarytas iš poros 3 x 3 matmenų kaukių (5 pav.). Antroji kaukė yra pirmoji pasukta statmenai.

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

5 pav. Sobelio operatoriaus stulpelių ir eilučių kaukės – G_x ir G_y

Remiantis vienmatės analizės teorija (Laplaso metodas), tas pats galioja ir dviejų matmenų atvejais tol, kol egzistuoja tiksli aproksimacija paveiksluko antros eilės išvestinės skaičiavimui. Sobelio operatorius atlieka 2D erdvinio gradiento skaičiavimus. Šis metodas naudojamas skaičiuojant apytikslę absoliutaus gradiento reikšmę kiekviename nespaltoto paveiksluko pikselėje. Kaukė dažniausiai yra žymiai mažesnė nei paveiksluko duomenų matrica. Gradiento reikšmė skaičiuojama naudojant šią formulę:

$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}. \quad (12)$$

Aproksimuota gradiento reikšmė:

$$|G| \approx |G_x| + |G_y|. \quad (13)$$

Briaunos orientacijos kampas skaičiuojamas:

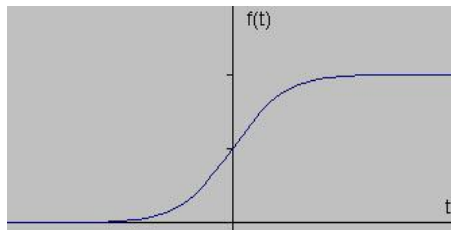
$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right). \quad (14)$$

Previto operatorius (angl. *Prewitt operator*) - panašus į Sobelio operatorių, skiriasi tik kaukių koeficientai (6 pav.).

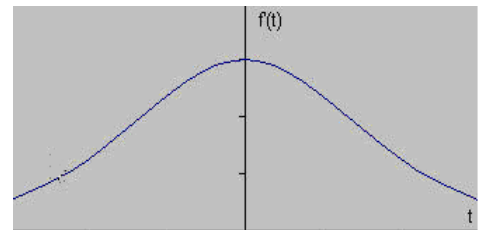
$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +1 & +1 \end{bmatrix}$$

6 pav. Previto operatoriaus stulpelių ir eilučių kaukės - G_x ir G_y

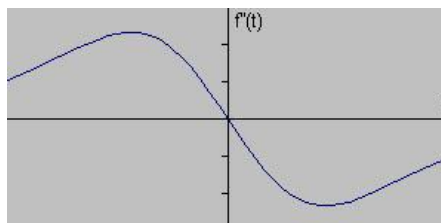
Laplaso operatorius. Laplaso metodas paremtas tuo, jog briaunų aptikimui paveikslėlyje ieškoma nulinių antros eilės išvestinių susikirtimų. Briauna paveiksliuke sudaro vienos dimensijos formą, todėl skaičiuojant paveiksliuko intensyvumo kitimo funkcijos išvestinę, galima apskaičiuoti briaunos poziciją. 7 pav. vaizduoja briaunos spalvos intensyvumą. Apskaičiavus šio signalo gradientą, kuris yra pirmos eilės išvestinė nuo t , gaunamos 8 pav. vaizduojamos reikšmės. Akivaizdu, kad išvestinė rodo maksimumą centrinėje 7 pav. dalyje. Šis briaunų atpažinimo metodas yra charakteringas gradiento metodų šeimai ir apima Sobelio operatorių. Pikselio reikšmė traktuojama kaip briaunos dalis, jei gradiento reikšmė viršija tam tikrą iš anksto nustatytą reikšmę (angl. *threshold*). Kaip minėta anksčiau, briaunų pikselių intensyvumo reikšmės bus didesnės nei supančiųjų. Kai briauną žyminti reikšmė yra žinoma, gradiento reikšmė lyginama su ribine (*threshold*) reikšme. Tokiu būdu iš paveiksliuko išskiriamos briaunos. Taip pat, jeigu pirmos eilės išvestinės reikšmė yra maksimali, antros eilės išvestinė visada bus lygi nuliui. Todėl briaunų atpažinimui galima naudoti antros eilės išvestinės nulines reikšmes. Nėra žina briaunos krypties. Šio metodo antros eilės išvestinės grafikas vaizduojamas 9 pav.



7 pav. Paveiksliuko spalvos intensyvumo kitimo funkcija



8 pav. Apskaičiuotas funkcijos gradientas



9 pav. Laplaso antros eilės išvestinės grafikas

Prie gradiento operatorių taip pat priskiriamos taip vadinamos kompaso kaukės. Šios kaukės taip vadinamos, kadangi visos kaukės aprašomos vieną kaukę sukančiomis visomis kompaso kryptimis.

Kiršo kompaso kaukė (angl. *Kirsch compass Mask*). Kiekvienam paveiksluko pikseliui atskirai taikoma kiekviena krypčių kaukė: šiaurės (Š), vakarų (V), pietų (P), rytų (R), šiaurės vakarų (ŠV), pietvakarių (PV), pietryčių (PR), šiaurės rytų (ŠR) (10 pav.). Briaunos kryptis nustatoma pagal kaukės, grąžinusios didžiausią reikšmę, kryptį.

$$\begin{aligned} \check{S} &= \begin{bmatrix} -3 & -3 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & 5 \end{bmatrix} & V &= \begin{bmatrix} -3 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} & P &= \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} & R &= \begin{bmatrix} 5 & 5 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} \\ \check{SV} &= \begin{bmatrix} 5 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & -3 & -3 \end{bmatrix} & PV &= \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & -3 \end{bmatrix} & PR &= \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & 5 \end{bmatrix} & \check{SR} &= \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & 5 & 5 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

10 pav. Kiršo kompaso kaukės

Robinsono kompaso kaukė (angl. *Robinson compass Mask*). Šių kaukių taikymas yra toks pat kaip ir Kiršo kompaso kaukės, tačiau paprastesnis, kadangi visų kaukių koeficientų reikšmės sudaro koeficientai - 0, 1, 2, o kaukės yra simetrinės krypties ašimi (11 pav.). Krypties ašį sudaro vien nulinės reikšmės, todėl dažniausiai taikomos tik pirmos keturios kaukės, likusių kaukių rezultatai gaunami paneigus pirmųjų keturių rezultatus.

$$\begin{aligned} \check{S} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} & V &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix} & P &= \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} & R &= \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -2 \end{bmatrix} \\ \check{SV} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} & PV &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} & PR &= \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} & \check{SR} &= \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

11 pav. Robinsono kompaso kaukės

Galima pastebėti, jog šiaurės (Š) ir pietryčių krypties kaukės yra tokios pačios kaip Sobelio operatoriaus. Šios kaukės gali būti praplėstos jas sukančiomis ratu, o informacija išskiriama bet kuria kryptimi.

2.2. Briaunų ir linijų atpažinimo algoritminiai metodai

Kadangi gradiento operatoriais paremti briaunų ir linijų atpažinimo metodai yra jautrūs triukšmui, prieš tai vaizdas turi būti apdorojamas triukšmo naikinimo operacijomis, dažniausiai Gauso dvimačiu glodinimo filtru (angl. *Gaussian filter*) (Umbaugh 2011). Pagrindiniai briaunų ir linijų išskyrimo metodai yra Canny bei Laplaso ir Gauso algoritmai.

2.2.1. Canny briaunų atpažinimo metodas

Canny briaunų aptikimo algoritmas yra gerai žinomas kaip optimaliausias iš visų briaunų aptikimo metodų. J.Canny tikslas kuriant šį metodą buvo pagerinti tuometinius briaunų atpažinimo algoritmus. Siekiant pagerinti tuometinius metodus, buvo iškelti keli pagrindiniai kriterijai:

- Pats svarbiausias – maža paklaida. Svarbu, kad briaunos paveiksliuke nebūtų neatpažintos ir klaidingai atpažintos kaip briaunos.
- Antrasis kriterijus – tiksli briaunos taškų lokalizacija. Kitaip tariant, minimali atstumo paklaida tarp nustatytų briaunos pikselių bei realiųjų.
- Trečiasis kriterijus – briauna nagrinėjama ir atpažinama tik vieną kartą. Šis kriterijus reikalingas siekiant visiškai panaikinti vienos ir tos pačios briaunos nagrinėjimą kelis kartus.

Vadovaujantis šiais kriterijais, Canny briaunų atpažinimo metodas pirmiausia nuglodina vaizdą ir pašalina triukšmą. Tada randamas paveiksliuko gradientas ir pabrėžiamos vietos, kur spalvos intensyvumas yra kintantis. Kitu žingsniu algoritmas šiose vietose randa ir eliminuoja pikselius, kurie yra ne maksimalios reikšmės. Gradiento reikšmių masyvas apdorojamas histerezės metodu. Histerezės metodas naudojamas pikselių nemaksimumų slopinimui. Šis histerezės metodas filtravimui naudoja dvi ribines reikšmes ir jei reikšmė yra žemiau pirmosios ribinės reikšmės, ji priskiriama nuliui – nepriklauso briaunai. Jei reikšmė yra aukščiau virš didesnės ribinės reikšmės, ji priskiriama ribinei reikšmei – priklauso briaunai. Jeigu reikšmė yra tarp dviejų ribinių reikšmių, ji priskiriama nuliui nebent egzistuoja kelias nuo šio pikselio iki kito su gradiento reikšme, didesne už antrąją ribinę reikšmę.

Canny algoritmo veiksmų seka

1 etapas. Prieš pradedant briaunų aptikimą, būtina paveiksliuką nuglodinti bei pašalinti triukšmą. Kadangi Gauso filtras naudoja paprastą kaukę, šis filtras naudojamas kaip pagrindinis

glodinimo filtras. Kai tinkama kaukė apskaičiuota, Gauso glodinimo filtras gali būti pritaikytas naudojant standartinius metodus. Kaukė dažniausiai yra žymiai mažesnė nei originalus paveikslukas. Kaukė yra projektuojama virš kiekvieno pikselio. Į skaičiavimus įtraukiami tik tie pikseliai, kurie patenka į kaukės regioną. Kuo didesnė kaukė, tuo geriau ignoruojamas triukšmas paveiksliuke. Briaunų aptikimo rezultatai taip pat gerėja, plečiant kaukės dimensijas. 12 pav. vaizduojama standartinė kaukė.

	2	4	5	4	2
	4	9	12	9	4
$\frac{1}{115}$	5	12	15	12	5
	4	9	12	9	4
	2	4	5	4	2

12 pav. Gauso glodinimo filtro operatoriaus kaukė

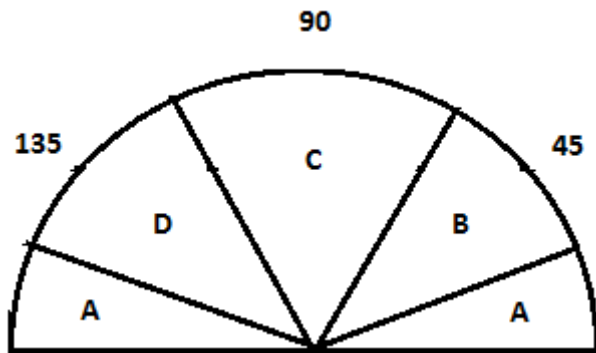
2 etapas. Po paveiksluko glodinimo ir triukšmo šalinimo, kitas žingsnis yra briaunos intensyvumo identifikavimas apskaičiuojant paveiksluko gradientą. Tam naudojamas Sobelio operatorius. Tokiu būdu randamas apytikslis gradiento reikšmės intensyvumas kiekviename taške.

3 etapas. Šiame žingsnyje nustatomos briaunų kryptys naudojant gradientą x ir y kryptimis. Tačiau turi būti įvertinta viena esminių klaidų. Suma x arba y kryptimi gali būti lygi nuliui. Tokiu atveju, briaunos kryptis turi būti pakeista į 90 arba 0 laipsnių, priklausomai kokia kryptimi yra y gradientas. Jei y suma lygi nuliui, kryptis keičiama į 0 laipsnių, kitu atveju – 90 laipsnių. Kampo nustatymo formulė yra tokia pati kaip Sobelio operatoriaus.

4 etapas. Kai briaunos kryptis yra žinoma, kitas žingsnis yra susieti aptiktos briaunos kryptį su kryptimi paveiksliuke. Jeigu paveikslukas yra 5×5 pikselių:

x	x	x	x	x
x	x	x	x	x
x	x	A	x	x
x	x	x	x	x
x	x	x	x	x

Pikselio **A** atžvilgiu įmanomos tik keturios kryptys – 0 laipsnių (horizontalia kryptimi), 45 laipsnių (teigiama diagonale), 90 laipsnių (vertikalia kryptimi) arba 135 laipsnių (neigiama diagonale). Šioje dalyje yra sprendžiama – kuri kryptis yra teisingiausia. Tai nustatoma priklausomai į kurią reikšmę kryptis konverguoja (jei kampas yra 3 laipsniai, reikšmė keičiama į 0 laipsnių – pagal 13 pav. ir 1 lentelę).



13 pav. Canny algoritmo briaunos krypties nustatymas

1 lentelė. Canny algoritmo briaunos krypties kampo nustatymas

Sritis	Srities intervalas	Briaunos krypties kampas
A	$[0^\circ; 22.5^\circ]$ ir $[157.5^\circ; 180^\circ]$	0°
B	$(22.5^\circ; 67.5^\circ]$	45°
C	$(67.5^\circ; 112.5^\circ]$	90°
D	$(112.5^\circ; 157.5^\circ]$	135°

5 etapas. Kai briaunos kryptis yra žinoma, reikia pašalinti nemaksimalias reikšmes turinčius pikselius. Tokiu būdu palei briauną jos kryptimi šalinami pikselių reikšmės (priskiriamos nuliui), kurios traktuojamos kaip nepriklausančios briaunai. Toks metodas suteikia briaunai plonos linijos įvaizdį.

6 etapas. Galiausiai naudojamas histerezės metodas dryžių eliminavimui. Dryžiai yra briaunos kontūro trūkiai, sukelti operatoriaus, kai reikšmės tikrinamos su ribinėmis reikšmėmis (*threshold*). Jei paveikslui yra taikoma viena ribinė reikšmė ir briaunos vidutinis intensyvumas lygus tai ribinei reikšmei, briaunoje atsiras tarpinių vietų. Todėl naudojamos dvi ribinės reikšmės – t_1 ; t_2 .

2.2.2. Laplaso ir Gauso briaunų atpažinimo metodas

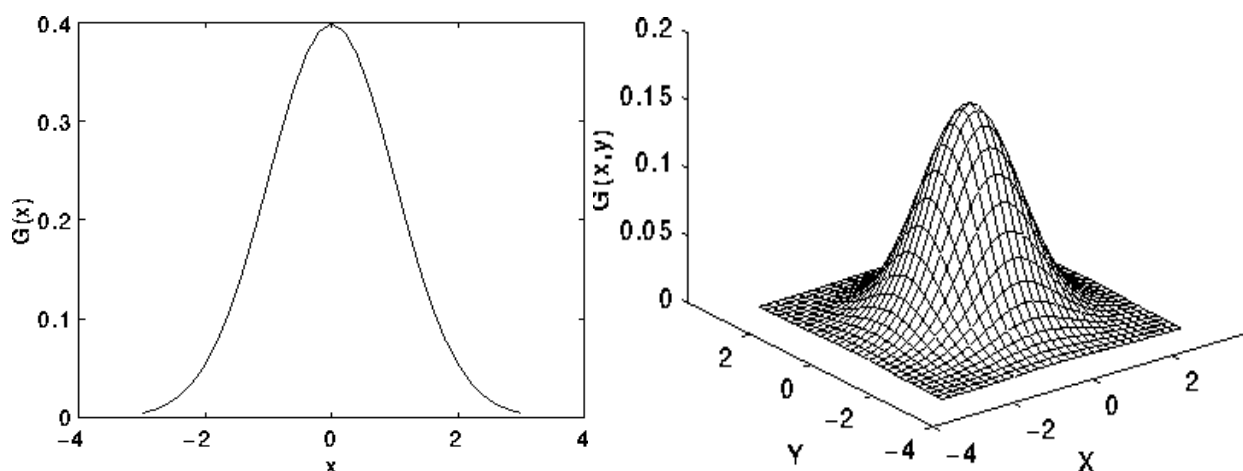
Laplaso ir Gauso metodas (angl. *Laplacian of Gaussian method*) – tai dvimatis izotropinis paveiksluko antros eilės erdvinės išvestinės matavimas. Šis metodas pabrėžia paveiksluko regionų staigų intensyvumo kitimą, todėl dažnai naudojamas briaunų aptikimo procese. Laplaso metodas dažniausiai taikomas paveikslukui, kuris prieš tai buvo nuglodintas Gauso filtru.

Gauso filtras yra paveiksluko filtravimo būdas, suteikiantis išliejimo efektą (angl. *blur effect*), primenantį nesufokusuotos kameros vaizdą. Vienmatis Gauso filtras aprašomas (15).

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (15)$$

Čia σ yra Gauso pasiskirstymo funkcijos standartinis nuokrypis, pasiskirstymo funkcijos vidurkis yra laikomas $x = 0$. Vienmatis Gauso pasiskirstymas su vidurkiu 0 ir standartiniu nuokrypiu $\sigma = 1$ vaizduojamas 14 pav. Filtravimui naudojamas dvimatis Gauso filtras (16) (14 pav.). Gauso pasiskirstymas yra visur teigiamas. Kadangi paveikslukas interpretuojamas kaip dvimatė pikselių reikšmių matrica, atliekant filtravimą Gauso filtras yra diskretizuojamas. Dydis parenkamas toks, kad toliausiai nuo centro nutolusios pikselių reikšmės būtų pakankamai arti nulinės reikšmės.

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (16)$$



14 pav. Vienmatis (kairėje) ir dvimatis (dešinėje) Gauso funkcijos pasiskirstymas, kai vidurkis $x = 0$, $y = 0$, standartinis nuokrypis $\sigma = 1$

Gauso filtro taikymas sumažina klaidingą Laplaso metodo reakciją į triukšmą. Dažniausiai įvesties paveikslukas turi būti nespaltvotas, rezultatas grąžinamas taip pat nespaltvoto paveiksluko formatu. Laplaso metodo reikšmės $L(x, y)$, kur $I(x, y)$ yra paveiksluko pikselio intensyvumo reikšmės, skaičiuojamos pagal šią metodiką:

$$L(x, y) = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2}. \quad (17)$$

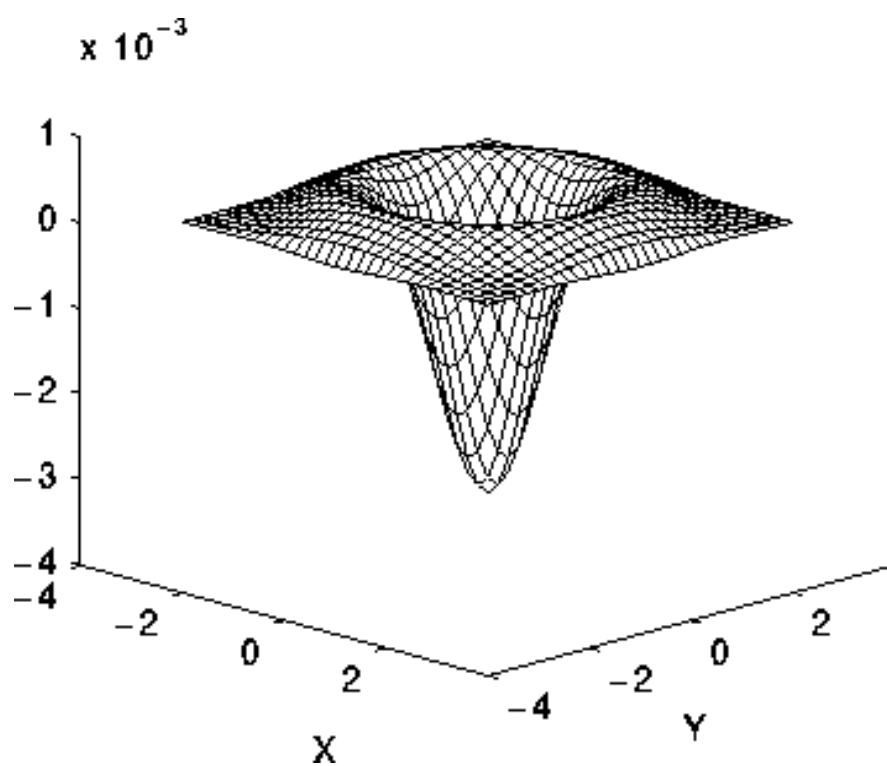
Kadangi įvesties paveikslukas yra atskirų pikselių rinkinys, apskaičiuojamos atskiros sąsūkų kaukės, kurios aproksimuojamos į antros eilės išvestinę. Egzistuoja dvi dažniausiai naudojamos kaukės (15 pav.).

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

15 pav. Laplaso ir Gauso operatoriaus kaukės

Kadangi šios kaukės aproksimuoja paveiksluko antros eilės išvestinę, jos yra labai jautrios triukšmui. Norint to išvengti, naudojamas Gauso glodinimo filtras. Šis išankstinis apdorojimo žingsnis mažina aukšto dažnio triukšmo komponentų išsiskyrimą. Tačiau toks pakartotinis paveiksluko apdorojimas ne retai užima daug laiko. Idealiausia būtų sujungti šiuos du žingsnius į vieną, taip sutrumpinant paveiksluko apdorojimo laiką pusiau. Sujungus šiuos du žingsnius gaunama nauja Laplaso ir Gauso (LoG) briaunų aptikimo ir filtravimo formulė:

$$LoG(x, y) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left[1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^4} \right] e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}}, \quad (18)$$



16 pav. Laplaso ir Gauso pasiskirstymo funkcija

0	1	1	2	2	2	1	1	0
1	2	4	5	5	5	4	2	1
1	4	5	3	0	3	5	4	1
2	5	3	-12	-24	-12	3	5	2
2	5	0	-24	-40	-24	0	5	2
2	5	3	-12	-24	-12	3	5	2
1	4	5	3	0	3	5	4	1
1	2	4	5	5	5	4	2	1
0	1	1	2	2	2	1	1	0

17 pav. Laplaso ir Gauso glodinimo filtro operatoriaus kaukė

Apibendrinimas. Vaizdų analizėje briaunų bei linijų atpažinimas yra vienas pagrindinių ir pirminių žingsnių, todėl atpažinimo metodas visų pirma parenkamas pagal sprendžiamą problemą. Lentelėje (2) pateikiamos teigiamos bei neigiamos šių metodų savybės.

