Kauno technologijos universitetas

Informatikos fakultetas

Lazerio linijos aptikimo algoritmas

Baigiamasis magistro projektas

Tadas Ivanovas

Projekto autorius

doc. dr. Armantas Ostreika

Vadovas

Kaunas, 2021

Kauno technologijos universitetas

Informatikos fakultetas

Lazerio linijos aptikimo algoritmas

Baigiamasis magistro projektas

Informatika (6211BX007)

Tadas Ivanovas

Projekto autorius

doc. Armantas Ostreika

Vadovas

Pareigų sutrumpinimas Vardenis Pavardenis

Recenzentas / Recenzentė

Kaunas, 2021

Kauno technologijos universitetas

Informatikos fakultetas

Tadas Ivanovas

Lazerio linijos aptikimo algoritmas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Tado Ivanovo, baigiamasis projektas tema „Lazerio linijos aptikimo algoritmas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)	(parašas)

Ivanovas, Tadas. Lazerio linijos aptikimo algoritmas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Armantas Ostreika; Kauno technologijos universitetas, Informatikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Informatika (I100).

Reikšminiai žodžiai: .....(įrašykite).

Kaunas, 2021. XX p.

Santrauka

Lorem ipsum dolor sit amet, eam ex decore persequeris, sit at illud lobortis atomorum. Sed dolorem quaerendum ne, prompta instructior ne pri. Et mel partiendo suscipiantur, docendi abhorreant ea sit. Recteque imperdiet eum te.

Eu eum decore inimicus consetetur, cu usu habeo corpora intellegam. Ut antiopam efficiendi deterruisset sit. Mel sint eirmod id, qui quot virtute id, dolor nemore forensibus usu id. Fugit dolore voluptatum cu vim. An vix veniam graecis insolens, sit posse iusto id. Ut vim ceteros percipit, id quo ubique recusabo, eum sint lucilius ea. In sumo inani numquam has.

Lazerio linija, kam naudojama. Kas šiame darbe yra rašoma (literatūra, algoritmas, tyrimas).

Ivadas pora sakinius
Tyrimo esme (tas tas padaryta)
ir rezultatai

Author’s surname, name. Title of the Final Degree Project. Bachelor's / Master's Final Degree Project / Final Degree Project of Minor Studies / Professional Studies (choose one) / supervisor abbreviation of the position, name and surname of the supervisor; Name of the Faculty, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): ..... (type here).

Keywords: ..... (type here).

Town, Year. Number of pages.

Summary

Lorem ipsum dolor sit amet, eam ex decore persequeris, sit at illud lobortis atomorum. Sed dolorem quaerendum ne, prompta instructior ne pri. Et mel partiendo suscipiantur, docendi abhorreant ea sit. Recteque imperdiet eum te.

Eu eum decore inimicus consetetur, cu usu habeo corpora intellegam. Ut antiopam efficiendi deterruisset sit. Mel sint eirmod id, qui quot virtute id, dolor nemore forensibus usu id. Fugit dolore voluptatum cu vim. An vix veniam graecis insolens, sit posse iusto id. Ut vim ceteros percipit, id quo ubique recusabo, eum sint lucilius ea. In sumo inani numquam has.

Turinys

Įvadas

Šiandien jau yra aibė pasiūlytų, sukurtų ir realizuotų lazerio linijos aptikimo sistemų. Daugelis jų yra skirtos pramonei, atitinkančios aukštus reikalavimus ir sąlyginai brangios. Jos paprastai naudojamos objektų orientacijos, padėties, tūrio ar paviršiaus ploto nustatymui. Nors tokios sistemos ir yra patikimos, jos paprastai būna stacionarios, pritvirtintos virš konvejerių ar kitų konstrukcijų, todėl jų panaudojimas mobilaus roboto aplikacijoje tampa komplikuotas. Dėl to atsiranda pigesnių, paprastesnių, reikalaujančių mažesnių resursų lazerio linijos aptikimo sistemų poreikis.

Tokią sistemą sudarytų paprasta vaizdo kamera ir lazerio linijos įrenginys, kuris projektuoja ryškią liniją ant įvairių paviršių. Tačiau pasitelkus vien paprastą vaizdo kamerą kyla nemažai linijos aptikimo iššūkių, pavyzdžiui, lazerio šviesos sodrumo reiškinys, baltos aplinkos šviesos poveikis ir lazerio linijos nuskaitymo segmentacija.

Atsižvelgiant į kilusias problemas, yra pasiūlytas sprendimas, kuris, manoma, išspręstų daugelį minėtų uždavinių. Lazerio liniją siūloma aptikti atsižvelgiant į nuotraukos dažninį spektrą. Kadangi lazerio linija vaizde sukelia aukštus dažnius, pakanka išfiltruoti žemus dažnius ir galima nebekreipti dėmesio į spalvą. Taip išsprendžiama lazerio šviesos sodrumo problema. Taip pat, dažnių spektro filtravimas yra optimalus metodas, kadangi yra atliekama sąlyginai paprasta operacija – tereikia sudauginti dvi matricas. Toks būdas yra gerokai optimalesnis ir greitesnis už metodus, kurie veikia konvoliucijos principu. ČIA NESĄMONĖ.

Šiame darbe sprendžiama problema – kaip aptikti lazerio liniją kameros vaizde esant sudėtingomis fono sąlygomis taip pat išsprendžiant problemą, kai dėl nepakankamo kameros jautrumo, raudona lazerio linija per vidurį tampa balta. ČIA IRGI.

Darbo tikslas – išanalizuoti jau esamus lazerio linijos aptikimo sprendimus ir pasiūlyti naują algoritmą, kuris veiktų sant sudėtingosmi fonos sąlygomis..

Pagrindiniai darbo uždaviniai:

- Lazerio linijos metodų aptikimo apžvalga.
- Gauso, idealųjį ir Butterworth‘o aukšto dažnio filtrų analzię.
- Pasiūlyti lazerio linijos aptikimo algoritmą.
- Ištirti algoritmo tikslumą ir greitaveiką..

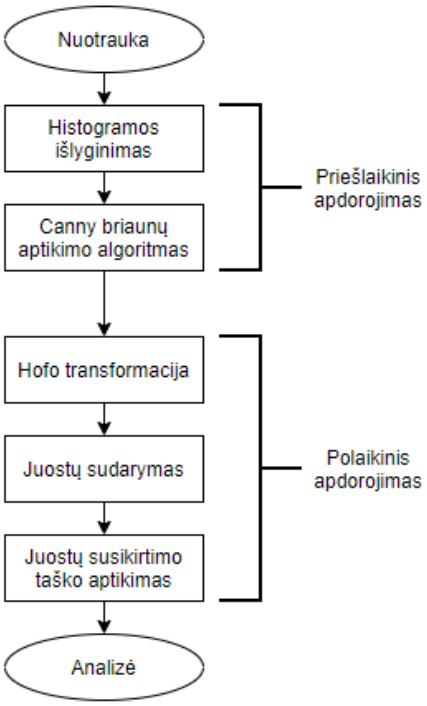
Dar trumpai apie dokumento struktūrą.

1. Lazerio linijos aptikimo metodų apžvalga

Šiame skyriuje yra aptariami jau naudojami linijos aptikimo algoritmai, metodai bei konkrečios aplikacijos paremtos jų panaudojimu. Daugelyje šaltinių, kartu su lazerio linijos aptikimo metodika bei algoritmais, yra pateikta informacija ir apie tam tikrą linijos aptikimo panaudojimo atvejį, pavyzdžiui, atstumo nustatymas pagal lazerio liniją. Tačiau plačiau yra aptariamos tik tos šaltinių dalys, kurios susijusios būtent su linijos aptikimo metodika ir tik minimaliai aptariami panaudos atvejai.

1.1. Kelio linijų aptikimo algoritmas

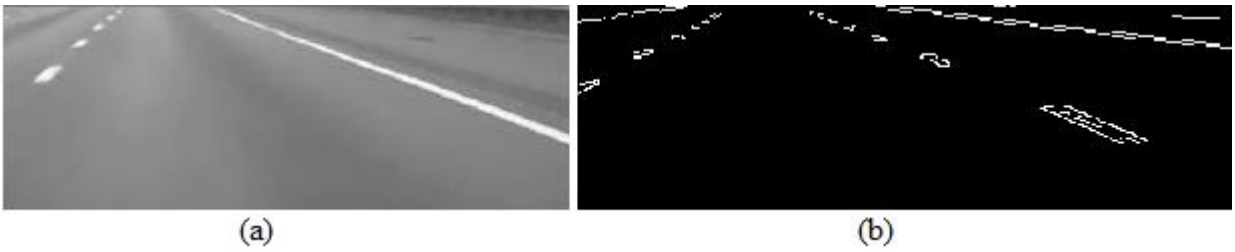
Kelio juostų aptikimas vaidina svarbų vaidmenį išmaniųjų transporto priemonių sistemų srityje. Toliau yra pateikiamas kelio juostų aptikimo algoritmas skirtas aptikti kairę ir dešinę gatvės juostas [**Error! Reference source not found.**]. Visa metodika susideda iš dviejų pagrindinių dedamųjų dalių: priešlaikinio ir polaikinio apdorojimo (žr. 1.1 pav.). Šiuo atveju dėmesys yra atkreipiamas tik į 4 algoritmo dalis (histogramos išlyginimas [144 p. 1], Canny briaunų aptikimo algoritmas [3], Hofo transformacija [226 p. **Error! Reference source not found.**] ir juostų sudarymas [2 p. **Error! Reference source not found.**]), kurios išaiškina patį linijų aptikimo veikimo principą.



1.1 pav. Juostų aptikimo algoritmo struktūrinė schema [**Error! Reference source not found.**]

Pirmasis žingsnis esantis iš karto po vaizdo nuskaitymo yra histogramos išlyginimas. Šis metodas dažniausiai naudojamas siekiant padidinti bendrą vaizdo kontrastą. Tokia kontrasto korekcija yra atliekama perskirstant pikselių intensyvumo reikšmes per visą vaizdo histogramą. Dėl to neryškūs ir sunkiai matomi objektai vaizde įgyja didesnį kontrastą. Tai yra daroma siekiant išryškinti kelio linijų žymėjimus, kadangi dažnu atveju gali nutikti taip, jog pilkšvos linijos susilieja su pilku kelio asfaltu, dėl to tolimesnis vaizdo apdorojimas gali tapti žymiai sudėtingesnis.

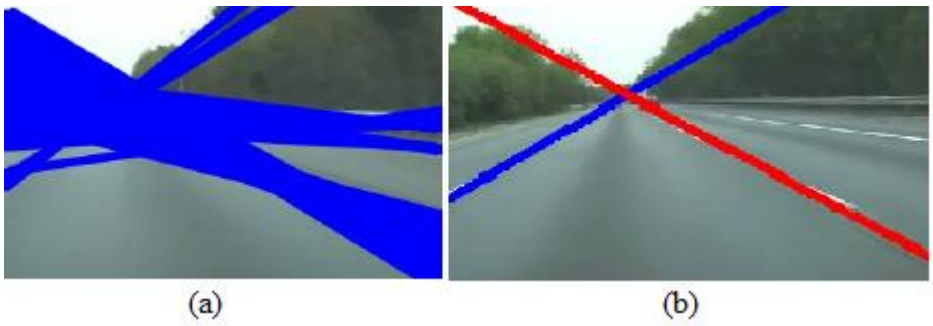
Toliau turimas RGB vaizdas yra paverčiamas į nespalvotą (angl. *grayscale*) vaizdą, kuris vėliau yra apdorojamas Canny briaunų aptikimo algoritmu. Jis grąžina binarinį vaizdą, kuris suteikia visą reikiamą informaciją aptinkant linijas (žr. 1.2 pav.). Siekiant sumažinti triukšmą gautame vaizde yra naudojamos morfologinės operacijos: skaitmeninė erozija[44 p. **Error! Reference source not found.**] ir skaitmeninis auginimas [42 p. **Error! Reference source not found.**]. Kartu yra pasitelkiamas ir vaizdo glotninimas [4].



1.2 pav. Canny briaunų aptikimo algoritmo veikimo pavyzdys (a) originalus nespalvotas vaizdas (b) Canny algoritmo apdorotas vaizdas su aptiktomis briaunomis [**Error! Reference source not found.**]

Canny algoritmu gautame binariniame vaizde yra matomos ryškiai išskirtos briaunos (įvairūs kelio linijų žymėjimai). Linijų aptikimui ir identifikavimui toliau yra naudojama Hofo transformacija, kuri gali veikti esant būtent tik binariniam vaizdui. Pagrindinė jos paskirtis yra aptikti tiesias linijas ir kreives. Vienas iš didžiausių Hofo transformacijos privalumų yra tas, jog aptinkant linijas ji gali sujungti atskirus linijos segmentus, kurie priklauso tai pačiai linijai, o kaip jau žinoma, kelio linijų žymėjimas dažnai turi pertrauktas linijas.

Hofo transformacija vaizde aptinka ne tik ieškomas 2 linijas (kairiąją ir dešiniąją kelio juostas) bet ir daug pašalinių linijų, kurios kartais tik kerta ieškomas linijas (žr. 1.3 pav. (a)). Dėl to kelio juostų sudarymui ir aptikimui yra naudojami 2 linijų parametrai: posūkio kampas ir linijos statmens ilgis iki vieno iš vaizdo kampų ilgis. Tada sugrupavus visas linijas, kurių parametrai panašūs, yra apskaičiuojamas tų parametrų vidurkis, o galutinis rezultatas atvaizduojamas originaliame vaizde (žr. 1.3 pav. (b)), kur yra pažymimos kairioji ir dešinioji kelio juostos.



1.3 pav. Aptiktos linijos vaizde (a) Hofo transformacijos visos aptiktos linijos (b) išskirtos kairioji ir dešinioji kelio linijos [**Error! Reference source not found.**]

Taigi, pateiktas algoritmas geba aptikti kairiąją ir dešiniąją kelio juostas esant realiomis lauko sąlygomis. Tačiau jis yra paremtas keliomis prielaidomis, kurios riboja algoritmo veikimo diapazoną:

– kelio linijos yra pakankamai ryškiai matomos nuoseklios;

– kelio plotis yra pastovus arba su minimaliais pokyčiais;
– kelio linijos turi sekti griežtas išvaizdos taisykles;
– negali būti ekstremalios oro sąlygos (liūtis, sniegas).

1.2. Lazerio linijos aptikimas skirtas suvirinimo linijų nustatymui

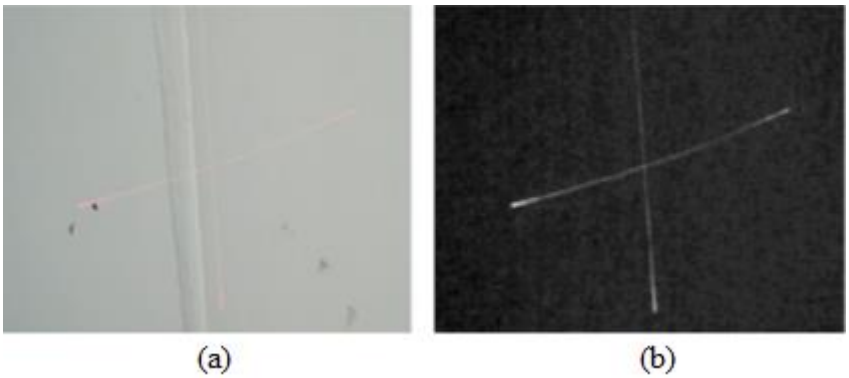
Struktūrizuotos šviesos jutikliai pritraukia vis daugiau dėmesio ir yra plačiai naudojami įvairiose automatizavimo bei robotikos srityse, pavyzdžiui, automatinis virinimas, kokybės kontrolė ar robotų navigacija [5]. Taigi, toliau šiame poskyryje yra kalbama apie struktūrizuotos lazerio šviesos linijų aptikimą naudojant CCD (angl. *charged-coupled device*) kamerą [6].

Lazerio linijos aptikimo rezultatas daro didžiulę įtaką visiems matavimo rezultatams. Dėl to patikimumas, tikslumas ir aptikimo greitis yra labai svarbūs parametrai visai struktūrizuotos šviesos aptikimo sistemai. Toliau pateiktas aptikimo algoritmas iš esmės yra paremtas vaizdo apšviestumo histograma (angl. *luminance histogram*) ir slenkstinių ribų segmentavimo (angl. *threshold segmentation*) metodu. Šie metodai yra paprasti ir greiti, tačiau labai jautrūs nepageidaujamam triukšmui, ypač esant ryškiai saulės šviesai lauke.

Turint RGB vaizdą, kuriame yra matoma raudona lazerio linija, galima atkreipti dėmesį į tai, jog R kanalas turi žymiai didesnę vertę nei G ir B ties projektuotos linijos vieta, nes, kaip žinoma, raudonas lazeris skleidžia labai ryškią ir monochromatinę šviesą. Remiantis tuo yra pasiūlytas naujas segmentavimo metodas lazerio linijos aptikimui. Pavyzdžiui, turint RGB spalvotą vaizdą, kurio rezoliucija yra 640x480 pikselių ir kurio stulpelių ir eilučių skaičius yra atitinkamai n = 640 bei m = 480, lazerio linija gali būti apskaičiuojama pagal išraišką:

$$I_{i,j} = max\{|I_{i,j}^R - I_{i,j}^G|, |I_{i,j}^R - I_{i,j}^B|\}, i \in [0, m), j \in [0, n), \quad (1.1)$$

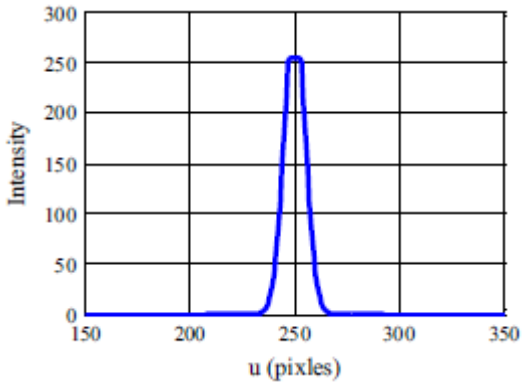
čia $I_{i,j}$ – pikselio vertė i eilutėje ir j nuotraukos stulpelyje, o $I_{i,j}^R$, $I_{i,j}^G$ ir $I_{i,j}^B$ yra atitinkamų R, G ir B kanalų pikselių vertės. Segmentavimo rezultatas pateiktas (žr. 1.1 pav.).



1.4 pav. Segmentavimo pavyzdys (a) originalus vaizdas (b) segmentavimo rezultatas [5]

Egzistuoja nemažai algoritmų skirtų lazerio linijos centro lokalizavimui didesniu nei vieno pikselio tikslumu. Pavyzdžiui, maksimalaus intensyvumo radimas per lazerio linijos plotį ir pikselių intensyvumo aproksimacija pagal Gauso skirstinį [7]. Deja, tokie metodai dažnai sukelia nepageidaujamą atsaką į apšviestumo pokyčius ir šešėlius. Verta atsižvelgti ir į tai, jog esant ryškiam

lazerio linijos atspindžiui, įvyksta kameros persotinimas, dėl to pikselių intensyvumo reikšmės per linijos plotį yra iškraipytos Gauso skirstinio viršuje (žr. 1.5 pav.). Dėl to tai gali daryti neigiamą poveikį Gauso aproksimacijos skaičiavimui.

