

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Füüsika instituut

Karin Kruuse

**Komeedivaatluskaamera OPIC esialgse mudeli
karakteriseerimine**

Bakalaureusetöö (6 EAP)
Füüsika, keemia ja materjaliteadus

Juhendajad:
Mihkel Pajusalu, PhD
Joosep Kivastik, MSc

Tartu 2021

Komeedivaatluskaamera OPIC esialgse mudeli karakteriseerimine

Komeedivaatluskaamera OPIC (Optical Periscope Imager for Comets) on instrument Euroopa Kosmoseagentuuri Komeedipüüduuri missioonis, mille eesmärgiks on mööda lennata dünaamiliselt uuest komeedist. Kaamera on sondi B2 pardal ja selle peamiseks teadusülesandeks on komeedi tuuma ja seda ümbritsevast tolmu keskkonna pildistamine. Instrument ise oli 2020. aastal arenduse algstaadiumis ja mitmed selle komponendid vajasis väljavalimist. Käesoleva töö käigus karakteriseeriti muuhulgas erinevaid objektiive ja tulemuste põhjal valiti neist parim võimalik. Lisaks uuriti ka OPICu periskoobi kahe erineva mudeli mõju pildile. Töö lõppfaasis kasutati välja valitud objektiivi ja periskoobi mõõdetud omadusi, et simuleerida oodatavaid pilte ja hinnata eeldatavat pildikvaliteeti.

CERCS: T320 — Kosmosetehnoloogia

Võtmesõnad: Komeedipüüdur, kaamera kalibreerimine, kosmosemissioonid, teadusinstrumentid

Characterizing Optical Periscopic Imager for Comets breadboard model

Comet Interceptor is a mission to visit a dynamically new comet, led by the European Space Agency. Optical Periscopic Imager for Comets (OPIC) is a camera system that will be mounted onboard the B2 probe within the mission and its main objective is to take images of the comet's nucleus and coma. In 2020, the instrument was in its early development and many of its components were to be selected. In this thesis, possible lens candidates for OPIC were characterized. Based on these findings, the most suitable one was chosen for the mission. The properties of the picked lens were also taken into account when designing the periscope. In addition, the Sun-rejection-angle and the amount of vignetting of two periscope versions were measured. Finally, combining the properties of the lens and periscope, the expected image quality is assessed using simulated imagery.

CERCS: T320 — Space technology

Keywords: Comet Interceptor, camera calibration, space missions, scientific instruments

Sisukord

Sissejuhatus	4
1 Komeedipüüdur ja OPIC	5
2 Teoreetiline taust	8
2.1 Kaamera matemaatiline mudel	8
2.1.1 Lineaarne mudel	8
2.1.2 Mittelineaarsed moonutused	10
2.1.3 Vaatenurk ja vaateväli	11
2.2 Periskoobi mõju pildile	11
2.2.1 Vinjeteerimine	12
2.2.2 Hajusvalgus	13
3 Metoodika	15
3.1 Kaamera kalibreerimine	15
3.2 Kaamera vaatekoonuse asukoha leidmine	17
3.3 Persikoop ja hajusvalgus	18
4 Tulemused ja analüüs	20
4.1 Mõõtmised objektiivide karakteriseerimiseks	20
4.1.1 Kaamera kalibreerimine	20
4.1.2 Objektiivide vaatekoonused	22
4.2 Periskoop ja varjuk	23
4.2.1 Hajusvalgus	24
4.2.2 Vinjeteerimine	25
4.3 Pildikvaliteedi simulatsioon	26
Kokkuvõte	27
Kirjandus	28
Lihtlitsents	32

Sissejuhatus

Päikesesüsteemi moodustumisest on möödunud ligikaudu 4,6 miljardit aastat ja praegu on võimalused selle algusajal toimunu uurimiseks piiratud. Kõik taevakehad on selle aja jooksul muundunud ja ei sarnane enam oma algsele olekule. Päikesesüsteemi äärealadel olevad komeedid on aga eeldatavasti säilitanud oma algse vormi ja koostise paremini kui Päikesesüsteemi sisealade taevakehad [1]. Seetõttu pakub nende uurimine astronoomidele suurt huvi. Tänapäev on aga suudetud lähemalt vaadelda vaid korduvalt Päikesest möödunud komeete. Need on kaotanud oma algse pinna kui ka suure osa sisemistest lenduvatest ühenditest. Näiteks tähendati seda Rosetta missiooni sihtmärgiks olnud 67P/Tšurjumov-Gerassimenko puhul[2].