2 lentelė. Briaunų bei linijų atpažinimo metodų savybės

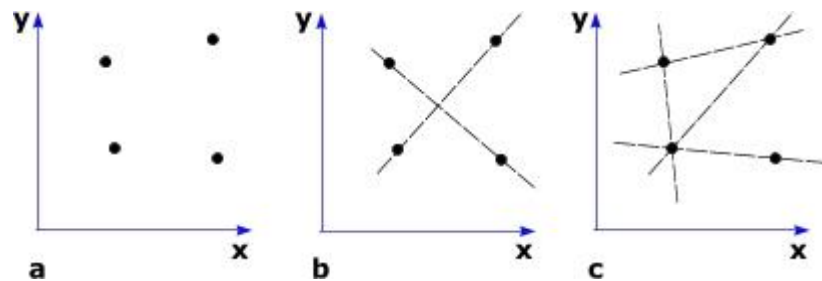
Metodas	Savybės	
	Privalumai	Trūkumai
Klasikiniai gradiento operatoriai (Robertso, Sobelio, Previto, Laplaso)	• paprastumas; • didelė greitaveika; • briaunų krypties nustatymas.	• jautrūs triukšmui; • netikslūs dėl mažos sąsūkos kaukės ir fiksuotų sąsūkos koeficientų.
Laplaso ir Gauso (LoG)	• didelė greitaveika; • didinant sąsūkos kaukę, didėja tikslumas; • gali būti apskaičiuotas prieš paveiksluko apdorojimą ir naudojamas kaip konstanta.	• didinant sąsūkos kaukę, mažėja greitaveika; • negrąžina briaunų krypties (Laplaso metodas);
Canny (su Gauso filtru)	• reikšmių tinkamumo įvertinimas; • atsparus triukšmui; • briaunos dryžuotumo panaikinimo galimybė; • briaunos krypties ir intensyvumo nustatymas;	• atliekama daug skaičiavimo operacijų; • sparta ir tikslumas priklauso nuo Gauso pasiskirstymo funkcijos standartinio nuokrypio σ dydžio; • reikalingas dviejų ribinės reikšmės filtro parametrų t_1 ir t_2 įvertinimas.

Klasikinių gradiento operatorių pagrindinis trūkumas – didelis jautrumas triukšmui, sąsūkos kaukių dydis bei koeficientai yra fiksuoti ir negali būti pritaikyti konkrečiam paveikslui. Canny algoritmo greitaveika tiesiogiai priklauso nuo Gauso filtro standartinio nuokrypio reikšmės σ bei ribinių reikšmių t_1 ir t_2 . Dėl šių priežasčių nuspręsta naudoti tik Gauso glodinimo filtrą vertikalia paveiksluko kryptimi ir Gauso glodinimo filtrą horizontalia kryptimi su skirtingomis standartinio nuokrypio reikšmėmis. Tokiu būdu išryškinamos tik vertikalios linijos, o glodinimo operacija panaikina netolygų paveiksluko intensyvumo pasiskirstymą.

2.3. Hough transformacija

Hough transformacija (angl. *Hough transform*) (toliau - HT) – tai labai populiarus metodas, kurio pagalba galima išgauti geometrinius primityvus iš rastrinių vaizdų. Paprasčiausios algoritmo realizacijos aptinka tiesias linijas, tačiau algoritmas nesunkiai modifikuojamas sunkesnių detalių radimui. Yra kelios pagrindinės HT algoritmų klasės, kurių panaudojimas priklauso nuo vaizdo.

Standartinė Hough transformacija (angl. *Standard Hough Transform*) (toliau - SHT) algoritmas, kaip ir visi HT algoritmai operuoja su diskrečiąja aibe primityvių parametrų (18 pav. a)).



18 pav. a) – diskrečioji parametrų aibė, b) ir c) – galimi tiesių linijų variantai

Bet kokio vaizdo erdvėje tiesi linija yra aprašoma lygtimi:

$$y = mx + b \quad (19)$$

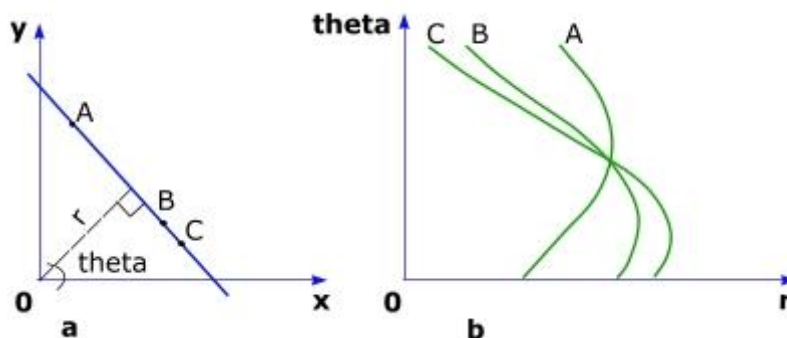
ir grafiškai gali būti bet kokių dviejų taškų (x, y) pradžia bei pabaiga. Pagrindinė Hough transformacijos idėja yra ta, kad bet kokios figūros charakteristika yra išreiškiama figūros parametrais. Tiesios linijos parametrai: m – linijos nuolydis, b – Y ašies susikirtimo vertė. Tačiau linijos parametras m artėja link begalybės, keičiant tiesės vertikalumą. Ši problema sprendžiama tiesės lygti išreiškiant parametrine lygtimi:

$$\rho = x \cos(\theta) + y \sin(\theta), \quad (20)$$

čia ρ yra atstumas iki tiesės nuo nulinio taško, o θ yra kampas tarp X ašies bei vektoriaus, kuris yra statmenas tiesei ir prasideda nuliniame taške.

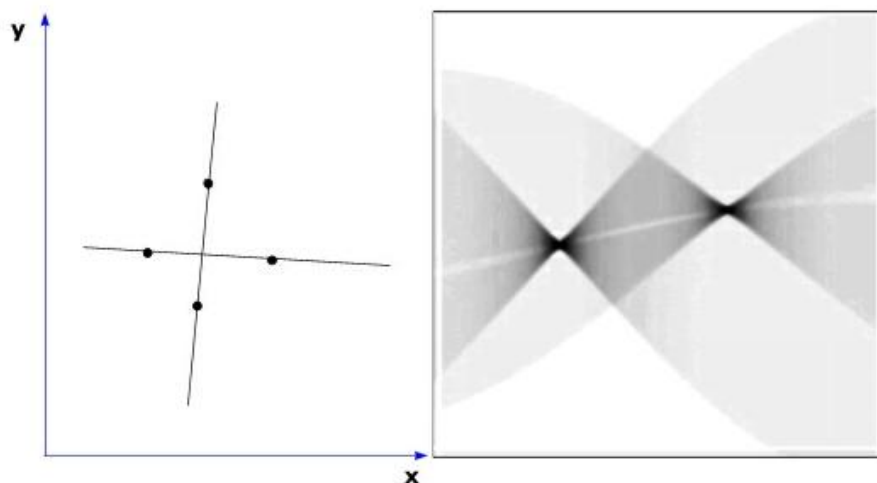
Visi galimi taškai (ρ_i, θ_i) apibrėžti kiekviena taškų pora (x_i, y_i) Dekarto koordinatų sistemoje yra sinusoidės Hough parametrų erdvėje. Ši taško – kreivės transformacija yra vadinama Hough tiesių linijų transformacija. Todėl bet kokie, priklausantys bendrai tiesei

kolinearūs Dekarto koordinatų sistemoje taškai (A, B ir C – 19 pav.), išreikšti sinusoidinėmis kreivėmis, susikerta viename ir tame pačiame taške (ρ_i, θ_i) (19 pav.).



19 pav. a) – tiesi linija, išreikšta atstumu nuo linijos iki koordinatų pradžios – r , kampu tarp X ašies ir vektoriaus r ; b) Hough parametrų erdvėje taškai A, B ir C transformuoti į sinusoidines kreives

Kiekvienas vaizdo taškas gali priklausyti kelioms tiesėms, kurios yra aprašytos minėtais parametrais. Kitaip tariant, tam, kad atskirti triukšmą nuo gerų duomenų, yra apibrėžiamas kaupiklis (angl. *accumulator*) masyvas - $A(\rho, \theta)$, kuriame visų elementų pradinės reikšmės yra lygios nuliui. Algoritmas kiekvieną vaizdo tašką (x_i, y_i) transformuoja į diskrečią (ρ_i, θ_i) kreivės išraišką. Kiekvienam taškui, kurio reikšmė pradiniam vaizde yra nelygi nuliui, visų kaupiklio masyvo elementų, atitinkančių tieses, kurios kerta nagrinėjamą tašką, reikšmės yra padidinamos vienetu. Toliau pasirenkama tam tikra slenksčio reikšmė Th tam, kad panaikinti triukšmą. T.y. paliekamos tik tos parametrų poros (ρ, θ) , kurioms $A(\rho, \theta)$ yra didesnis negu pasirinktas slenkstis Th . Visos likusios poros charakterizuoja aptiktas linijas – 20 pav. Du šviesūs taškai yra tiesės parametrai Hough erdvėje. Atstumas nuo taško iki koordinatų pradžios yra vektorius ρ , kampas tarp vektoriaus ρ ir X ašies – θ .



20 pav. Hough transformacijos parametrai

Daugiamatė Hough transformacija (angl. *Multidimensional Hough Transform*) (toliau - MHT) yra SHT algoritmo modifikacija. Šis algoritmas, panaudodamas vaizdo žemesnę rezoliuciją, apskaičiuoja parametrų poras, taikydamas SHT algoritmą. Po to algoritmas parametrų erdvėje aptinka parametrų sritis, kurios turėtų atitikti tieses pradiname vaizde. MHT algoritmas turėtų būti naudojamas, kai pradiniai vaizdai turi kelias tieses ir mažai triukšmo.

Progresyvioji tikimybinė Hough transformacija (angl. *Progressive Probabilistic Hough Transform*) (toliau - PPHT). Šio metodo idėja yra tame, kad yra operuojama su atsitiktinai parinktais taškais. Kiekvieną kartą, kai pasikeičia bet kurio kaupiklio masyvo elemento reikšmė, didžiausia reikšmė yra lyginama su pasirinktu slenkščiu. Jei reikšmė yra didesnė, negu pasirinktas slenkstis, tai visi taškai, kurie priklauso pasirinktam intervalui, apibrėžtam šia didžiausia reikšme, yra šalinami. Jei taškų skaičius viršija iš anksto pasirinktą reikšmę, t.y. tiesios linijos ilgį, tai aptikta detalė laikoma tiesiąja, kitaip skaitoma, kad tai triukšmas. Po to procesas pasikartoja iš pradžių, kol vaizde nebelieka taškų. Algoritmas pagerina rezultatą po kiekvieno žingsnio, todėl gali būti sustabdytas bet kuriuo metu. PPHT algoritmas nesunkiai modifikuojamas visais atvejais, kai įmanoma modifikuoti SHT algoritmą. PPHT algoritmo trūkumas yra tas, kad, skirtingai nuo SHT, šis algoritmas klaidingai aptinka kai kurias vaizdo detales, pvz., tiesių susikirtimus.

2.4. RANSAC metodas

Šiame skyriuje aprašomas tam tikros aibės parametrų vertinimo problemos sprendimo būdas, kai tam tikrų matavimų rezultatus sudaro dėl tam tikrų priežasčių klaidingais tapę duomenys. Klaidingi rezultatų duomenys – tai duomenys iškreipiantys rezultatų vientisumą. Vienas iš populiariausių metodų yra RANSAC.

RANSAC – tai statistinis iteracinis duomenų įvertinimo metodas, skirtas sudarytajam modeliui suderinti su parinktais duomenimis. Šiuo atveju modelis yra 2D tiesė, einanti per tam tikrų taškų visumą. Šie taškai – tai filtruoto vaizdo pikseliai. Vaizdo filtras – tai vaizdo apdorojimo operacija, kurios metu šalinami tam tikrą sąlygą neatitinkantys pikseliai. Po filtro operacijos tarp šių taškų egzistuos tokių, kurie sudaro tiesę, ir tokių, kurie iškreipia rezultatų vientisumą – priklauso vaizdo triukšmui.

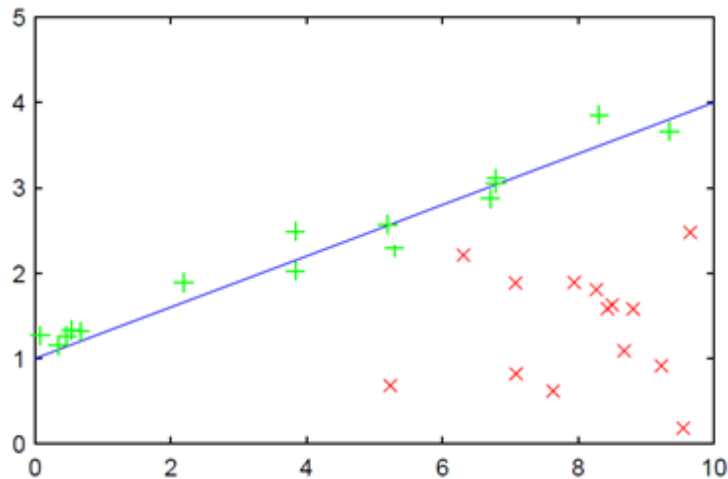
RANSAC algoritmas operuoja tam tikrais duomenimis:

- Duomenų aibė $D = \{d_i\}$, kurią sudaro $N = |D|$ skaičius reikšmių (21 pav.). Šiuo atveju duomenų aibė $\{x_i \mid i = 1, \dots, N\}$ yra sudaryta iš N skaičiaus taškų, išreikštų $x_i = [x_i, y_i]$.
- Funkcija $p = f(s)$, kuri tiesiogiai apskaičiuoja modelio parametrus p iš duomenų poaibio S . Duomenų poaibį S privalo sudaryti pakankamas skaičius $M = |S|$ elementų. Tai reiškia, jog apytikslės šabloninės reikšmės yra nereikalingos. Duomenų, reikalingų funkcijos parametrų aproksimacijai, skaičius turi būti kuo mažesnis. Šiuo atveju reikalingi $M = 2$ taškai, kurių homogeninės koordinatės yra $A = [x_1, y_1]$ ir $B = [x_2, y_2]$. Iš šių taškų A ir B homogeniniai tiesės parametrai $l = [a, b, c]$ apskaičiuojami pagal $l = x \times y$.
- Įvertinimo funkcija $\rho(p, d_i)$ kiekvienam duomenų elementui d_i ir visiems parametrams p grąžina skaitinę reikšmę. Ši funkcija parenkama taip, kad klaidingi duomenys turi mažiausią įtaką parametrams p . Iš esmės tai priklauso nuo likutinės duomenų vertės:

$$e_i = e_i(p, d_i). \quad (21)$$

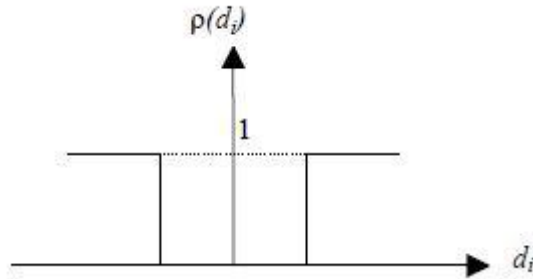
Šiuo atveju, sprendžiant įvertinimo funkciją naudojamas mažiausių kvadratų metodas (22), kur d_i yra atstumas nuo taško iki sprendžiamo modelio – tiesės lygties.

$$c_0 = d = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N d_i^2}}{N}. \quad (22)$$



21 pav. Duomenų aibė D . Tiesi 2D linija

Klaidingi duomenys randami naudojant funkcija ρ (22 pav.). Šių duomenų skaičius randamas lyginant tiesės taškų atstumus d_i su pasirinkta ribine reikšme: jei $d_i > k$, duomenys yra klaidingi ir $\rho = 1$; kitu atveju parinkti taškai atitinka ribinę reikšmę ir $\rho = 0$.



22 pav. Klaidingų duomenų įvertinimo funkcija

Bendra įvertinimo funkcijos reikšmė yra randama pagal:

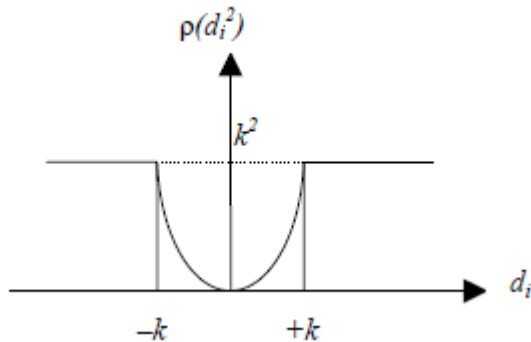
$$C = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \rho(d_i)}}{N}, \quad (23)$$

čia

$$\rho(d_i) = \begin{cases} 1, & |d_i| < k \\ 0, & d_i \geq k \end{cases}. \quad (24)$$

Išraiška $\rho(d_i) = d_i^2$ yra mažiausių kvadratų metodo sprendinys. Jei parinkti duomenys yra neklaidingi, naudojama įvertinimo funkcija (23 pav.): jei $|d_i| < k$, taškai traktuojami kaip teisingi ir kiekvieno taško įvertinimo funkcijos reikšmė yra $\rho = d_i^2$; (22 pav.) jei $|d_i| \geq k$, taškai traktuojami kaip neteisingi ir kiekvieno taško įvertinimo funkcijos reikšmė yra $\rho = k^2$, todėl:

$$\rho(d_i) = \begin{cases} d_i^2, & |d_i| < k \\ k^2, & d_i \geq k \end{cases}, \quad (25)$$



23 pav. Įvertinimo funkcija: didelių reikšmių mažesnė įtaka

RANSAC metodo veikimo principas

Pagrindinė RANSAC algoritmo mintis yra pakartotinis atsitiktinio duomenų poaibio S parinkimas ir funkcijos $p = f(S)$ sprendinių radimas. Todėl algoritmas yra sudarytas iš penkių pagrindinių žingsnių:

- Žingsniai nuo 2 iki 4 atliekami n kartų, čia n – privalomas išankstinis kintamas parametras (iteracijų skaičius), kuris perskaičiuojamas algoritmo eigoje;
- Atsitiktinio duomenų poaibio S parinkimas (24 pav.). Duomenų kiekį poaibyje S nurodo M (25 pav.). Parinktų duomenų skaičius M gali būti lygus bendram duomenų skaičiui N , todėl poaibio S duomenų kiekis privalo neviršyti N :

$$n = \binom{N}{M}. \quad (26)$$

Dažniausiai n parenkamas toks, kad:

$$n = \frac{N(N-1)}{2}. \quad (27)$$

Tačiau toks duomenų skaičiaus parinkimas (27) tinka, kai duomenų aibę sudaro pakankamai mažas duomenų kiekis. Dideliam duomenų kiekiui n parenkamas atsitiktine tvarka. Pirmos iteracijos metu bet kokio atsitiktinio duomens parinkimo tikimybė visada bus lygi. Todėl parenkamasis poaibis S yra pildomas šiuo būdu: $S_v \subset D, |S_v| = M, v \in [1, \dots, n]$. Galimas papildomas parenkamų duomenų filtravimas, kadangi kai kurie duomenys gali iškreipti parametrų parinkimą. Šiuo atveju filtro sąlyga gali būti tokia kad: Euklidinis atstumas (angl. *Euclidean distance*) $E(A, B)$ (28) privalo būti mažesnis arba lygus tam tikrai ribinei reikšmei T (29) (Wang).

$$E(A, B) = \sqrt{(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2}; A = (a_1, a_2), B = (b_1, b_2), \quad (28)$$

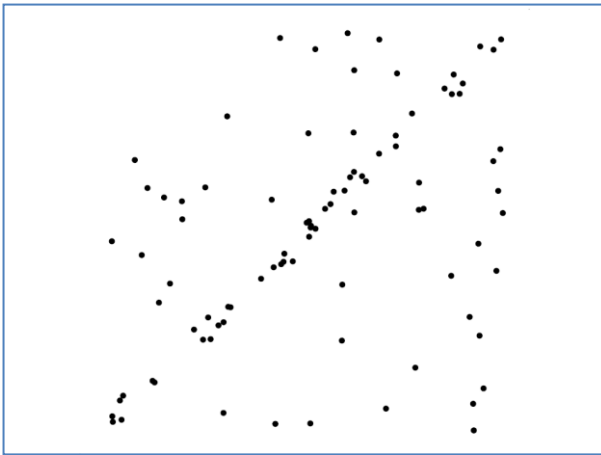
$$E(A, B) \leq T. \quad (29)$$

- Parametro p_k įvertinimas pagal pasirinkta modelį pagal parinktą atsitiktinių duomenų poaibį S_k , kur $p_k = f(S_k)$ (26 pav.).
- Skaičiuojamas pasirinkto modelio su parametrais p_k tinkamumas pagal įvertinimo funkciją (30). Jei pradinės sąlygos reikalauja bent vieno tinkamo modelio

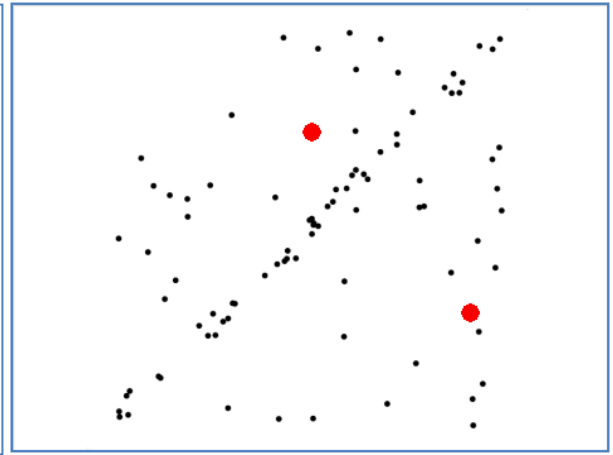
sprendinio, kai $C_k \leq T$ ir ši sąlyga yra teisinga, algoritmas gali būti stabdomas (27 pav.), (28 pav.).

$$C_k = \sum_{x \in S} \rho(p_k, x). \quad (30)$$

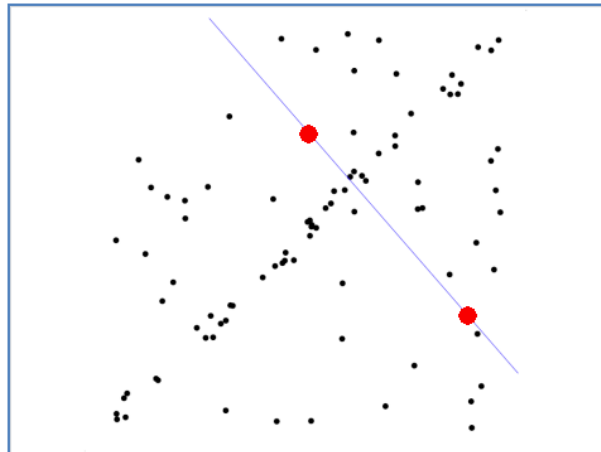
- Randamas geriausias modelio sprendinys (29 pav.). Tai yra duomenų poaibis S_k su parametrais p_v , kur C_k įgauna mažiausią reikšmę. Papildomai C_k gali būti tikrinamas su tam tikra iš anksto nurodyta ribine reikšme T .