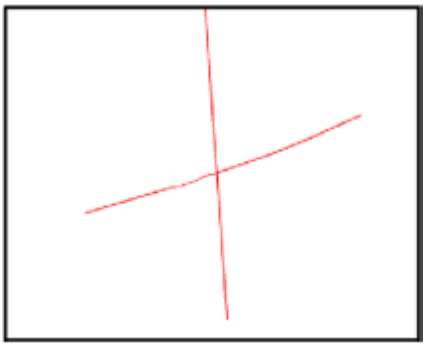


1.5 pav. Pikselių intensyvumas per lazerio linijos plotį [5]

Dėl Gauso skirstinio iškraipymų lokalizuojant lazerio linijos centrą yra naudojamas masės centro algoritmas. Pavyzdžiui, turint vertikalią liniją, masės centras *i* eilutėje yra apskaičiuojamas pasitelkiant mažą paieškos langą aplink intensyviausią linijos vietą. Masės centro stulpelio koordinatė $M_i(w)$ eilutėje *i* yra apskaičiuojama pagal formulę:

$$M_i(w) = \frac{\sum_{j^i_{max}-(w/2)}^{j^i_{max}+(w/2)} I_{i,j} \cdot j}{\sum_{j^i_{max}-(w/2)}^{j^i_{max}+(w/2)} I_{i,j}}, i \in [0,m), j \in [0,n), \quad (1.2)$$

čia j^i_{max} – maksimalus *i* eilutės intensyvumas *j* stulpelyje, o *w* yra paieškos lango dydis. Lazerio linijos plotis ir ryškumas įtakoja paieškos lango dydį *w*, o jo reikšmė yra 9 pikseliai, kuri buvo nustatyta empiriškai. Tada pagal (1.2) formulę galima nustatyti lazerio linijos centrą (žr. 1.6 pav.).



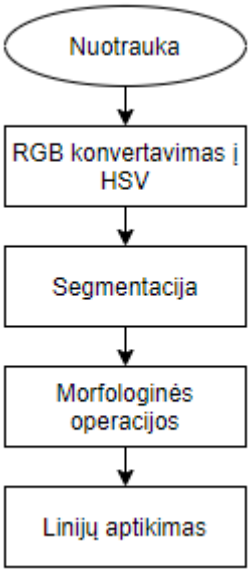
1.6 pav. Nustatyti lazerio linijų centrai [5]

Taigi, tokiu iš esmės paprastu slenkstinių ribų segmentavimo metodu galima aptikti lazerio liniją, kai fonas yra sąlyginai paprastas. Žinoma, kuriant šį algoritmą buvo atsižvelgta ir į jo pritaikymą – suvirinimo linijų aptikimas. Galima manyti, jog esant šiai konkrečiai aplikacijai turbūt dažniausiai bus turimas nesudėtingas fonas – paprastas, vienspalvis, neturintis daug briaunų. Esant šioms prielaidoms algoritmas geba aptikti lazerio linijas.

1.3. Kliūčių aptikimas naudojant lazerio liniją

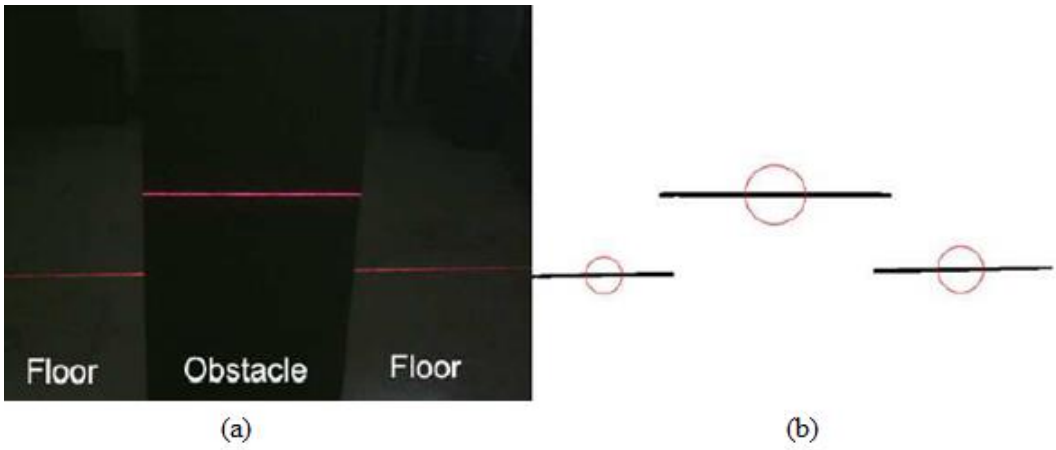
Automatizuoti judantys objektai, tokie kaip, pavyzdžiui, išmanieji neįgaliųjų vežimėliai privalo turėti atstumų nustatymo ir kliūčių aptikimo sistemas. Dėl to toliau yra pateikiamas lazerio linijos aptikimo metodas, kuris yra naudojamas būtent tokiose aplikacijose [8]. Naudojant ant kelio projektuojamą lazerio liniją ir CCD vaizdo kamerą trianguliacijos [9] principu galima nustatyti atstumą iki objekto, ant kurio yra projektuojama lazerio linija. Šiuo atveju bus nagrinėjamas tik lazerio aptikimo algoritmas nekreipiant dėmesio į atstumo nustatymo metodiką.

Pateiktas algoritmas (žr. 1.7 pav.) naudoja RGB spalvų schemos vaizdus, kurių rezoliucija yra 320x240 pikseliai. Priešlaikinio apdorojimo metu vaizdo RGB spalvų schema yra konvertuojama į HSV (angl. *Hue, Saturation, Value*). Tokia konversija pasitelkta dėl labai paprastos priežasties – dominantis aptikimo objektas, šiuo atveju lazerio linija, turi raudoną spalvą. Kaip žinoma, HSV spalvų schemoje H (angl. *Hue*) kanalo vertė nurodo būtent pikselio spalvą, dėl to tolimesniame vaizdo apdorojime spalvų segmentavimas tampa kiek paprastesnis, nei naudojant RGB spalvų schemą. Šią spalvų schemą naudojo M. Mesko‘as ir P. Chmelar‘as aptinkant raudono lazerio linijos projekciją[10, 11].



1.7 pav. Lazerio linijos aptikimo algoritmo struktūrinė schema

Lazerio linijos segmentavimas toliau yra vykdomas paprasčiausiai naudojant statines slenkstines ribas. Formuojamas binarinis vaizdas pagal nustatytus rėžius HSV spalvų schemoje. Apatinė riba yra (0, 70, 70), o viršutinė – (255, 255, 255). Visi pikseliai esantys vaizde, kurie patenka į šiuos rėžius yra pažymimi 1, visi likę – 0. Po to sudarytas binarinis vaizdas yra apdorojamas įvairiomis morfologinėmis operacijomis, tokiomis kaip uždarymas, skaitmeninis auginimas ir skaitmeninė erozija. Šių operacijų struktūriniai elementų dydžiai yra taip pat iš anksto numatyti. Uždarymo operacija yra kartojama 2 kartus su skirtingų dydžių elementais: 2x2 pikseliai ir 3x15 pikseliai. Visos kitos operacijos atliekamos su 2x2 pikselių dydžio struktūriniu elementu.



1.8 pav. Lazerio linijų aptikimo pavyzdys (a) originali nuotrauka (b) aptiktos linijos su pažymėtais centrais [8]

Tada yra pažymimi atskiri linijos segmentai. Tai yra atliekama pagal 8 pikselių kaimynystę (angl. *8-pixel connectivity*). Reiškia, jeigu binariniame vaizde esantis vienetas bet kokia kryptimi (vertikaliai, horizontaliai ar įstrižai) ribojasi su kitu vienetu, tada tas pikselis priklauso tam pačiam linijos segmentui. Po to yra skaičiuojamas kiekvieno segmento centras naudojant masės centrą pagal lygtis:

$$\text{center}_x = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} x_k, \tag{1.3}$$

$$\text{center}_y = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} y_k, \tag{1.4}$$

čia $center_x$ ir $center_y$ yra x ir y centro koordinatės, n – pikselių, kurie priklauso vienam linijos segmentui skaičius, o x_k ir y_k – atitinkamai pikselių koordinatės. Galutinis algoritmo rezultatas pavaizduotas (žr. 1.8 pav.).

Taigi, šis algoritmas yra išties ganėtinai paprastas. Pagrindinis lazerio linijos aptikimo principas iš esmės yra paremtas tiesiog slenkstinių ribų segmentavimo metodu taip iš vaizdo išskiriant raudoną spalvą pagal pakankamai platų pikselių intensyvumo diapazoną (nuo (0, 70, 70) iki (255, 255, 255) pagal HSV spalvų schemą). Remiantis tuo, galima daryti prielaidą, jog bet koks raudonai ryškesnis objektas vaizde gali daryti neigiamą įtaką lazerio aptikimui, jei to objekto pikselių reikšmės atitiks nurodytą diapazoną.

1.4. Lazerio linijos aptikimas atstumo nustatymui

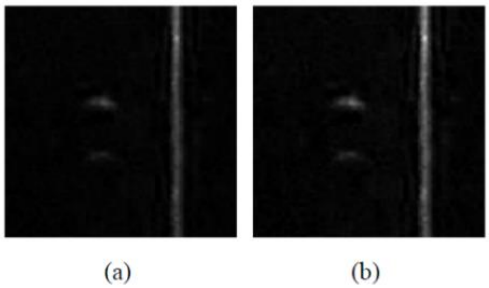
Lazerio linijos projekcijos aptikimas šiandien labai plačiai naudojamas įvairiose robotikos bei elektroninių matavimo prietaisų srityse. Aptikimo sistemos kokybė yra priklausoma nuo lazerio linijos projekcijos ant įvairių objektų aptikimo tikslumo. Toliau pateiktas algoritmas yra paremtas RGB spalvų segmentavimu ir atskirų linijos komponentų žymėjimu (žr. 1.9 pav.). Būtent šio algoritmo pagrindu yra sukurta atstumų nustatymo sistema veikianti kartu su autonominiu robotu, kuris gali tirti nepažįstamas vietas ir kurti tų vietų žemėlapius [12]. Šiame poskyryje vėlgi yra aptariama tik lazerio linijos aptikimo metodika nekalbant apie jos pritaikymą konkrečiai aplikacijai.

1.9 pav. Lazerio linijos aptikimo algoritmo struktūrinė schema

Priešlaikinio apdorojimo (angl. *pre-processing*) metu yra labai svarbu atlikti vaizdo normalizavimą. Šis paprastas būdas leidžia koreguoti vaizdo pikselių reikšmes taip, jog visas kadras įgyja didesnį bendrą kontrastą, taip išryškindamas silpnai matomus objektus (žr. 1.10 pav.). Šiuo atveju tokia pikselių intensyvumo reikšmių korekcija yra atliekama tik su raudonuoju kadro kanalu, nes norimos aptikti lazerio linijos spalva yra raudona. Normalizavimas yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$I_{Ni}(R) = \frac{R_i}{\max(R)}, \tag{1.5}$$

čia $I_{Ni}(R)$ – normalizuota raudonojo kanalo pikselio intensyvumo reikšmė, i – pikselio indeksas.



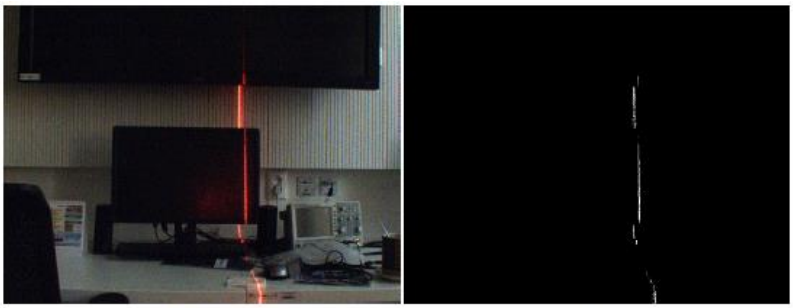
1.10 pav. Vaizdo normalizavimo pavyzdys (a) originali nuotrauka

(b) normalizuota nuotrauka [12]

Turint jau normalizuotą vaizdą toliau yra atliekamas spalvų segmentavimas. Tai yra pati svarbiausia šio algoritmo dalis, nes būtent segmentavimo būdu yra atrenkami visi pikseliai kadre, kurie priklauso lazerio linijai. Kadangi monochromatinė raudona lazerio linijos šviesa didžiausias pikselių intensyvumo reikšmes sukelia būtent raudonajame vaizdo kanale, logiška, jog būtent raudonasis kanalas atspindi pagrindines lazerio savybes. Likę du – žaliasis ir mėlynasis kanalai reikalingi baltos spalvos fone įvertinimui. Taigi, lazerio linijai priklausančių pikselių išskyrimas iš fono yra atliekamas nustačius konkrečias slenkstines ribas kiekvienam kanalui. Vienas pikselis laikomas priklausančiu raudonai lazerio linijai, jeigu atitinka išraišką:

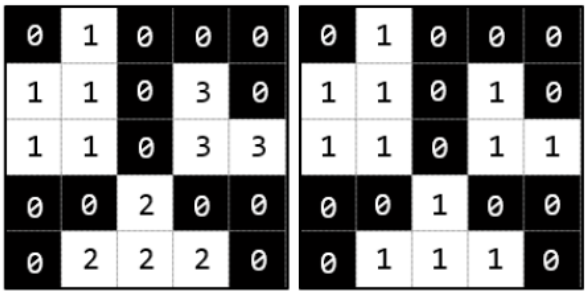
$$I_L = I(R > T_R)\ \&\ I(G < T_G)\ \&\ I(B < T_B), \tag{1.6}$$

čia I_L – išskirti iš fono lazerio linijos pikseliai. T_R, T_G ir T_B yra atitinkamų spalvos kanalų slenkstinės ribos. Dar prieš pradedant spalvų segmentavimą visos trys slenkstinės ribos kiekvienam vaizdo kanalui turi būti parinktos rankiniu būdu atsižvelgiant į fono sąlygas. Tinkamai suderinus šiuos parametrus, yra gaunamas binarinis lazerio linijos vaizdas (žr. 1.11 pav.).



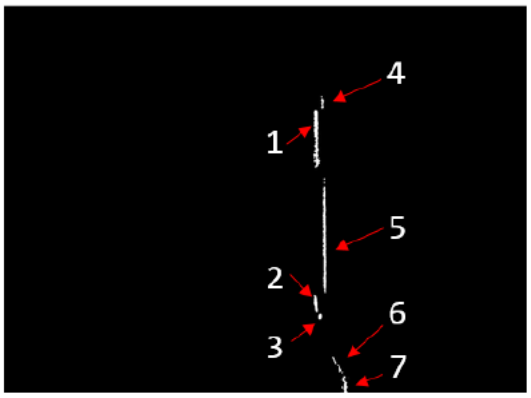
1.11 pav. Spalvų segmentavimo rezultatas (a) originalus vaizdas, (b) binarinis lazerio linijos vaizdas [12]

Tada turimas binarinis vaizdas (žr. 1.11 pav. (b)) yra apdorojamas morfologinėmis operacijomis, kurios pašalina smulkius lazerio linijos pertrūkimus ir užpildo skyles. Po to yra atliekamas skirtingų linijos segmentų žymėjimas pagal pikselių tarpusavio pozicijos sąryšį, kuris gali būti nusakomas dviem būdais (žr. 1.12 pav.).



1.12 pav. Sužymėti komponentai (a) keturių pikselių sąryšio būdas (b) aštuonių pikselių sąryšio būdas [12]

Keturių pikselių sąryšio būdas (angl. 4–*pixel connectivity*) (žr. 1.12 pav. (a)) sujungia atskirus pikselius į viena komponentą, jeigu šie liečiasi tik vertikalia ar horizontalia kryptimis, o aštuonių pikselių sąryšio būdas (angl. 8–*pixel connectivity*) (žr. 1.12 pav. (b))prie to pačio prideda ir pikselius, kurie ribojasi įstrižai. Šiam algoritmui yra naudojamas pirmasis būdas. Atskirų lazerio linijos komponentų žymėjimas yra naudingas tuo, jog galima aptikti ir nustatyti atstumus iki skirtingų objektų, ant kurių yra projektuojama lazerio linija.



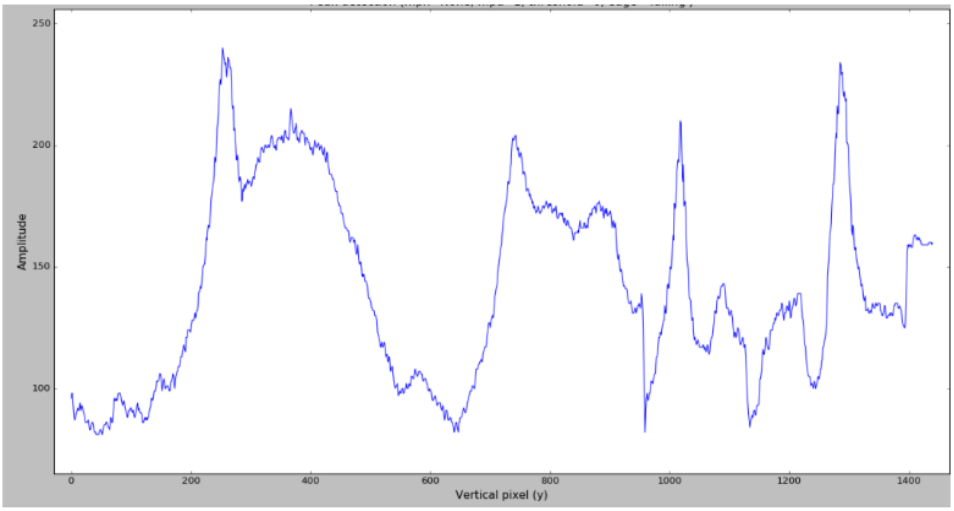
1.13 pav. Sužymėti lazerio linijos komponentai [12]

Taigi, šiame poskyryje pateiktas lazerio aptikimo algoritmas iš esmės yra paremtas tik spalvų segmentavimu nustatant slenkstines ribas kiekvienam kanalui RGB vaizde. Toks būdas reikalauja labai tikslaus slenkstinių ribų nustatymo, kuris turi būti koreguojamas atsižvelgiant į tai, kaip ryškiai yra atspindima lazerio šviesa. Taip pat turi būti garantuota, jog turimam vaizde nebus daugiau pikselių, apart lazerio linijos, kurie atitinka (1.6) išraišką.

1.5. 3D lazerio linijos skeneris

3D lazerio linijos skeneris naudoja mažiausiai vieną lazerio linijos projekciją ir vaizdo kamerą objekto taškų atkūrimui erdvėje. Kiekvienas unikalus objekto taškas gali būti apskaičiuojamas naudojant trianguliacijos principą, kai yra žinomas kampas tarp vaizdo kameros ir lazerio liniją projektuojančio prietaiso [13]. Toliau šiame poskyryje yra detalizuojamas tik algoritmas, skirtas lazerio linijos aptikimui, kuris yra naudojamas būtent 3D skenavimo sistemoje.

Paprasčiausiu skenavimo atveju yra naudojama viena pastovaus posūkio kampo lazerio linija. Šiuo atveju, pavyzdžiui, yra naudojama horizontali raudona lazerio linija, kuri yra projektuojama ant objekto. Tada vaizdo kameros pagalba yra užfiksuojamas kadras ir pradedamas priešlaikinis apdorojimas siekiant aptikti lazerio liniją kadre. Kadangi linijos kryptis yra horizontali, norint aptikti visus jos taškus reikia analizuoti kiekvieną kadro pikselių stulpelį atskirai.