Euroopa Kosmoseagentuuri (ESA - ingl *European Space Agency*) missiooni Komeedipüüdur (ingl *Comet Interceptor*) [3] eesmärgiks on uurida komeeti, mis on esmakordselt Päikesesüsteemi siseosasse sattumas. Konkreetne sihtmärk ei ole praegu veel välja valitud. Missioon koosneb kokku kolmest erinevast kosmosesondist. Nende pardal on sihtmärgi uurimiseks hoolikalt valitud komplekt instrumente, millega on võimalik koguda andmeid komeedi pinnamorfoloogia, keemilise koostise ja seda ümbritseva plasma ning tolmu keskkonna kohta.

Üheks instrumendiks selle missiooni pardal on laias spektrialas töötav periskoobiga kaamera OPIC (ingl *Optical Periscopic Imager for Comets*) [4], mida arendatakse Tartu Observatooriumis koostöös partneritega Aalto Ülikoolist Soomest. Instrument asub kosmosesondi B2 pardal, mis lendab sihtmärgist kõige lähemalt mööda. OPICu ülesandeks on pildistada komeedi tuuma ja seda ümbritsevat tolmu- ja gaasikeskkonda. Hiljem on piltide põhjal võimalik kirjeldada sihtmärgi struktuuri, aktiivsust ja albeedot ning hinnata selle koostist ja ajalugu. Lisaks on oluline, et OPICuga kogutud andmeid saaks kasutada ka sondi asukoha määramiseks.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on karakteriseerida OPICu erinevaid optilisi kandidaatkomponente, sealhulgas objektiive ja periskoobi versioone. Veel hinnatakse, kuidas objektiiv ja periskoobi valik mõjutab OPICu eeldatavat pildikvaliteeti.

Bakalaureusetöö on jaotatud neljaks osaks. Esimeses peatükis antakse ülevaade Komeedipüüduri missioonist ja instrumendist OPIC järgnevatele peatükkidele konteksti loomiseks. Teises peatükis kirjeldatakse esmalt kaameraid kiirteoptika lähenduses ja seejärel olulisi nähtusi, mis pildi kujunemist mõjutavad. Kolmandas peatükis on kirjeldatud mõõtmisteks kasutatud meetodeid ning tulemused ja nende analüüs on toodud neljandas peatükis.

1. Komeedipüüdur ja OPIC

Komeedipüüduri missiooniks huvipakkuvaid komeete leidub peamiselt kauges Öpik-Oorti pilves [5]. Päiksele lähemale sattudes komeedi tuumas olevad lenduvad ühendid (nagu vesi ja süsihappesaas) paisatakse gaasina välja ja komeedi koostis muutub. Kahjuks ei ole Päikesesüsteemi äärealadesse veel kuigi lihtne rännata ei inimestel ega masinatel. Seega on lihtsaim viis rikkumatu komeedi uurimiseks oodata, kuni see meile lähemale sattub.

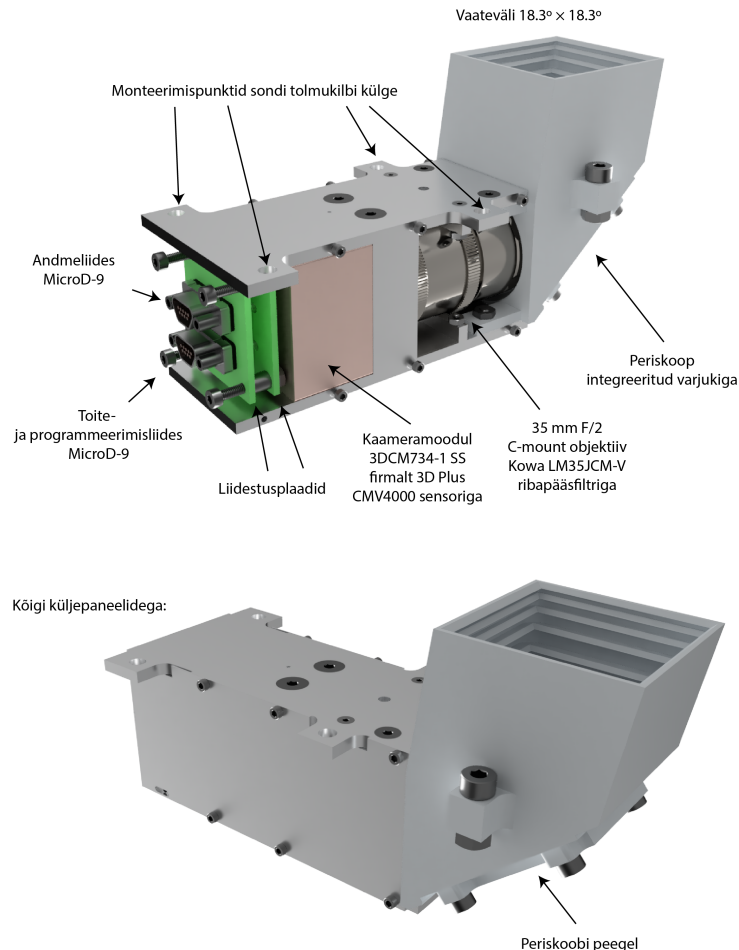
Edukaks möödalennuks on vaja teada sihtmärgi täpset trajektoori. Selliseks ennustuseks aga peab taevakeha olenevalt kasutatavast aparatuurist vaatlema kuid või isegi aastaid. Seetõttu on siiani suudetud lähemalt uurida vaid lühiperioodilisi komeete, mis on Päikesesüsteemi siseosa eelnevalt läbinud juba korduvalt. Neist mõned tuntuimad on Halley komeet [6], Tempel 1 [7] ja 67P/Tšurjumov-Gerassimenko [8]. Ühest küljest võib nende orbiiti ette ennustada suure kindlusega. Teisest küljest on sellised komeedid juba vähemal või rohkemal määral moonunenud.