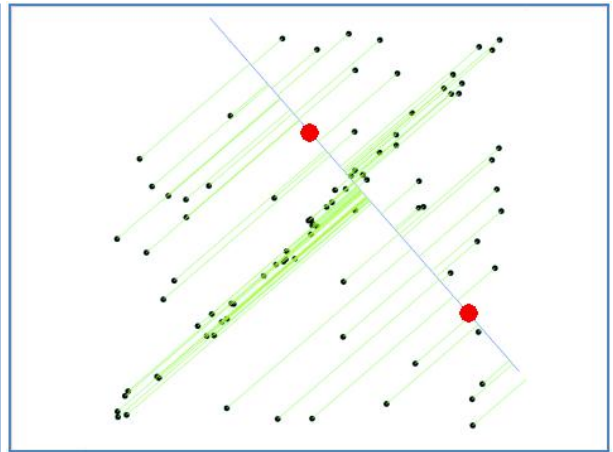
24 pav. RANSAC metodo etapas I



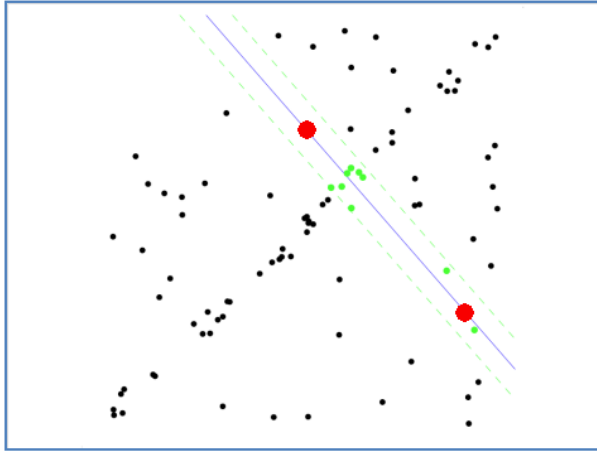
25 pav. RANSAC metodo etapas II



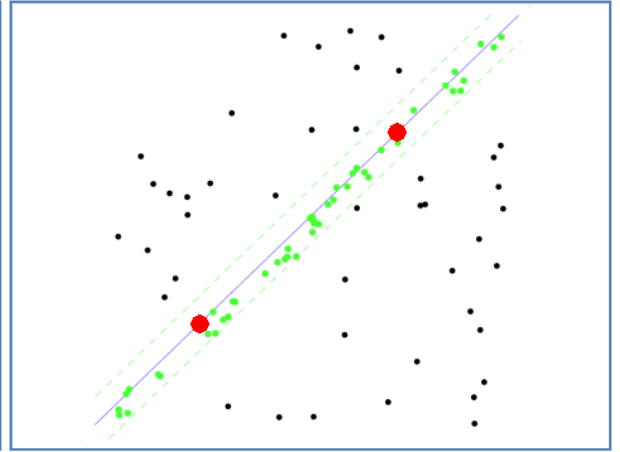
26 pav. RANSAC metodo etapas III



27 pav. RANSAC metodo etapas IV



28 pav. RANSAC metodo etapas V



29 pav. RANSAC metodo etapas VI

RANSAC metodo parametrai

RANSAC algoritmas reikalauja šių pradinių įvesties parametrų:

- Bandymų skaičius n ;
- Ribinė reikšmė k , kuri naudojama modelio tinkamumo skaičiavimui algoritmo veikimo IV ir V etapuose.
- Ribinė reikšmė T , kuri naudojama tinkamų duomenų kiekio skaičiavime.

Bandymų skaičius n parenkamas itin kruopščiai. Jei nebus patikrinti visi duomenų aibės D nariai, neišku ar galutinė reikšmė C_k yra teisingiausia. Tačiau egzistuoja tikimybė P , kad bus parinktas bent vienas tinkamas modelio sprendinys iš duomenų poaibio M per bandymų skaičių n , jei paklaidos procentinė išraiška yra ε (31).

$$P = 1 - (1 - (1 - \varepsilon)^M)^n. \quad (31)$$

Jei egzistuoja minimali tikimybė P_{min} , kad bus parinktas bent vienas tinkamas modelio sprendinys, tai minimalus bandymų skaičius n_{min} yra:

$$n_{min}(P_{min,\varepsilon,M}) = \frac{\ln(1 - P_{min})}{\ln(1 - (1 - \varepsilon)^M)}. \quad (32)$$

3 lentelė. Minimalus bandymų skaičius n_{min} , reikalingas bent vienam modelio sprendiniui rasti, kai minimali tikimybė - P_{min} , paklaidos procentinė išraiška - ε , atsitiktinių duomenų kiekis $M = 2$

P_{min}	ε								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,95	2	3	4	7	10	17	32	73	298
0,99	3	5	7	10	16	26	49	113	458
0,999	4	7	10	15	24	40	73	169	687

4 lentelė. 3 lentelės duomenys. Atsitiktinių duomenų kiekis $M = 5$

P_{min}	ε								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,95	3	8	16	37	94	291	1231	9360	299572
0,99	5	12	25	57	145	447	1893	14389	460515
0,999	8	17	38	85	218	671	2839	21583	690772

3 ir 4 lentelės nurodo minimalų bandymų skaičių, kai teisingo modelio sprendinio radimo tikimybės $P_{min} = 95\%, 99\%$ ir $99,9\%$, esant skirtingoms teisingų duomenų egzistavimo paklaidoms $\varepsilon = [0,1; 0,9]$. Atsitiktinių duomenų skaičius turi būti parenkamas toks, kad kuo tiksliausiai nusakytų modelio parametrus. Kadangi 2D liniją sudaro pradžios ir pabaigos taškai, optimaliausia, kai $M = 2$ (3 lentelė). Bandymų skaičius didėja, kai parenkamas didesnis atsitiktinių duomenų skaičius M (4 lentelė).

Jei ribinė reikšmė k nėra žinoma iš anksto, ji gali būti apskaičiuota kiekvienam duomenų poaibiui S . Dažniausiai k reikšmė yra poaibio S duomenų mediana.

Teorinės analizės apibendrinimas. Remiantis atlikta kelio juostų ir kelio kraštų atpažinimo literatūros analize, galima pažymėti:

- Kelio juostų ir kelio kraštų atpažinimui pasirinktas Borkar A. ir Hayes M. (2009) siūlomo metodo RLDT-RK pagrindas.
- Pradiniam vaizdo apdorojimui bus taikoma IPM transformacija bei du iš anksto apskaičiuoti vienmačiai filtrai: vertikalia glodinimo ir horizontalia linijų ryškinimo antros eilės išvestinės Gauso filtrai su skirtingomis standartinio nuokrypio reikšmėmis.
- Preliminarių kelio juostų ir kelio kraštų aptikimui bus naudojamas naujas metodas, paremtas tuo, kad nagrinėjama paveiksluko stulpelių intensyvumo funkcijos pasiskirstymas horizontalia kryptimi.
- Kelio juostų ir kelio kraštų teisingumo įvertinimui bus naudojamas RANSAC metodas.

3. Kelio vertikalių ženklavimo juostų ir kelio kraštų atpažinimo metodas

Tyrinėjant literatūrą apie kelio juostų ir kraštų atpažinimą, dažniausiai naudojamų metodų galimybes, veikimo sudėtingumą, duomenų apdorojimo greitį bei efektyvumą buvo suformuotas metodas, tinkamas greitam ir tiksliam kelio vertikalių ženklavimo juostų ir kelio kraštų nustatymui mašininės regos sistemose. Šioje darbo dalyje aprašomos realizavimo priemonės ir technologijos, naujas sukurtas metodas, jo veikimo schema, rezultatai bei tolimesni tobulinimo būdai.

3.1. Realizavimo priemonės ir technologijos

Šiame skyriuje aprašoma kuriamo metodo realizavimo priemonės ir technologijos, pasirinkta programavimo kalba, pagalbinės bibliotekos bei testavimui naudota įranga.

Metodo kūrimui buvo pasirinkta C++ objektiškai orientuota programavimo kalba dėl paplitimo, greito veikimo ir lankstumo. C++ kalba parašytos programos yra kompaktiškos ir greitai vykdomos. Ši programavimo kalba yra labai lanksti. Tai reiškia, jei programa yra parašyta šia kalba, ji gali būti lengvai, su nedideliais pataisymais arba visai be jų, perkeliama į kitas sistemas, pvz.: iš IBM kompiuterio perkeliama į *UNIX* sistemą.

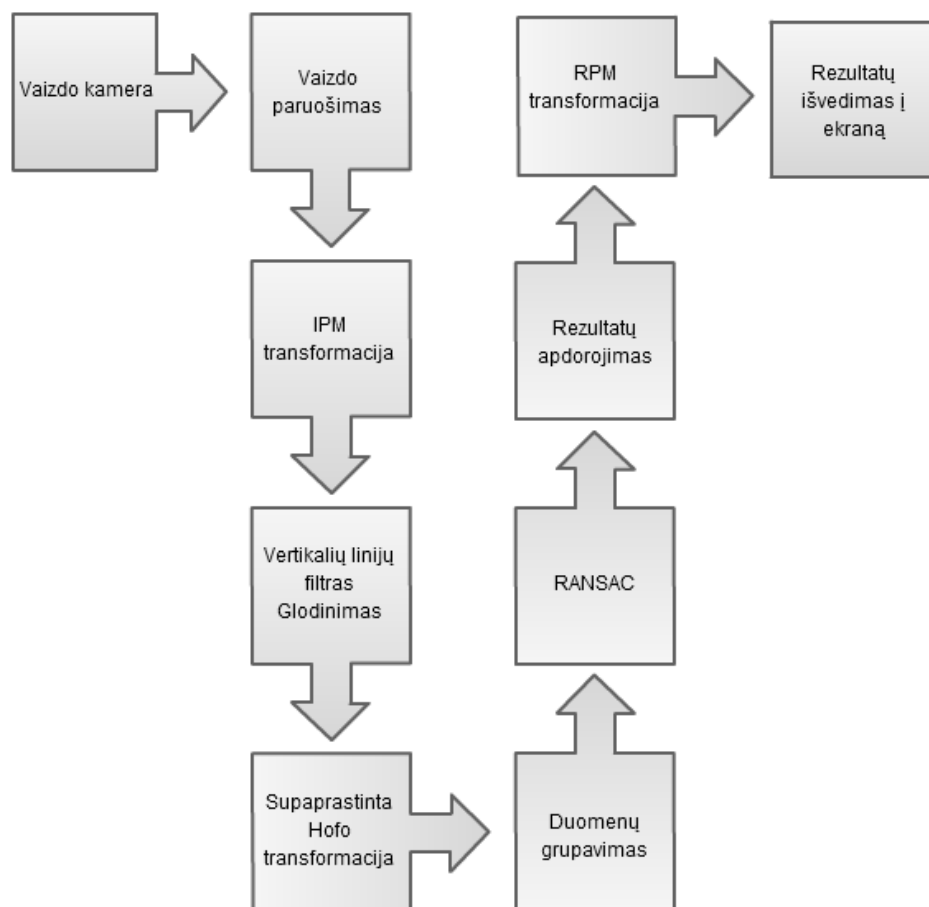
Metodo kūrimui buvo pasirinkta pagalbinė C++ biblioteka *OpenCV* (Bradski 2008). *OpenCV* - tai atviro kodo vaizdų analizės biblioteka. Ši biblioteka yra parašyta C ir C++ programavimo kalbomis, todėl veikia beveik ant visų operacinių sistemų platformų – *Linux*, *Windows*, *Mac OS X*. *OpenCV* biblioteka buvo kuriama tikslingam kompiuterio skaičiavimo efektyvumo išnaudojimui. Todėl didelis dėmesys skiriamas vaizdų analizėje realiu laiku nagrinėjamų problemų sprendimui. *OpenCV* yra parašyta optimizuota C programavimo kalba, todėl gali išnaudoti kompiuterio procesoriaus kelių branduolių architektūrą.

Kuriamo metodo architektūra reikalauja daug įvesties bei konfigūravimo parametrų, todėl nuspręsta sukurti pradinę metodo parametrų įvesties grafinę vartotojo sąsają. Šios sąsajos kūrimui panaudota *Fast Light Toolkit GUI* (FLTK GUI) biblioteka.

Metodo kūrimo ir testavimo metu buvo naudojama *GoPro Hero HD* vaizdo kamera, skirta ekstremalaus sporto filmavimui. Ši vaizdo kamera pasirinkta dėl išgaubto lęšio efekto (angl. *Wide lens*) ir plataus matymo kampo.

3.2. Metodo architektūra

Šiame skyriuje pateikiamas paprastas, greitas bei efektyvus kelio juostų atpažinimo problemos sprendimo būdas. Jis pagrįstas nagrinėjant kelio kontūrą, transformuotą į pūkščio skrydžio projekciją. Ši transformacija vadinama *Inverse Perspective Mapping* (IPM). Transformuotas vaizdas yra apdorojamas Gauso filtru, optimizuotu vertikalių linijų išryškiniui. Filtruotas vaizdas apdorojamas paliekant tik maksimalias pikselių reikšmes. Hough transformacija yra geriausias metodas linijų atpažinimui duotame vaizde. Tačiau dėl algoritmo lėto veikimo retai naudojamas arba dažnai pritaikomas konkrečiai problemai. Todėl visos vertikalios tiesios linijos išgaunamos naudojant naujai sukurtą metodą, kai naginėjama paveiksluko stulpelių intensyvumo funkcijos pasiskirstymas horizontalia kryptimi. Išgautos linijos apdorojamos naudojant RANSAC statistinį metodą – išrenkamos labiausiai atitinkančios tiesios linijos lygtį. Galiausiai atliekamas rezultatų apdorojimas – atrenkamos linijos su aukščiausiu panašumo koeficientu, transformuojamos į pradinę paveiksluko fragmento projekciją ir atvaizduojamos ekrane. Metodo veikimo schema pavaizduota 30 pav.



30 pav. Kelio ženklinimo vertikalių juostų ir kelio kraštų atpažinimo metodo schema

3.2.1. Metodo parametrai

Kadangi kuriamo metodo architektūra reikalauja daug įvesties bei konfigūravimo parametrų, testavimo etapas bei metodo naudojimas palengvintas sukuriant pradinį duomenų įvesties vartotojo sąsają (31 pav.).

The screenshot shows a window titled "Magistrinis" with a standard Windows-style title bar (minimize, maximize, close buttons). Inside the window, there is a "Pics dir:" label followed by a text box containing the path "Y:\media\PENDRIVE\Magistrinis\Magistrinis\clips\sam" and a browse button "...". Below this, there are several groups of input fields:

- IPM width: 256
- IPM height: 240
- IPM left/top: 0 and 40 (two adjacent boxes)
- IPM right/bottom: 255 and 200 (two adjacent boxes)
- Focal length X/Y: 128 and 120 (two adjacent boxes)
- Opt. center X/Y: 128 and 120 (two adjacent boxes)
- Im. width/height: 256 and 240 (two adjacent boxes)
- Camera height: 1500
- Pitch: 44
- Yaw: 0

At the bottom of the window, there are five buttons: "Defaults", "Preset 1", "Preset 2", "Start", and "End".

31 pav. Kelio juostų atpažinimo parametrų įvesties vartotojo grafinė sąsaja

- „Pics dir“ – nagrinėjamų paveikslukų rinkinio kelias standžiajame diske.
- „IPM width“/ „IPM height“ – IPM transformacijos paveiksluko plotis ir aukštis.
- „IPM left/top“ – IPM transformacijos pradžios taško ($x; y$) koordinatės.
- „IPM right/bottom“ – IPM transformacijos pabaigos taško ($x; y$) koordinatės.
- „Focal length X/Y“ – vaizdo kameros lęšio židinio nuotolio taško ($x; y$) koordinatės.
- „Opt. center X/Y“ – vaizdo kameros optinio centro taško ($x; y$) koordinatės.
- „Im. width/height“ – nagrinėjamų paveikslukų plotis ir aukštis.
- „Camera height“ – vaizdo kameros aukštis nuo žemės.
- „Pitch“ – vaizdo kameros posvyrio kampas.
- „Yaw“ – vaizdo kameros posūkio kampas.

3.2.2. Atvirkštinė perspektyvos transformacija

Kelio ženklavimo juostų bei kraštų atpažinimo sistema reikalauja tikslios informacijos apie juostų ir kelio vingius bei jų poziciją pasaulinėje erdvėje. Dažniausiai vaizdo kameros yra montuojamos ant transporto priemonės stogo arba šalia prietaisų skydelio. Vaizdo kameros kaip ir žmogaus matomas vaizdas yra iškreiptas. Bet kokio objekto dydis yra įvertinamas pagal jo atvaizdo dydį akies tinklainėje. Tačiau neįmanoma įvertinti objekto dydžio nežinant atstumo, nes toliau esančių objektų atvaizdas akies tinklainėje yra mažesnis ir jie atrodo mažesni.

Perspektyva – objektų ir kadro elementų vaizdo perteikimo principas, kurio tikslas yra dvimatėje plokštumoje sudaryti trimatės erdvės įspūdį. Perspektyva pagrįsta optiniu reiškiniu – tariamu figūrų bei daiktų mažėjimu ir jų lygiagrečių linijų susikirtimu horizonte, kūnams tostant nuo stebėtojo pozicijos. Egzistuoja trys šios perspektyvų rūšys: linijinė, toninė (spalvinė) ir daiktų mastelio perspektyva.

Linijinę perspektyvą sudaro lygiagrečios linijos (kelio ženklavimo juostų, geležinkelio bėgių, vėžių, kelkraščių, pastato sienų), einančios nuo žiūrovo tolyn ir kadro gilumoje susiliejančios beveik viename taške. Šis taškas vadinamas nykstamuoju tašku (angl. *Vanishing point*). Toninė perspektyva sudaro erdvės tolumos įspūdį tokiu principu, kad arti esantys objektai yra ryškiausi ir sodriausi, o labiausiai nutolę – šviesiausi ir blankūs. Daiktų mastelio perspektyva pagrįsta paprastu principu – arti esantys objektai atrodo didesni ir gretinami su toliau esančiais, kurie atrodo žymiai mažesni. Padidinti arba sumažinti erdvės tolumos įspūdį padeda kompozicinis kadro sprendimas (kadro komponavimo metodika). Erdvės gilumo įspūdis labiau pastebimas, jeigu vaizde į tolumą eina ir ten susilieja linijos.

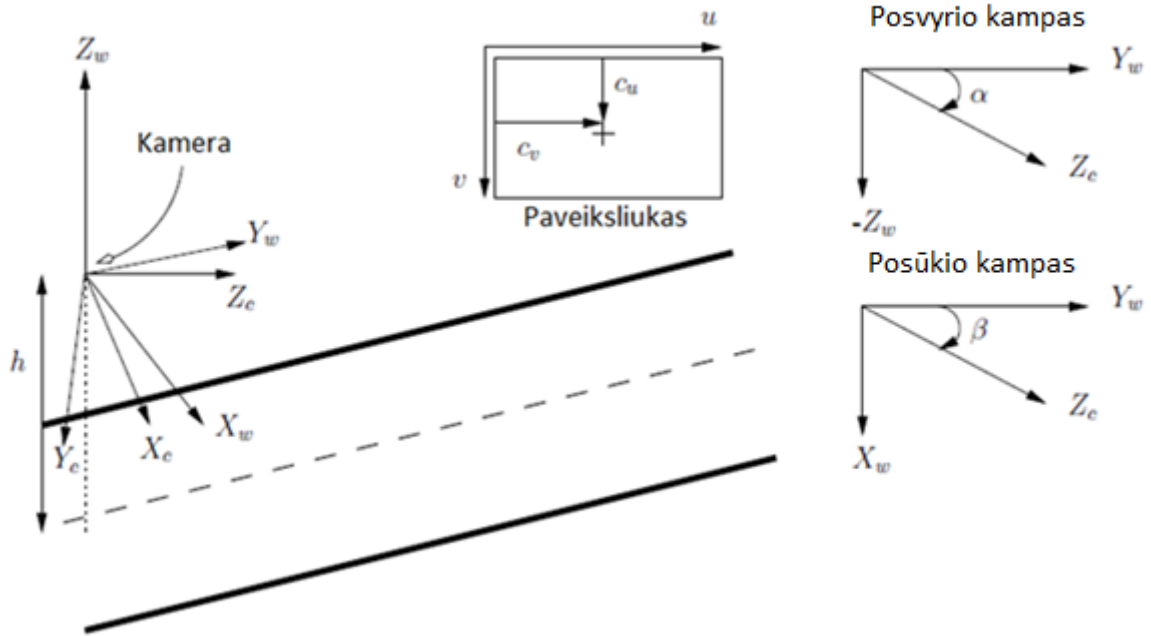
Pirmasis ir pagrindinis žingsnis kelio ženklavimo juostų atpažinime yra kameros perspektyvinio vaizdo transformacija į paukščio skrydžio perspektyvą. Šis metodas vadinamas *Atvirkštine Perspektyvos Transformacija* (IPM). Pirminė šios transformacijos paskirtis buvo kelio kliūčių aptikimas transformuotame vaizde (Mallot 1991; Maud 2004; Bertozzi^B 1998). Šio metodo pagalba kelio juostos tampa lygiagrečios viena kitai tam tikru fiksuotu atstumu viena nuo kitos. Vaizdas yra transformuojamas iš perspektyvinio į ortogonalų. Todėl kelio juostos traktuojamos kaip vertikalios - stačios horizontaliai X ašiai. Šiai transformacijai yra reikalingi tiek vaizdo kameros parametrai, tiek aplinkos parametrai (32 pav.).

Kameros parametrai:

- lęšio židinio nuotolis;
- kameros objektyvo plotis;
- optinis centras.

Aplinkos parametrai:

- kameros posvyrio kampas;
- kameros posūkio kampas;
- kameros atstumas nuo žemės.



32 pav. IPM koordinatės. Kairėje: koordinatinių – pasaulio, kameros ir paveiksliuko - ašys. Dešinėje: posvyrio ir posūkio kampų apibrėžimai

Pasaulinė erdvė yra aprašoma šia išraiška:

$$\{F_w\} = \{X_w, Y_w, Z_w\}. \quad (33)$$

Vaizdo kameros erdvė:

$$\{F_c\} = \{X_c, Y_c, Z_c\}. \quad (34)$$

Vaizdo kameros fiksuojamas paveiksliukas:

$$\{F_i\} = \{u, v\}. \quad (35)$$

Vaizdo kameros erdvė (34) yra centruojama ties kameros optiniu centru. Kameros aukštis nuo žemės – h . O kiekvieno taško ${}^iP = \{u, v, 1, 1\}$ projekcija paveiksliuko erdvėje kelio erdvės atžvilgiu apskaičiuojama taikant homogeninę transformaciją (36).