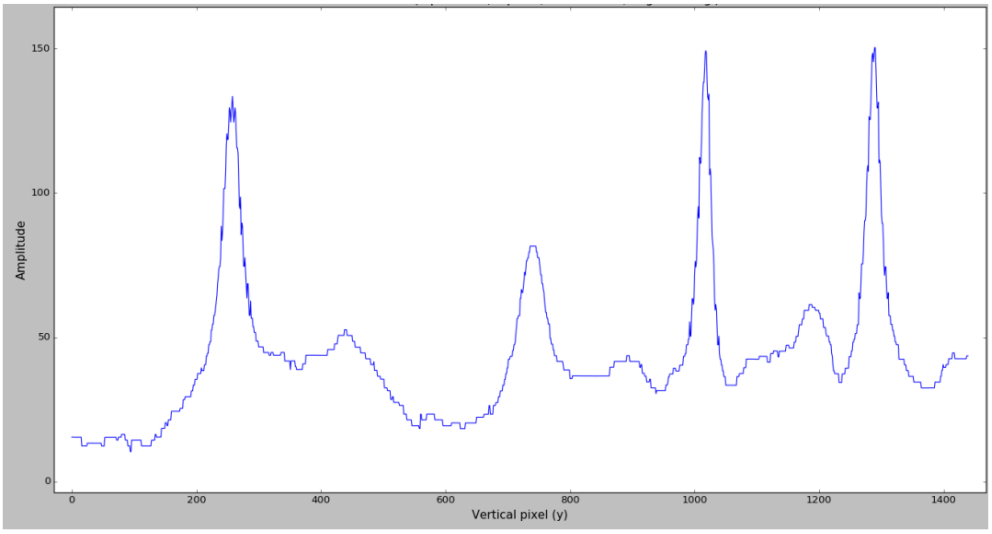
1.14 pav. Pikselių stulpelio intensyvumo kitimo grafikas raudonajame kanale [13]

Turint vieno pikselių stulpelio RGB reikšmių duomenis yra atliekamas baltos šviesos filtravimas. Toks apdorojimas yra svarbus siekiant padidinti algoritmo linijos aptikimo kokybę, nes iš aplinkos sklindanti šviesa gali sukelti nepageidaujamų pikselių intensyvumo padidėjimų, kurie grafike atsiranda kaip intensyvumo pikas (žr. 1.14 pav.). Kadangi balta šviesa apytiksliai turi vienodas reikšmes visuose RGB kanaluose, ji yra išfiltruojama iš raudonojo kanalo atėmus žaliojo ir mėlynojo kanalų vidurkį:

$$I_R = I_R - \frac{I_B + I_G}{2}, \tag{1.7}$$

čia I_R, I_G *ir* I_B – atitinkamų kanalų pikselių intensyvumo reikšmės.

Atlikus baltos šviesos filtravimą galima pastebėti, jog išanalizavus vieną pikselių stulpelį, grafike yra turimas mažesnis skaičius intensyvumo pikų (žr. 1.15 pav.).



1.15 pav. . Pikselių stulpelio intensyvumo kitimo grafikas raudonajame kanale atlikus baltos šviesos filtravimą [13]

Lazerio linijos taškų radimas iš esmės yra vykdomas ieškant pikselių intensyvumo pikų kiekviename stulpelyje. Tiesiog paprasta statinė slenkstinė riba netinka pikų radimui, nes skenuojant yra nevienodos apšvietimo sąlygos skirtingose skenuojamo objekto vietose. Siekiant lazerio linijos taškų aptikimą padaryti patikimesniu, yra pritaikomas bėgančio vidurkio metodas (angl. *running average*). Reiškia skenuojant pikselių stulpelį, kiekvienam pikseliui atskirai yra suskaičiuojamas intensyvumo vidurkis kartu su prieš jį esančiais pikseliais. Toks apskaičiuotas vidurkis kiekviename taške yra naudojamas kaip to taško slenkstinė riba (angl. *threshold*), prie kurios taip pat dar yra pridedama ir statinė, empiriškai nustatyta kita slenkstinė riba. Visi pikseliai, kurie turi didesnį intensyvumą nei apskaičiuota slenkstinė riba yra laikomi lazerio linijos taškais.

Taigi, toks lazerio linijos aptikimo algoritmas iš esmės yra glaudžiai pririštas prie linijos krypties. Norint, pavyzdžiui, skenuoti vertikalia kryptimi, tektų keisti algoritmo veikimą ir pikselius analizuoti kiekvienoje eilutėje, o ne stulpelyje. Kiek sudėtingiau būtų, jeigu lazerio projekcija turėtų įstrižą kryptį, tačiau, žinoma, reikia atsižvelgti į tai, jog šis algoritmas yra naudojamas objektų skenavimui kur lazerio linijos kryptis dažniausiai yra nekintama.

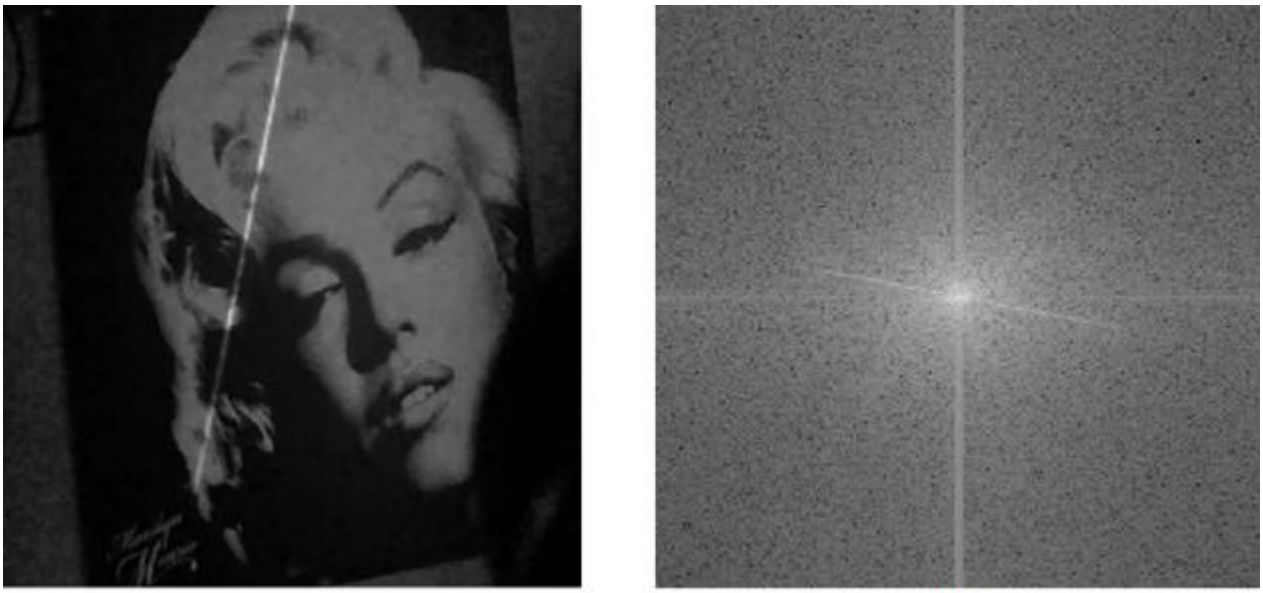
1.6. Darbe naudojamų metodų apžvalga

Šiame poskyryje yra aptariami jau esami algoritmai bei metodai, kurie naudojami šiame darbe. Kadangi kitame skyriuje pateiktas algoritmas iš esmės yra paremtas šiais metodais, dėl to yra labai svarbu suprasti esminį jų veikimo principą. Čia yra apžvelgiama Furjė transformacija, Hofo transformacija bei aukštų dažnių filtrai.

1.6.1. Furjė transformacija

Furjė transformacija yra svarbi vaizdo apdorojimo priemonė, naudojama vaizdui suskaidyti į jo sinuso ir kosinuso komponentus. Ji naudojama įvairiose srityse, tokiose kaip vaizdo analizė, vaizdo filtravimas, vaizdo rekonstravimas ir vaizdo glaudinimas. Transformacijos išvestis atspindi vaizdą Furjė arba dažnio srityje, o įvesties vaizdas yra erdvinės srities ekvivalentas. Furjė domeno

paveikslėlyje kiekvienas taškas žymi tam tikrą erdvinio domeno vaizdo dažnį. Paprasčiau tariant, funkcijos ar signalo Furjė transformacija, šiuo atveju vaizdo, nuotraukos, yra kompleksiniais skaičiais įvertinama dažnio funkcija, kurios dydis ar kitaip tariant, absoliuti reikšmė, parodo to specifinio dažnio kiekį, esantį pradinėje funkcijoje (vaizde erdviniame domene). Šios operacijos pavyzdys pateiktas žemiau (žr. 1.16 pav.).



1.16 pav. Nuotraukos Furjė transformacija (a) originali nuotrauka (b) atvaizduotas nuotraukos dažnių spektras

Šiame darbe iš esmės yra kalbama apie diskrečius signalus (skaitmeninius vaizdus), todėl tolesnė analizė apsiriboja diskrečiąja Furjė transformacija (angl. *DFT* – Discrete Fourier Transform). DFT yra diskretinė arba imtinė Furjė transformacijos forma. Joje nėra visų įmanomų vaizde aptiktų dažnių, bet tik tam tikrų dažnių rinkinys, kurio pakanka apibūdinti erdvinės srities vaizdą. Svarbu paminėti, kad dažnių skaičius yra lygiai toks pat kaip ir pikselių skaičius originaliame paveikslėlyje, todėl vaizdų dydis tiek erdviniame, tiek dažnių srityje yra vienodas. *N* dydžio kvadratiniam atvaizdui dvimatis DFT apskaičiuojamas taip:

$$F(k,l) = \sum_{m=0}^{N-1}\sum_{n=0}^{N-1} f(m,n)e^{-i2\pi(\frac{km}{N}+\frac{in}{N})}, \tag{1.8}$$

čia *f (m, n)* yra vaizdas erdvinėje srityje, atitinkantis kiekvieną tašką *F(k, l)* Furjė erdvėje. Paprasčiau tariant, šią lygtį galima apibūdinti taip: kiekvienas Furjė erdvės taškas gaunamas padauginus vaizdą erdvinėje srityje su duota bazine funkcija ir susumavus rezultatą.

Panašiu būdu Furjė vaizdą galima atgal konvertuoti į erdvinį domeną. Atvirkščioji diskrečioji Furjė transformacija yra aprašoma taip:

$$f(k,l) = \frac{1}{N^2}\sum_{m=0}^{N-1}\sum_{n=0}^{N-1} F(m,n)e^{i2\pi(\frac{km}{N}+\frac{in}{N})}, \quad (1.9)$$

čia *f(m, n)* ir *F(k, l)* turi tas pačias reikšmes, kaip ir (1.8) lygtyje. Lygtyje (1.9) reikia atkreipti dėmesį į $\frac{1}{N^2}$ trupmeną, kuri naudojama atvirkštinėje Furjė transformacijoje. Kartais ji gali būti naudojama ir tiesioginėje transformacijoje, tačiau niekada abiejose.

Remiantis (1.8) ir (1.9) lygtimis, darosi akivaizdu, jog dvimatį signalą konvertuoti iš erdvinio domeno į dažninį reikalauja pakankamai daug skaičiuojamosios galios. Dėl to įprastai aplikacijose yra naudojama FFT (angl. *Fast Fourier Transform*). Tai yra optimizuota DFT, o pats populiariausias jos algoritmas yra Cooley-Tukey greitosios Furjė transformacijos algoritmas. Tai yra „skaldyk ir valdyk“ tipo algoritmas, kuris skaičiavimo problemą padalija į daug mažesnių problemų, kurios skaičiavimo požiūriu yra daug pigesnės. Jau yra žinoma, jog DFT yra apibūdinama lygtimi:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}nk}, \quad (1.10)$$

čia X_k yra signalas dažnių srityje, x_n – konvertuojamas signalas, N – signalo dydis, o k yra sveikasis skaičius nuo 0 iki *N-1*. Pačiu paprasčiausiu atveju šis FFT algoritmas įgyja skaičiavimo greičio pranašumą, kai signalas yra dalijamas į du atskirus masyvus. Viename jų yra signalo reikšmės, kurios turi lyginę indekso reikšmę, o kitame – nelyginę. Tokiu atveju (1.10) lygtį galima perrašyti taip:

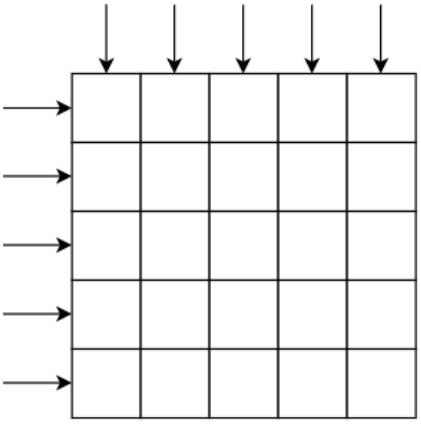
$$X_k = \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2m} e^{-\frac{2\pi i}{N}(2m)k} + \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2m+1} e^{-\frac{2\pi i}{N}(2m+1)k}, \quad (1.11)$$

Tada atlikus nesudėtingus tarpinius prastinimus, sutrakus bendrąjį daugiklį iš (1.11) išraiškos, DFT galima aprašyti taip:

$$X_k = E_k + e^{\frac{-2\pi i}{N}k} O_k, \quad (1.12)$$
$$X_{k+\frac{N}{2}} = E_k - e^{\frac{-2\pi i}{N}k} O_k,$$

čia E_k lyginių indekso verčių DFT, o O_k – nelyginių. Pirmiausia algoritmas apskaičiuoja lyginių ir nelyginių indeksuotų verčių diskrečiąją Furjė transformaciją. Tai yra svarbiausia dalis, kur algoritmas įgauna savo greitį. Signalas rekursyviai dalijamas į dvi mažesnes DFT kol signalo tampa nebeįmanoma padalinti į dvi lygias dalis.. Tokiu būdu yra išvengiama daug papildomų skaičiavimų, kadangi mažesnių transformacijų rezultatai yra naudojami daug kartų apskaičiuoti visą transformaciją.

Remiantis (1.12) formule, pateiktas algoritmas tinka tik vienmačiam signalui skaičiuoti. Nepaisant to, tai nėra sunku atlikti naudojant dvimatį signalą, šiuo atveju – vaizdą ar nuotrauką. Vaizdo dažnio spektras apskaičiuojamas pirmiausia atliekant DFT viena kryptimi, o po to kita (žr. 1.17 pav.).



1.17 pav. Dvimačio signalo FFT skaičiavimas

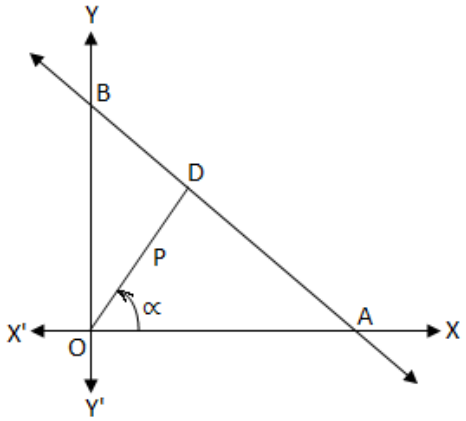
Vieną pikselių eilutę ar stulpelį galima laikyti vienmačiu signalu, kurio diskrečiąją Furjė transformaciją galima suskaičiuoti naudojant „Cooley-Tukey“ algoritmą pagal (1.12) išraišką.. Iš pradžių tai daroma su kiekviena eilute ir po to su kiekviena stulpeliu, o rezultatas susumuojamas į vieną dažnio spektrą (žr. 1.16 pav. (b)).

1.6.2. Hofo transformacija

Hofo transformacija yra metodas, kuris yra naudojamas tam tikrų formų ir požymių išskyrimui vaizde. Kadangi yra reikalavimas, jog norimos formos savybės būtų apibrėžtos tam tikra parametrų erdve, klasikinė Hofo transformacija dažniausiai naudojama nustatant įprastas kreives, tokias kaip linijos, apskritimai ar elipsės. Šiuo atveju yra kalbama apie Hofo transformacijos naudojimą linijos aptikimui. Pagrindinis principas grindžiamas normaliąja linijos forma:

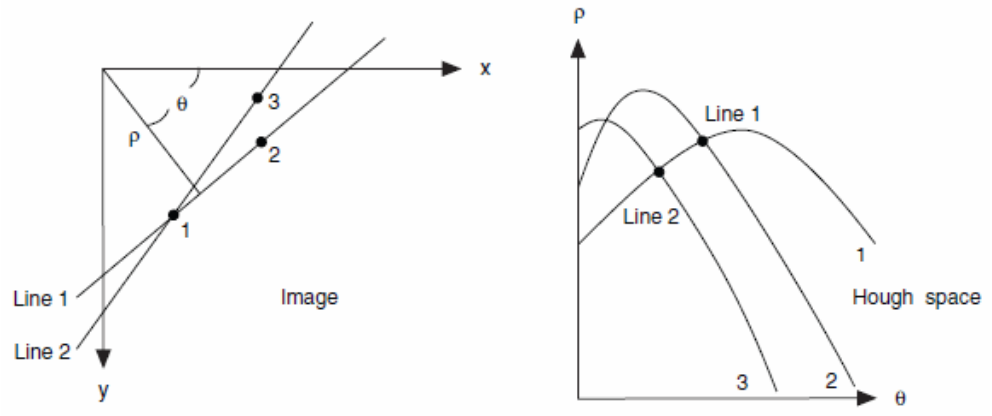
$$P = xcos(\alpha) + ysin(\alpha), \tag{1.13}$$

,kur P yra atraminės linijos ilgis, o α yra kampas tarp atraminės linijos ir pradinės ašies (žr. 1.18 pav.). Atraminė linija visada yra statmena linijai, kurią norima apibrėžti pagal (1.13) išraišką.



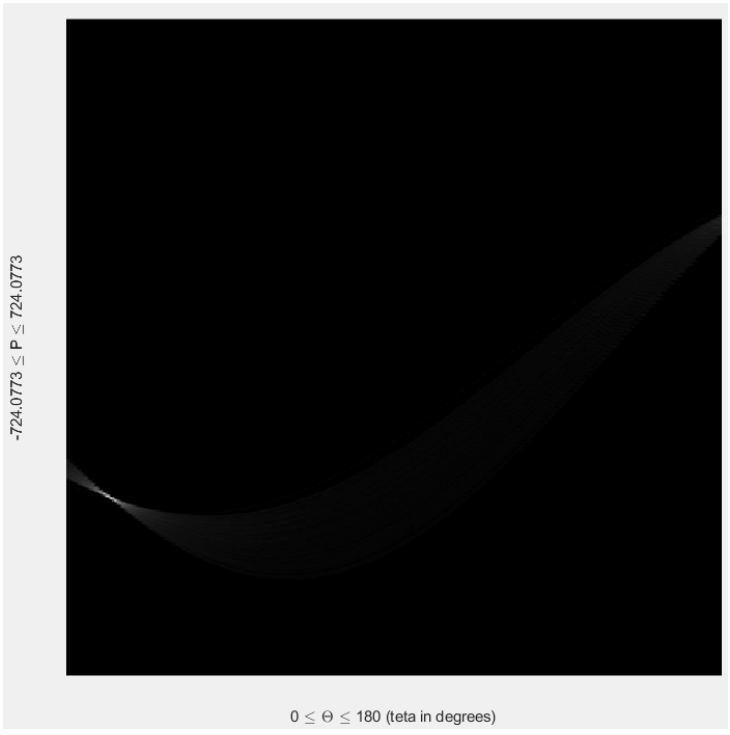
1.18 pav. Normalioji linijos forma

Įvestis į šį algoritmą privalo būti binarinis vaizdas. Hofo transformacija tada apdoroja kiekvieną vienetu pažymėtą pikselį binariniame vaizde. Kiekvienas jų atitinkamai pagal (1.13) formulę yra konvertuojamas į reikšmę Hofo erdvėje (žr. 1.19 pav.). Tokiu būdu kiekvienam pikseliui, kurio reikšmė lygi vienetui binariniame vaizde, yra apskaičiuojama pozicija Hofo erdvėje. Šiuo atveju jos vertikalioji ašis apibrėžia ρ (atraminės linijos ilgis), o horizontalioji – θ (kampas tarp atraminės linijos ir koordinačių pradžios). Taigi, kuo daugiau taškų binariniame vaizde sudaro tiesią liniją, tuo daugiau taškų atitinka tą pačią poziciją Hofo erdvėje.



1.19 pav. Konvertavimas iš vaizdo erdvės į Hofo erdvę [14]

Iš esmės kiekvienas tos pačios linijos taškas binariniame vaizde atitinką vieną ir tą patį tašką Hofo erdvėje. Taigi, jeigu linija egzistuoja binariniame vaizde, ji yra atvaizduojama kaip taškas (lokalus maksimumas) Hofo erdvėje (žr. 1.20 pav.). Pagal to taško poziciją galima nusakyti linijos parametrus ρ ir θ, o pagal juos galima nubrėžti liniją originaliame vaizde remiantis (1.13) išraiška.