Aastal 2019 valis ESA Komeedipüüduri oma esimeseks F-klassi ehk kiireks missiooniks. See missioon on ambitsioonikas nii oma eesmärgi kui ka ajaraamistiku tõttu. Komeedipüüdur startib oma esialgse peatuspaiga, L2 Lagrange'i punkti poole aastal 2029. Ilmselt ei ole selleks hetkeks lõplik sihtmärk – loodetavasti mõni pikaperioodiline komeet Öpik-Oorti pilvest või lausa tähtedevaheline objekt – veel välja valitud. See valitakse kolme aasta jooksul, kui satelliit Lagrange'i punktis peatub. Seega ei ole täpsed möödalennu olud ette teada ja süsteem peab olema kohanemisvõimeline. [9]

Pärast esmasest peatumispaigast valitud sihtmärgi poole lahkumist jaguneb Komeedipüüduri satelliit kolmeks sondiks: emalaev A ning kaks väiksemat sonni B1 ja B2. Selline kooslus võimaldab sihtmärki mitmest suunast samaaegselt vaadelda, mis on kasulik komeedi kuju uurimiseks ja selle ümbruse kolmedimensionaalseks kaardistamiseks. Lisaks tähendab see, et emalaev ei pea komeedist mööduma ohtlikult lähedalt. Nimelt liiguvad komeedituuma ümbritsevas tolmutilve osakesed väga suure kiirusega sonni suhtes (kuni 70 km/s) ja need võivad sondiga põrkudes suuri kahjustusi tekitada, nagu juhtus Giotto missiooni käigus, kus suhtelised kiirused olid palju väiksemad [6].

Selles töös uuritav instrument OPIC kinnitatakse sonni B2 pardale. OPICu esmaseks ülesandeks, on koguda infot komeedi pinna kohta: iseloomustada selle morfoloogiat ja albeedot ning hinnata selle tolmu- ja gaasijugade aktiivsust ning kraatrite jaotust. Selleks tuleb oodata, kuni B2 sond

on komeedile piisavalt lähedal, et komeedi tuum oleks pildil selge. OPICu abil on võimalik määrata ka sondi asukohta ja asendit komeedi suhtes, jälgides komeedi tuuma kuju ja parallaxi kaugete tähtede suhtes. Sondi asukoha teadmine on vajalik ka selleks, et koos teiste instrumentide kogutud andmetega oleks võimalik komeedi ruumiline mudel hiljem rekonstrueerida. Veel on OPICule seatud eesmärgiks komeedi pöörlemistelje ja -kiiruse karakteriseerimine. [10]