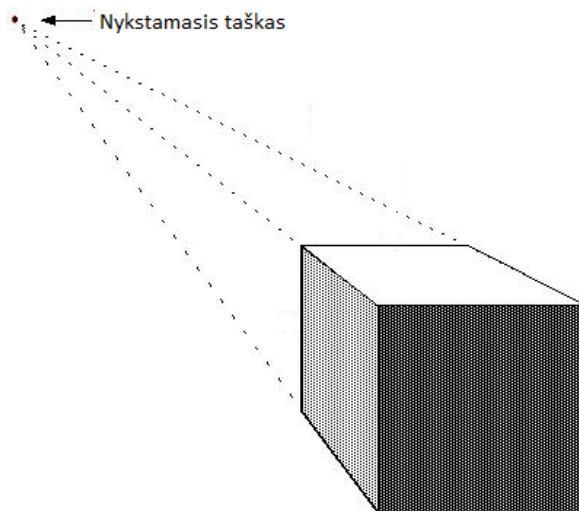
$${}^gT = h \cdot \begin{bmatrix} -\frac{1}{f_u}c_2 & \frac{1}{f_v}s_1s_2 & \frac{1}{f_u}c_uc_2 - \frac{1}{f_v}s_1s_2 - c_1s_2 & 0 \\ \frac{1}{f_u}s_2 & \frac{1}{f_v}s_1c_1 & -\frac{1}{f_u}c_us_2 - \frac{1}{f_v}c_vs_1c_2 - c_1c_2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{f_v}c_1 & -\frac{1}{f_v}c_vc_1 + s_1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{hf_v}c_1 & \frac{1}{hf_v}c_vc_1 - \frac{1}{h}s_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Čia ${}^gP = {}^gT {}^iP$ yra taškas kelio erdvėje, atitinkantis tašką iP paveiksliuko erdvėje, o $\{f_u, f_v\}$ yra horizontalus ir vertikalus židinio nuotoliai, atitinkamai, $\{c_u, c_v\}$ yra optinio centro koordinatės, o $c_1 = \cos \alpha$, $c_2 = \cos \beta$, $s_1 = \sin \alpha$ ir $s_2 = \sin \beta$. Šis metodas tinka bet kokio paveiksliuko dydžio transformacijai. Atvirkštinė transformacija iT apskaičiuojama šiuo būdu:

$${}^iT = \begin{bmatrix} f_uc_2 + c_uc_1s_2 & c_uc_1c_2 - s_2f_u & -c_us_1 & 0 \\ s_2(c_vc_1 - f_vs_1) & c_2(c_vc_1 - f_vs_1) & -f_vc_1 - c_vs_1 & 0 \\ c_1s_2 & c_1c_2 & -s_1 & 0 \\ c_1s_2 & c_1c_2 & -s_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

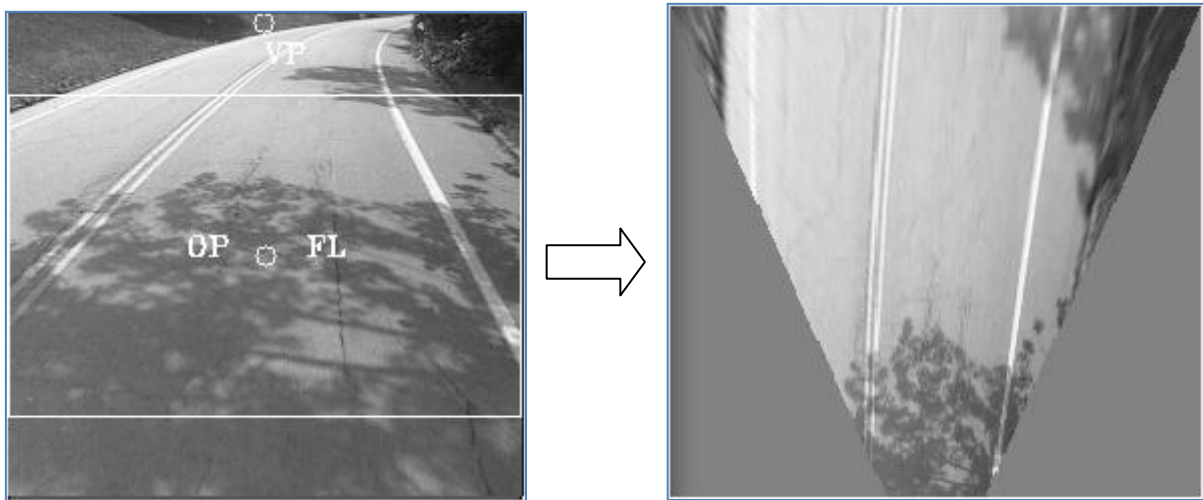
Čia kiekvieno kelio erdvėje esančio taško ${}^gP = \{x_g, y_g, -h, 1\}$ koordinatės paveiksliuko erdvėje yra ${}^iP = {}^iT {}^gP$.

Vienas iš svarbiausių perspektyvos atvirkštinės transformacijos parametrų yra vaizdo nykstamasis taškas (angl. *Vanishing point*). Tai taškas, sujungiantis visų vaizde esančių objektų projekcinius spindulius (33 pav.).



33 pav. Vaizdo perspektyvos nykstamasis taškas

Paveiksliuką gali sudaryti ne vienas nykstamasis taškas, tačiau IPM transformacija reikalauja vieno taško. Šis taškas yra svarbus tuo, jog jo (x, y) koordinatės nurodo vaizdo nagrinėjamos srities ribas, kadangi objektai, esantys virš nykstamojo taško, nepriklausys kelio erdvei. Kelio juostų ir kraštų atpažinime visada nagrinėjama tik tam tikra paveiksliuko sritis (angl. *Region of Interest*) (ROI) (34 pav.). Tokiu būdu paspartinamas vaizdo apdorojimas bei dėmesys koncentruojamas tik ties kelio juostų atpažinimu. Vaizdas po IPM transformacijos – 34 pav.

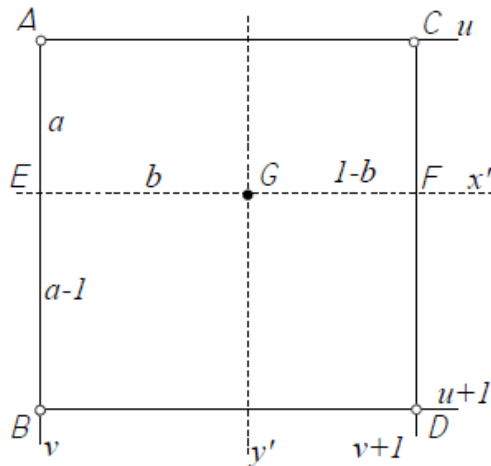


34 pav. IPM transformacija. Kairėje pradinis vaizdas, dešinėje vaizdas po transformacijos. VP – nykstamasis taškas, OP – optinis centras, FL – židinio nuotolis

Pagrindinis IPM transformacijos trūkumas – nykstamojo taško srities paveiksliuko platinimas ir artimiausios stebėtojo atžvilgiu srities siaurinimas (34 pav.). Dėl platinimo operacijos atsiranda naujų paveiksliuko taškų, o dėl siaurinimo operacijos prarandami tam tikri taškai, todėl naujų taškų įvertinimui būtina naudoti interpoliacijos metodą.

Vaizdo interpoliacija – tai procesas, kurio metu po geometrinės transformacijos nustatomos nežinomos pikselių reikšmės nežinomose vietose pagal žinomas kaimynines reikšmes. Interpoliacijos algoritmai skirstomi į dvi kategorijas: adaptyvūs ir neadaptyvūs. Adaptyvūs metodai keičia tai, ką jie interpoliuoja, o neadaptyvūs metodai traktuoja visus pikselius vienodai. Dažniausiai naudojami neadaptyvūs interpoliacijos metodai yra artimiausio kaimyno, dvitiesio ir kubinio. Tiesiniai interpoliacijos būdai – artimiausio kaimyno ir dvitiesio – dažnai naudojami dėl to, kad netiesiniai metodai, tokie kaip bikubinė ir spline interpoliacija, nors ir pateikia geresnius interpoliacijos rezultatus, bet reikalauja daugiau ir sudėtingesnių

skaičiavimų bei pasižymi suliejimo efektu (Kazakevičiūtė-Januškevičienė 2011). IPM transformuotas paveikslukas yra apdorojamas dvitiese, kitaip dar vadinama pirmojo laipsnio, interpoliacija. Visų pirma surandami keturi (A, B, C, D) (38) originalaus vaizdo pikseliai, kurie yra artimiausi nagrinėjamam transformuoto vaizdo taškui (x', y') (35 pav.). Nauja transformuoto vaizdo pikselio reikšmė apibrėžiama kaip dvitiesė keturių artimiausių originalaus vaizdo pikselių funkcija.



$$\begin{aligned}
 A &= I(u, v), \\
 B &= I(u + 1, v), \\
 C &= I(u, v + 1), \\
 D &= I(u + 1, v + 1),
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

čia $u = x', v = y'$.

35 pav. Dvitiesis interpoliacijos procesas

Pikselių (A, B, C, D) reikšmės yra interpoliuojamos horizontalia ir vertikalia kryptimis. Tarpinės (E, F) reikšmės yra apibrėžiamos naudojant atstumą $a = x' - u$ tarp interpoliuojamo taško (x', y') ir horizontalios koordinatės u :

$$\begin{aligned}
 E &= A + (x' - u) \cdot (B - A) = A + a \cdot (B - A), \\
 F &= C + (x' - u) \cdot (D - C) = C + a \cdot (D - C).
 \end{aligned}
 \tag{39}$$

Galutinė pikselio reikšmė G yra apskaičiuojama naudojant atstumą $b = y' - v$:

$$\begin{aligned}
 G &= E + (y' - v) \cdot (F - E) = E + b \cdot (F - E) = \\
 &= (a - 1) \cdot (b - 1) \cdot A + a \cdot (1 - b) \cdot B + (1 - a) \cdot b \cdot C + a \cdot b \cdot D
 \end{aligned}
 \tag{40}$$

Dvitiesė interpoliacija gali būti atlikta ir kaip tiesinė sąsūka (tiesinis filtras). Dvimatis branduolys šiam interpoliacijos būdai apibrėžiamas kaip dviejų vienmačių branduolių sandauga. Dvitiesė interpoliacija sąlygoja geresnę vaizdo kokybę nei artimiausio kaimyno metodas, nors pastarasis yra greitesnis dėl paprastesnio pikselio reikšmės įvertinimo būdo pagal du kaimyninius taškus. Kelio juostų bei kraštų atpažinimui svarbiausia interpoliavimo operacijos kokybė bei operacijos greitis, dėl to buvo pasirinktas dvitiesis interpoliavimo būdas.

3.2.3. Glodinimo ir vertikalių linijų operatorių taikymas

Šioje dalyje aprašoma paveikslėlio glodinimo ir vertikalių linijų ryškinimo operacijos.

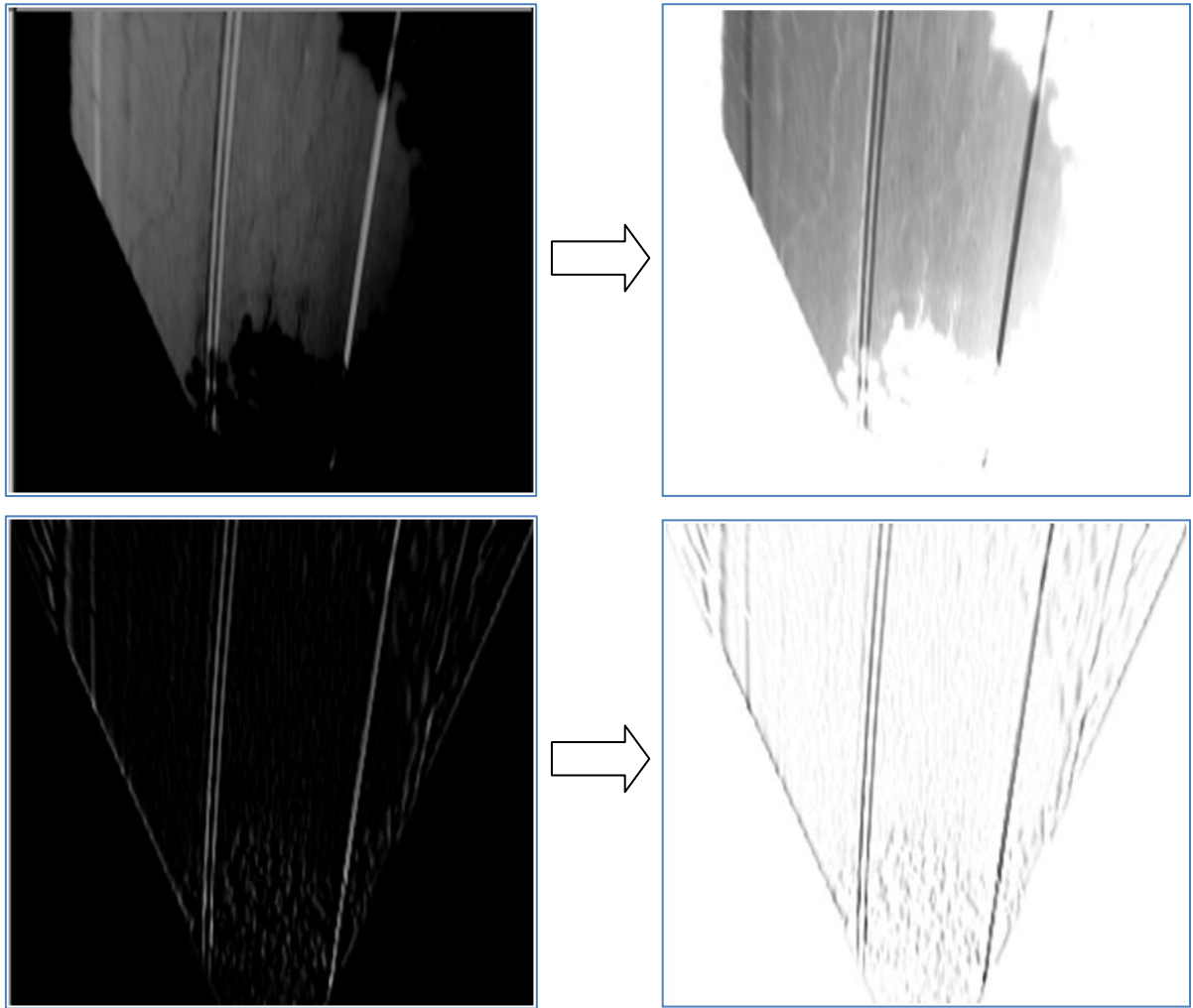
Glodinimo operacijos tikslas yra panaikinti vaizdo paveikslėlyje esantį triukšmą. Triukšmas atsiranda dėl įvairių priežasčių. Pagrindinės priežastys yra kameros ir apšvietimo kokybė. Jei kelias yra prastai apšviestas, privaloma ilginti kameros ekspozicijos trukmę, tačiau dėl to atsiranda didesnis skirtumas tarp vaizdo kadrų ir prarandama daug vizualinės informacijos. Todėl ekspozicijos ilginimas nėra tinkamas. Dėl šių priežasčių atliekama vaizdo glodinimo operacija ir naudojamas Gauso filtras.

Po IPM transformacijos taikymo nagrinėjama paveiksliuko sritis yra filtruojama dvimačiu Gauso filtru. Jei Gauso filtro sąsūka yra didelė, glodinimo operacijos kokybė gerėja, tačiau didėja atliktų operacijų skaičius. Operacijų skaičių galima sumažinti glodinimo operaciją vykdant dviem etapais, išskaidant dvimatį Gauso filtrą į du vienmačius. Visų pirma, vaizdas glodinamas vertikalia kryptimi, o gautas rezultatas glodinamas horizontalia kryptimi.

Horizontalia kryptimi taikoma antros eilės Gauso išvestinės filtras (41), kur nuokrypio reikšmė σ_x turi būti pritaikyta tam tikro pločio kelio juostų atpažinimui (36 pav.). Pagal nutylėjimą σ_x reikšmė yra 0,01 metro pločio. Vertikalia kryptimi taikomas glodinimo filtras (42), kur nuokrypio parametro σ_y reikšmė turi būti pritaikyta tam tikro kelio juostų ilgio atpažinimui (Vliet 1998). Pagal nutylėjimą σ_y reikšmė yra 3 metrų ilgio. Daroma prielaida, jog kelio juosta yra pakankamai ilga, kad vertikalčiai apimtų visą nagrinėjamą kelio sritį. Šis filtras yra pritaikytas ryškių vertikalių linijų tamsiame fone (kelio pagrindas - asfaltas) atpažinimui (Barret-Lennard 1998). 36 pav. pateiktas filtro taikymo pavyzdys. Viršutiniame paveiksliuke yra atlikta glodinimo operacija, o apatiniame paveiksliuke išryškintos vertikalios linijos. Kairiajame paveiksliuke vaizduojami realūs metodo operuojami duomenys, o dešiniajame atlikta pikselių reikšmių inversijos operacija.

$$f_u(x) = \frac{1}{\sigma_x^2} e^{\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right)} \left[1 - \frac{x^2}{\sigma_x^2}\right] \quad (41)$$

$$f_v(y) = e^{-\frac{1}{2\sigma_y^2}y^2} \quad (42)$$

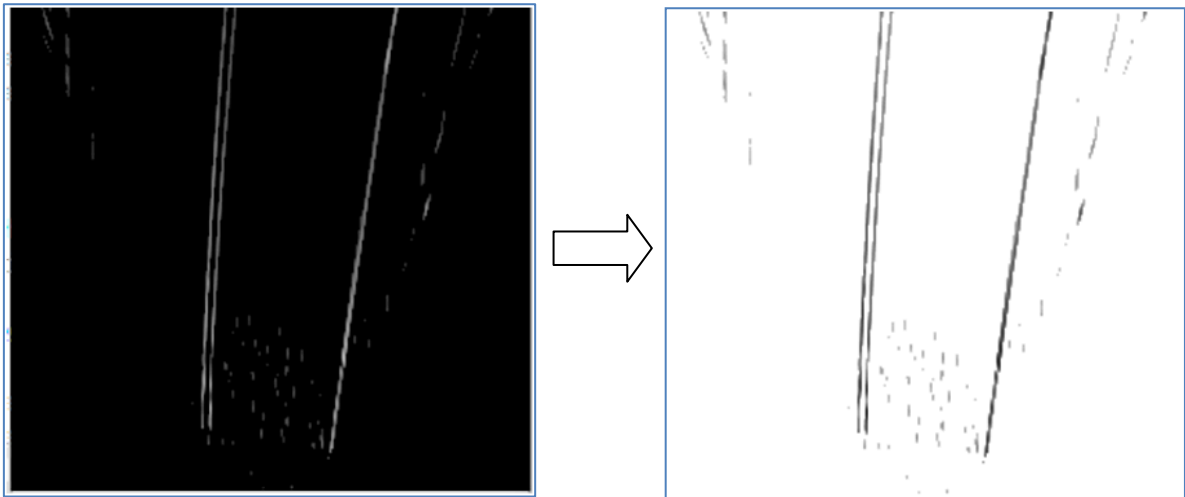


36 pav. Glodinimo ir vertikalų kelio juostų išskyrimas

Po glodinimo ir vertikalų juostų išskyrimo operacijų nagrinėjama vaizdo sritis yra apdorojama papildomu vaizdo filtru išrenkant tik maksimaliausias ir tam tikrą ribinę reikšmę Th viršijančias taškų reikšmes (37 pav.). Kadangi kiekvienas paveiksliukas yra skirtingas, ribinė reikšmė Th privalo būti perskaičiuojama kiekvienos filtravimo operacijos metu. Visų pirma paveiksliuko stulpelių – C ir eilučių – R duomenys transformuojami į vektorių – $V(C \times R)$. Reikšmingiausi paveiksliuko taškai yra tie, kurie yra ryškiausi – įgauna didžiausias reikšmes. Todėl ribinė reikšmė Th yra apskaičiuojama pagal (43). Atrenkamos tik tokios taškų reikšmės, kurios patenka į intervalą $[M; M * 0.03]$.

$$Th = M - M * 0.03, \quad (43)$$

kur $M = \max(V(C \times R))$.



37 pav. Maksimalių reikšmių filtro taikymas

Po šio žingsnio nagrinėjamą paveiksluko sritį sudaro tik tokios taškų reikšmės, kurios įgyja maksimalias reikšmes bei numanomai sudaro vertikalias kelio juostas.

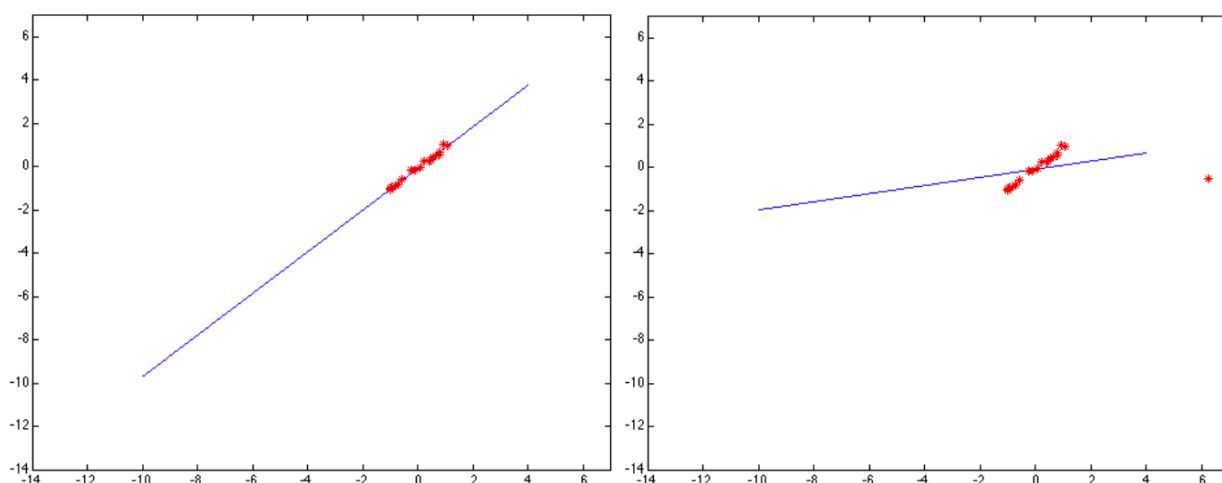
3.2.4. Vertikalių kelio juostų ir kraštų atpažinimo metodas

Šiame skyriuje aprašomas vertikalių kelio juostų ir kraštų išskyrimo metodo taikymas ir nagrinėjamos srities maksimalių pikselių reikšmių išskyrimas, grupavimas bei RANSAC statistinio metodo taikymas tiesių linijų nustatymui.

Problema

Tiesių linijų išskyrimui dažniausiai naudojama standartinė Hough transformacija. Standartinės Hough transformacijos paskirtis yra tiesių linijų išskyrimas tam tikrame paveiksluke transformuojant visus pikselius į Hough parametrų erdvę. Šią erdvę sudaro (ρ, θ) parametrų poros. ρ - tai normalė (statmuo) išvesta iš tikros linijos iki koordinatų pradžios taško. θ - tai kampas, kurį sudaro normalė ρ ir X ašis. Hough parametrų erdvės duomenys apskaičiuojami sprendžiant tiesės normalinę lygtį $\rho = x\cos(\theta) + y\sin(\theta)$, kur (x, y) yra pikselio koordinatės. Ši lygtis yra taikoma kiekvienam nagrinėjamo paveiksluko pikseliui bei keičiant kampo θ reikšmę, dažniausiai intervale $[0; \pi]$ iš anksto parinktu žingsniu $\Delta\theta$, randamos visos per šį pikselį einančios tiesės, todėl toks būdas yra lėtas atliktų operacijų ir rezultatų naudos santykio išraiškos prasme, nes išskiriamos ne tik vertikalios linijos, bet visos kitos šiuo atveju nereikšmingos ir klaidingos linijos. Todėl standartinė Hough transformacija netinka būtent greitam ir tiksliam vertikalių linijų išskyrimui.