1.20 pav. Hofo erdvė

Toliau linija yra aptinkama balsavimo metodu. Kuo daugiau taškų sudaro vieną liniją nuotraukoje, tuo ryškesnis taškas yra matomas Hofo erdvėje, kuris apibūdina tą liniją. Hofo transformacija naudoja slenkstinės ribos parametrą, kuris nusako kiek mažiausiai taškų turi sudaryti liniją, jog ją būtų galima laikyti linija. Jei tas taškas Hofo yra ryškesnis už nustatytą slenkstinę ribą, tada reiškia, jog ta linija yra aptikta vaizde.

1.7. Aukšto dažnio filtrai

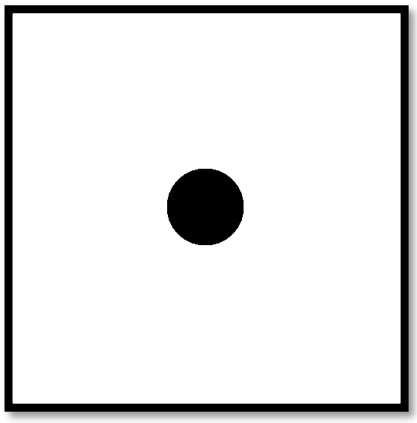
Aukšto dažnio filtras leidžia pro jį praeiti tik aukštiems dažniams signale.. Aukšti dažniai nuotraukoje yra tos vietos, kur yra didelis skirtumas tarp gretimų pikselių intensyvumų reikšmių. Pavyzdžiui, įvairių objektų kraštai, projektuojama lazerio šviesa ar balto popieriaus lapo, gulinčio ant juodo stalo, kraštas. Žemi dažniai nuotraukoje gali būti traktuojami tiesiog kaip fonas, kadangi ten pikselių reikšmės yra tolygios. Kaip jau žinoma, kiekvienas taškas vaizdo dažnių spektre atitinka tam tikrą dažnį, o kuo to taško pozicija yra toliau nuo spektro centro, tuo aukštesnį dažnį jis apibrėžia, o tai reiškia, jog spektro centre esantys taškai apibrėžia žemus dažnius. Taigi, šių filtrų veikimo principas iš esmės yra paremtas reikšmių, esančių dažnio spektro centre, pašalinimu iš vaizdo signalo.

Toks nuotraukos dažnių srities filtravimas iš esmės yra ganėtinai optimalus metodas. Furjė transformacijos atlikimas ir jos gauto rezultato sandauga su sudarytu aukšto dažnio filtru yra kur kas, skaičiavimo požiūriu, pigesnė ir mažiau skaičiuojamosios galios reikalaujanti operacija nei, pavyzdžiui, atliekant įvairias konvoliucijos principu paremtas operacijas erdviniame domene. Taigi, toliau šiame poskyryje yra aprašyti darbe naudojami trys nuotraukų aukšto dažnio filtrai: idealusis, Gauso ir Butterworth‘o.

Idealiojo aukšto dažnio filtro veikimo principas yra ganėtinai paprastas. Jis turi tik vieną parametrą D_0, kuris reiškia filtro spindulį. Idealusis filtras iš esmės veikia kaip paprasta slenkstinė riba nuotraukos dažnių spektre, o jo išraiška yra:

$$H(u,v) = \begin{cases} 0 \; if \; D(u,v) \; \leq \; D_0 \\ 1 \; if \; D(u,v) \; > \; D_0 \end{cases}, \tag{1.14}$$

čia $D(u,v)$ yra atstumas tarp esamo pikselio ir pikselio, kuris yra dažnio spektro centre, $H(u,v)$ – atitinkamai filtro pikselių binarinės vertės. Taip suformuotas aukšto dažnio filtras iš esmės yra tiesiog binarinis vaizdas, kurio centre yra matomas juodas apskritimas (žr. 1.21 pav.)turintis pikselių vertes lygias nuliui. Filtro dydis privalo būti toks pat kaip ir filtruojamojo dažnio spektro, kad būtų galima kiekvieną filtro reikšmę sudauginti su kiekviena dažnių spektro reikšme. Tada nesunku suprasti, jog sudauginus tokį filtrą su dažnio spektru (žr. 1.16 pav. (b)), centre esančios reikšmės (žemi dažniai) tampa lygios nuliui, o visos kitos (aukšti dažniai) išlieka nepakitusios. Tokiu būdu iš nuotraukos yra pašalinami visi žemi dažniai.

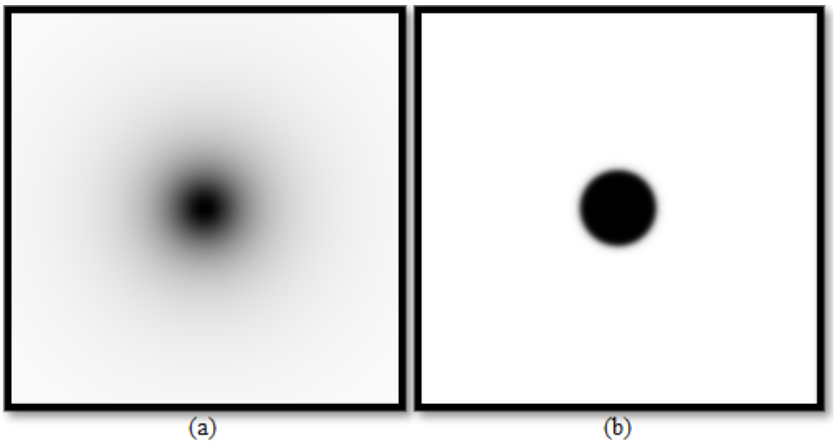


1.21 pav. Idealusis aukšto dažnio filtras

Butterworth‘o aukšto dažnio filtras (žr. 1.22 pav.) neturi tokios ryškios briaunos kaip idealusis filtras, dėl to skirtumas tarp išfiltruotų ir praleistų dažnių yra tolydesnis. Jis turi platesnes derinimo galimybes, kadangi be filtro spindulio D_0 egzistuoja dar vienas parametras n, kuris reiškia filtro eilę:

$$H(u,v) = \frac{1}{1 + (\frac{D(u,v)}{D_0})^{2n}}, \tag{1.15}$$

čia *D(u,v)* ir *H(u,v)* reiškia tą patį kaip ir (1.14) išraiškoje.

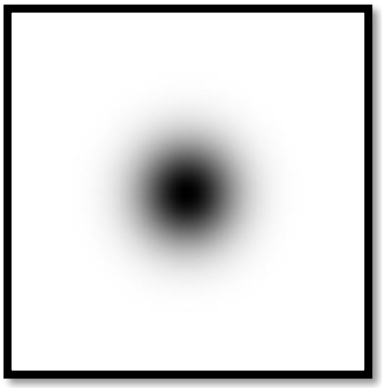


1.22 pav. Butterworth‘o aukšto dažnio filtras (a) n = 1 (b) n = 10

Gauso aukšto dažnio filtras turi taip pat glotnų kraštą (žr. 1.23 pav.), tačiau jo funkcija yra skirtinga:

$$H(u,v) = e^{\frac{-D^2(u,v)}{2D_0^2}}, \tag{1.16}$$

čia *D(u,v)* ir *H(u,v)* reiškia tą patį kaip ir (1.14) išraiškoje.

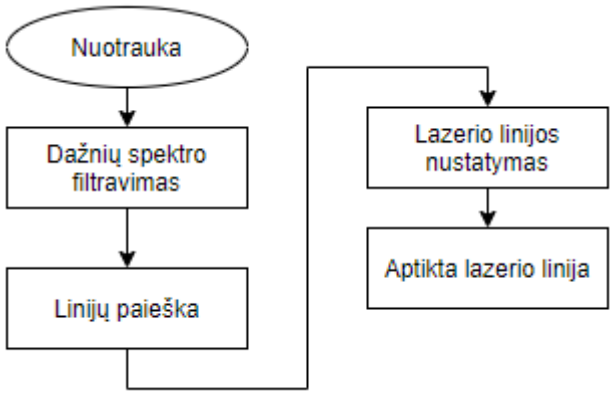


1.23 pav. Gauso aukšto dažnio filtras

Taigi, visi trys filtrai turi skirtingas funkcijas, todėl naudojant tokio pačio ilgio spindulį visi filtrai veikia skirtingai. Idealusis filtras nustato konkrečią ribą, iki kurios žemi dažniai yra filtruojami, dėl to išfiltruotame vaizde gali būti sunku aptikti objektų kraštus, nes nėra kartu filtruojamas perėjimas iš aukšto dažnio į žemą. Kita vertus Gauso ir Butterworth‘o filtrai turi glotnų kraštą, dėl to jais išfiltruoti vaizdai turi aštresnes briaunas, nes dažniai yra filtruojami sulig briaunų perėjimais vaizde.

2. Lazerio linijos aptikimo metodologija

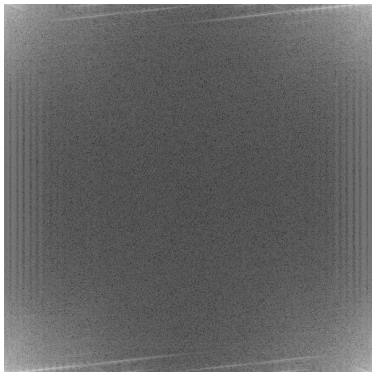
Šiame skyriuje yra pasiūlyta nauja lazerio linijos aptikimo metodologija, kuri iš esmės susideda iš trijų pagrindinių dalių: dažnių spektro filtravimo, linijų paieškos ir lazerio linijos nustatymo (žr. 2.1 pav.). Toliau esančiuose poskyriuose kiekviena iš šių dalių yra analizuojama atskiruose poskyriuose.



2.1 pav. Algoritmo struktūrinė schema

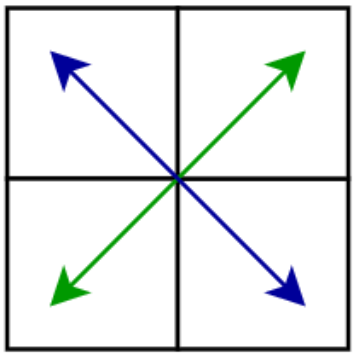
2.1. Dažnių spektro filtravimas

Šis poskyris yra skirtas detalesnei vaizdo dažnių spektro filtravimo apžvalgai. Atlikus Furjė transformaciją yra gaunamas vaizdas, kuriame yra atvaizduotas originalios nuotraukos dažnių spektras (žr. 2.2 pav.). Originali šio vaizdo forma dažnius atvaizduoja kitaip – žemi dažniai yra koncentruoti nuotraukos kampuose.



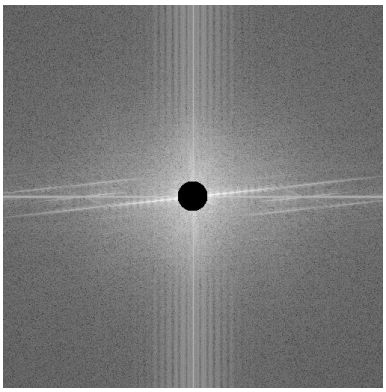
2.2 pav. Pradinė dažnių spektro forma

Filtruoti tokį vaizdą yra sudėtinga, nes žemi dažniai yra išmėtyti skirtingose vaizdo vietose. Tam, kad filtravimas būtų paprastesnis ir greitesnis įstrižai yra sukeičiami dažnių spektro ketvirčiai (žr. 2.3 pav.). Tada visi žemi dažniai tampa koncentruoti vienoje vietoje – spektro centre. Po tokio ketvirčių sukeitimo dažnių reikšmės tampa pasiskirsčiusios pagal dėsnį – kuo reikšmė yra toliau nuo spektro centro, tuo aukštesnį dažnį ji apibūdina.



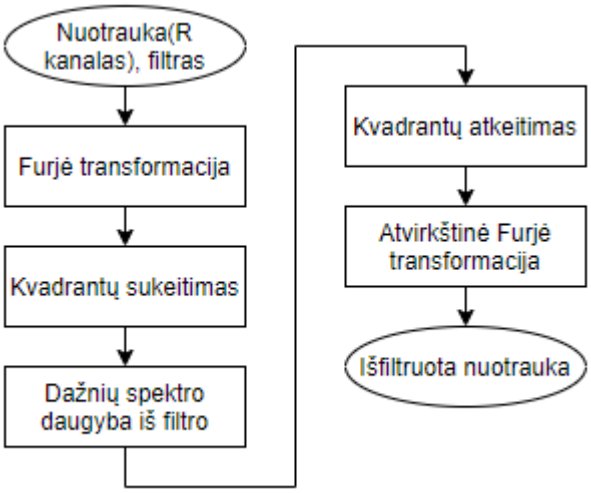
2.3 pav. Dažnių spektro ketvirčių sukeitimas

Toliau vyksta iš esmės labai paprastas filtravimo procesas. Kadangi dabar žemi dažniai yra koncentruoti spektro centre, dabar yra galimas aukšto dažnio filtro taikymas (žr. 2.4 pav.). Turimo filtro dažnių spektro dydžiai turi būti vienodi, tam kad būtų galima kiekvieną spektro reikšmę padauginti iš kiekvienos filtro pikselio reikšmės (žr. 2.4 pav.). Tokia dviejų matricų daugybos operacija yra greita, optimali ir nereikalaujanti daug skaičiuojamosios galios.



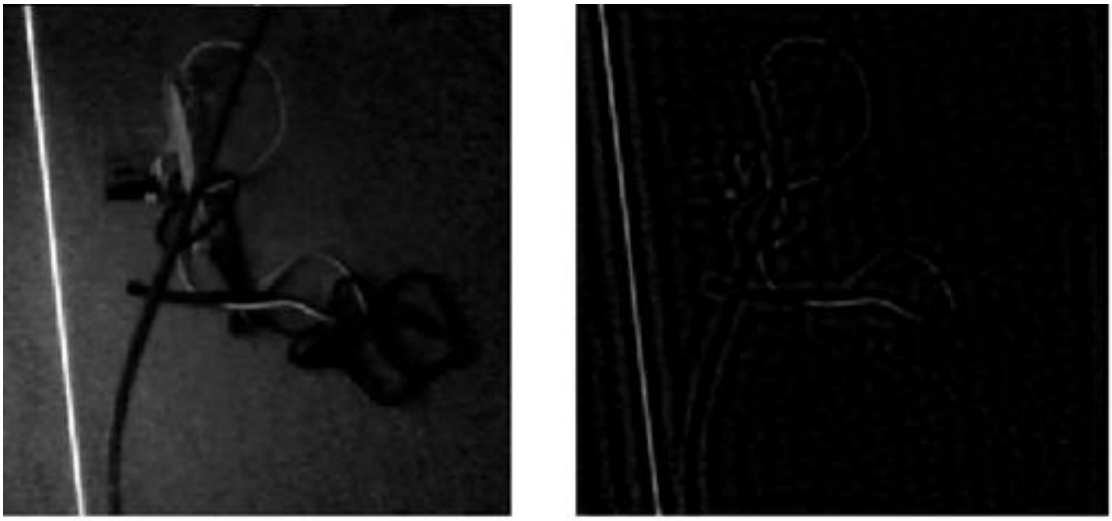
2.4 pav. Dažnių spektras su aukšto dažnio filtru

Kadangi, šiuo atveju, filtro viduryje reikšmės yra lygios nuliui arba artimos nuliui, atlikus daugybos veiksmą, žemų dažnių reikšmės taip pat yra paverčiamos į nulį arba skaičių, artimą nuliui. Tada dažnių spektras yra konvertuojamas atgal į erdvinį domeną (žr. 2.5 pav.).



2.5 pav. Dažnių spektro filtravimo procesas

Šiame darbe yra ieškoma raudona lazerio linija vaizde, dėl to filtravimo proceso įvestis yra raudonasis nuotraukos kanalas (žr. 2.6 pav. (a)) bei iš anksto suformuotas aušto dažnio filtras su nustatytu spinduliu. Po to Furjė transformacijos pagalba yra suskaičiuojamas vaizdo dažnių spektras, kurio ketvirčiai yra sukeičiami įstrižai. Tada spektras yra padauginamas iš turimo filtro, o spektro ketvirčiai atkeičiami atgal į pradinę poziciją. Ketvirčių atkeitimas yra svarbus žingsnis prieš pradedant konversiją į erdvinį domeną, nes dažnių pozicijos spektre buvo pakeistos. Pasitelkus atvirkštinę Furjė transformaciją vaizdas yra atgal konvertuojamas į erdvinį domeną (žr. 2.6 pav. (b)).



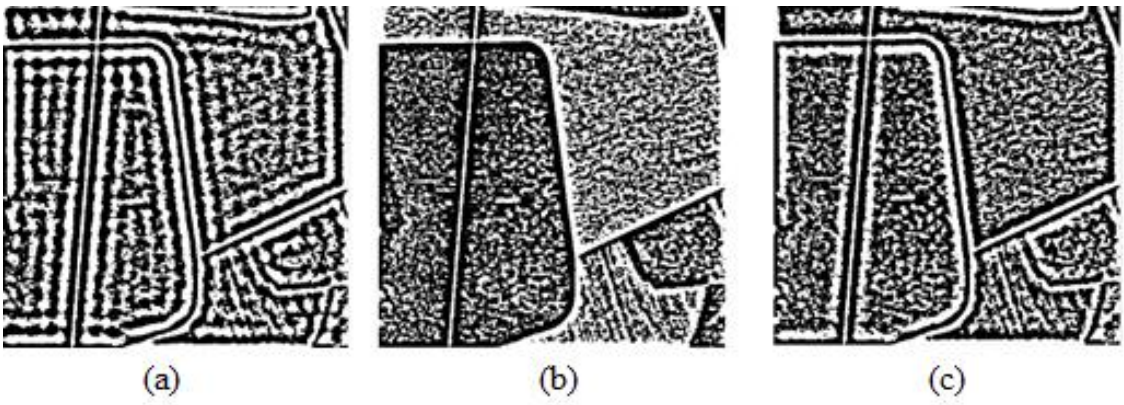
2.6 pav. Dažnių filtravimo pavyzdys (a) vaizdas prieš filtravimą (b) vaizdas po filtravimo

Pateiktame pavyzdyje (žr. 2.6 pav.) yra pavaizduotas dažnių spektro filtravimo rezultatas. Vaizde prieš filtravimą yra matoma ryški linija kairėje pusėje. Tai yra raudona lazerio linija, tačiau kadangi filtravimui yra naudojamas vien raudonasis kanalas, visas vaizdas yra nespalvotas. Toks ryškus objektas vaizde sukelia aukštus dažnius spektre, dėl to atlikus filtravimą yra pašalinama daug nereikalingo triukšmo. Matoma, jog iš nuotraukos yra pašalintas fonas, tačiau linija išlieka taip pat ryški.

2.1.1. Aukšto dažnio filtrų tyrimas

Lazerio linijos aptikimo kokybė yra tiesiogiai susijusi su priešlaikinio apdorojimo metu vykdomu dažnio spektro filtravimu. Skirtingi filtrai grąžina skirtingus rezultatus, dėl to yra labai svarbu nustatyti, kuris filtras yra tinkamiausias lazerio linijos aptikimo uždaviniui spręsti.

Vizualiai įvertinus trijų aukšto dažnio filtrų rezultatus (žr. 2.7 pav.) galima pastebėti, jog nepaisant vienodo filtrų dydžio, kiekvieno jų filtravimo rezultatas yra skirtingas. Pagrindinis tokio filtravimo tikslas yra pašalinti iš vaizdo kiek įmanoma daugiau triukšmo paliekant tik reikalingą informaciją. Šiuo atveju reikalinga informacija yra visi pikseliai, kurie priklauso lazerio linijai, o triukšmas – visas likęs fonas, iš kurio bandoma išskirti liniją. Taigi, toliau šiame skyrelyje yra aprašomas bandymas, kurio metu nustatoma, kuris filtras yra tinkamiausias lazerio linijos aptikimui.