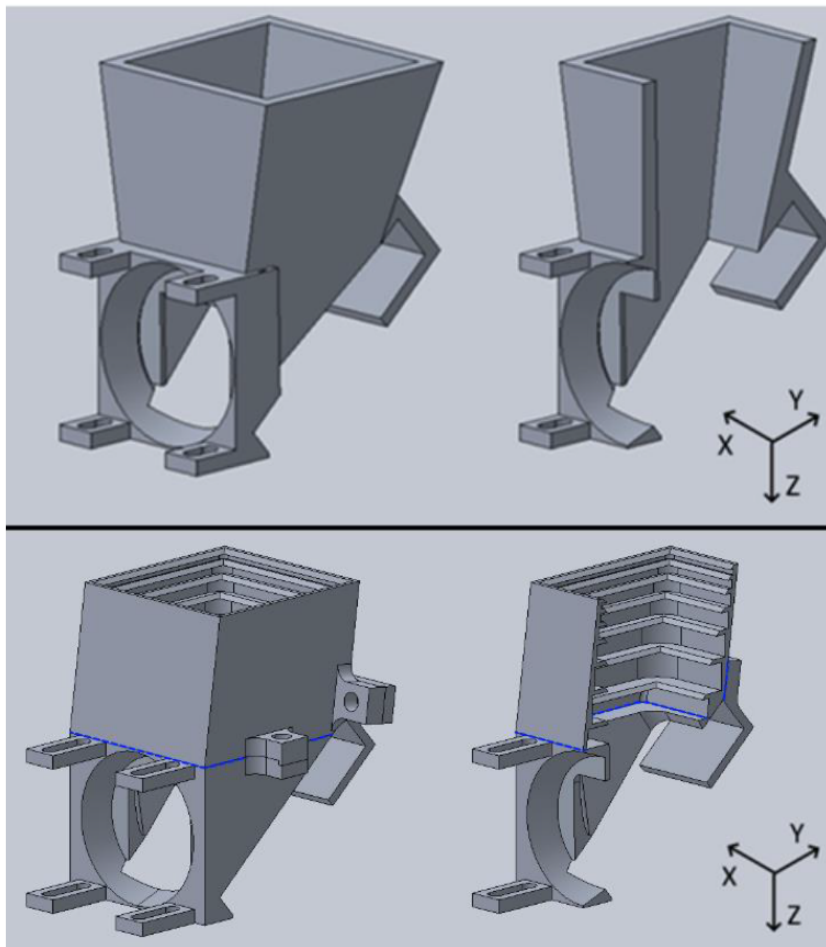
Joonis 1.1. Renderdatud pilt OPICu prototüübist koos komponentide ülevaatega.

Kokkuvõtvalt koosneb OPICu lauamudel mustvalge (ilma Bayeri värvifiltrita) CMOS-pildisensoriga (ingl *Complementary metal oxide semiconductor*) kaameramoodulist, objektiiivist ja integreeritud varjukiga periskoobist. Viimane on vajalik selleks, et peita elektroonika ja läätsete süsteem tolmuosakeste ja kiirguse eest kaitseilbi taha. Kaameramooduliga suheldakse läbi EnVisS (ingl *Entire visible sky*) [11] instrumendiga jagatud pardaarvuti SpaceWire või SPI (ingl *Serial Peripheral Interface*) üle LVDS (ingl *Low Voltage Differential Signaling*) standardi.

Üheks selle töö eesmärgiks oli läbi viia katsetused, mille põhjal valida OPICule objektiiiv kolme võimaliku seast. Valikusse kuuluvad mudelid: Edmund 35181 [12], Kowa LM35JCM-V [13], Ricoh FL-CC3516-2M [14]. Lisaks oli kasutada ka Kowa mudel LM35HC-V [15], et näidata parimat saavutatavat pildikvaliteeti. Oma mõõtmete tõttu oli see OPICu jaoks liiga suur. Selles töös uuritakse iga objektiiiviga kaamera kalibreerimise parameetreid ja mittelineaarsete moonutuste

tugevust ning karakteriseeritakse vaatekoonuse asukohta. Lõpliku otsuse tegemisel võeti arvesse ka teisi katsetulemusi, millega selle töö autor ei tegeleud.

Peale objektiivide katsetatakse ka OPICu periskoobi kahte versiooni (vt joonist 1.2). Täpsemalt tuleb hinnata nurkade vahemikku, kus Päike piltidel hajusvalgust tekitab. See võib kosmoses mõõtetulemusi segama hakata. Kahest versioonist esimene 3D-prinditud ja tumedaks värvitud mudel koosnes ribideta varjukist, peeglist ning kaamera kinnitist. Pärast objektiivi väljavalimist ja karakteriseerimist disainis Leedu kolleeg Artiom Nikolajev uue periskoobi [16]. Siin töös olulised muudatused on varjukile lisatud ribad ning materjali valik. Plastiku asemel on see toodetud anodeeritud alumiiniumist.



Joonis 1.2. Esialgse (ülemine) ja optimeeritud periskoobi (alumine) mudelid. Sinise joonega on uuel periskoobil tähistatud kahe jupi piiri. Pilt on võetud viitest [16]

2. Teoreetiline taust

Järgnevas peatükis antakse matemaatiline seletus pildi tekkimisele kaameras ja tuuakse välja selleks olulised parameetrid. Esimeses pooles pannakse kirja võrrandid ruumikoordinaatide kaamerasensori koordinaadistikku teisendamiseks. Teises pooles kirjeldatakse periskoobi ja varjuki võimalikku mõju pildile.