Kitas būdas yra *RANSAC* statistinio metodo taikymas, kai pagal tam tikrus duomenis įvertinimas matematinis modelis. Šiuo atveju duomenys yra filtruotame paveiksliuke išsibarstę taškai, o matematinis modelis – tiesios linijos funkcija. Pagrindinis šio metodo trūkumas – tai klaidingų duomenų įvertinimas, kadangi kiekvienas kelio ruožo paveiksliukas yra skirtingas ir norint sumažinti paklaidos tikimybę, reikia didinti modelio įvertinimo funkcijos iteracijų skaičių, o tai atsiliepia atpažinimo metodo veikimo spartai. 38 pav. kairėje vaizduojama ideali situacija, kai duomenys išsidėstę taip, kad atitinka tiesios linijos modelį. Dešinėje vaizduojama situacija, kai klaidos vertinimo funkcija iškreipia tiesios linijos modelį.



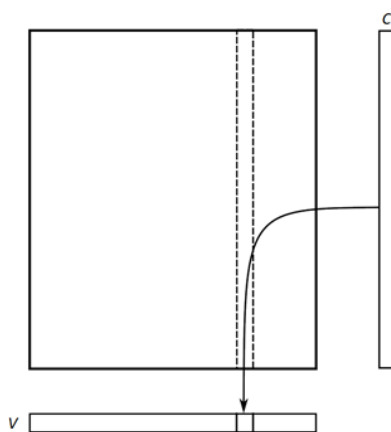
38 pav. Tiesės modelio įvertinimas esant klaidingiems duomenims

Sprendimas

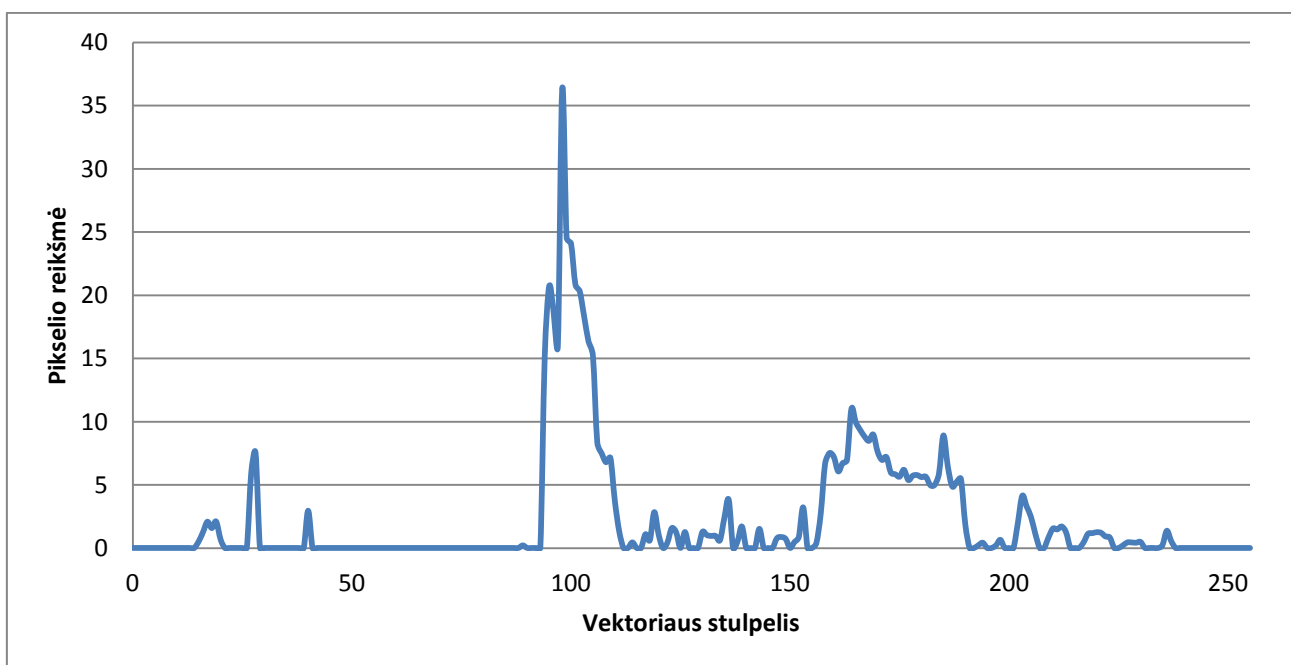
Šiai problemai spręsti sukurtas ir panaudotas naujas metodas, pagrįstas tuo, jog paveiksliuko pikselių duomenys nagrinėjami tik stulpelių atžvilgiu, kadangi ta kryptimi yra ieškomos vertikalios kelio ženklavimo juostos bei kelio kraštai, o nagrinėjama sritis koncentruojama aplink paveiksliuko intensyviausias reikšmes. Šių sričių pikselių duomenys apdorojami *RANSAC* metodu. Kadangi nagrinėjama sritis yra koncentruojama ties intensyviausiomis paveiksliuko vietomis, žymiai sumažėja klaidingų duomenų įvertinimo funkcijos vertė bei atliktų algoritmo operacijų skaičius.

Visų pirma paveiksliuko stulpelių reikšmių suma $S(C_i)$ yra perkeliama į naujo vektoriaus V poziciją v_i (39 pav.). Kadangi vektorių V sudaro maksimalios paveiksliuko pikselių reikšmės, galima traktuoti, jog šiose pozicijose egzistuoja taškai, priklausantys tam tikroms linijoms arba vienai linijai ir yra maksimali intensyvumo reikšmė. Šią intensyvumo reikšmę atitinka vektoriaus V pozicijos v_i reikšmė. Vektoriaus intensyvumo grafikas vaizduojamas 39 pav. Šios linijos yra

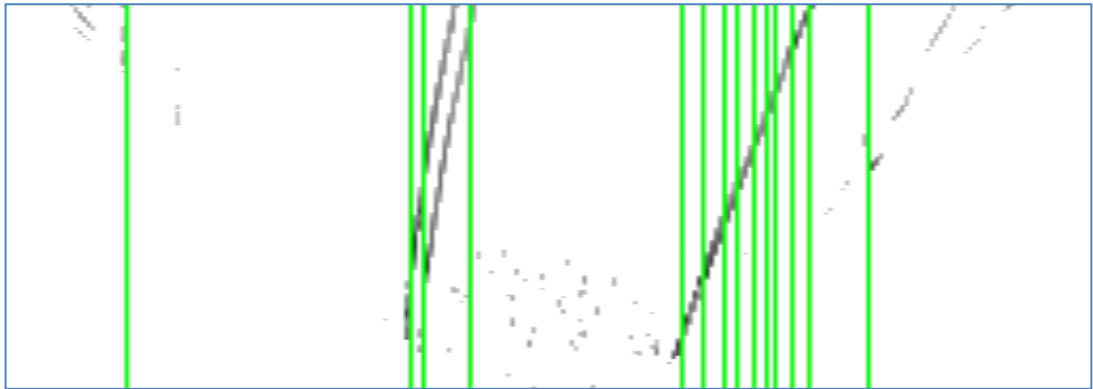
vektoriaus V lokalūs maksimumai. Tačiau nagrinėjamame paveiksliuke būtinai egzistuos triukšmas, iškreipiantis duomenis. Todėl išskiriant linijas iš paveiksliuko vektoriaus V būtina taikyti papildomą filtro sąlygą. Šio filtro ribinė reikšmė buvo parinkta konstanta, lygi 5. Visos paveiksliuko pikselių reikšmės yra pakeistos santykiu $\frac{1}{255}$, o maksimali galima pikselio reikšmė lygi 1. Todėl ribinė reikšmė atitinka penkių maksimalių pikselių reikšmių sudėtį. Galutinis filtruotas paveiksliukas vaizduojamas 40 pav., kur vertikalios tiesios linijos – tai lokalūs paveiksliuko vektoriaus intensyvumo maksimumai.



39 pav. Paveiksliuko stulpelio reikšmių sumos transformaciją į vektorių



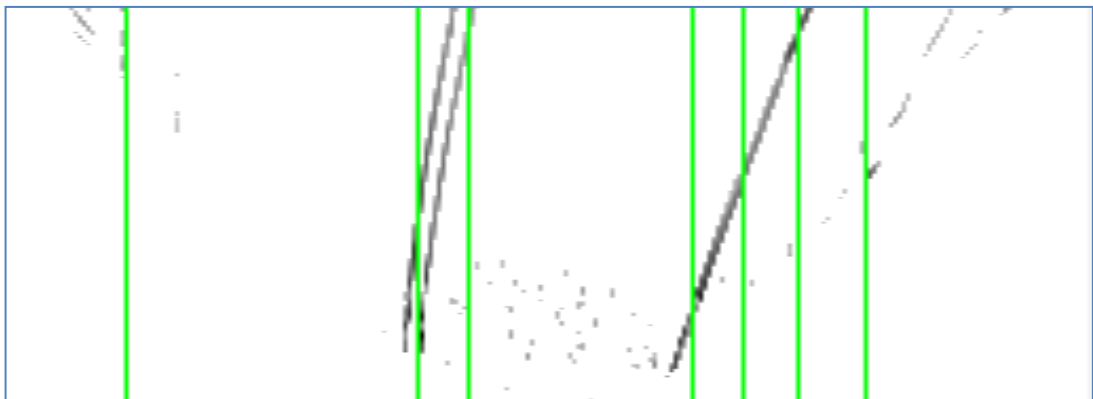
40 pav. Paveiksliuko stulpelių reikšmių intensyvumo grafikas



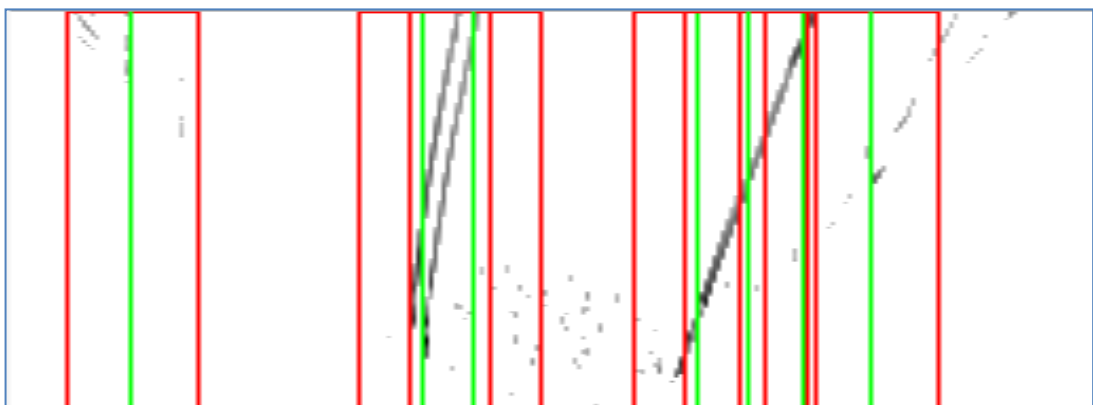
41 pav. Paveiksluko intensyvumo reikšmių lokalūs maksimumai po ribinės reikšmės operacijos

Intensyvumo reikšmių lokalių maksimumų grupavimas

Paveiksluko stulpelių pikselių intensyvumo sumų vektorių V gali sudaryti reikšmės, priklausančios tai pačiai linijai (41 pav.), todėl būtina atlikti tokių reikšmių grupavimą, kai viena kitos pakankamai arti esančios reikšmės yra eliminuojamos ir paliekama tik viena, kurios intensyvumo reikšmė yra didžiausia (42 pav.).



42 pav. Paveiksluko intensyvumo reikšmių lokalūs maksimumai po grupavimo operacijos



43 pav. Paveiksluko intensyvumo reikšmių lokalių maksimumų nagrinėjama sritis

Atlikus maksimalių reikšmių grupavimą yra žinomos intensyviausios nagrinėjamo paveiksluko stulpelių pozicijos. Šių pozicijų reikšmės yra potencialios vertikalios linijos, jei linija yra statinė, arba jos priklauso tam tikroms linijoms, jei jos yra pasvirusios tam tikru kampu. Kadangi idealios, stačios X ašiai linijos retai pasitaiko, nagrinėjama sritis išplečiama tam tikru atstumu apie kiekvieną maksimalią reikšmę. Nagrinėjamos srities plotis yra iš anksto parenkama konstanta, o ilgis – nagrinėjamo paveiksluko aukštis. Nagrinėjama sritis yra pažymėta raudona spalva, o intensyviausia srities dalis – žalia linija (43 pav.).

RANSAC metodo taikymas

Kai nagrinėjama paveiksluko sritis yra sumažinama, taikomas statistinis RANSAC parametrų pagal tam tikrą modelį įvertinimo metodas. Šis metodas operuoja tik tai sričiai priklausančiais duomenimis (45 pav.). Srities duomenys yra visi nenulines reikšmes įgaunantys paveiksluko pikseliai.

Pirmasis RANSAC metodo etapas yra algoritmo taikymo operacijų skaičius. Pasirinktas skaičius – 40 iteracijų (3 lentelė).

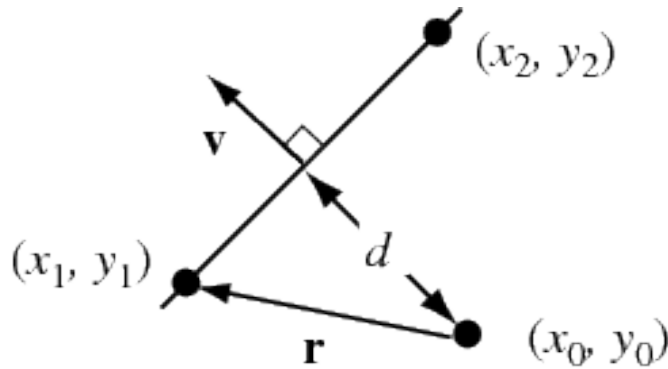
Antrasis etapas yra atsitiktinių duomenų parinkimas. Kadangi apibrėžti tiesią liniją užtenka dviejų pradžios ir pabaigos taškų, pagal metodo apibrėžimą iš duomenų aibės turėtų būti parenkami du atsitiktiniai duomenys. Tačiau šiuo atveju atskirą duomenį sudaro ne tik pozicijos koordinatės, bet ir intensyvumo reikšmė. Kuo taško reikšmė intensyvesnė, tuo didesnė tikimybė, jog parenkamas taškas priklauso ieškomai linijai, o ne triukšmui. Kadangi atsiranda naujas svarbus duomenų įvertinimo parametras, visi duomenys yra įvertinami. Tai yra sudaroma didesnė tikimybė aukštesnio intensyvumo pikselių parinkimui (angl. *weighted sampling*) (Cochran 1977). Visų pirma pikselių reikšmės sudedamos į vektorių ir apskaičiuojamas šių pikselių reikšmių komutatyvi suma S (angl. *cumulative sum*) (44). Parenkamas atsitiktinis skaičius intervale $[0; S)$. Einama per naujai sudaryta vektorių ir tikrinama ar atsitiktinio parinkto skaičiaus reikšmė yra mažesnė nei vektoriaus elementas (pikslio reikšmė). Jei sąlyga teisinga, reikšmė priskiriama kaip pirmas taškas, kitu atveju atsitiktinio skaičiaus reikšmė sumažinama vektoriaus elemento reikšme. Algoritmas pakartojamas antrojo taško parinkimui. Tačiau parinkti taškai neturi būti pašalinti, kadangi gali likti neįvertinti kiti taškai jų atžvilgiu.

$$S_{\{a,b,c,\dots\}} = a, a + b, a + b + c, \dots \quad (44)$$

. Trečiasis ir ketvirtasis RANSAC metodo etapai įvertina matematinį modelį. Tarp dviejų parinktų taškų brėžiama tiesė ir skaičiuojamas atstumas nuo tiesės iki taško, kuris yra paimtas iš

įvertintų reikšmių masyvo. Kadangi masyvas yra įvertintas pagal intensyvumo kriterijų, egzistuoja didelė tikimybė, jog šis parinktas taškas priklausys nagrinėjamai tiesei. Ši operacija atliekama pirmajame etape nurodytą kartų skaičių. Atstumas d tarp tiesės, aprašytos pradžios $x_1 = (x_1, y_1)$ ir pabaigos $x_2 = (x_2, y_2)$ taškais, apskaičiuojamas išvedant normalę iš taško $x_0 = (x_0, y_0)$ iki tiesės, o krypties vektorius yra v (45) (44 pav.) (Point-Line Distance 2-Dimensional).

$$v = \begin{bmatrix} y_2 - y_1 \\ -(x_2 - x_1) \end{bmatrix}, \quad (45)$$



44 pav. Atstumas nuo taško iki dviem taškai aprašytos tiesės.

Vektorius r iš taško $x_0 = (x_0, y_0)$ iki pirmojo tiesės taško $x_1 = (x_1, y_1)$ yra:

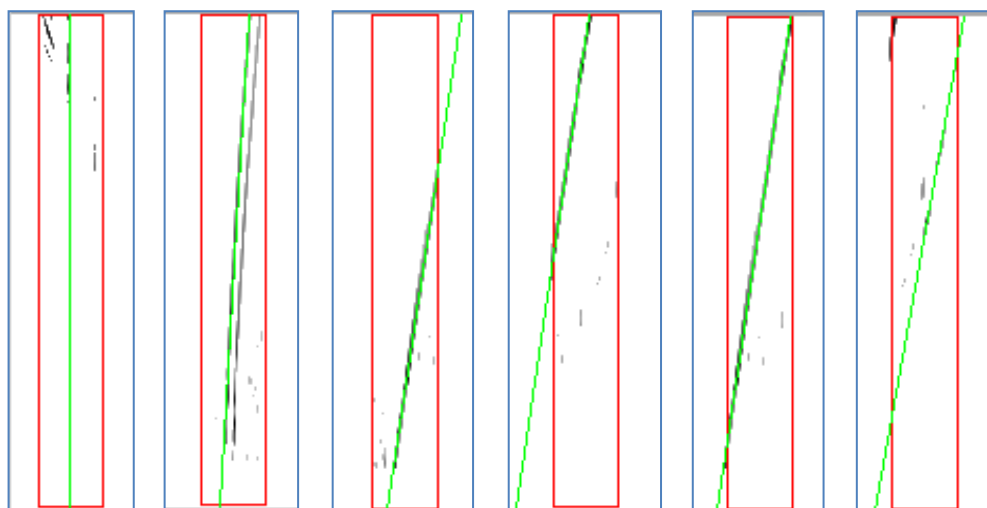
$$r = \begin{bmatrix} x_1 - x_0 \\ -(y_1 - y_0) \end{bmatrix}. \quad (46)$$

Atstumas d nuo taško $x_0 = (x_0, y_0)$ iki tiesės apskaičiuojamas:

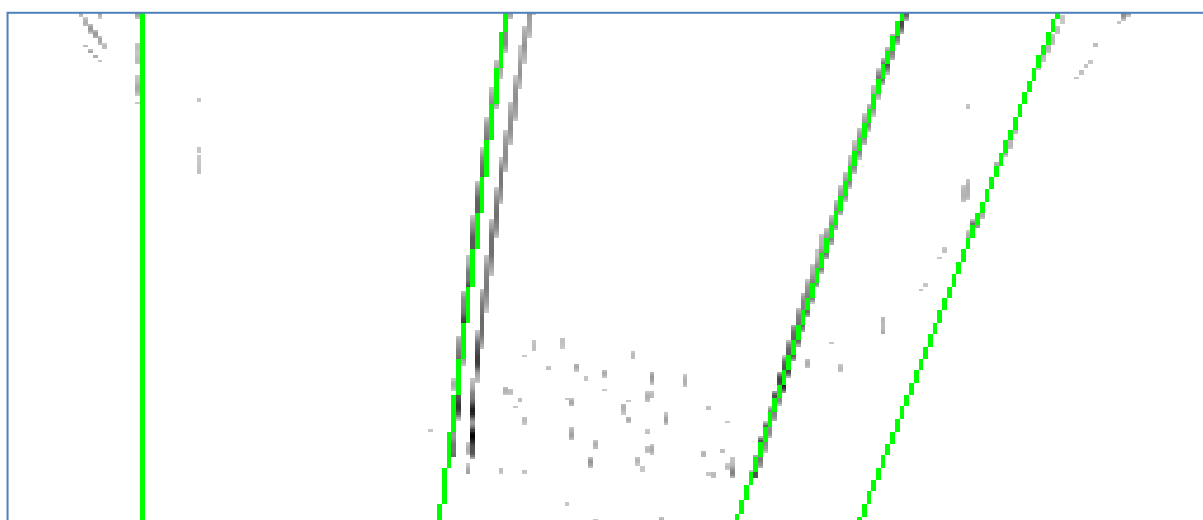
$$d = |\hat{v} * r| = \frac{|(x_2 - x_1)(y_1 - y_0) - (x_1 - x_0)(y_2 - y_1)|}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}. \quad (47)$$

Įvertinus visus duomenis geriausiu rezultatu tampa ta linija, aplink kurią egzistuoja daugiausia taškų, kurie nutolę mažiausiu atstumu nagrinėjamoje srityje bei neviršija tam tikros ribinės reikšmės Th (45 pav.). Ribinė reikšmė Th yra pusė linijos pločio su pridėtine paklaida.

Kiekviena nagrinėjama sritis atstoja paveiksliuko intensyvumo maksimalias reikšmes, todėl šios reikšmės gali priklausyti vienai ir tai pačiai linijai. Taip atsitinka, kai nagrinėjama linija yra pasvirusi dideliu kampu. Todėl viena linija gali būti nagrinėjama keletą kartų. Tai vienas iš didesnių šio metodo trūkumų. Tačiau galutinį rezultatą sudarys tik realios linijos (46 pav.).