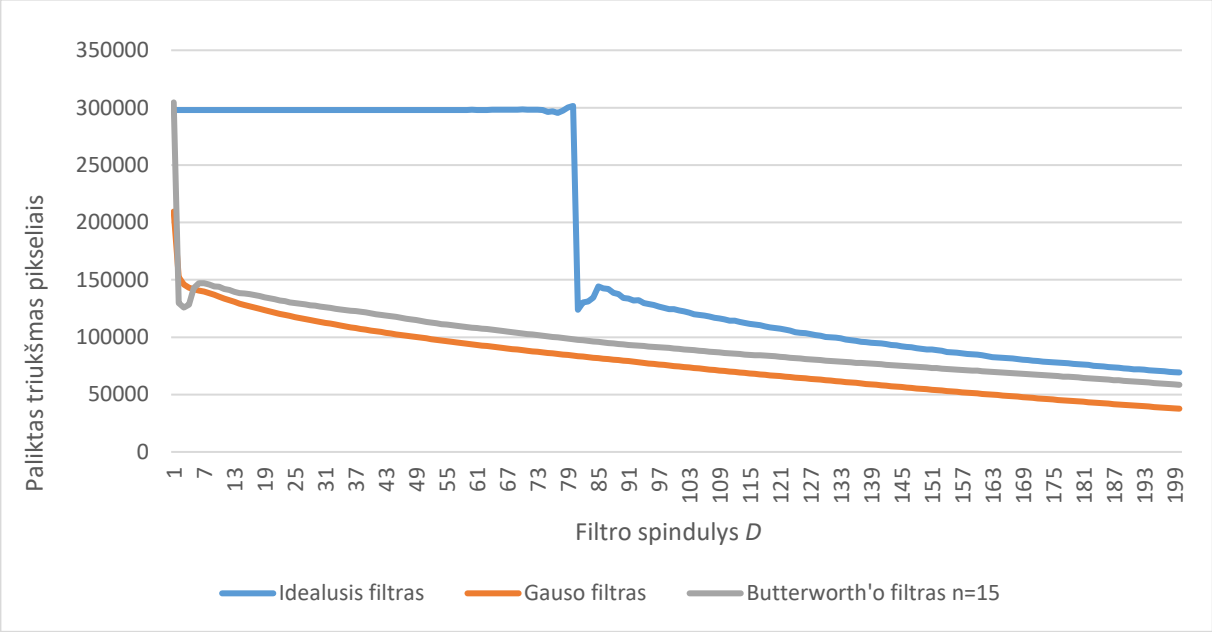
2.7 pav. Dažnio spektro filtravimo rezultatai su skirtingais filtrais (a) idealusis filtras (b) Gauso filtras (c) Butterworth‘o filtras

Bandymui yra parenkamos trys eksperimentinės nuotraukos, kuriose yra matoma lazerio linija. Kiekvienoje jų lazerio linija yra pažymima ryškiai žalia spalva (žr. 2.8 pav.). Žymėjimo pikselių RGB reikšmės yra (0, 255, 0). Prieš žymėjimą yra patikrinama ar nuotraukoje nėra daugiau pikselių, kurie turi tokias pat reikšmes. Taip yra užtikrinami kiek įmanoma tikslesni bandymų rezultatai.

2.8 pav. Eksperimentinės nuotraukos pavyzdys (a) originali nuotrauka (b) pažymėta nuotrauka

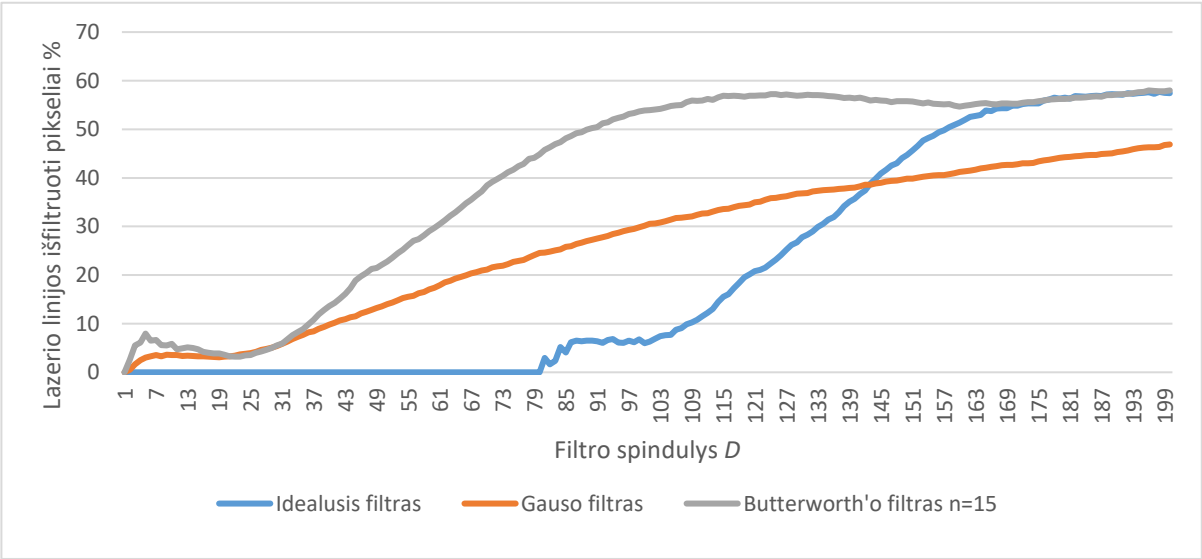
Visi pikseliai, kurie yra pažymėti visiškai ryškiai žalia spalva yra laikomi lazerio linijai priklausančiais pikseliais, o visi kiti – nereikalingas triukšmas. Remiantis tuo yra atliekami bandymai su kiekviena iš eksperimentinių nuotraukų. Kiekvienos jų dažnių spektras yra filtruojamas su skirtingais aukšto filtrais (idealusis, Gauso ir Butterworth‘o). Su kiekvienu filtru ir kiekviena nuotrauka yra atliekama po 200 iteracijų, o kiekvienos jų metu filtro spindulys *D* yra didinamas vienetu. Butterworth‘o filtrui yra nustatomas vis skirtingas statinis eilės numeris *n* kiekvienai nuotraukai. Po kiekvienos iteracijos yra skaičiuojama, kiek procentais filtras išfiltravo reikalingos informacijos (pikselių, kurie priklauso lazerio linijai) ir kiek vaizde yra palikta triukšmo pikseliais (visi kiti pikseliai, kurie nepriklauso lazerio linijai).

Remiantis pateikti grafiku (žr. 2.9 pav.) galima teigti, jog Gauso filtras, lyginant su idealiuoju ir Butterworth‘o filtrais, vaizde palieka mažiausiai triukšmo nepaisant esamo filtro dydžio. Tačiau esant labai mažam filtro spinduliui (apie 5) grafike galima pastebėti, jog Butterworth‘o filtras palieka mažiau triukšmo nei Gauso filtras. Visgi tokie mažų dydžių filtrai šiame darbe yra nenaudojami, dėl to į tai galima nekreipti dėmesio ir vadovautis vien matomu dėsningumu.



2.9 pav. Paliktas triukšmas pikseliais (pirma nuotrauka)

Analizuojant grafiką (žr. 2.10 pav.) galima pastebėti, jog Gauso ir idealiojo filtrų grafikai susikerta ties tašku, kur filtro spindulys *D* yra lygus 144. Esant mažesniam spinduliui atrodo, jog idealusis filtras pašalina mažiausią dalį lazerio linijos duomenų, tačiau ties didesniu spinduliu Gauso filtras tampa geresniu pasirinkimu. Taip pat verta atkreipti dėmesį į tai, jog Gauso filtro grafikas yra pats tolydžiausias, dėl to jo darosi paprasčiau nustatyti jo poveikį visai sistemai, nes priklausomybė atrodo beveik tiesinė.



2.10 pav. Išfiltruoti lazerio linijos pikseliai procentais (pirma nuotrauka)

Iš esmės visų bandymų metu buvo gauti panašūs rezultatai, kaip ir pateiktuose grafikuose. Dėl to siekiant gauti viso bandymo įvertinimą, kiekvienos nuotraukos gautų rezultatų vidurkiai yra pateikti lentelėje (žr. lentelė 2.1).

lentelė 2.1 Visų bandymų rezultatų vidurkiai

	Idealusis filtras	**Gauso filtras**	**„Butterworth“ filtras**
Išfiltruoti linijos pikseliai (%)	34.773	10.709	29.698
Paliktas triukšmas (pikseliai)	77448	58144	64146

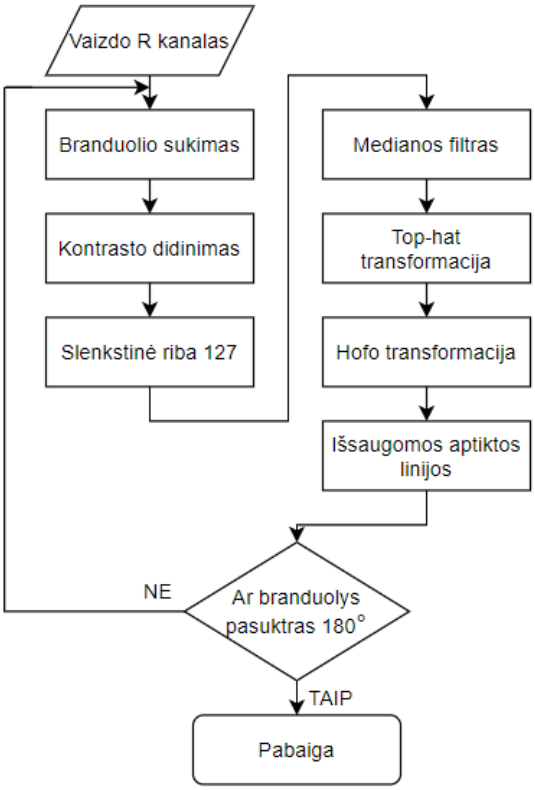
Remiantis gautais rezultatais galima teigti, jog iš bandytų trijų filtrų tinkamiausias lazerio linijos aptikimo uždaviniui spręsti yra Gauso filtras. Jis vidutiniškai vaizde palieka apie 58 tūkstančius pikselių triukšmo, lyginant su kitais filtrais – 77 ir 64 tūkstančiai. Gauso filtras taip pat daro mažiausią įtaką lazerio linijos pikseliams. Jis vidutiniškai išfiltruoja tik apie 11% pikselių, kurie priklauso lazerio linijai, lyginant su kitais filtrais – 35% ir 30%.

Remiantis gautais bandymų rezultatais yra nuspręsta, jog optimaliausias filtras šiam darbui yra Gauso filtras. Jo poveikis sistemai yra lengvai nuspėjamas ir derinimas yra pakankamai paprastas, nes yra tik vienas parametras – filtro spindulys *D*. Kai tuo tarpu Butterworth‘o filtras turi papildomą parametrą *n* (filtro eilės numeris). Taigi, toliau šiame darbe naudojamo aukšto dažnio Gauso filtro generavimo kodas pateiktas (žr. 2.11 pav.).

```
filter[height, width]
center_x = width/2
center_y = height/2
for (i=0; i<width; i++)
    for (j=0; j<height; j++)
        distance=sqrt((center_x - i)^2 + (center_y - j)^2)
        filter[j,i] = 1 - exp(-distance^2/(2*rad^2))
    end
end
```

2.11 pav. Gauso filtro generavimo pseudokodas

2.2. Linijų paieška



2.12 pav. Linijų paieškos algoritmas

Šiame poskyryje yra aprašomas naudojamas algoritmas linijų paieškai. Jis iš esmės yra vaizdo konvoliucijos branduolio sukimu ir Hofo transformacija (žr. 2.12 pav.). Vienas kadras yra apdorojamas pagal pavaizduotą vis su skirtingu branduoliu. Šios iteracijos vyksta tol, kol branduolys galiausiai yra apsukamas 180°. Atlikus konvoliuciją su pasuktu branduoliu, po to yra atliekamas kontrasto didinimas ir formuojamas binarinis vaizdas paprastos slenkstinės ribos metodu. Šiuo atveju yra nustatyta slenkstinė riba 127. Tai yra tiesiog pusė maksimalaus galimo pikselio intensyvumo – 255. Daroma prielaida, jog vaizde lazerio linija turi būti pakankamai ryškiai matoma.

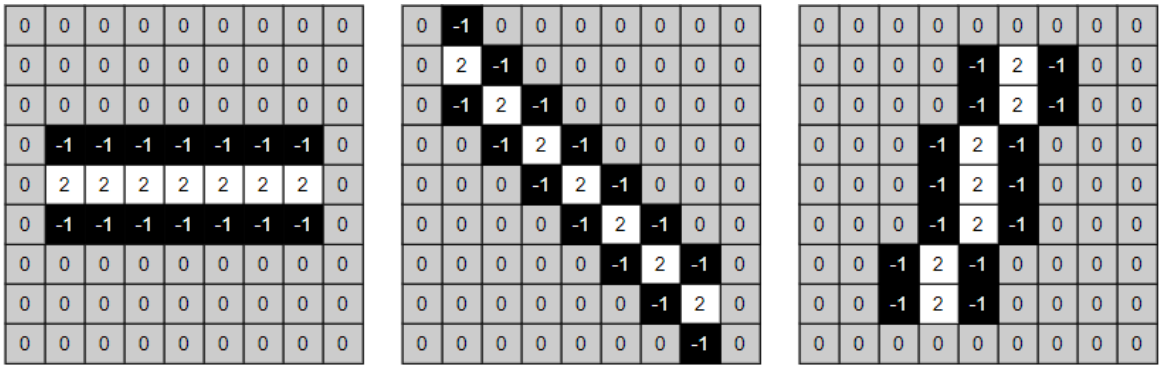
Toliau vyksta binarinio vaizdo apdorojimas. Siekiant pašalinti triukšmą iš vaizdo yra naudojami medianos filtras ir top-hat transformacija. Galiausiai toks binarinis vaizdas yra apdorojamas Hofo transformacija, kuri aptinka visas linijas vaizde ir išsaugo jų tam tikrus parametrus tolimesniam algoritmo veikimui.

2.2.1. Branduolio sukimas

Linijų paieška pradedama vykdyti nuo vaizdo, kuris yra išfiltruotas su Gauso aukšto dažnio filtru. Po to yra vykdomas to vaizdo filtravimas konvoliucijos principu pagal iš anksto sudarytą linijos aptikimo branduolį. Branduolio dydis yra 1% turimo vaizdo skersmens. Šis dydis yra suapvalinamas iki artimiausio nelyginio skaičiaus. Branduolio dydis privalo būti nelyginis skaičius dėl paprastesnio algoritmo įgyvendinimo. Tokiu būdu, nesvarbu kokiu kampu yra pasuktas branduolys, jo centriniame pikselyje visada bus linijos centras.

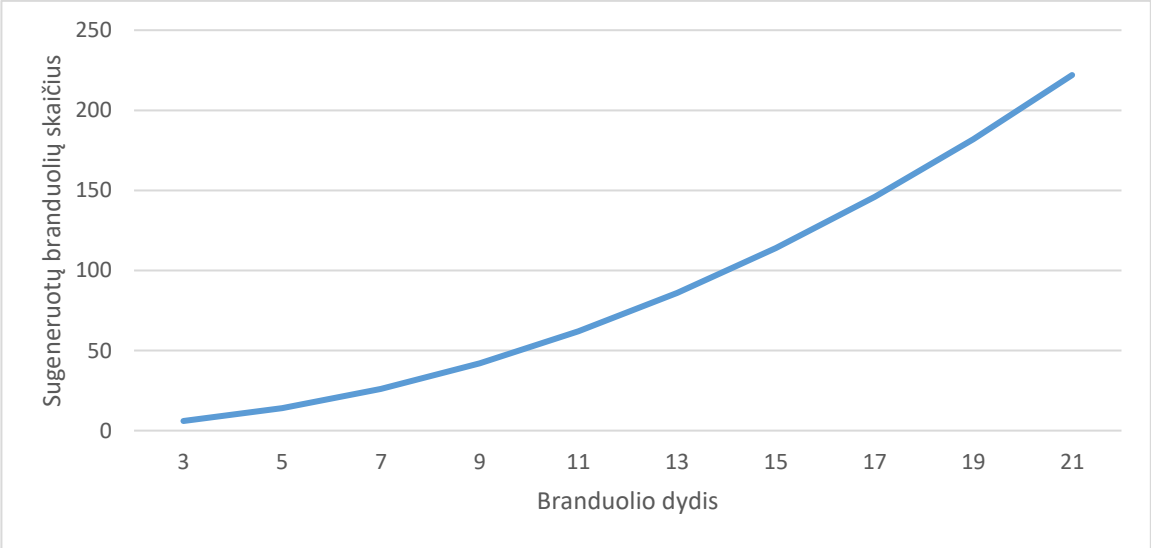
Branduolio sukimas vyksta paprastu principu. Iš pradžių yra sudaromas vertikalus branduolys (žr. 2.13 pav. (a)), po to yra generuojami visi įmanomi branduolio pikselių išsidėstymo variantai taip, kad

pikseliai turintys reikšmę 2 vertikaliai, horizontaliai arba skersai liestųsi su kitu pikseliu, turinčiu reikšmę 2. Atitinkamai kiekvienas dvejetas turi ir po du pikselius, kurių reikšmė lygi (-1). Branduolio sukimo kampas yra skaičiuojamas nuo horizontalios padėties pagal laikrodžio rodyklę. Visi tokiu būdu sugeneruoti branduoliai yra saugomi programos vidinėje atmintyje.



2.13 pav. Pasukti branduoliai (a) 0° kampu (b) 45° kampu (c) 105° kampu

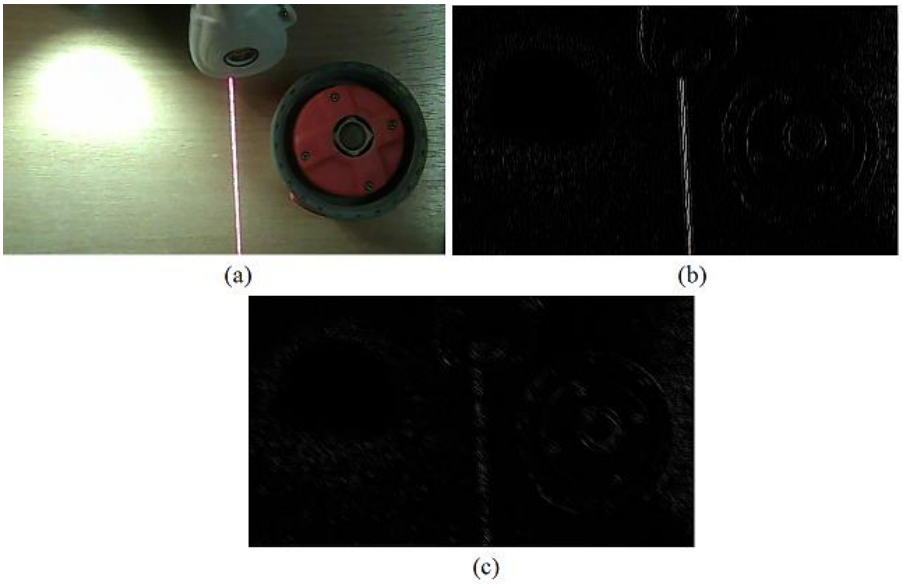
Sugeneruotų branduolių skaičius yra tiesiogiai priklausomas nuo pačio branduolio dydžio (žr. 2.14 pav.), kadangi didesnis branduolys turi daugiau pikselių, o tai reiškia, jog egzistuoja daugiau įmanomų skirtingų pikselių išsidėstymo variantų. Esant dideliam branduolio dydžiui yra sugeneruojama sąlyginai daug pasuktų branduolių, pavyzdžiui, jei nustatomas branduolio dydis yra 21, tai algoritmas sugeneruoja 222 skirtingų kampų branduolius. Ilgainiui vis didinant branduolio dydį darosi labai neoptimalu atlikti konvoliucijos operaciją su kiekvienu iš branduolių.