2.1 Kaamera matemaatiline mudel

2.1.1 Lineaarne mudel

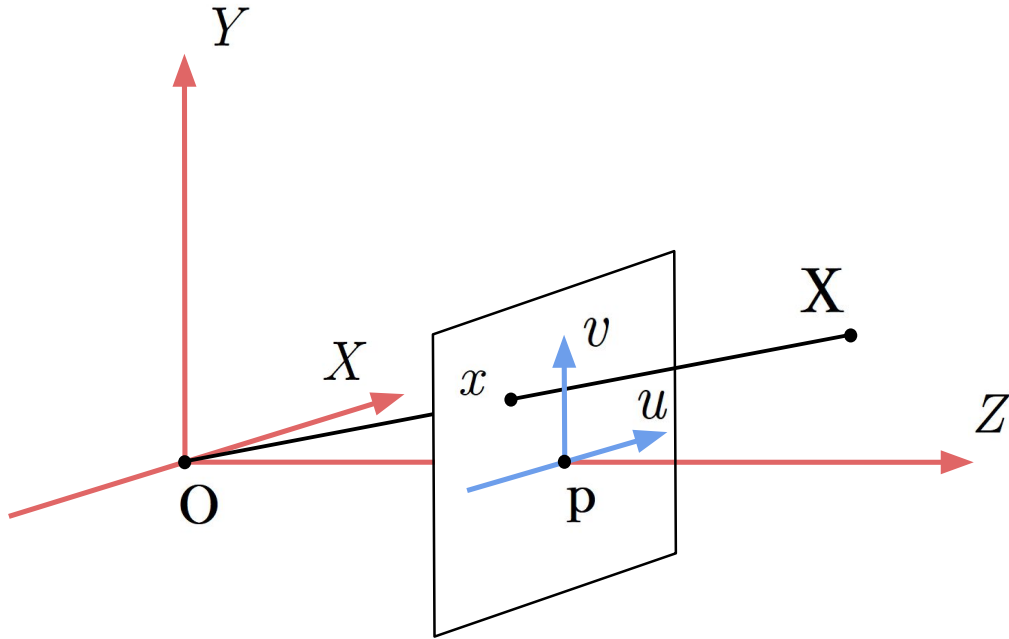
Lihtsa, kiirteoptikal ja projektiivsel geomeetrial põhineva seletuse pildi tekkimisest kaamerasensoril annab nõelapea kaamera mudel (ingl *pinhole camera model*). Selle kohaselt on kaamera apertuur koondunud üheks punktiks – kaamera keskpunktiks –, mida läbivad kõik kaamerasse jõudvad kiired (vt joonis 2.1). Fokaaltasand või pilditasand, mis on risti süsteemi optilise peateljega, on sellest punktist kaugusel f , mida nimetatakse fookuskauguseks. Punkt, kus optiline peatelg ristub fokaaltasandiga, on pildi põhipunktiks (ingl *principal point*) [17].

Edasi valitakse kaks taustsüsteemi: ruumikoordinaadistik, mille algpunktiks on kaamera keskpunkt, ja pildi põhipunktis oleva algpunktiga koordinaadistik fokaaltasandil. Ruumipunkt \mathbf{X} koordinaatidega (X, Y, Z) ja selle projektsioon fokaaltasandil x koordinaatidega (u, v) on sel juhul seotud võrranditega [17]

$$x = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{f}{Z} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}. \quad (2.1)$$

Siinkohal tuleks mainida, et tegelikkusele vastaks olukord, kui kordaja $\frac{f}{Z}$ ees oleks miinusmärk, sest uuritav ruumipunkt ja selle projektsioon peaksid ju optilise telje sihis kaamera keskpunktist vastassuundades asuma. Kokkuleppeliselt jäetakse see aga üldiselt ära ehk fokaaltasand asetatakse kaamera ette.

Tavaliselt nii lihtsa mudeliga siiski piirduda ei tohiks. Kasutusele tuleb võtta veel teisigi suurusi peale fokaalkauguse f , et arvestada ka pildisensori omadustega. Varasemalt valitud koordinaadistik fokaaltasandil vahetatakse nüüd välja sensori koordinaadistiku vastu, nii et põhipunkti koordinaadid on (u_0, v_0) . Kasutades punktide \mathbf{X} ja x jaoks homogeenseid koordinaate $(X, Y, Z, 1)$ ja $(u, v, 1)$, mille kohta on pikemalt kirjas viites [18], esitatakse teisendus (2.1) veidi üldisemal