45 pav. Nagrinėjamų sričių RANSAC metodo taikymo rezultatai



46 pav. Vertikalių linijų atpažinimo metodo rezultatai

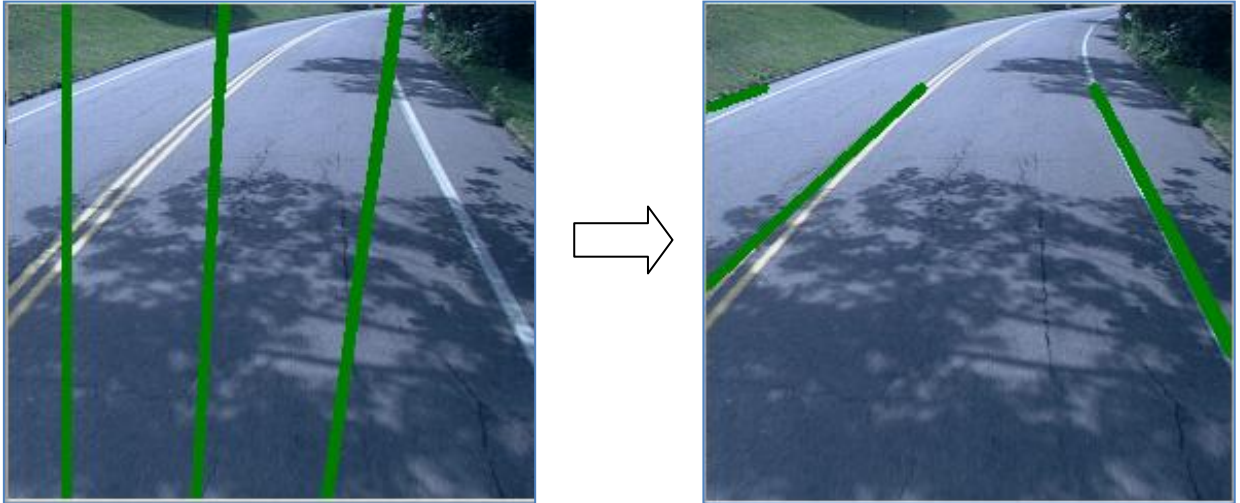
Atbulinė perspektyvos transformacija

Vertikalių kelio ženklavimo juostų atpažinimo metodo pradžioje vaizdo kameros fiksuotas vaizdas buvo transformuotas į paukščio skrydžio projekciją (IPM), dėl to metodo algoritmo metu operuojami duomenys buvo ne pasaulinės projekcijos tipo. Atbulinė perspektyvos transformacija (angl. *Reverse Perspective Mapping*) (RPM) reikalinga tam, kad rezultatų duomenys atitiktų pasaulinę projekciją. Transformuoti duomenis tada gali būti atvaizduojami vartotojo grafinėje sąsajoje.

Metodo grąžinami rezultatai yra rinkinys linijų objektų, kurias sudaro du taškai – pradžios ir pabaigos. Todėl transformacija atliekama ne su paveiksluko duomenimis, o tik su linijų taškais. Transformacijai naudojama atvirkštinė homogeninė transformacija:

$${}^i_gT = \begin{bmatrix} f_u c_2 + c_u c_1 s_2 & c_u c_1 c_2 - s_2 f_u & -c_u s_1 & 0 \\ s_2(c_v c_1 - f_v s_1) & c_2(c_v c_1 - f_v s_1) & -f_v c_1 - c_v s_1 & 0 \\ c_1 s_2 & c_1 c_2 & -s_1 & 0 \\ c_1 s_2 & c_1 c_2 & -s_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (48)$$

Čia kiekvieno kelio erdvėje esančio taško ${}^gP = \{x_g, y_g, -h, 1\}$ koordinatės paveiksluko erdvėje yra ${}^iP = {}^i_gT {}^gP$. Transformacijos rezultatas vaizduojamas 47 pav.



47 pav. Atbulinės perspektyvos transformacijos rezultatai

3.3. Metodo rezultatai, privalumai ir trūkumai, tolimesnis tyrimas

Vaizdo kameros pagalba išgaunamų vertikalių kelio ženklavimo juostų ir kelio kraštų rezultatų tikslumas ir stabilumas yra labai svarbus aspektas, kai tokia pagalbinė vairuotojo sistema yra diegiama į transporto priemones. Todėl buvo atliekami sukurto metodo tikslumo ir stabilumo vertinimo bandymai. Vaizdo fiksavimui naudojama plataus lęšio vaizdo kamera „GoPro Hero HD“. Metodo patikimumo vertinimo metu buvo atlikti šie kelio vertikalių ženklavimo juostų ir kelio kraštų atpažinimo bandymai:

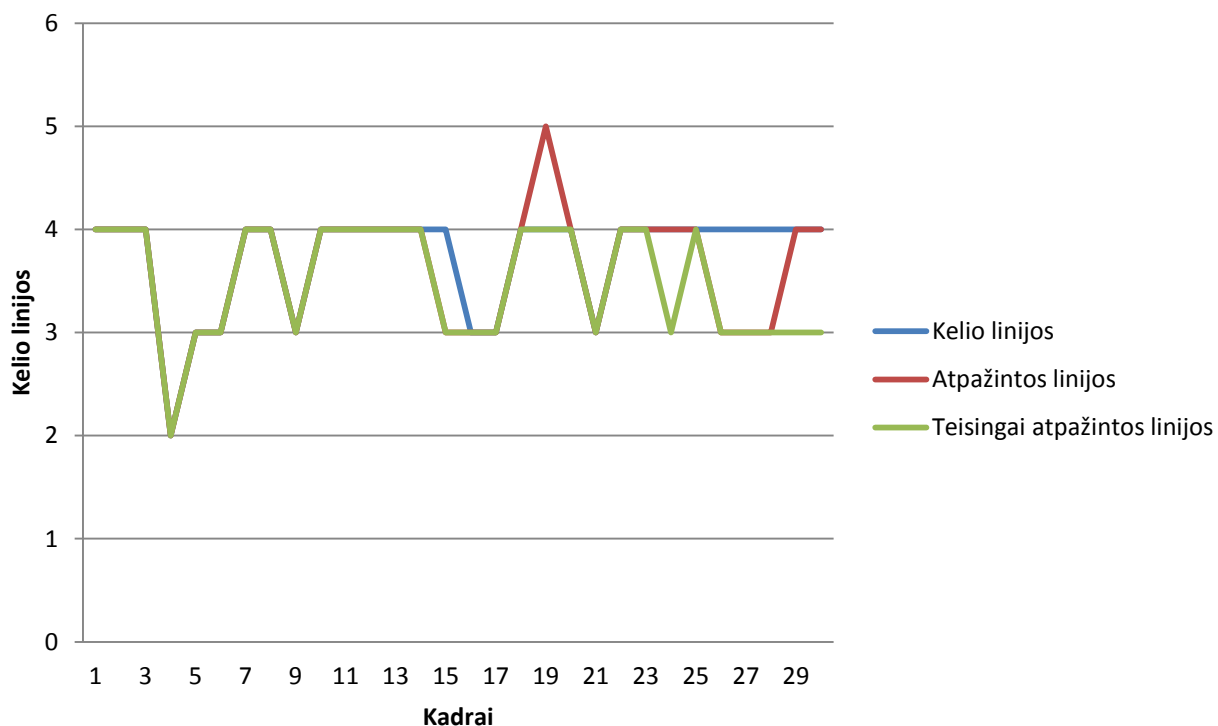
- Atpažinimas, kai kelio ženklavimo juostos yra aiškiai matomos, užmiesčio kelias;
- Atpažinimas, kai kelio ženklavimo juostos yra aiškiai matomos, bet šešėlyje, užmiesčio kelias;
- Atpažinimas, kai kelio ženklavimo juostos yra blankios, šešėlyje, kelias vingiuotas, šlapias, miesto kelias;
- Atpažinimas, kai kelio ženklavimo juostos aiškiai matomos - automagistralė;

Metodo tikslumas testavimas pradedamas nuo kelio juostų atpažinimo užmiesčio keliuose, kai nėra kelio ir kelio šalikelėje esančių objektų šešėlių apšvietimo skirtumo, transporto priemonių intensyvumas minimalus, kelias tiesus, nevingiuotas, kelio ženklavimo vertikalios juostos yra aiškiai matomos. Paveiksle 48 a) ir b) vaizduojamas visų kelio juostų, atpažintų kelio juostų bei teisingai atpažintų kelio juostų tam tikroje vaizdų sekoje palyginimas. Kiekvienas vaizdo kadras fiksuojamas kas vieną sekundę. Tai yra 60 kadrų per minutę. Pagal 48 a) pav. galima matyti, jog kelio juostų atpažinimo proceso rezultatai yra tolygūs. Teisingai atpažintų juostų skaičius atitinka kelyje esančias juostas. Pagal 48 b) pav. galima matyti, kad atpažinimas vykdomas 93,75% tikslumu – iš 112 juostų teisingai yra atpažintos 105.

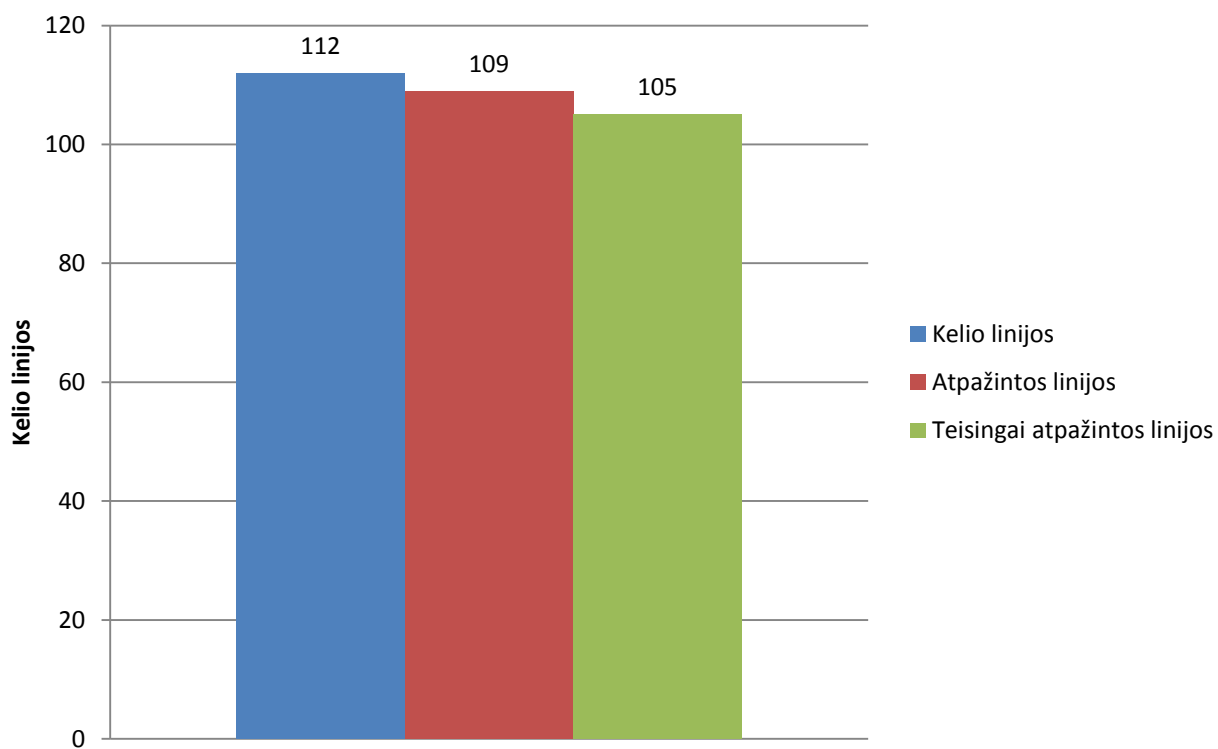
Paveiksle 49 a) ir b) vaizduojamas kelio juostų atpažinimas, vykdomas lygiai tokiomis pačiomis sąlygomis kaip ir pirmajame bandyme, tačiau yra didelis skirtumas tarp kelio ir šalikelės objektų sudaromų šešėlių apšvietimo. Atpažinimas vykdomas 91,89 % tikslumu. Tai reiškia, kad šešėlių įtaka yra, bet minimali. Metodo atpažinimo tikslumas mažėja 1,86 %.

Paveiksle 50 a) ir b) vaizduojamas bandymas, atliktas miesto keliuose. Kelio danga yra šlapi, dėl to kelio juostos yra matomos blogiau. Kelias vingiuotas. Transporto priemonių srautas intensyvus. Atpažinimas vykdomas su labai didele paklaida. Randamos neegzistuojančios juostos. Taip atsitinka dėl didelio triukšmo bei kelio vingiuotumo, kadangi kelio vingio lankas traktuojamas kaip dvi juostos. Atpažinimo tikslumas 65,21%.

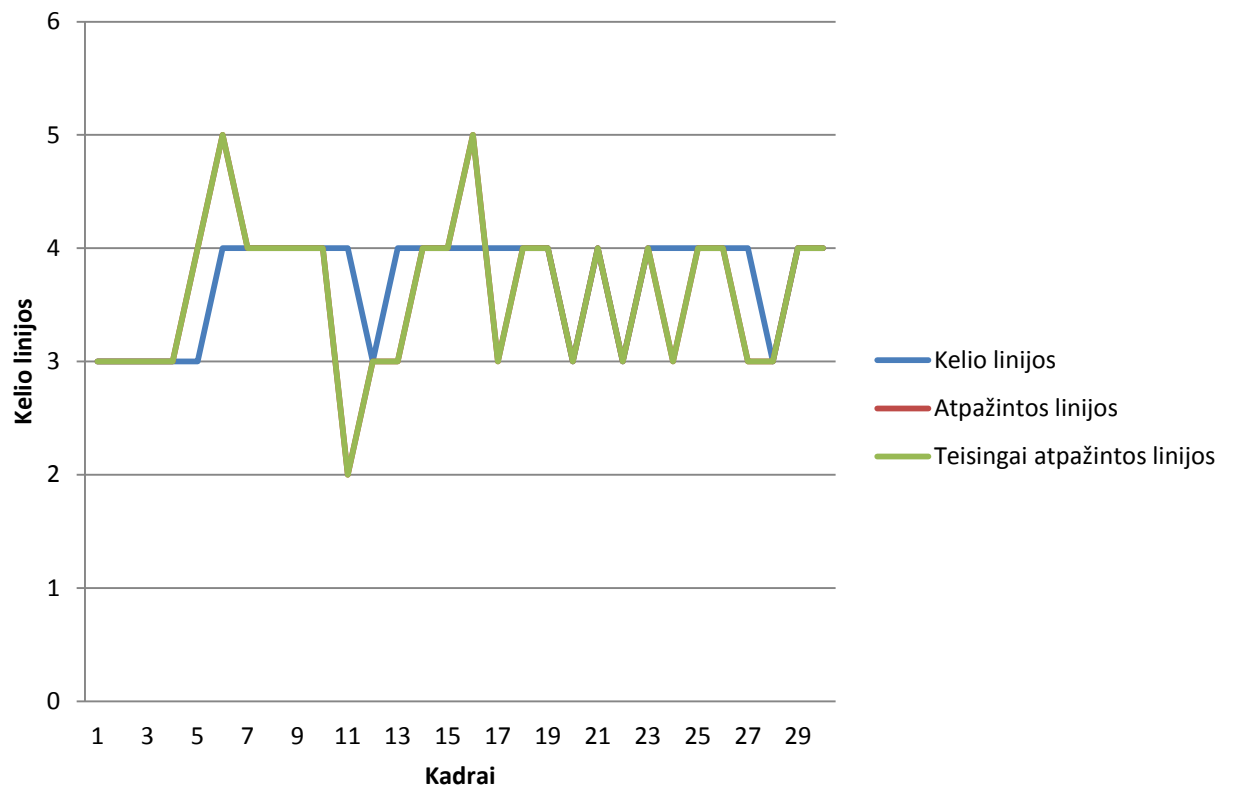
Paveiksle 51 a) ir b) vaizduojami bandymo rezultatai, gauti automagistralės kelio ruože. Atpažinimas, palyginus su miesto bei užmiesčio keliais, yra itin tikslus – 95,5 %.



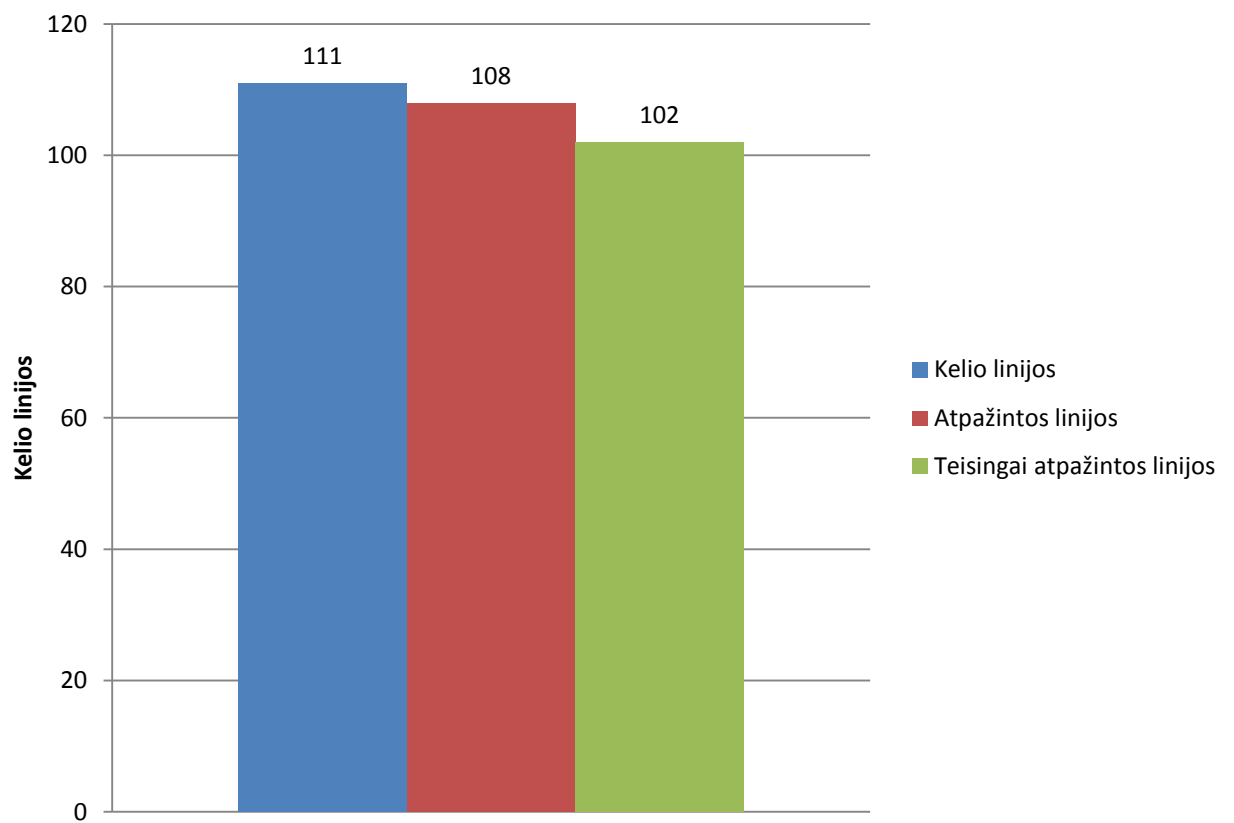
48 a) pav. Metodo veikimo bandymas: kelio juostos aiškiai matomos, užmiesčio kelias



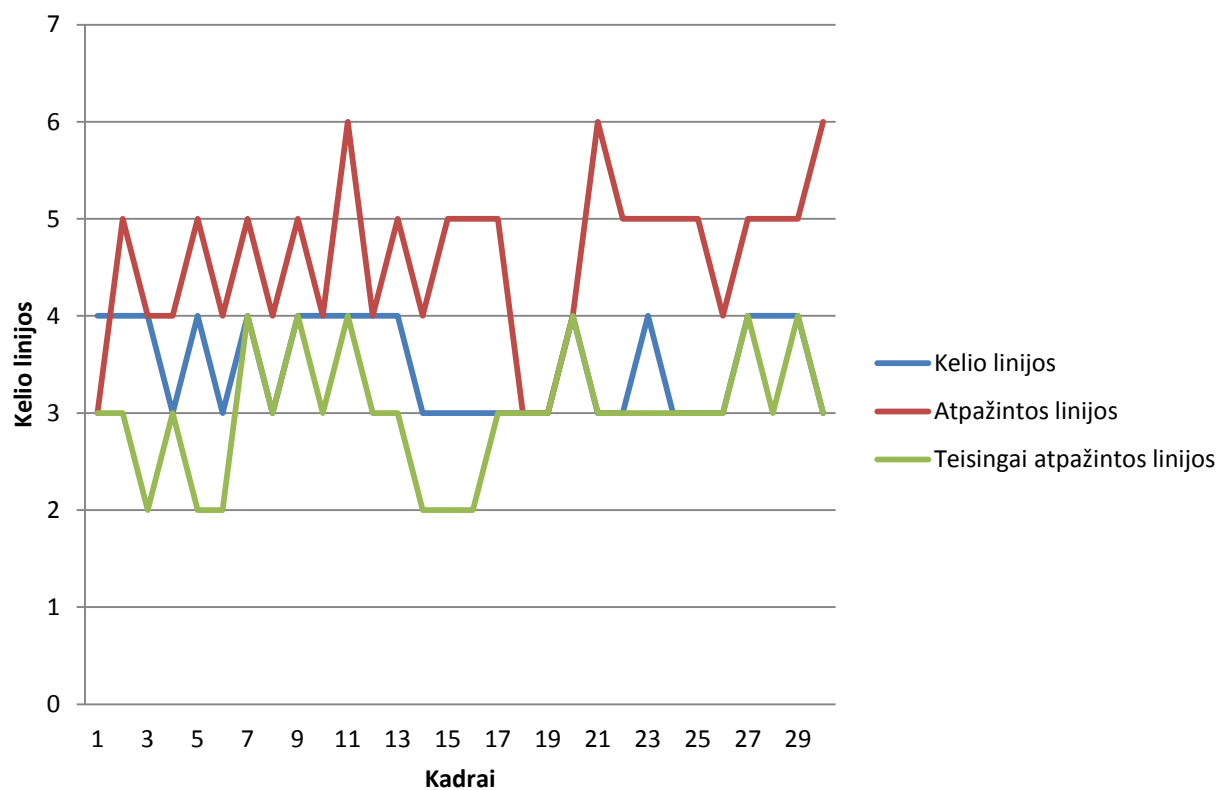
48 b) pav. Metodo veikimo bandymas: kelio juostos aiškiai matomos, užmiesčio kelias