2.14 pav. Sugeneruotų branduolių skaičiaus priklausomybė nuo branduolio dydžio

Branduolio dydis proporcingai didėja nuo vaizdo dydžio, esant dideliam branduoliui tenka atlikti daug konvoliucijos operacijų. Dėl to algoritmas pašalina kai kuriuos sugeneruotus tarpinius branduolius, jeigu jų yra sugeneruota daugiau nei 45. Pavyzdžiui, jeigu branduolio dydis yra parenkamas 13, tada yra sugeneruojami 86 pasukti branduoliai. Tokiu atveju galima iš branduolių rinkinio išmesti kas antrą branduolį, tada jų liks 43. Šiam algoritmui visiškai pakanka tokios

branduolio kampo sukimo rezoliucijos, nes toliau šiame darbe naudojama Hofo transformacija naudoja tik 1° kampo rezoliuciją.

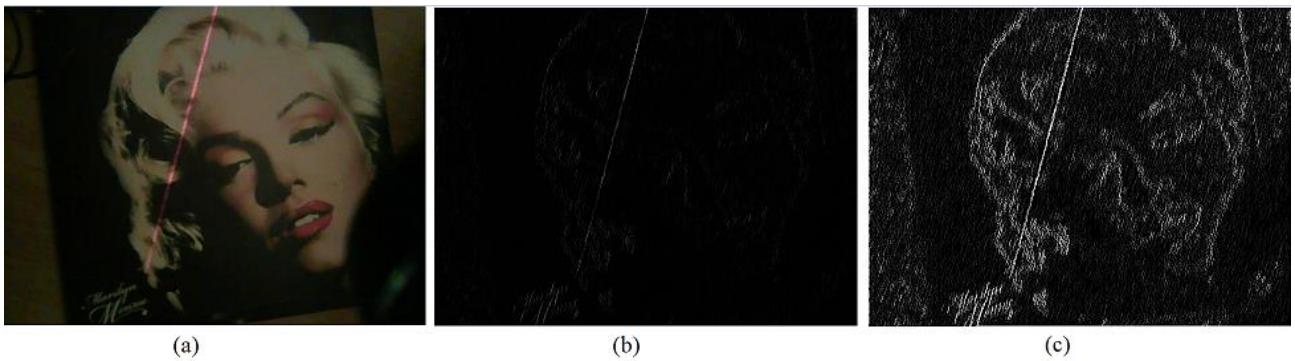


2.15 pav. Filtravimas konvoliucijos principu (a) originali nuotrauka (b) filtravimas su 90° kampu pasuktu branduoliu (c) filtravimas su 45° kampu pasuktu branduoliu

Taigi, šiame žingsnyje algoritmas iš esmės naudoja paprasčiausią linijos aptikimo branduolį pasuktą įvairiais kampais. Taip yra daroma, nes iš anksto nėra žinoma, kokia yra lazerio linijos vaizde orientacija, o išbandžius visus branduolius visais kampais, mažiausiai su vienu branduoliu tikrai bus gautas pakankamai ryškus rezultatas (žr. 2.15 pav. (b)). Jeigu branduolio kampas yra panašus į lazerio linijos kampą, linija po konvoliucijos išryškėja, kitais atvejais, ji tampa blanki ir tolesniuose algoritmo žingsniuose ji nėra aptinkama (žr. 2.15 pav. (c)).

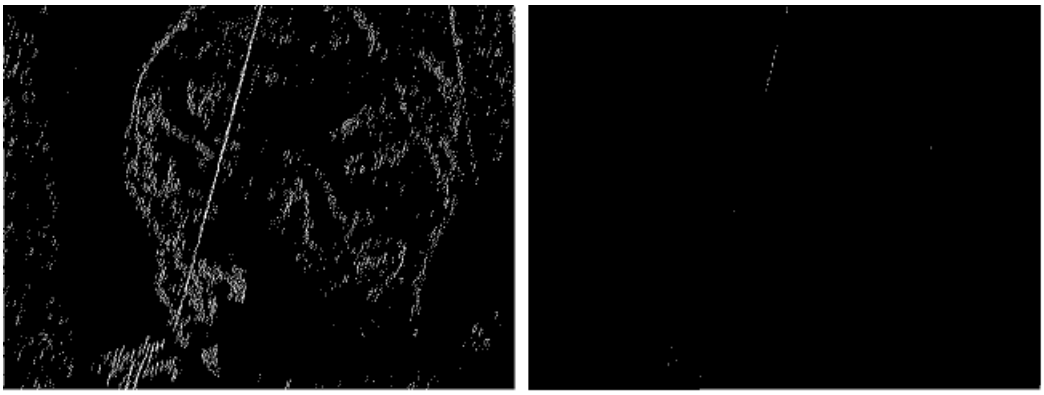
2.2.2. Binarinio vaizdo formavimas

Atlikus konvoliuciją su vienu iš sugeneruotų branduolių toliau yra formuojamas binarinis vaizdas. Šiame žingsnyje labai svarbus yra išfiltruoto vaizdo kontrasto didinimas. Būtent jis suteikia visam algoritmui daugiau lankstumo ir dinamiškumo. Tam tikrais atvejais, kai lazerio linija nėra labai ryškiai atspindima (žr. 2.16 pav. (a)), gali būti sunku suformuoti binarinį vaizdą neprarandant lazerio linijos.



2.16 pav. Kontrasto didinimas (a) originali nuotrauka (b) konvoliucijos principu išfiltruota nuotrauka (c) nuotrauka su padidintu kontrastu

Kontrasto didinimas padeda ne tik aptikti silpniau atspindimą lazerio liniją, bet ir suteikia galimybę naudoti paprastą slenkstinę ribą neprarandant reikalingų duomenų (žr. 2.17 pav.). Jeigu vaizdas su padidintu kontrastu turi matomą lazerio liniją, galima nesudėtingai išfiltruoti visus žemesnio intensyvumo pikselius. Šiuo atveju yra nustatoma statinė slenkstinė riba 127. Tai taip pat supaprastina algoritmo veikimo principą, nes nebereikia slenkstinės ribos derinti atskirai prie kiekvieno vaizdo. Tokiu būdu yra gaunamas patenkinamas filtravimo rezultatas nepaisant kaip stipriai yra atspindima lazerio linija.

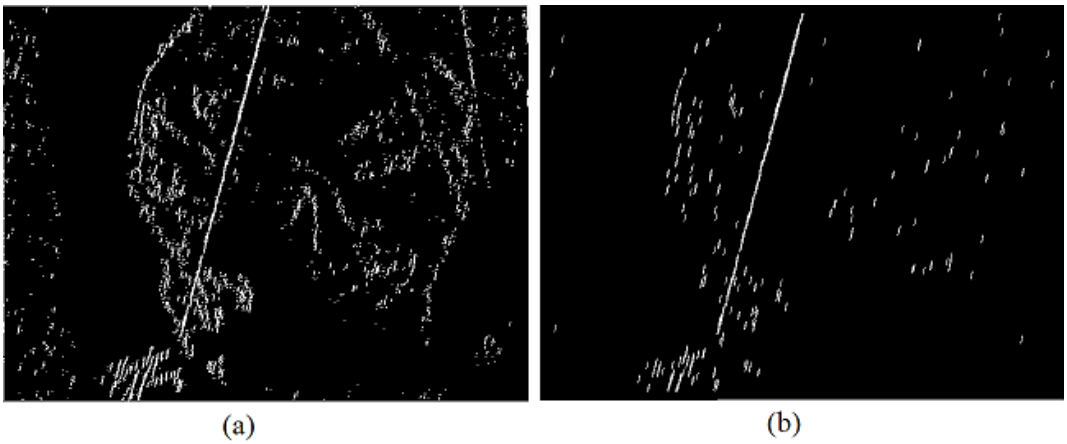


2.17 pav. Binarinio vaizdo pagal statinę slenkstinę ribą (a) su kontrasto didinimu (b) be kontrasto didinimo

Padidinus kontrastą ir panaudojus paprastą slenkstinę ribą yra išsaugoma didelė dalis reikalingų duomenų. Žinoma, toks kontrasto koregavimas turi ir neigiamą efektą – vaizde taip pat yra paliekama kur kas daugiau nereikalingu triukšmo. Dėl to norint jį pašalinti toliau yra atliekamos morfologinės operacijos bei papildomas binarinio vaizdo filtravimas, kuris yra aprašytas kitame skyrelyje.

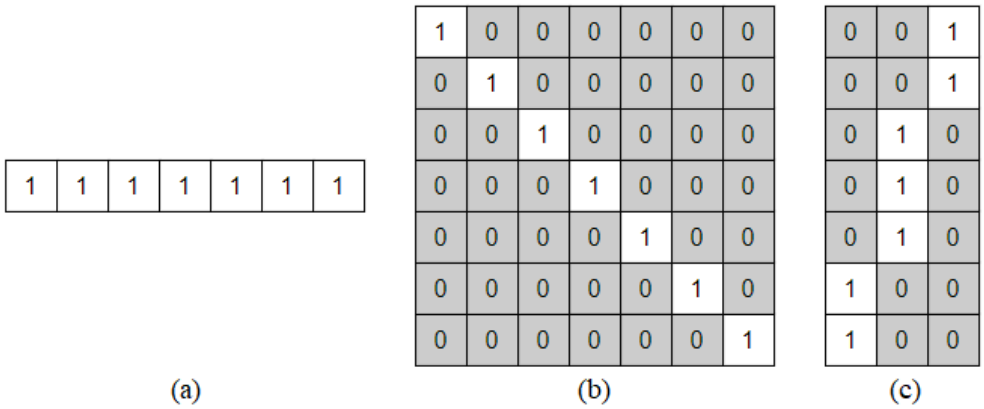
2.2.3. Binarinio vaizdo apdorojimas

Toliau siekiant pašalinti kiek įmanoma daugiau triukšmo iš nuotraukos yra atliekamas binarinio vaizdo filtravimas pasitelkiant medianos filtrą. Jis yra veiksmingas naudojant mažų taškų pašalinimui, tačiau jo dydis turi labai stiprų poveikį galutiniam filtravimo vaizdui. Jeigu medianos filtro dydis yra parenkamas per didelis, gali būti išfiltruota visiškai visa lazerio linija. Dėl to šiam darbe yra naudojamas minimalaus dydžio (2x2) medianos filtras, kuris mažai įtakoja lazerio liniją, tačiau pašalina dalį nereikalingo triukšmo (žr. 2.18 pav.). Vaizdas prieš pritaikant medianos filtrą (žr. 2.17 pav.).



2.18 pav. Binarinio vaizdo filtravimas (a) medianos filtras (b) morfologinis atidarymas

Po filtravimo su medianos filtru yra atliekamas morfologinis atidarymas. Tai yra morfologinės erozijos ir morfologinio išplėtimo operacijų kombinacija pagal tą patį struktūrinį elementą. Struktūrinis elementas yra generuojamas ties kiekviena konvoliucijos branduolio iteracija pagal posūkio kampą (žr. 2.19 pav.). Iš esmės struktūrinis elementas yra sudaromas pagal tą patį branduolį iš jo tiesiog pašalinus neigiamas reikšmes ir eilutes bei stulpelius, kuriuose yra tik nuliai. Tokiu būdu struktūrinis elementas turi tokį patį kampą kaip ir naudojamas branduolys.



2.19 pav. Morfologinio atidarymo struktūriniai elementai (a) 0° (b) 45° (c) 105°

Morfologinis atidarymas iš esmės binariniame vaizde pašalina visus mažus objektus, tačiau išsaugo didelių objektų formą ir dydį pagal struktūrinį elementą. Taigi, pavyzdžiui, jeigu vaizde yra 105° kampu pasukta lazerio linija (žr. 2.18 pav. (a)) ir tas vaizdas yra apdorojamas su tokiu pat kampu pasuktu konvoliucijos branduoliu (žr. 2.13 pav. (c)), o po to atliekamas morfologinis atidarymas pagal tokio pat kampo struktūrinį elementą (žr. 2.19 pav. (c)), galiausiai yra gaunamas binarinis vaizdas su ryškiai matoma linija (žr. 2.18 pav. (c)). Kadangi struktūrinio elemento kampas sutampa su linijos kampu, linija vaizde yra išsaugoma, o didelė dalis triukšmo yra nufiltruojama. Toliau toks binarinis vaizdas yra apdorojamas Hofo transformacija, apie tai plačiau yra rašoma kitame skyrelyje.

2.2.4. Linijų aptikimas ir saugojimas binariniame vaizde

Hofo transformacija yra esminis šio algoritmo žingsnis. Apdorotame ir išfiltruotame binariniame vaizde toliau yra ieškoma taškų, kurie sudaro linijas. Kaip jau žinoma, atlikus Hofo transformaciją yra apskaičiuojama Hofo erdvė, kurioje lokalūs maksimumai reiškia egzistuojančias linijas binariniame vaizde.

Toliau linijų aptikimas Hofo erdvėje vyksta pagal pagrindinius 2 parametrus: minimalus linijos ilgis ir maksimalus linijos pertrūkimo ilgis. Minimalus linijos ilgis reiškia koks turi būti linijos ilgis, jog ją būtų galima laikyti linija. Jeigu linija turi pertrūkimų, tai maksimalus pertrūkimo ilgis reiškia, jeigu pertrūkimo ilgis neviršija nustatytos ribos, tai pertrūkimas yra ignoruojamas ir atskirti linijos segmentai yra laikomi kaip viena linija. Šiuo atveju šie du parametrai taip pat priklauso nuo vaizdo skersmens. Minimalus linijos ilgis yra 20% vaizdo skersmens, o maksimalus pertrūkimo ilgis - 5%.

Kiekviena aptikta linija ties kiekviena branduolio sukimo iteracija yra saugoma masyve. Iš pradžių yra apskaičiuojamas linijos kampas pagal du jos galų taškus (žr. 2.20 pav.). Svarbu atkreipti dėmesį į tai, jog kampas yra skaičiuojamas nuo horizontalios padėties pagal laikrodžio rodyklę. Tokia taisyklė yra priimta visame algoritme.

```
function points_to_angle(x1, x2, y1, y2)
    slope = (y2 - y1) / (x2 - x1)
    slope_angle = arctan(slope)

    if slope_angle < 0:
        slope_angle = 180 - slope_angle

    return slope_angle
```

2.20 pav. Linijos kampo apskaičiavimo pseudokodas

Apskaičiavus aptiktos linijos kampą yra ieškomas tam kampui statmenas konvoliucijos branduolys (žr. 2.21 pav.). Kadangi iš visi pasukti branduoliai yra sugeneruoti dar algoritmo pradžioje, iš visų brandulių masyvo belieka išsirinkti reikiamą branduolį pagal kampą.

```
function degrees_to_kernel(kernels, kernels_count, degrees)
    //How many degrees is rotated from horizontal position
    if degrees > 180:
        degrees = degrees - 180

    rotation_resolution = 180/kernels_count

    kernel_deg = 0
    kernel_deg_before = 0
    kernel_before = kernels[0]
    for each kernel in kernels:
        if degrees > kernel_deg:
            //Check which kernel is closer to provided degrees
            if |degrees - kernel_deg_before| < |degrees - kernel_deg|:
                return kernel_before
            else
                return kernel
            if
        kernel_deg_before = kernel_deg
        kernel_before = kernel
        kernel_deg = kernel_deg + rotation_resolution
```

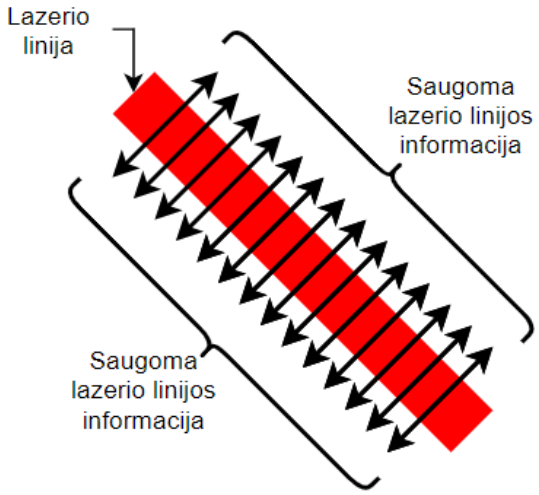
2.21 pav. Branduolio parinkimo pagal kampą pseudokodas

Kaip jau žinoma, sugeneruotų branduolių skaičius priklauso nuo pačio branduolio dydžio. Kuo didesnis branduolys, tuo daugiau yra sugeneruojama pasuktų branduolių ir gaunama didesne branduolio kampo sukimo rezoliucija. Kitaip tariant, tai yra tam tikras kampo kvantavimo vienetas, kuris reiškia kaip tiksliai sugeneruoti branduoliai apibūdina posūkio kampą:

$$r = \frac{180}{\mathrm{n}}, \tag{2.1}$$

čia *r* yra vieno branduolio kvantavimo vienetas laipsniais, o *n* – sugeneruotų branduolių skaičius. Iš esmės, kuo daugiau turima branduolių, tuo mažesnis yra gaunamas *r* ir dėl to kiekvienas branduolys tiksliau apibūdina kampą.

Iš esmės aptikta linija binariniame vaizde yra toje pačioje pozicijoje kaip ir originaliame RGB vaizde. Dėl to toliau pagal linijos poziciją binariniame vaizde yra surenkami visi tos linijos RGB pikseliai iš originalaus vaizdo. Suradus statmeną linijai branduolį, pagal jį yra formuojamas lygiai tokio pat kampo struktūrinis elementas, kuris buvo naudojamas ir morfologinei atidarymo operacijai. Tada šie struktūriniai elementai yra dedami ant originalaus vaizdo per visą linijos ilgį taip, jog linijos centras sutaptų su struktūrinio elemento centru (žr. 2.22 pav.). Tada masyve yra išsaugomi tie originalaus RGB vaizdo pikseliai, kurių pozicija sutampa su struktūrinio elemento binariniais vienetais. Kitaip tariant, yra išsaugomas visas originalus linijos vaizdas (žr. 2.23 pav.).



2.22 pav. Lazerio linijos išsaugojimas

Toks linijos saugojimo būdas yra geras tuo, jog yra nesvarbus linijos posūkio kampas vaizde. Optimalu yra ir tai, jog iš anksto sugeneruoti branduoliai yra naudojami ne vieną kartą per visą algoritmą, o branduolio dydį visada galima pakeisti ir taip priderinti prie lazerio linijos storio. Žinoma, tokiu būdu saugant linijas yra neišvengiama ir tai, jog kartu su linija bus išsaugoma ir dalis fono, kuris yra tik nereikalingas triukšmas, tačiau to yra sudėtinga išvengti, nes linijos storis nėra iš anksto žinomas. Taigi, tolimesni algoritmo žingsniai yra skirti būtent išsaugotų linijų analizei. Tarp visų jų dažnai pasitaiko ir kitų linijų vaizde, tačiau jei lazerio linija vaizde yra ryškiai matoma, tarp išsaugotų linijų bus ir ieškoma lazerio linija.