Joonis 2.1. Illustratsioon nõelapea kaamera mudelist. Ruumikoordinaadistiku (punane teljestik) algpunktiks on kaamera keskpunkt O ja fokaaltasandil oleva kahemõõtmelise koordinaadistiku (sinine teljestik) algpunktiks on pildi põhipunkt p . Nende punktide vaheline kaugus on fokaalkaugus f . Ruumis asuv punkt X projekteeritakse mudeli kohaselt fokaaltasandil punkti x . Joonis on kohandatud viitest [17]

kujul

$$x = KX = \begin{pmatrix} f & fs & u_0 & 0 \\ 0 & f(1+m) & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} X, \quad (2.2)$$

kus s näitab pikslite viltusust ning suurus $(1+m)$ väljendab pikslite külgede pikkuste suhet. Homogeenseid koordinaate kasutatakse siin, sest uuritav võrrandisüsteem on sel juhul esitatav lihtsamal kujul. Matriksit K nimetatakse kaameramatriksiks. Digitaalkaamerate puhul pole põhjust arvata, et ei kehtiks võrdus $s = 0$ ja tihtipeale ka $m = 0$. [18]

Üldiselt on vaja arvesse võtta ka kaamera suunda ja aukohta ruumis. See tähendab, et alati ei ole mõistlik ruumipunktide jaoks kasutada koordinaadistikku, mille kaks telge on paralleelsed kaamera koordinaadistikuga ja algpunkt on kaamera keskpunktis. Selleks, et eelnev mõttekäik siiski paika peaks, teisendatakse lihtsalt ruumipunkt globaalsetest koordinaadest kaamerakesksesse koordinaadistikku. Kasutades endiselt homogeenseid koordinaate, on lõplik teisendus esitatav kujul [17]

$$x = K \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} X, \quad (2.3)$$

kus pöördematriks

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{r}_3 \end{pmatrix}$$

kirjeldab kaamera asendit ja vektor \mathbf{t} nihet kaamera ja ruumipunkti vahel. Võrrandisüsteem (2.3) kirjeldab ideaalset kaamerat. Võib ära märkida, et sellisel juhul projekteeritakse sirged jooned ruumis ka fokaaltasandile sirgete joontena.

2.1.2 Mittelineaarsed moonutused

Nõelapea mudeli korral piisab pildi tekke kirjeldamiseks lineaarsetest võrranditest. Kuid mudelis arvestamata jäetud reaalne läätsede süsteem tekitab moonutusi, mida lineaarsete liikmetega kirja panna ei saa. Veelgi enam, nende tekkemehhanisme on hulgaliselt, näiteks optiliste pindade ebatäpsused, aberratsioonid või vead kaamera kokkupanemisel. Seetõttu on ka moonutuste jaoks välja pakutud mitmeid avaldise, mis põhinevad nii füüsikalistel [19, 20] kui ka puhtalt matemaatilistel kaalutlustel [21, 22]. Artiklis [23] võeti kokku kolm juba varasemalt välja töötatud mudelit: radiaalne, tangentsiaalne ja õhukese prisma moonutus, millest kaks esimest on hiljem leidnud valdkonnas laialdasemat kasutust.

Enamasti käsitletakse väikese ja keskmise vaateväljaga objektiivide puhul moonutusi aditiivsena [18]. Nii võib väga üldiselt moonutatud pildi koordinaatide u' ja v' jaoks kirja panna seosed

$$\begin{aligned}u' &= u + \delta_u(u, v), \\v' &= v + \delta_v(u, v),\end{aligned}$$

kus u ja v on koordinaadid, mis saadakse ruumikoordinaadi teisendamisel võrranditega (2.2). Funktsioonidega $\delta_u(u, v)$ ja $\delta_v(u, v)$ võetakse kokku ebatäiustest tulenev nihe. Selleks, et arvestada optiliste elementide vigadega – peamiselt läätsede vale kumerus –, on tuletatud avaldised radiaalse moonutuse jaoks kujul [19]

$$\begin{aligned}u' &= u_0 + (u - u_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots), \\v' &= v_0 + (v - v_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots),\end{aligned}$$

kus $r = \sqrt{(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2}$ ja kordajad k_1, k_2, k_3, \dots on radiaalse moonutuse koefitsiendid. On tähendatud, et suhteliselt hea lähenduse annavad tegelikult juba kaks esimest kordajat [24]. Moonutuste keskpunktiks on siin valitud põhipunkt (u_0, v_0) . Reaalsete objektiivide puhul nii aga ei pruugi olla. Seetõttu on vahel vajalik vastavad muutujad kasutusele võtta [25]. Valdavalt esineb pildidel just radiaalne moonutus [26]. Sellegi poolest lisatakse tänapäeval tavaliselt arvutusettesse ka tangentsiaalmoonutus, mis tekib, kui kõikide optiliste elementide keskkohad ei asu optilisel peateljel. Sel juhul võib kirjutada [20]

$$\begin{aligned}u' &= u + p_1(3u^2 + v^2) + 2p_2 uv + \dots, \\v' &= v + 2p_1 uv + p_2(u^2 + 3v^2) + \dots\end{aligned}$$

Kõrgema astme liikmed jäetakse siit tavaliselt välja. Liiga paljude liikmete kasutamine võib tulemused vigade ja müra suhtes tundlikuks muuta. Sama kehtib ka radiaalse moonutuse kohta. [24]