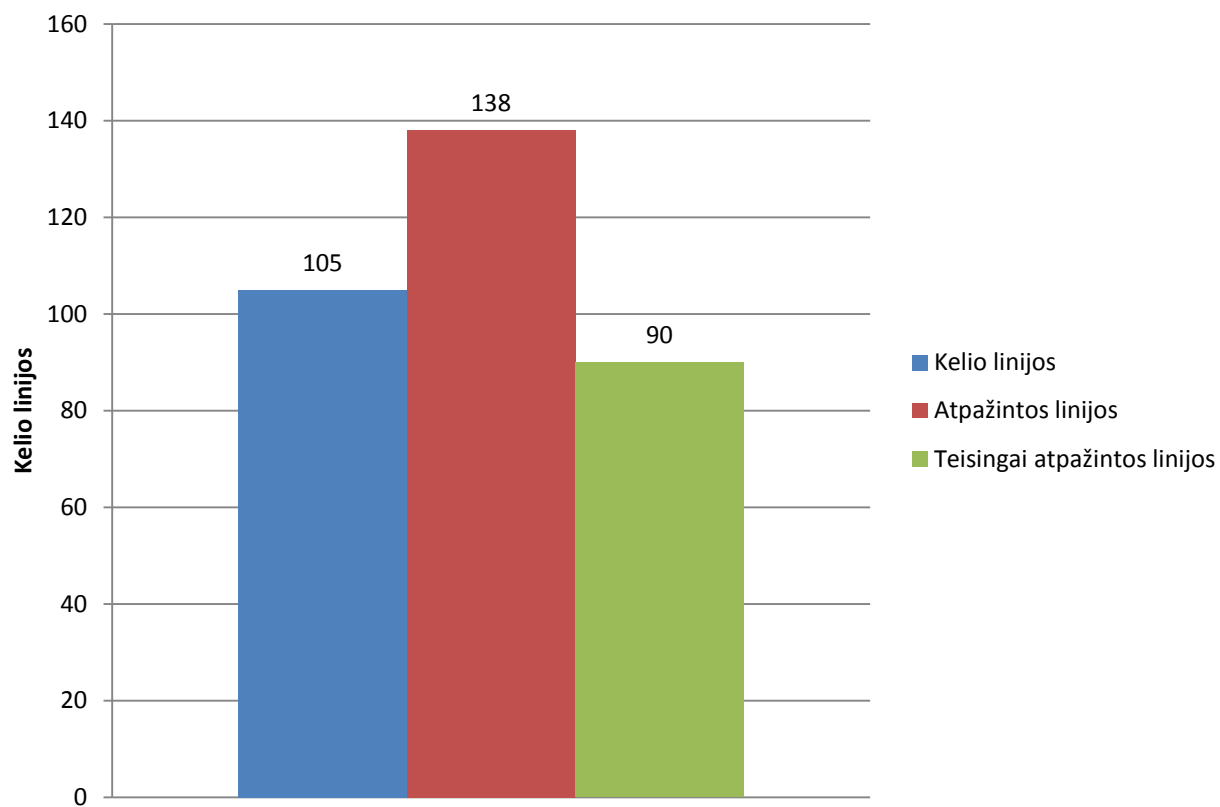
49 a) pav. Metodo veikimo bandymas: kelio juostos aiškiai matomos, šešėlyje, užmiesto kelias



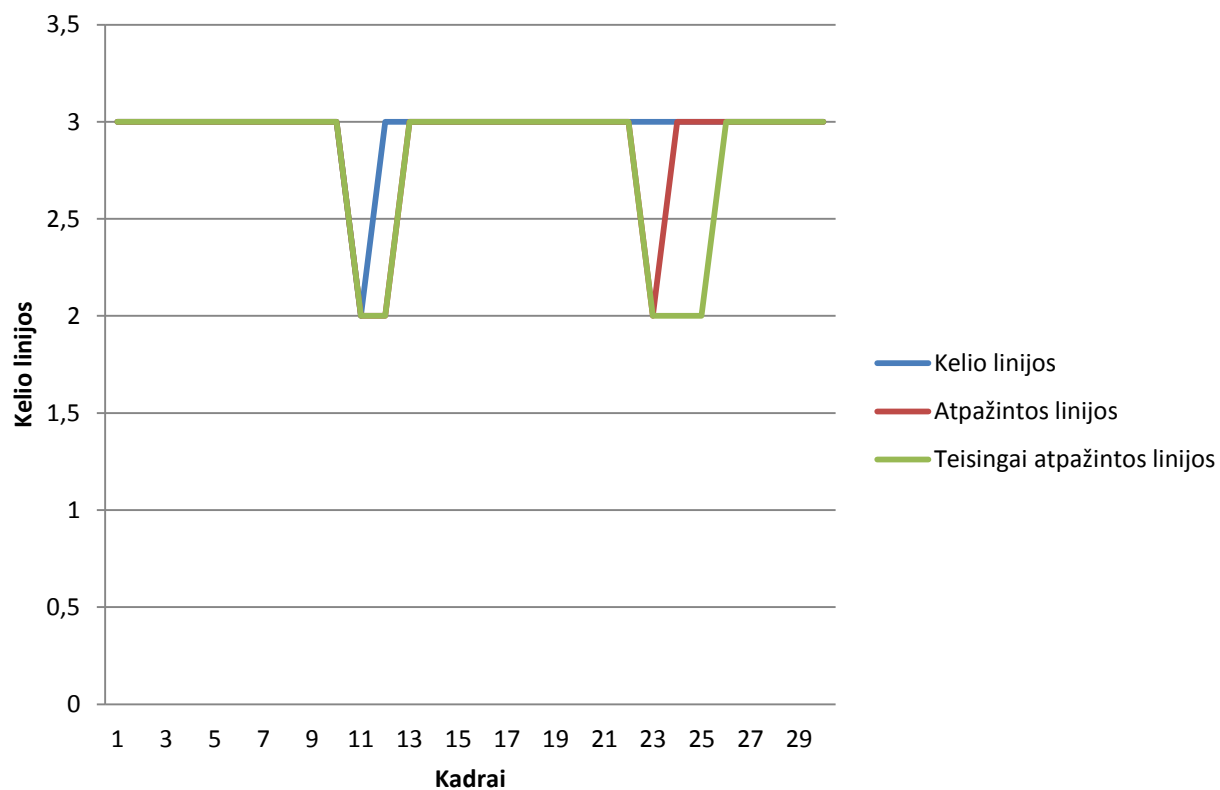
49 b) pav. Metodo veikimo bandymas: kelio juostos aiškiai matomos, šešėlyje, užmiesto kelias



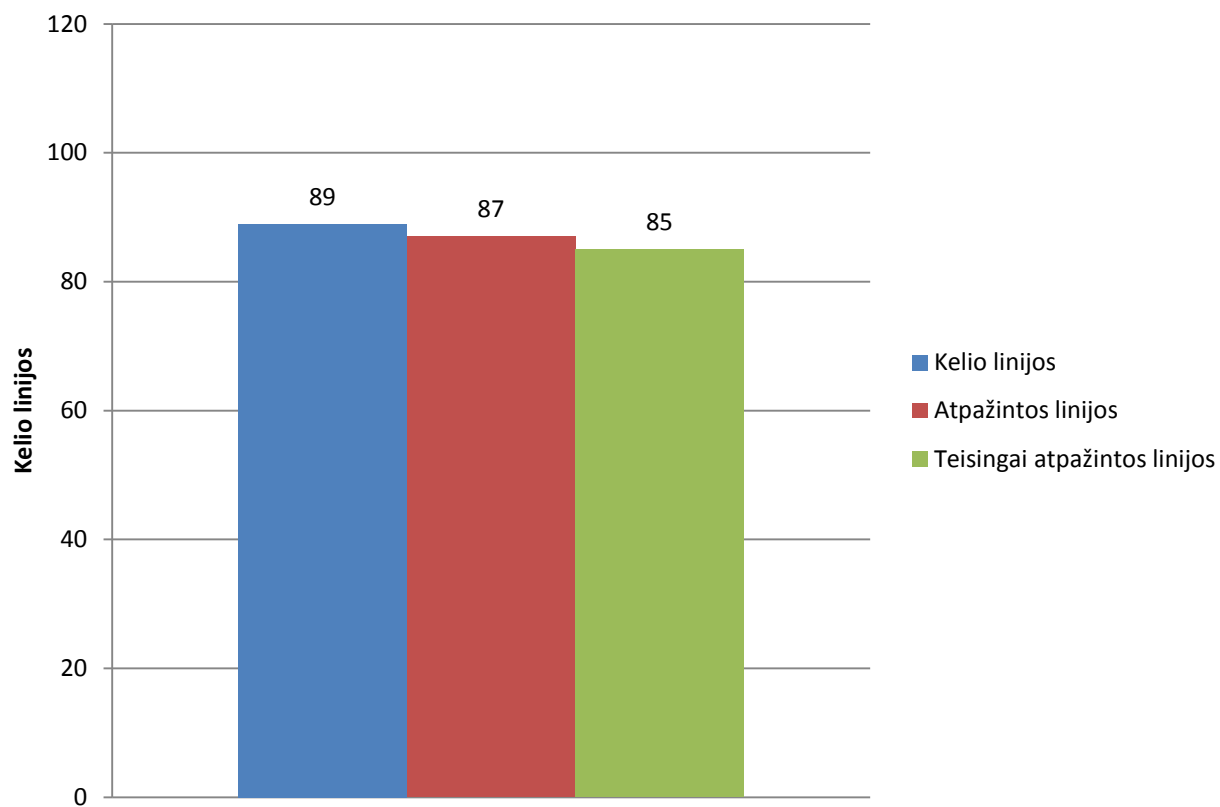
50 a) pav. Metodo veikimo bandymas: kelio juostos blankios, šešėlyje, kelias vingiuotas, šlapias, miesto kelias



50 b) pav. Metodo veikimo bandymas: kelio juostos blankios, šešėlyje, kelias vingiuotas, šlapias, miesto kelias



51 a) pav. Metodo veikimo bandymas: kelio juostos automagistralėje



51 b) pav. Metodo veikimo bandymas: kelio juostos automagistralėje

5 lentelė. Borkar A. ir Hayes M. (2009) kelio juostų atpažinimo metodo RLDT-RK tikslumas

Kelio tipas	Transporto intensyvumas	Metodo vidutinis atpažinimo tikslumas (60 kadrų per 1 min.)		
		Teisingai atpažinta	Klaidingai atpažinta	Neatpažinta
Greitkelis	Žemas	92,27%	6,49%	1,22%
	Vidutinis	92,14%	4,43%	3,45%
Miesto kelias	Žemas	82,41%	12,6%	4,91%
	Vidutinis	72,56%	20,17%	8,26%

6 lentelė. Įgyvendinto kelio juostų ir kelio kraštų atpažinimo metodo tikslumas

Kelio tipas	Transporto intensyvumas	Metodo vidutinis atpažinimo tikslumas (60 kadrų per 1 min.)		
		Teisingai atpažinta	Klaidingai atpažinta	Neatpažinta
Greitkelis	Žemas	95,5%	2,25%	2,25%
Miesto kelias	Vidutinis	65,21%	20,5%	14,29%
Užmiesčio kelias	Žemas	93,75%	3,57%	2,68%
	Vidutinis	91,89%	5,41%	2,7%

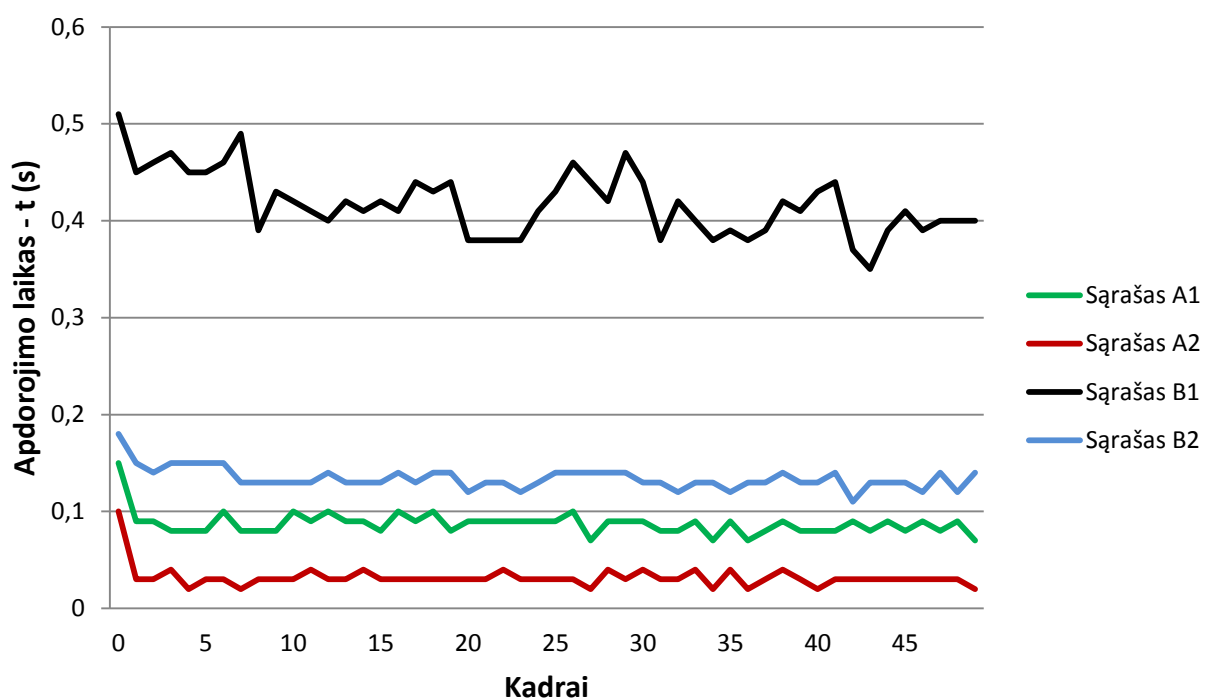
5 lentelėje pateikiami Borkar A. ir Hayes M. (2009) siūlomo kelio juostų atpažinimo metodo RLDT-RK tikslumas. Bandymai buvo atlikti greitkelyje ir miesto kelyje, esant žemam ir vidutiniam transporto priemonių intensyvumui. Kelio ženklavimo juostų būklė vienoda. Galima pastebėti, kad juostų atpažinimo tikslumas yra smarkiai įtakojamas transporto priemonių srauto intensyvumo, kadangi dažnai kelio ženklavimo juostos yra uždengiamos aplinkinių transporto priemonių. Pagal metodo aprašymą šią problemą turėtų spręsti Kalmano filtro taikymas, tačiau dažnai ženklavimo juostos ilgesniam laiko tarpui yra užstojamos, o Kalmano filtras nesugeba įvertinti naujai atsiradusių kituose vaizdo kadruose. Didelę įtaką taip pat daro ir miesto kelio vingiuotumas bei sankryžų gausa. Tačiau šio metodo taikymas greitkelyje rodo aukštą atpažinimo tikslumą esant žemam ir vidutiniam eismo intensyvumui.

6 lentelėje pateikiami įgyvendinto metodo rezultatai. Bandymai atlikti greitkelyje, miesto bei užmiesčio keliuose. Metodo tikslumui didelę įtaką daro transporto priemonių eismo intensyvumas, kelio vingiuotumas bei blogos oro sąlygos, todėl atpažinimo tikslumas yra žymiai mažesnis nei Borkar A. ir Hayes M. (2009) RLDT-RK siūlomo metodo. Būtina pabrėžti, kad taip pat didėja metodo klaidingas atpažinimas – išgaunamos neegzistuojančios kelio ženklavimo

juostos. Tačiau šis metodas tinka kelio ženklavimo juostų atpažinimui užmiesto keliuose bei greitkeliuose. Būtina pažymėti, kad bandymai yra atlikti su skirtingais duomenimis ir skirtingomis sąlygomis nei RLDT-RK metodo pateiktame aprašyme. Buvo stengiamasi bandymus atlikti kuo panašesnėmis sąlygomis, todėl šie rezultatai negali būti tiesiogiai lyginami. Bandymai atlikti nešiojamu kompiuteriu (*Intel Core Duo T2350 1860 MHz 2 GB RAM*).

Remiantis atliktais bandymais, galima teigti, kad sukurtas kelio vertikalių ženklavimo juostų ir kelio kraštų atpažinimo metodas yra atsparus daliniam vaizdo triukšmui, daliniam kelio linijų uždengimui, bei apšvietimo kontrasto buvimui. Tačiau labai jautrus, kai kelio danga yra šlapia, kelio ženklavimas ir kelio kraštai yra blankūs, sunkiai įžiūrimi, vingiuoti, transporto priemonių srautas intensyvus.

Atlikus metodo veikimo greičio palyginimą buvo nustatyta, kad keičiant paveiksluko IPM transformacijos srities mastelį dvigubai, metodo atpažinimo tikslumas beveik nenukenčia – sumažėja vidutiniškai 2,3%, o metodo veikimo sparta pagreitėja trigubai (52 pav.). Paveikslukų sąrašas A1 (52 pav.) (256x240 rezoliucijos) prieš IPM mastelio mažinimą buvo apdorojamas per 4,37s, vienas paveikslukas vidutiniškai per 0,0874s, po mastelio mažinimo paveikslukų sąrašas A2 apdorojamas per 1,53s, vienas paveikslukas vidutiniškai per 0,0306s. Paveikslukų sąrašas B1 (640x480 rezoliucijos) prieš IPM mastelio mažinimą - 20,64s, vienas paveikslukas - 0,4128s, po mastelio mažinimo B2 - 6,57s, vienas paveikslukas - 0,1314s. Svarbu pažymėti, kad RLDT-RK metodo aprašyme pateikiamas vieno paveiksluko vidutinis apdorojimo greitis – 0,8s.



52 pav. Metodo veikimo sparta keičiant paveiksluko IPM transformacijos mastelio dydį

Kelio juostų ir kelio kraštų atpažinimas tiesiogiai priklauso nuo pradinio vaizdo paruošimo ir apdorojimo. Šiuo metu vertikalių juostų ryškinimui naudojamas antros eilės išvestinės Gauso filtras, o horizontalia kryptimi vykdomas glodinimas Gauso filtru. Greitesnei ir tikslesnei juostų ryškinimo operacijai galima taikyti Gauso filtrų skirtumo metodą (angl. *Difference of Gaussians*) (DoG). Šis metodas paremtas tuo, kad paveiksliukas yra apdorojamas atskirai du kartus Gauso filtru su skirtingomis standartinio nuokrypio reikšmėmis, o rezultatas yra apdorotų paveiksliukų skirtumas. Tokiu būdu išgaunami dviejų vaizdų skirtumai. Šie skirtumai dažniausiai yra paveiksliuko objektų briaunos. Taikant DoG metodą tik horizontalia kryptimi galima išgauti tikslesnes pradinių kelio ženklavimo juostų bei kelio kraštų pozicijas.

Išvados ir rezultatai

Atlikus darbo probleminės srities analizę, išnagrinėjus praktikoje naudojamus kelio ženklavimo vertikalių juostų ir kelio kraštų atpažinimo metodus, jų veikimo principus bei aspektus, aptarus vaizdų analizėje naudojamus briaunų ir linijų išgavimo ir įvertinimo būdus, realizavus kelio juostų ir kraštų atpažinimo sistemą, galima daryti šias darbo išvadas:

- Dažniausiai praktikoje naudojami metodai yra paremti paveiksliuko spalvinių komponentų konvertavimu į atskirą spalvinę erdvę; paveiksliuko pilkumo intensyvumo kitimo nagrinėjimu; išskirtų paveiksliuko briaunų ir linijų tinkamumo pagal matematinius modelius įvertinimu; GPS ir LIDAR sistemų kaip atskaitos taško naudojimu; neuroninių tinklų idėja, kai naudojamos iš anksto sudarytos apmokymų duomenų bazės.
- Patobulintas ir įgyvendintas pasirinktas perspektyviausias kelio juostų atpažinimo metodas - RLDT-RK. Aprašyti šio metodo veikimo etapai. Išskirtos probleminės sritys. Įgyvendintas ir panaudotas pradinio vaizdo apdorojimo būdas – IPM transformacijos taikymas paveiksliuko perspektyvinio vaizdo korekcijai atlikti. Canny briaunų išskyrimo metodas dėl greitaiveikos stokos pakeistas Gauso vertikalių linijų ryškinimo ir glodinimo filtro taikymu. Hough transformacijos taikymas preliminarinių ženklavimo juostų išskyrimui pakeistas nauju greitu metodu, kai nagrinėjama paveiksliuko stulpelių intensyvumo funkcijos pasiskirstymas horizontalia kryptimi, o kelio juostų tinkamumo įvertinimas vykdomas tik maksimalias intensyvumo reikšmes įgyjančiose srityse.
- Išnagrinėjus rezultatus galima teigti, kad sukurtas metodas netik sparčiai apdoroja paveiksliukų duomenis, bet taip pat pasiektas aukštas kelio vertikalių ženklavimo juostų ir kelio kraštų atpažinimo tikslumas (greitkeliuose – 95,5%; užmiesčio keliuose – 93,75%, vidutinio intensyvumo eismo metu – 91,89%). Taip pat pasiektas mažesnis klaidingai atpažintų juostų skaičius. Testuojant miesto kelius itin blogomis sąlygomis teisingai atpažinta 65,21%, tačiau neegzistuojančių juostų atpažinta 20,5%.

Literatūros sąrašas

- 1) Amemiya, M.; Ishikawa, K.; Kobayashi, K. Watanabe, K. 2004. *Lane detection for intelligent vehicle employing omni-directional camera: SICE Annual Conference*, vol. 3: 2166-2170.
- 2) Assidiq, A.; Khalifa, O.; Islam, R.; Khan, S. 2008. *Real time lane detection for autonomous vehicles: IEEE international Conference on Computer and Communication Engineering*. 82-88.
- 3) Bahgat, M. 2008. *A simple implementation of unmarked road tracking: IEEE Mediterranean Elektrotechnical Conference 14*: 929-934.
- 4) Barjatya, A. 2004. *Block Matching Algorithms for Motion Estimation* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2012 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://image.ing.bth.se/ipl-bth/Siamak.khatibi/computerVisionBTH10Summer/papers/BlockMatchingAlgorithmsForMotionEstimation.pdf>>
- 5) Barret-Lennard M. 1998. *Second Order Derivative Shapes: Calculation, Visualisation and Application* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011 m. lapkričio 2 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/studentprojects/barrettlennard/honours/thesis.pdf>>
- 6) Bertozzi^A, M.; Broggi, A. 1998. *Gold: a parallel real-time stereo vision system for generic obstacle and lane detection: IEEE Transactions on Image Processing* 7: 62–81.
- 7) Bertozzi^B, M.; Broggi, A., Fascioli A. 1998. *Stereo inverse perspective mapping: theory and applications, Image and Vision Computing* 16: 585– 590.
- 8) Borkar, A.; Hayes, M.; Smith, M. T. 2009. *Robust Lane Detection and Tracking with RANSAC and Kalman filter*. 3261-3264.
- 9) Bradski, G.; Kaehler, A. 2008. *Learning OpenCV – Computer Vision with the OpenCV libraries*. O. Reilly Media: 1-6.
- 10) Bruhn, A.; Weickert, J. 2004. *Combining Local and Global Optic flow methods*. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2012 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <ftp://ftp.ldv.e-technik.tu-muenchen.de/pub/Motion_Estimation/Papers/lucas-kanade%20+%20horn-schunck.pdf>
- 11) Canny, J. F. 1986. *A Computational Approach to Edge Detection: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 8. 34-43.
- 12) Cheng, H.; Jeng, B.; Tseng, P.; Fan, K. 2006. *Lane detection within moving vehicles in the traffic scenes: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol 7, no. 4. 571-582.