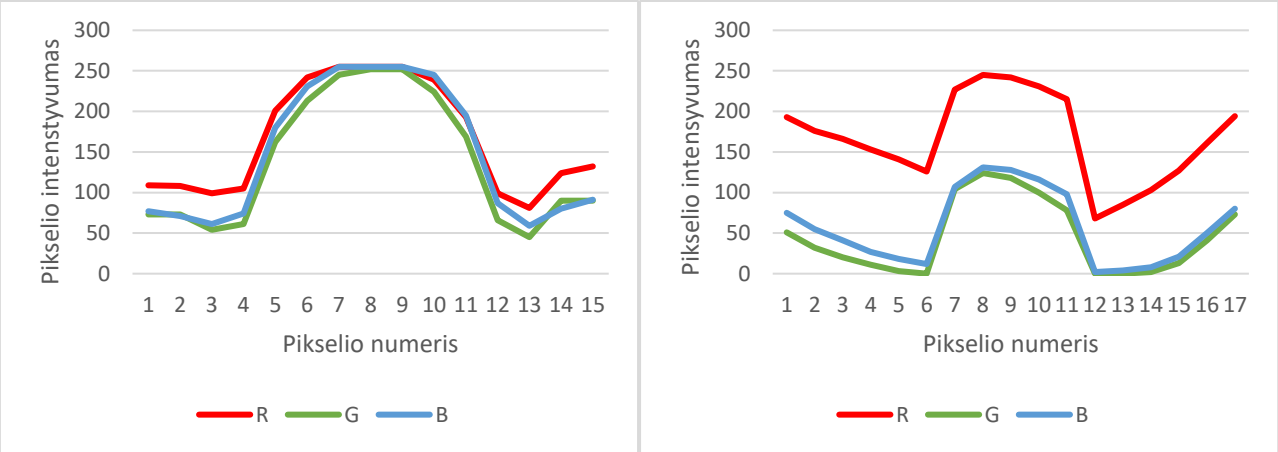
2.23 pav. Išsaugotų lazerio linijų pavyzdžiai

2.3. Lazerio linijos nustatymas

Baigus visas iteracijas su pasuktais konvoliucijos branduoliais toliau yra analizuojama kiekviena iteracijų metu aptikta linija. Toliau yra daromos iteracijos su kiekviena aptikta ir programos vidinėje atmintyje išsaugota linija. Pagrindinis šio žingsnio tikslas yra nustatyti, kuri iš visų aptiktų linijų yra būtent raudona lazerio linija.

Šiuo atveju galima pastebėti du skirtingus lazerio linijos projektavimo ant paviršiaus atvejus. Pirmasis, kai lazerio linija nuo paviršiaus yra stipriai atspindima, tada ji per vidurį tampa balta. Šis reiškinys yra vadinamas kameros persotinimu (angl. *oversturation*) ir tai nutinka dėl nepakankamo kameros jautrumo. Antrasis atvejis yra tada, kai raudona lazerio linijos ir kameros vaizde išlieka raudona. Abu šiuos atvejus galima pastebėti (žr. 2.23 pav.).

Iš esmės lazerio linijos nustatymas yra paremtas RGB vaizdo skirtingų kanalų tarpusavio santykiu. Jeigu kamera nėra persotinta, tada per visą lazerio linijos plotį raudonasis vaizdo kanalas yra intensyvesnis už žaliąjį ir mėlynąjį kanalus (žr. 2.24 pav. (b)). Tačiau kitu atveju, kai lazerio linija tampa balta, pikselių intensyvumas pasiekia maksimalią (255) reikšmę visuose trijuose kanaluose (žr. 2.24 pav. (a)). Tada nebelieka tokio pat dėsningumo kaip pirmuoju atveju. Tačiau galima pastebėti, jog projektuojamas lazeris ant paviršiaus šiek tiek išsisklaido ir ties kraštais jo intensyvumas sumažėja. Dėl to kraštuose raudonasis kanalas turi didesnį intensyvumą lyginant su kitais dviem.



2.24 pav. Pikselių intensyvumo kitimo grafikai per lazerio linijos plotį (a) kai lazerio linija kameros vaizde yra balta (b) kai lazerio linija kameros vaizde yra raudona

Norint nustatyti lazerio liniją yra reikalingas tam tikras kiekvienos linijos skaitinis įvertis. Skaičiuojant šį įvertį iš pradžių lazerio linija per plotį yra suskaidoma į 3 dalis: dvi kraštines dalis ir centrą. Kiekvienos dalies plotis priklauso nuo išsaugotos linijos pločio, o išsaugotas linijos plotis priklauso nuo linijos saugojimui skirto struktūrinio elemento dydžio, kuris šiuo atveju yra 2% vaizdo skermens. Norint tinkamai suskirstyti liniją svarbu išlaikyti kiekvienos dalies proporcingumą ir tai atlikti taip, jog abiejų kraštinių dalių ilgiai būtų tokie patys, tačiau ne didesni už centrinės dalies ilgį. Tai yra svarbu todėl, nes būtent kraštinėse lazerio linijos dalyse raudonasis kanalas visada bus intensyvesnis už centrinę, nepaisant kameros persotinimo.

```
function line_partition(laser_width)
    sides_len = laser_width/3
    centert_len = laser_width - sides_len*2
    if center_len > sides_len:
        center_len = center_len - 2
        sides_len = sides_len + 1

    return center_len, sides_len
```

2.25 pav. Linijos dalių ilgių nustatymo pseudokodas

Jeigu linijos plotis yra 7 pikseliai, tada kraštinių dalių ilgiai bus po 3 pikselius, o centrinės dalies ilgis – 1 pikselis. Jeigu linijos plotis yra 9 pikseliai, tada linija yra suskirstoma į 3 lygias dalis po 3 pikselius. Pagrindinė esmė, jog kraštinės dalys visada yra ilgesnės arba lygios centrinei daliai, nes lazerio linijos kraštai visada turi tą patį požymį – raudonasis kanalas yra intensyvesnis už kitus du kanalus.

Toliau yra skaičiuojamas kiekvienos linijos dalies raudonojo, žaliojo ir mėlynojo kanalų vidurkiai. Tada pagal juos atskirai yra įvertinama kiekviena iš linijos dalių. Linijos kraštinių dalių įverčiai yra apskaičiuojami taip:

$$S = \left(M_R - \frac{M_G + M_B}{2}\right) \cdot 3, \tag{2.2}$$

čia S – kraštinės dalies skaitinis įvertis, o M_R, M_G ir M_B yra atitinkamų RGB kanalų kraštinių dalių vidurkiai. Skaičiuojant šį įvertį iš esmės iš raudonojo kanalo yra atimamas žaliojo ir mėlynojo kanalo vidurkis. Tai parodo kiek raudonasis kanalas yra intensyvesnis už likusius du. Paprasčiau tariant, kiek raudoni yra lazerio linijos kraštai. Lygiai taip pat svarbu yra viską padauginti iš konstantos 3, nes kraštinėms dalims siekiama suteikti didesnę reikšmę skaičiuojant bendrą visos linijos įvertį. Žinoma, kartais nutinka taip, jog linijos kraštai yra visiškai raudoni, padidėjęs intensyvumas yra matomas tik raudonajame kanale, dėl to žaliojo ir mėlynojo kanalo suma tampa lygi nuliui, o dalyba iš nulio yra negalima. Tokiu atveju įvertis yra prilyginamas tiesiog raudojo kanalo vidurkiui padaugintam iš trijų (žr. 2.26 pav.).

```
function side_part_coefficient(Mr, Mg, Mb)
    S = 0
    if (Mg + Mb) == 0:
        S = Mr * 3
    else
        S = (Mr - (Mg + Mb)/2) * 3

    return S
```

2.26 pav. Kraštinių dalių įverčio skaičiavimo algoritmas

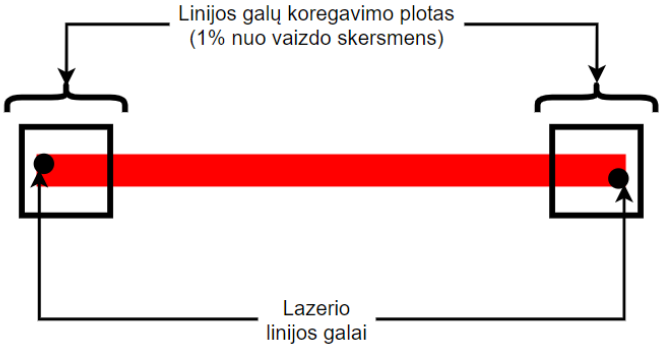
Toliau yra skaičiuojamas centrinės linijos dalies skaitinis įvertis pagal formulę:

$$C = \frac{M_R + M_G + M_B}{3}, \quad (2.3)$$

čia C yra centrinės dalies skaitinis įvertis, o M_R, M_G bei M_B reiškia tą patį kaip ir (2.2) formulėje. Jau yra žinoma, jog lazerio vidurys gali būti raudonas arba, kameros persotinimo atveju, baltas. Esant baltai linijai visi trys RGB kanalai siekia maksimalias reikšmes ir raudonojo kanalo intensyvumas iš esmės yra lygus žaliojo ir mėlynojo kanalų intensyvumams. Dėl to (2.2) formulė tokiu atveju netinka. Dėl to linijos centrinę dalį paprasčiausia yra įvertinti pagal bendrą jos ryškumą, tai yra tiesiog visų trijų kanalų vidurkis. Tada bendras linijos įvertis yra skaičiuojamas tiesiog sudedant abiejų kraštinių dalių ir centrinės dalies įverčius. Lazerio linija yra laikoma ta linija, kurios bendras skaitinis įvertis yra didžiausias.

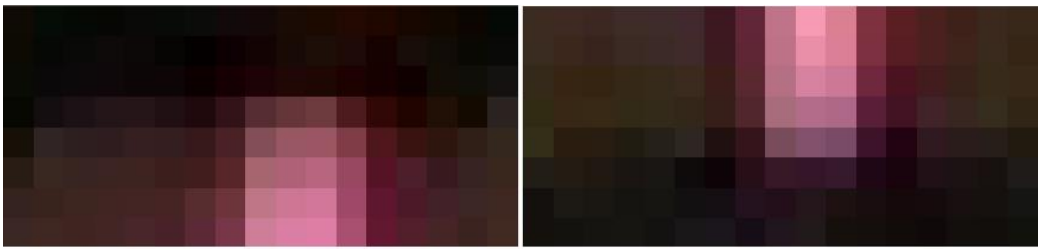
2.3.1. Linijos centro patikslinimas

Aptikta lazerio linija turi 2 apskaičiuotus jos galus. Jeigu lazerio linija vaizde yra platesnė, dažnai nutinka taip, jos iš esmės vienas arba abu taškai atsiduria ties linijos kraštais. Siekiant pagerinti algoritmo tikslumą toliau yra ieškomas lazerio linijos centras.



2.27 pav. Lazerio linijos centro patikslinimas

Kaip jau žinoma, lazerio linijos centras visada bus ryškiausia vieta per visą linijos plotį. Tai galima pamatyti ir grafike (žr. 2.24 pav.). Logiška ir tai, kadangi lazeris yra šviesos šaltinis, vaizde aplink lazerį neturėtų būti ryškesnių objektų. Remiantis tuo, lazerio linijos centro patikslinimas yra iš esmės tiesiog ryškiausio lokalaus taško radimas (žr. 2.27 pav.). Lokalios zonos dydis taip pat yra apibrėžiamas pagal turimo vaizdo skersmenį, tai yra 1%.



2.28 pav. Lazerio linijos galai

Abiejose linijos taškų zonose yra vykdomas raudonojo kanalo pikselių skenavimas. Ryškiausias pikselis toje zonoje yra laikomas lazerio centru. Žinoma, tai nėra pats tiksliausias lazerio linijos centro nustatymo būdas, nes jis turi tam tikrą neapibrėžtumą. Kameros persotinimo atveju, kai raudona lazerio linija tampa balta, centre esantys pikseliai įgyja maksimalias reikšmes – 255. Dėl to yra galimos tam tikros centro nustatymo paklaidos, nes lokalioje zonoje nėra vieno pačio ryškiausio pikselio. Tokiu atveju yra parenkamas pirmas pasitaikęs ryškiausias pikselis, kuris gali būti nutolęs nuo tikrojo centro per kelis pikselius.

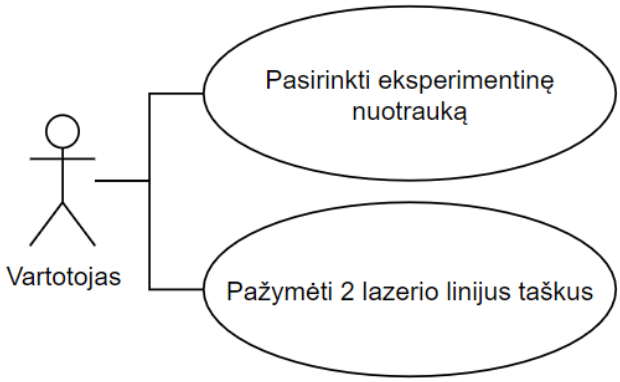
3. Algoritmo tyrimas

Šiame skyriuje yra aprašomas algoritmo tyrimo realizavimas. Yra rašoma apie tyrimui naudojamą sukurtą programinį įrankį. Po to yra apžvelgiama visa eksperimento eiga ir galiausiai aptariami gauti rezultatai.

3.1. Tyrimo programinis įrankis

Tyrimo programinis įrankis, kaip ir pats algoritmas yra realizuotas naudojant „Matlab“ programinį paketą. Parašyta programa iš esmės turi 3 rėžimus: lazerio linijos aptikimas nuotraukoje, lazerio linijos aptikimas vaizdo įraše ir lazerio linijos tyrimas, naudojant eksperimentines nuotraukas. Toliau yra rašoma būtent apie pastarąjį programos režimą, nes šis skyrius skirtas algoritmo tyrimui.

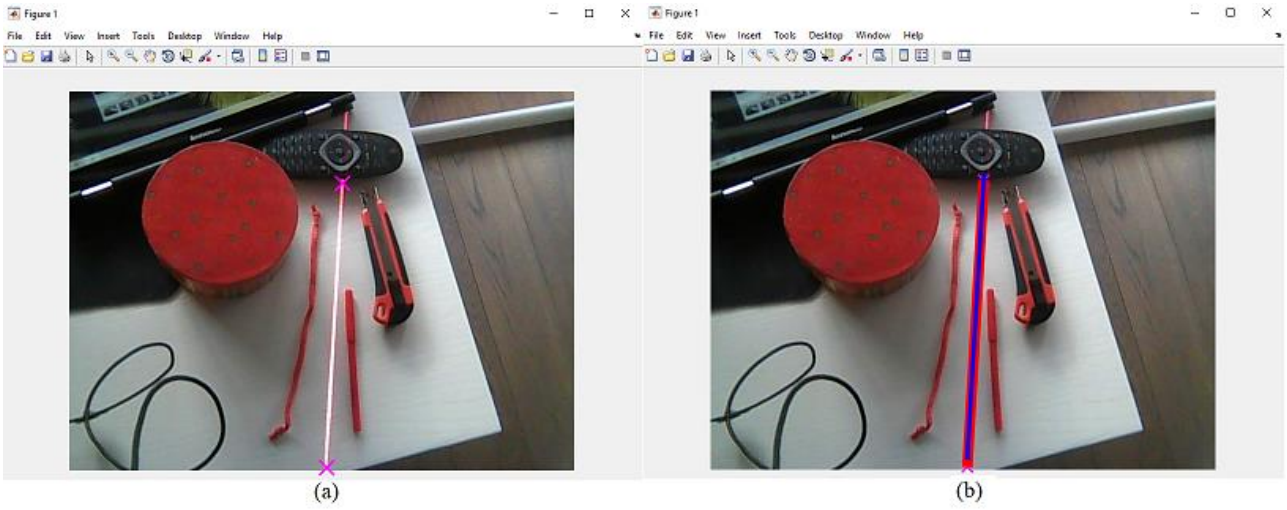
Pats tyrimo įrankis iš esmės yra labai paprastas. Vartotojas gali atlikti tik 2 veiksmus: pasirinkti eksperimentinę nuotrauką ir joje pažymėti 2 matomos lazerio linijos taškus (žr. 3.1 pav.). Prieš paleidžiant programą, vartotojas privalo programiniame kode nurodyti eksperimentinės nuotraukos buvimo vietą kompiuteryje.



3.1 pav. Panaudos atvejų diagrama

Nurodžius eksperimentinės nuotraukos buvimo vietą ir paleidus programą, toliau vartotojui yra atvaizduojama pati nuotrauka. Norint toliau tęsti bandymą, jis privalo kairiuoju pelės klavišu paspausti ant 2 nuotraukos vietų, taip nurodydamas 2 lazerio linijos taškus. Sulig kiekvienu paspaudimu taškas yra pažymimas ryškiai violetinės spalvos žymekliais. (žr. 3.2 pav. (a)). Pažymėjus antrąjį linijos tašką, programa nuotraukoje atvaizduoja vartotojo pažymėta lazerio liniją stora, ryškiai raudona linija, o po to automatiškai yra paleidžiamas lazerio linijos aptikimo algoritmas. Algoritmui aptikus lazerio liniją, ji yra atvaizduojama toje pačioje nuotraukoje plonesne tamsiai mėlynos spalvos linija (žr. 3.2 pav. (b)).

Taip pateikta vizualinė informacija leidžia vartotojui padaryti pirmines išvadas apie lazerio linijos aptikimo algoritmo veikimą. Iš esmės, jeigu mėlyna linija (algoritmo aptikta linija) yra atvaizduota ant storesnės raudonos linijos (vartotojo pažymėtos linijos), tada galima teigti, jog algoritmas tikrai aptiko lazerio liniją. Žinoma, tai yra tik pirminis vizualinis įvertinimas, šis programinis įrankis pateikia ir detalesnę informaciją apie aptikimo kokybę.



3.2 pav. Programinio įrankio vaizdas (a) pažymėti 2 lazerio linijos taškai (b) pažymėta vartotojo nurodyta ir algoritmo aptikta lazerio linija

Siekiant įvertinti lazerio linijos aptikimo kokybę, programinis įrankis palygina vartotojo pažymėtą liniją su algoritmo aptikta linija. Palyginimas vyksta tokiu principu, jog vartotojo pažymėta linija yra laikoma atskaitos, arba, kitaip tariant, tikrąja linija, nes žmogus bet kokioje nuotraukoje intuityviai geba nustatyti, kurioje vietoje yra lazerio linija. Algoritmo aptikta linija yra galutinis gautas rezultatas.

Vienas iš aptikimo kokybės įvertinimo kriterijų yra linijos posūkio kampo paklaida. Paprasčiau tariant, yra skaičiuojama posūkio kampo absoliuti skirtumo reikšmė tarp referencinės ir aptiktos linijos. Kadangi yra žinomi abiejų linijų galutiniai taškai, tai jų kampus galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$\alpha = \arctan\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \tag{3.1}$$

čia α yra linijos posūkio kampas, o y_1, y_2, x_1, x_2 – atitinkamai pirmojo ir antrojo taškų koordinatės. Tyrimo metu, lygiai taip, kaip jau yra apibrėžta ir algoritmo veikimo metu, linijos kampas yra skaičiuojamas nuo horizontalios pozicijos pagal laikrodžio rodyklę (žr. 2.20 pav.).