Kogu teisendus, mis võtab arvesse ka optilistest elementidest tulenevaid moonutusi, on nüüd kirja pandav kujul

$$x = \begin{pmatrix} f & fs & u_0 + \delta_u(u, v) & 0 \\ 0 & f(1+m) & v_0 + \delta_v(u, v) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{X}, \quad (2.4)$$

kus

$$\begin{aligned} \delta_u(u, v) &= (u - u_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(3u^2 + v^2) + 2p_2 uv, \\ \delta_v(u, v) &= (v - v_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 uv + p_2(u^2 + 3v^2). \end{aligned}$$

2.1.3 Vaatenurk ja vaateväli

Kaamera vaatenurk, nagu nimigi vihjab, on suurim võimalik nurk kiirte vahel, mis nõelapea mudeli kohaselt kaamera keskpunktis lõikuvad ja veel pildile jõuavad. Selle väärtus sõltub nii fookuskaugusest kui ka pildisensori suuruselt. Täpsemini nimetatakse elementi, mis määrab vaatenurga suuruse, vaatevälja diafragma. Seetõttu võib vaatenurga suurus olla erinev olenevalt suunast, kuigi objektiivi elemendid on üldjuhul ringikujulised. Eristatakse horisontaalset, vertikaalset ja diagonaalset vaatenurka. [27]

Olgu huvipakkuvas suunas pildisensori mõõde d (vt joonis 2.2). Lõpmatusse fokuseeritud ja moonutustevaba objektiiviga kaamera jaoks kehib sellisel juhul vaatenurga α jaoks avaldis [18]

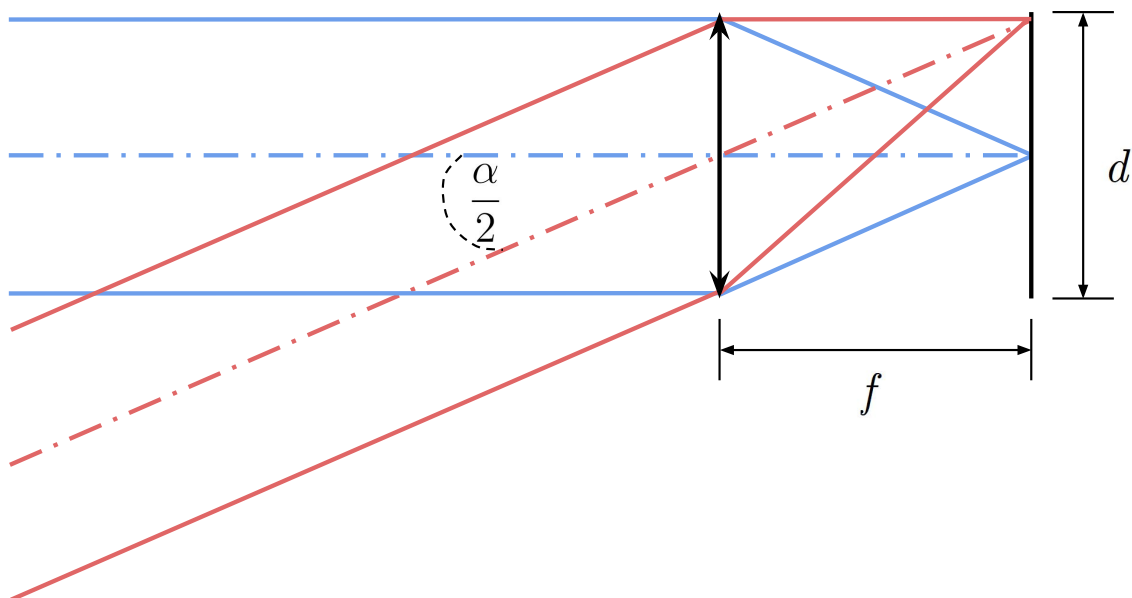
$$\alpha = 2 \arctan \left(\frac{d}{2f} \right). \quad (2.5)$$

Vaatevälja (FOV - ingl *field of view*) suurus huvipakkuval kaugusel l on vaatenurgaga α seotud kujul

$$\text{FOV} = 2l \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right). \quad (2.6)$$

2.2 Periskoobi mõju pildile

Nagu mainitud, kinnitatakse OPICu objektiivi ette ka ühe peegli ja varjukiga periskoop. Pildi geometrilist kujunemist see ei mõjuta. Küll aga sõltub sellest valguse hulk ja jaotus pildisensoril. Kaks olulist nähtust, mille mõju tuleb uurida, on hajusvalgus ja vinjeteerimine. Selle tõhusaks vähendamiseks tuleb hajusvalgust analüüsida varakult iga optilise süsteemi puhul. Tulenevalt



Joonis 2.2. Lõpmatuselt lähtuvad kiired koonduvad õhukese läätse mudeli kohaselt kaamerasensoril.

periskoobi ehitusest on ka vinjeteerimise jälgimine OPICu arendamisel oluline.