- 13) Chin, K.; Lin, S. 2005. *Lane detection using color-based implementation: IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. 700-711.
- 14) Cochran, W. 1977. *Sampling Techniques*, 3rd edition. New York: John Wiley & Sons.
- 15) Ieng, S.; Tarel, J.; Labayrade, R. 2003. *On the design of a single lane-markings detector regardless the on-board cameras position: Proceedings of the IEEE Intelligent vehicle Symposium*. 564-569.
- 16) Kai, N.; Kezhong, H. 2003. *THMR-V: an effective robust high speed system in structured road: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol5: 4370-4374.
- 17) Kazakevičiūtė-Januškevičienė, G. 2011. *Rastrinių vaizdų geometrinės transformacijos. Mokomoji knyga*. VGTU. Vilnius. 59-64.
- 18) Kluwer A. 1997. *Neural network vision for robot driving: International Series in engineering and Computer Science*. 53-72.
- 19) Kreucher, C. 1999. *A lane extraction algorithm that uses frequency domain features. Robotics and Automation, IEEE Transactions*: 343-350.
- 20) Kreucher, C.; Lakshmanan, S. 1999. *Lana: a lane extraction algorithm that uses frequency domain features: IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 15. 343-350.
- 21) Li, Q.; Zheng, N.; Cheng, H. 2003. *An adaptive approach to lane markings detection: IEEE intelligent Transportation Systems Conference*, vol. 1. 510-514.
- 22) Mallot, H. A.; Buthoff, H. H.; Little J. J. 1991. Bohrer S. *Inverse perspective mapping simplifies optical flow computation and obstacle detection*: 177-185.
- 23) Matas, J.; Galambos, C.; Kittler J. *Progressive Probabilistic Hough Transform*: 257-265.
- 24) Maud; Hussain; Samed. *Implementation of Inverse Perspective Mapping Algorithm For The Development Of An Automatic Lane Tracking System* [interaktyvus]. 2004. [Žiūrėta 2011 lapkričio 19 d.]. Prieiga per internetą: <http://ecmr07.informatik.uni-freiburg.de/proceedings/ECMR07_0039.pdf>.
- 25) Mori, R.; Kobayashi, K.; Watanabe, K. 2004. *Hough-based robust lane boundary detection for the omni-directional kamera*. SICE Annual Conference, vol. 3: 2113–2117.
- 26) Point-Line Distance 2-Dimensional [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011 lapkričio 13 d.]. Prieiga per internetą: <<http://mathworld.wolfram.com/Point-LineDistance2-Dimensional.html>>
- 27) Pomerleau, D. 1989. *ALVINN: an autonomous land vehicle in a neural network*. Morgan Kaufmann Publisher Inc. San Francisco, CA, USA.
- 28) Ruzgienė, B.; Förstner, W. 2005. *RANSAC for Outlier Detection*: 83-87.

- 29) Schreiber, D.; Alefs, B.; Clabian, M. 2005. *Single camera lane detection and tracking: Proceedings of the 2005 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*. 1114 - 1119.
- 30) Sparbert, J.; Dietmayer, K.; Streller, D. 2001. *Lane detection and street type classification using laser range images: IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*. 454-459.
- 31) Trzebiatowski, M.; Gern, A.; Franke, U.; Kaeppler, U.; Levi, P.; Res, D.; Stuttgart, G. 2004. *Detecting reflection posts-lane recognition on country roads: IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. 304-309.
- 32) Tsai, T.; Chan, V. 2006. *HIS color model based lane-marking detection: IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*. 1168-1172.
- 33) Tsogas, M.; Polychronopoulos, A.; Amditis, A. 2007. *Using digital maps to enhance lane keeping support systems: IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. 148-153.
- 34) Umbaugh, S. 2011. *Digital Image Processing and Analysis. Second Edition*. 176-183.
- 35) Vliet, L.; Young, I.; Verbeek, P. 1998. *Recursive Gaussian Derivative Filters* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011 m. lapkričio 2 d.]. Prieiga per internetą: <<http://homepage.tudelft.nl/e3q6n/publications/1998/ICPR98LVTPV/ICPR98LVTPV.pdf>>
- 36) Wang, H.; Chen, Q. 2006. *Real-time Lane Detection in Various Conditions and Night Cases. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*: 564-569
- 37) Wang, L.; Zhang, Y.; Feng, J. *On the Euclidean Distance of Images* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011 m. lapkričio 27 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.cis.pku.edu.cn/faculty/vision/wangliwei/pdf/IMED.pdf>>
- 38) Welch, G.; Bishop, G. 2006. *A Introduction to the Kalman Filter*: Department of Computer Science [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011 lapkričio 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf>
- 39) Welsh, T. 2004. *Parallax mapping with Offset Limiting: A Per-Pixel approximation of Uneven surfaces* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2012 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <https://www8.cs.umu.se/kurser/5DV051/VT09/lab/parallax_mapping.pdf>.

KELIO ŽENKLINIMO VERTIKALIŲ LINIJŲ IR KELIO KRAŠTŲ ATPAŽINIMO TYRIMAS

Valdemaras Tribockis¹

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹v.tribockis@gmail.com

Santrauka. Nagrinėjama miesto gatvių ženklavimo vertikalinių linijų ir kelio kraštų aptikimas ir atpažinimas. Kelio kraštų bei vertikalinių linijų atpažinimas gali būti naudojamas įvairiose srityse: autotransporto priemonės lokalizavimas kelyje, vairuotojo pagalbinė sistema, autonominė sistema. Atpažinimą sudaro kelio segmento transformavimas į paukščio skrydžio projekciją, vertikalinių linijų filtro taikymas, lokalių maksimumų radimas, supaprastintos Hough transformacijos taikymas linijų išgavimui ir grupavimui, RANSAC metodo taikymas pradinių linijų išgavimui ir rezultatų apdorojimas.

Reikšminiai žodžiai: kelio linijų atpažinimas, IPM, vertikalinių linijų filtras, Hough transformacija, RANSAC.

Įvadas

Vairuotojo saugumas visada buvo pagrindinis tikslas, kadangi vairuotojo išsiblaškymas yra pagrindinė nelaimingų atsitikimų kelyje priežastis. Pagal tyrimus, atliekamus Nacionalinės Europos Kelių Eismo Saugos Administracijos, daugiau kaip 20% nelaimingų atsitikimų kelyje kyla dėl vairuotojo išsiblaškymo. Tolimesni tyrimai parodė, jog maždaug 60% šių įvykių priežastimi tampa vairuotojai besinaudojantys mobiliaisiais telefonais, navigacijos prietaisais, automobilio muzikos grotuvu. Ši statistika paskatino automobilių kūrėjų pramonę bei akademines įstaigas sutelkti dėmesį į saugumo sistemų diegimą į automobilius. Šių saugumo sistemų pagrindinis tikslas – vairuotojo informavimas apie susidariusią pavojingą situaciją.

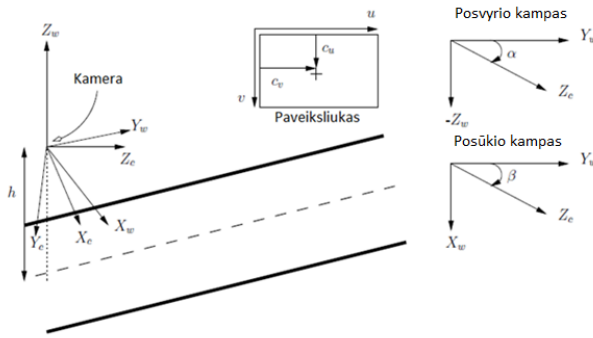
Spartėjant technologijų raidai bei tobulėjant elektronikos prietaisams, į transporto priemones integruojamos vis pažangesnės technologijos. Šios pagalbinės sistemos skirstomos į dvi pagrindines grupes: pagalbines ir informacines sistemas. Pirmajai grupei priskiriamos automatinis šviesų įjungimas/išjungimas, šviesų intensyvumo reguliavimas, pastovaus greičio palaikymo ir automobilio parkavimo sistemos. Antrajai grupei priskiriamos informacinės sistemos, įspėjančios vairuotoją apie galimą susidūrimą su aplinkinėmis transporto priemonėmis, pašalinius objektus ant kelio, stebinančios ir analizuojančios kelio ženklus. Šiame straipsnyje dėmesys skiriamas kelio vertikalinių linijų ženklavimo ir kelio kraštų atpažinimui. Pagrindinis tikslas yra atpažinti kelio ženklavimo linijas ir perduoti duomenis atitinkamai saugumo sistemai. Saugumo

sistemos užduotis – atvaizduoti duomenis vairuotojui. Dauguma saugumo sistemų kelio ženklavimo atpažinimui naudoja vaizdo kameras, lazerinius diapazono vaizdus, GPS įrangą. Šiame straipsnyje nagrinėjamas kelio ženklavimo atpažinimo būdas naudoja video kamera fiksuotą medžiagą. Kelio ženklavimo linijų atpažinimas miesto gatvėse yra ypač sudėtinga užduotis. Miesto gatvės nuo užmiesčio gatvių skiriasi keliais faktoriais: eismo intensyvumas, aplinkinių pastatų gausa, šalikelėse parkuojami automobiliai, medžių šešėliai, staigūs kelio krypties pokyčiai, kelio susiaurėjimas arba praplatėjimas, nežymus kelio ženklavimas, kintamas šviesos intensyvumas tarp aukštų pastatų.

Šiame straipsnyje pateikiamas paprastas, greitas bei efektyvus šios problemos sprendimo būdas. Jis pagrįstas nagrinėjant kelio kontūrą, transformuotą į paukščio skrydžio projekciją. Ši transformacija vadinama *Inverse Perspective Mapping(IPM)*. Transformuotas vaizdas yra apdorojamas Gauso filtru, optimizuotu vertikalinių linijų išryškinimui. Filtruotas vaizdas apdorojamas paliekant tik maksimalias reikšmes. Visos vertikalios tiesios linijos išgaunamos naudojant supaprastintą *Hough* transformacijos metodą. Išgautos linijos apdorojamos naudojant RANSAC statistinį metodą – išrenkamos labiausiai atitinkančios tiesios linijos lygtį. Galiausiai atliekamas rezultatų apdorojimas – atrenkamos linijos su geriausiu panašumo koeficientu, transformuojamos į pradinę paveiksluko fragmento projekciją ir atvaizduojamos.

Inverse Perspective Mapping (IPM)

Pirmasis žingsnis kelio ženklavimo linijų atpažinime yra kameros perspektyvinio vaizdo transformacija į paukščio skrydžio perspektyvą. Šio metodo pagalba kelio linijos tampa lygiagrečios viena kitai tam tikru fiksuotu atstumu viena nuo kitos. Todėl kelio linijos traktuojamos kaip vertikalios, stačios horizontaliai X ašiai. Šiai transformacijai yra reikalingi tiek vaizdo kameros parametrai, tiek aplinkos parametrai. Kameros parametrai: židinio nuotolis, kameros objektyvo plotis, optinis centras. Aplinkos parametrai: kameros pasvirimo bei pasukimo kampai ir kameros atstumas nuo žemės – 1 pav.



1 pav. IPM koordinatės. Kairėje: koordinatės – pasaulio, kameros ir paveiksluko - ašys. Dešinėje: posūkio ir posvyrio kampų apibrėžimai.

Pasaulinė erdvė aprašoma šia išraiška - $\{F_w\} = \{X_w, Y_w, Z_w\}$, vaizdo kameros - $\{F_c\} = \{X_c, Y_c, Z_c\}$ centruojama ties kameros optiniu centru, kameros paveikslukas - $\{F_i\} = \{u, v\}$. Kameros aukštis nuo žemės - h . Kiekvieno taško ${}^iP = \{u, v, 1\}$ paveiksluko erdvėje projekcija kelio erdvės atžvilgiu apskaičiuojama taikant homogeninę transformaciją:

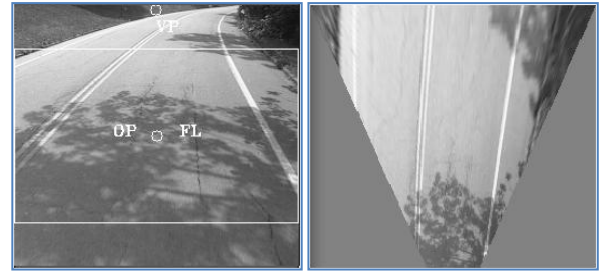
$${}^gT = h \cdot \begin{bmatrix} -\frac{1}{f_u}c_2 & \frac{1}{f_v}s_1s_2 & \frac{1}{f_u}c_u c_2 - \frac{1}{f_v}s_1s_2 - c_1s_2 & 0 \\ \frac{1}{f_u}s_2 & \frac{1}{f_v}s_1c_1 & -\frac{1}{f_u}c_u s_2 - \frac{1}{f_v}c_v s_1c_2 - c_1c_2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{f_v}c_1 & -\frac{1}{f_v}c_v c_1 + s_1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{hf_v}c_1 & \frac{1}{hf_v}c_v c_1 - \frac{1}{h}s_1 & 0 \end{bmatrix}$$

kur ${}^gP = {}^gT {}^iP$ yra taškas kelio erdvėje, atitinkantis tašką iP paveiksluko erdvėje, kur $\{f_u, f_v\}$ yra horizontalus ir vertikalus židinio nuotoliai, atitinkamai, $\{c_u, c_v\}$ yra optinio

centro koordinatės, o $c_1 = \cos \alpha$, $c_2 = \cos \beta$, $s_1 = \sin \alpha$ ir $s_2 = \sin \beta$. Šios transformacijos tinka bet kokio dydžio paveiksluko transformacijai. Atvirkštinė transformacija i_gT apskaičiuojama šiuo būdu:

$${}^i_gT = \begin{bmatrix} f_u c_2 + c_u c_1 s_2 & c_u c_1 c_2 - s_2 f_u & -c_u s_1 & 0 \\ s_2 (c_v c_1 - f_v s_1) & c_2 (c_v c_1 - f_v s_1) & -f_v c_1 - c_v s_1 & 0 \\ c_1 s_2 & c_1 c_2 & -s_1 & 0 \\ c_1 s_2 & c_1 c_2 & -s_1 & 0 \end{bmatrix}$$

kur kiekvieno kelio erdvėje esančio taško ${}^gP = \{x_g, y_g, -h, 1\}$ koordinatės paveiksluko erdvėje yra ${}^iP = {}^i_gT {}^gP$. Šių transformacijų pagalba kelio kameros perspektyvinis vaizdas transformuojamas į paukščio skrydžio perspektyvą – 2 pav. Kelio linijos paveiksluke yra lygiagrečios.



2 pav. IPM transformacija. Kairėje: pradinis paveikslukas. Dešinėje: transformuotas paveikslukas.

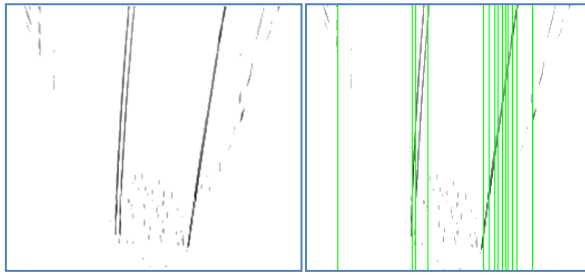
Vertikalių linijų filtras

Transformuotas IPM paveikslukas yra filtruojamas dviejų dimensijų Gauso filtru. Vertikalia kryptimi - glotninimo filtras, kur σ_y reikšmė yra pritaikyta tam tikro ilgio linijų atpažinimui (pagal nutylėjimą linijos ilgis yra 3 metrai): $f_v(y) = e^{-\frac{1}{2\sigma_y^2}y^2}$

. Horizontalia kryptimi - antros eilės Gauso išvestinė, kur σ_x reikšmė yra pritaikyta tam tikro pločio kelio

linijoms: $f_u(x) = \frac{1}{\sigma_x^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} \left[1 - \frac{x^2}{\sigma_x^2} \right]$. Filtras yra

pritaikytas specialiai ryškių vertikalių linijų tamsiame fone (kelio pagrindas - asfaltas) atpažinimui. 3 pav. pateiktas filtro taikymo pavyzdys. Kairiajame paveiksluke yra išryškintos vertikalios kelio ženklavimo linijos. Filtravimas atliekamas parenkant procentinę kvantilio reikšmę ($q = 97\%$) ir atmetant visus paveiksluko taškus, kurių reikšmė yra žemiau nei ribinė.



3 pav. IPM paveiksluko filtras.

Vertikalių linijų išskyrimas

Šio etapo metu iš apdoroto paveiksluko išskiriamos vertikalios linijos. Tam pasitelkiama supaprastinta *Hough* transformacija – kai naginėjama paveiksluko stulpelių intensyvumo funkcijos pasiskirstymas horizontalia kryptimi – 4 pav., ir RANSAC statistinis metodas – iteracinis matematinis metodas, įvertinantis modelio parametrus pagal stebėjimų duomenis. Šiuo atveju modelis – linijos tiesinė lygtis, duomenys – supaprastintos *Hough* transformacijos rezultatai, prieš tai išrenkant lokalias maksimalias reikšmes ir sugrupavus panašias linijas – taip atrenkamos unikalios, be aplinkinio triukšmo linijos. Linija yra aprašoma dviem nežinomaisiais – pradžios ir pabaigos taškais, tačiau kelio linija nėra visada tiesi, todėl šiuo atveju linija aprašoma keturiais taškais. Toks metodas sumažina paklaidos dydį. RANSAC algoritmas skirstomas į keturis pagrindinius žingsnius:

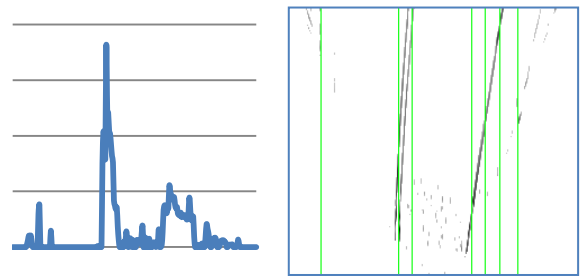
1. Keturių atsitiktinių duomenų parinkimas. Šiuo atveju duomenys yra pikselių reikšmės;
2. Tarp šių taškų aproksimuojama tiesi linija;
3. Skaičiuojama paklaidos reikšmė tarp aproksimuotos linijos ir visų duomenų. Išrenkami ir išsaugomi taškai su mažiausiomis paklaidų reikšmėmis;
4. Grįžtama į pirmą punktą.

Po tam tikro skaičiaus iteracijų, linija su mažiausia paklaidos reikšme bus geriausiai išsidėsčiusi tiesė duotojoje taškų plokštumoje – 5 pav.

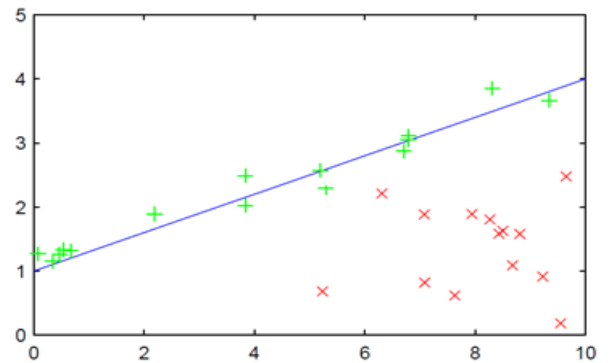
Iteracijų skaičius apskaičiuojamas kiekvienam paveikslukui atskirai. Jei 80% duomenų yra blogi – nesudaro tiesės, tikimybė pasirinkti keturis taškus, kurie sudarytų tiesę yra 0,05. Binominis skirstinys, nusakantis tikimybę, kad pasirinkti taškai sudarys tiesę, po n iteracijų:

$$1 - (1 - 0.05)^n$$

Iš čia apskaičiuojama, kad reikia $n = 50$ iteracijų, kad tikimybė, jog parinkti taškai atitiks modelį, būtų 0,92.



4 pav. Kairėje: paveiksluko stulpelių pikselių reikšmių suma. Dešinėje: lokalių maksimumai.



5 pav. Duomenų aibė. Tiesi linija. + žymėjimas linijai priklausantys taškai; - žymėjimas linijai nepriklausantys taškai.

Vertikalių linijų apdorojimas

Galutinis vertikalių kelio linijų atpažinimo žingsnis yra ankstesniame etape gautų rezultatų apdorojimas – lokalizuotos linijos pratęsimas, transformavimas į pradinę pasaulinę erdvę bei atvaizdavimas.

Kiekviena linija yra pratęsiama į abi puses, kadangi nagrinėjamas IPM regionas dažniausiai yra maža paveiksluko dalis – 2 pav. Linijos pratęsimas išvedus normales pagal jau egzistuojančius linijos taškus. Linija yra tęsiama tol kol kito pikselio reikšmė patenka į liniją sudarančių pikselių vidutinės ir maksimalios reikšmės intervalą.

Galiausiai tikrinama kiekvienos linijos geometrija. Per daug pasvirusios linijos yra atmetamos – pasirinktas intervalas $[-10^\circ; 10^\circ]$ nuo statmens.

Išvados

Straipsnyje aptariamas paprastas, greitas bei efektyvus vertikalių kelio žymėjimo juostų atpažinimo algoritmas. Algoritmas yra paremtas nagrinėjamos kelio dalies kontūro transformacija į paukščio skrydžio projekciją, Gauso filtro, pritaikyto vertikalių linijų tamsiame fone, taikymu, supaprastintos *Hough* transformacijos linijų segmentų aptikimui, RANSAC metodo kelio linijų atpažinimui naudojimas bei galutinis linijų geometrijos apdorojimas.



6 pav. Rezultatai.

Literatūra

- Mallot H. A.; Buthoff H. H; Little J. J; Bohrer S. Inverse perspective mapping simplifies optical flow computation and obstacle detection. 1991. 177-185.
- Maud; Hussain, Samed et al. Implementation of Inverse Perspective Mapping Algorithm For The Development Of An Automatic Lane Tracking System. 2004.
- Bradski G.; Kaehler A. Learning OpenCV – Computer Vision with the OpenCV libraries. O. Reilly Media. 2008
- Amol Borkar, Monson Hayes, Mark T. Smith, Sharathchandra Pankanti 2009. A Layered Approach to Robust Lane Detection At Night.
- Bahgat M. 2008. A simple implementation of unmarked road tracking; 930-935.
- Wang H.; Chen.Q. 2006. Real-time Lane Detection in Various Conditions and Night Cases, *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference* 564-569
- Chin. K.; Lin S. 2005. Lane detection using color-based implementation, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*: 700-711.
- Forsyth D. A.;Ponce J. 2002. Computer Vision: A modern approach.
- Derksen, J. J. 2003. Separation performance predictions of a Stairmand high efficiency cyclone, *AIChE Journal* 49: 1359-1371.

Zu Kim. 2006. Realtime lane tracking of curved local road. *Intelligent Transportation Systems, Proceedings of the IEEE*. 1150-1155.

Matas J.; Galambos C.; Kittler J. Progressive Probabalistic Hough Transform. 257-265.

Kreucher C. 1999. A lane extraction algorithm that uses frequency domain features. *Robotics and Automation, IEEE Transactions*. 343-350

RESEARCH OF VERTICAL LANE MARKERS AND ROAD BOUNDARIES EXTRACTION ON URBAN ROAD

V. Tribockis

Abstract

The paper describes an efficient, simple and robust algorithm for detecting and extracting road vertical lane markers and road boundaries. The algorithm is based on taking a top view transform of the road, filtering with Gaussian filters that are optimized to detect vertical lines on dark surface, detecting and grouping straight lines using simplified Hough transform, which is followed by RANSAC line fitting. Finally, lines localization and geometry check step is performed.

Keywords: road lane detection, IPM, vertical lines filter, Hough transform, RANSAC.