Antrasis vertinimo kriterijus mažiausias atstumas tarp vartotojo pažymėto linijos taško ir algoritmo aptiktos linijos taškų. Kadangi algoritmas apskaičiuoja tik galinius 2 linijos taškus, norint surasti artimiausią atstumą iki vartotojo pažymėto taško, reikia toliau suskaičiuoti visus tarpinius aptiktos linijos taškus. Tai yra daroma pasitelkiant paprasčiausią tiesės lygtį:

$$y = mx + b, \tag{3.2}$$

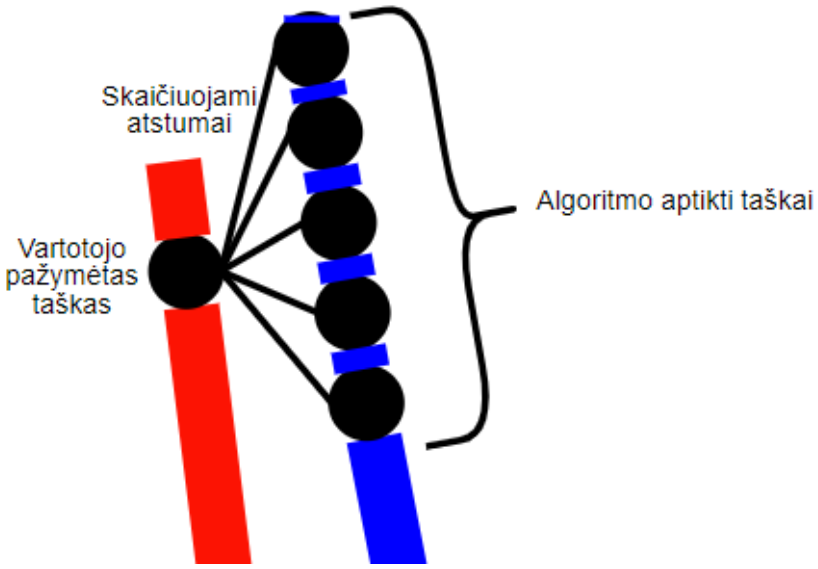
čia y ir x yra taško koordinatės, m – teisės krypties koeficientas, o b – taško, kuris kerta y ašį, y koordinatė. Toliau krypties koeficientas m yra randamas pagal aptiktos linijos 2 taškus:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \tag{3.3}$$

čia y_1, y_2, x_1, x_2 reiškia tą patį kaip ir (3.1) formulėje. Tai yra algoritmo aptiktos linijos galinių taškų koordinatės. Apskaičiavus *m*, toliau kintamasis *b* yra surandamas tiesiog jį išreiškiant iš (3.2) formulės:

$$b = y - mx, \tag{3.4}$$

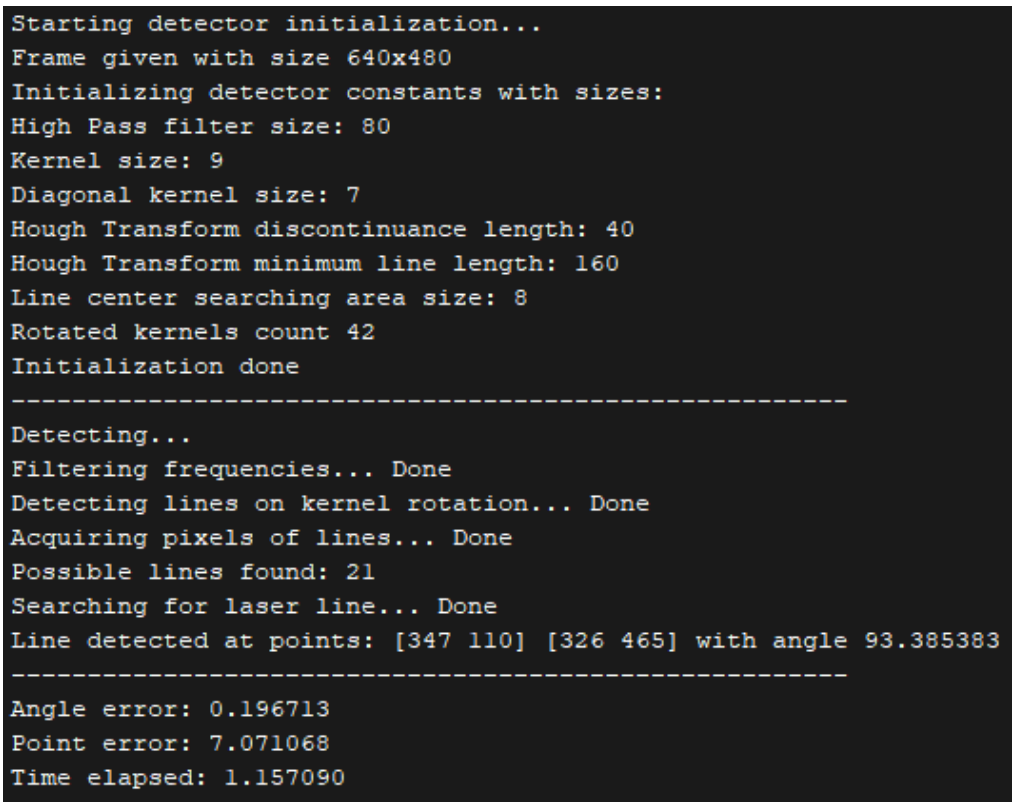
čia visi lygties parametrai reiškia tą patį, kaip ir (3.2) formulėje. Apskaičiavus *m* ir *b* toliau yra skaičiuojamos aptiktos linijos taškų *y* koordinatės pagal (3.2) lygtį. Koordinatės *x* reikšmės kinta nuo 1 iki turimo vaizdo pločio pikseliais. Visi apskaičiuoti linijos taškai yra saugomi vidiniame programos masyve. Toliau yra skaičiuojami Euklido atstumai tarp vartotojo pažymėto pirmojo taško ir visų algoritmo aptiktos linijos taškų (žr. 3.3 pav.). Po to iš visų tokiu būdu apskaičiuotų atstumų yra surandamas mažiausias, kuris reiškia lazerio linijos aptikimo taškų paklaidą.



3.3 pav. Atstumo tarp taškų radimas

Šis programinis įrankis, kartu su lazerio linijos aptikimo paklaidomis taip pat įvertina ir algoritmo vykdymo greitaveiką. Kaip jau minėta anksčiau, vartotojui pažymėjus antrąjį linijos tašką, programa paleidžia sukurtą aptikimo algoritmą. Vykdymo laikas yra pradedamas skaičiuoti nuo to momento, kai yra iškviečiama pagrindinė algoritmo funkcija, o baigiamas, kai algoritmas apskaičiuoja du aptiktus lazerio linijos taškus. Į visą vykdymo trukmę nėra įtraukiamas atvaizdavimui skirtas laikas.

Baigus tyrimą su eksperimentine nuotrauka, rezultatai yra išvedami į programinio paketo „Matlab“ konsolės langą (žr. 3.4 pav.). Paskutinėse trijose eilutėse yra pateikiama svarbiausia tyrimo informacija, tai yra posūkio kampo paklaida, taškų atstumo paklaida bei vykdymo laikas.

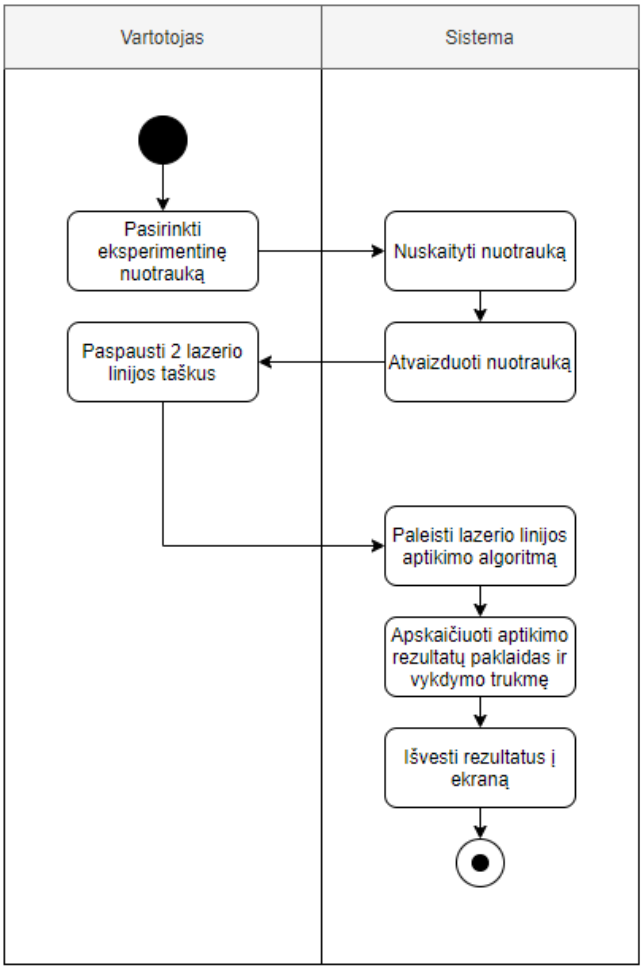


3.4 pav. Programinio įrankio konsolės išvestis

Šiame konsolės lange taip pat galima matyti ir kitus svarbius algoritmo parametrus. Vieni iš svarbiausių yra suinicializuotų konstantų dydžiai. Jie programiniame kode yra nurodomi kaip procentinė dalis nuo vaizdo skersmens. Dėl to yra svarbu matyti, kokius realius dydžius programa apskaičiavo. Yra 6 pagrindinės algoritmo konstantos, kurios gali būti koreguojamos programiniame kode atsižvelgiant į turimo vaizdo sąlygas:

- Aukšto dažnio filtro dydis (angl. *High Pass filter size*). Tai yra Gauso filtro, kuris naudojamas priešlaikinio apdorojimo metu, dydis.
- Branduolio dydis (angl. *Kernel size*). Tai yra brandulio, kuris naudojamas linijų aptikimui konvoliucijos metu.
- Statmeno branduolio dydis (angl. *Diagonal kernel size*). Tai yra branduolio, kuris naudojamas linijai išsaugoti, dydis.
- Hofo transformacijos linijos pertraukimo ilgis (angl. *Hough Transform discontinuance length*). Tai yra maksimalus linijos pertraukimo ilgis, iki kurio skirtingi linijos segmentai yra laikomi kaip viena linija.
- Hofo transformacijos minimalus linijos ilgis (angl. *Hough Transform minimum line length*). Tai yra linijos, kuri gali būti aptikta, minimalus ilgis.
- Linijos centro radimo paieškos lauko dydis (angl. *Line center searching area size*). Tai yra paieškos lauko dydis, kuris naudojamas linijos centro radimui.

Programos išvestyje taip pat galima matyti sugeneruotų pasuktų branduolių skaičių (angl. *Rotated kernels count*). Viso vykdymo metu taip pat yra spausdinama algoritmo veikimo esama stadija bei jau įvykdytos stadijos. Ši informacija yra naudinga vartotojui esant labai aukštos rezoliucijos vaizdams. Tokiais atvejais algoritmo vykdymo laikas gali apimti keliasdešimt sekundžių, todėl galima vizualiai matyti, kuri algoritmo dalis yra vykdoma ilgiausiai.



3.5 pav. Programinio įrankio veiklos diagrama

Apibendrintas sukurto programinio įrankio veikimas yra pavaizduotas veiklos diagrama (žr. 3.5 pav.). Joje galima matyti apibendrintą visą tyrimo eigą. Diagramoje taip pat atsispindi vartotojo ir algoritmo sąryšis. Gauti rezultatai iš esmės yra priklausomi ir nuo pačio vartotojo, nes rezultatams turi įtakos ir tai, kaip tiksliai vartotojas pažymi abu lazerio linijos taškus.

3.2. Tyrimo eiga

3.3. Tyrimo rezultatai

Išvados

Atlikus 2.2 skyrelyje aprašytą aukštų dažnių filtrų bandymus buvo išanalizuoti 3 aukštų dažnių filtrai: Gauso, „Butterworth“ ir idealusis. Atsižvelgiant į 2.4 lentelėje pateiktus duomenis galima daryti išvadą, jog Gauso filtras yra labiausiai tinkamas iš visų trijų sprendžiant lazerio linijos aptikimo problemą. Jis vidutiniškai išfiltruoja mažiausią procentinę dalį mus dominančios linijos taškų (10.709%), kai tuo tarpu idealusis ir „Butterworth“ filtrai - atitinkamai 34.773% ir 29.698%. Gauso filtras taip pat vidutiniškai palieka mažiausią kiekį triukšmo nuotraukoje (58144 pikseliai) lyginant su idealiuoju ir „Butterworth“ fitlrais (77448 ir 64746 pikseliai).

Bandant nustatyti aukšto dažnio filtro dydį pagal „Hough“ transformacijos rezultatą buvo remiamasi (2.22 pav.) pateiktu grafiku. Dažnu atveju galimų linijų skaičius esant pakankamai dideliam filtro dydžiui galiausiai nusistovi ir pagal tai parinkus filtro dydį, kuris atitinka nusistovėjimo pradžią grafike, pavyksta aptikti liniją. Kol kas negalime šio bandymo rezultatų įvertinti skaitinėmis reikšmėmis.

Taigi, liniją šiuo atveju pavyksta aptikti, tačiau dar reikia tobulinti algoritmus. Jei linija yra suskaidyta į kelis segmentus, tokiu atveju aptinkame tik vieną patį ryškiausią linijos segmentą. Be to, jei linijos storis yra didesnis, mano pateiktas būdas aptinka tik vieną linijos pusę, bet ne linijos vidurį. Tęsiant toliau darbus bus bandoma aptikti ir lygiagrečiai einančią kita linijos pusę ir taip apskaičiuoti linijos vidurį.

Literatūros sąrašas

1. LOW, C., Zamzuri, H. and Amri Mazlan, S. Simple robust road lane detection algorithm. [interaktyvus] [žiūrėta 2021-05-01] Prieiga per: https://ieeexplore.ieee.org/document/6869550
2. GONZALEZ, R. C and WOODS, R. E, 2008, Digital image processing. 3. New Jersey : Parson. [interaktyvus] [žiūrėta 2021-05-01] Prieiga per: http://sdeuoc.ac.in/sites/default/files/sde_videos/Digital%20Image%20Processing%203rd%20ed.%20-%20R.%20Gonzalez%2C%20R.%20Woods-ilovepdf-compressed.pdf
3. CANNY, J, 1968, A Computational Approach to Edge Detection [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.420.3300&rep=rep1&type=pdf
4. DERVINIS, Donatas, Vaizdų apdorojimas. [interaktyvus]. 2012. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: https://www.ebooks.ktu.lt/eb/451/vaizdu-apdorojimas/
5. PULFER, Erich-Matthew, Different Approaches to Blurring Digital Images and Their Effect on Facial Detection. Scholarworks.uark.edu [interaktyvus]. 2019. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: https://scholarworks.uark.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1067&context=csceuht
6. ZHANG, Liguo ir kt., 2014, A novel laser vision sensor for weld line detection on wall-climbing robot. [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399214000061
7. FOSSUM, Eric R. and HONDONGWA, Donald B., IEEE Xplore, [interaktyvus]. 2014. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6742594
8. GUO, Hongwei, 2011, A Simple Algorithm for Fitting a Gaussian Function. [interaktyvus]. 2011. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/252062037_A_Simple_Algorithm_for_Fitting_a_Gaussian_Function_DSP_Tips_and_Tricks
9. UTAMININGRUM, Fitri ir kt., Fast obstacle distance estimation using laser line imaging technique for smart wheelchair. [interaktyvus]. 2016. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/profile/Muhammad-Fauzi-6/publication/309114385_Fast_obstacle_distance_estimation_using_laser_line_imaging_technique_for_smart_wheelchair/links/59e789e5458515c3630f92de/Fast-obstacle-distance-estimation-using-laser-line-imaging-technique-for-smart-wheelchair.pdf
10. BARRETO, Saulo Vinicius Ferreira, Sant'Anna, Remy Eskinazi and Feitosa, Marcilio Andre Felix, A method for image processing and distance measuring based on laser distance triangulation. [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6815509&tag=1
11. CHMELAR, Pavel, Bean, Ladislav and Kudriatseva, Natalia, The laser color detection for 3D range scanning using Gaussian mixture model. [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7129023&tag=1
12. MEŠKO, Matej and, Štefan Toth, Laser Spot Detection. [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/350124875_Laser_spot_detection
13. CHMELAR, Pavel and, Martin Dobrovolny, The Laser Line Detection for Autonomous Mapping Based on Color Segmentation. Publications.waset.org [interaktyvus]. 2021. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: https://publications.waset.org/9996622/the-laser-line-detection-for-autonomous-

mapping-based-on-color-segmentationA low cost 3D laser-line scanner for facial acquisition https://essay.utwente.nl/72064/1/Bijman_BA_EEMCS.pdf
14. FISHER, R, Image Transforms - Fourier Transform. [interaktyvus]. 2003. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/fourier.htm
15. Concepts - NI Vision 2011 Concepts Help - National Instruments, [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372916L-01/nivisionconcepts/edge_detection_concepts/
16. Digital Image Processing using Fourier Transform in Python, [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: https://hicraigchen.medium.com/digital-image-processing-using-fourier-transform-in-python-bcb49424fd82
17.

18. Yining Deng, B. S. Manjunath, Hyundoo Shin. Color Image Segmentation [žiūrėta 2020m. sausio 12d.] Internetinė prieiga: https://pdfs.semanticscholar.org/be59/65b3659f1846b417939b80e8d1a081505fa6.pdf
19. Contrast Adjustment And Image Normalization [žiūrėta 2020m. sausio 12d.] Internetinė prieiga: https://www.giassa.net/?page_id=472
20. P.Kasparaitis. Skaitmeninis vaizdų apdorojimas. Morfologinis apdorojimas ir skeletizavimas [žiūrėta 2020m. sausio 14d.] Internetinė prieiga: https://klevas.mif.vu.lt/~pijus/SVA/skelmorf.pdf
21. R. Fisher; S. Perkins; A. Walker; E. Wolfart. Connected Component Labeling [žiūrėta 2020m. sausio 14d.] Internetinė prieiga: http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/label.htm
22. Defining Connectivity [žiūrėta 2020m. sausio 14d.] Internetinė prieiga: http://www.imageprocessingplace.com/downloads_V3/root_downloads/tutorials/contour_tracig_Abeer_George_Ghuneim/connect.html
23. Arnold Bijman. A low cost 3D laser-line scanner for facial acquisition [žiūrėta 2020m. sausio 15d.] Internetinė prieiga: https://essay.utwente.nl/72064/1/Bijman_BA_EEMCS.pdf
24. Image Processing. Thresholding [žiūrėta 2020m. sausio 15d.] Internetinė prieiga: https://mmeysenburg.github.io/image-processing/07-thresholding/
25. Moving Average. [žiūrėta 2020m. sausio 15d.]. Internetinė prieiga: https://en.wikiversity.org/wiki/Moving_Average
26. ValtenFx Electronics Innovation, Obstacle Detection Using Laser And Image Processing [žiūrėta 2020m. sausio 16d.]. Internetinė prieiga: http://valentfx.com/obstacle-detection-using-laser-and-image-processing/
27. David Jacobs. Image Gradients [žiūrėta 2020m. sausio 15d.], Internetinė prieiga: http://www.cs.umd.edu/~djacobs/CMSC426/ImageGradients.pdf
28. R. Fisher, S. Perkins, A Walker, E. Wolfart, "*Fourier Transform",* 2003, Hypermedia Image Processing Reference. [žiūrėta 2020-06-02]. Internetinė prieiga: https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/fourier.htm?fbclid=IwAR13t9VTIgHMP28giCfS5GDb-8clbLk97yMXQsaJveVj_cySkk330gvnh-I
29. "Fast Fourier transform – FFT", *Cooley-Tukey technique,* Article. 10, "A simple, pedagogical radix-2 algorithm in C++". [žiūrėta 2020-06-02]. Internetinė prieiga: http://www.librow.com/articles/article-10

30. T. Cormen, D. Balkcom, Khan Academy, *Divide and conquer algorithms*, Article, [žiūrėta 2020-06-02]. Internetinė prieiga: https://www.khanacademy.org/computing/computer-science/algorithms/merge-sort/a/divide-and-conquer-algorithms
31. C. Chen, "*Digital Image Processing using Fourier Transform in Python*". [žiūrėta 2020-06-02]. Internetinė prieiga: https://medium.com/@hicraigchen/digital-image-processing-using-fourier-transform-in-python-bcb49424fd82
32. P. Bourke, "*Image Filtering in the Frequency Domain",* 1998. [žiūrėta 2020-06-02]. Internetinė prieiga: http://paulbourke.net/miscellaneous/imagefilter/
33. A. Dogra, P. Bhalla, "*Image Sharpening By Gaussian And Butterworth High Pass Filter*", 2014, Biomedical & Pharmacology Journal. [žiūrėta 2020-06-02]. Internetinė prieiga: https://biomedpharmajournal.org/vol7no2/image-sharpening-by-gaussian-and-butterworth-high-pass-filter/
34. R. Fisher, S. Perkins, A Walker, E. Wolfart, "*Hough Transform",* 2003, Hypermedia Image Processing Reference. [žiūrėta 2020-06-02]. Internetinė prieiga: https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/hough.htm