2.2.1 Vinjeteerimine

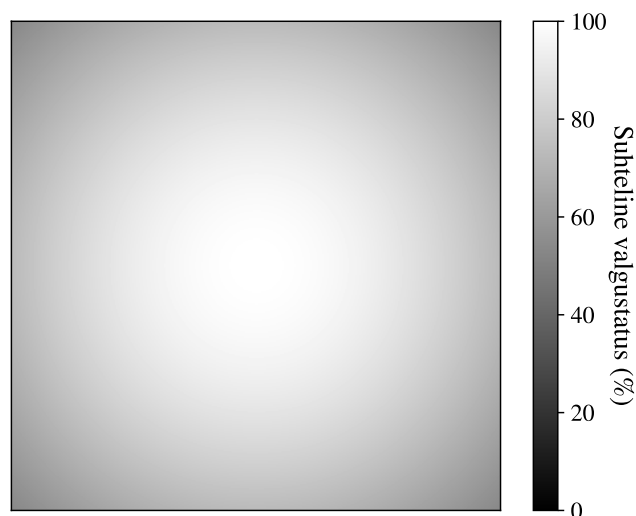
Tüüpiliselt langeb valgus kaamera fokaaltasandile ebaühtlaselt ka ühtlaselt valgustatud pinda jälgides. Pildi keskoht on heledaim ning äärte poole liikudes pildi heledus langeb. Sellist nähtust nimetatakse tervikuna vinjeteerimiseks, kuigi ebaühtlus tekib mitmel põhjusel. [28]

Ilma spetsiaalsete korrektuurideta esineb loomulik vinjeteerimine igas objektiivis. Sellise pildi valgustatuse E kirjeldamiseks on tuletatud nn koosinus-neljandas seos [29]

$$E(\theta) = E_0 \cos^4(\theta),$$

kus E_0 on valgustatus heledaimas punktis, θ on nurk fokaaltasandile langeva peakiire ja optilise peatelje vahel. See seos ei kirjelda reaalseid kaameraid üksi kuigi täpselt [30].

Tihti tuuakse eraldi välja optiline vinjeteerimine. Osa objektiivi sisestruktuurist võib väljastpoolt optilist peatelge langeva kiire blokeerida. Seda näiteks liiga pikliku objektiivi puhul, sest optilistes elementides murdumisel osa valgusest langeb objektiivi siseseintele. Seega jõuab vastavast suunas ka vähem valgust fokaaltasandile [31]. Lisaks võib optilises süsteemis esineda ka mehaanilist vinjeteerimist. Seda juhul, kui mõni kaamera osa piirab vaatevälja ulatust kaameras rohkem kui ettenähtud vaatevälja diafragma [32].



Joonis 2.3. Valguse intensiivsuse jaotus pildil loomuliku vinjeteerimise tõttu 45-kraadise vaate-nurga puhul.

2.2.2 Hajusvalgus

Hajusvalguse alla liigitub kogu kaamera fokaaltasandile jõudev soovimatu valgus, mis vähendab pildil kontrastsust ja signaal-müra suhet. Eriti suuri probleeme eesmärgi täitmisel võib see tekitada tuhmide objektide jälgimisel erede valgusallikate läheduses. [33] Tüüpiliselt eristatakse vaatevälja siseseid ja väliseid hajusvalguse allikaid. Vaatevälja jäävad allikad tekitavad hajusvalgust, kui neilt lähtuvad kiired ei liigu süsteemis nii nagu ette nähtud. Peamiselt juhtub see optilise süsteemi klaasist elementidelt peegeldumisel ja hajumisel. [34] Pildil tekitab vaatevälja sisene hajusvalguse allikas enda ümbruses erinevaid efekte. Vaatevälja välised hajusvalguse allikad aga tekitavad valguse intensiivsuse ebahürtlasi jaotust üle kogu pildi (vt joonis 2.4). [33]

Hajusvalguse analüüsimiseks on kaks lähenemisviisi: valmis ehitatud süsteemi katsetamine või mudeli ja simulatsioonide põhjal ennustuste tegemine. Mõlemal viisil on nii omad eelised kui ka nõrkused. Näiteks on simulatsioonide kasutamine odavam ja informatiivsem, kuid päris instrumendiga mõõtmisel on süsteemi parameetrid alati korrektsed. Igatahes on oluline hajusvalguse analüüsiga alustada varakult, sest hiljem suurte muudatuste tegemine on tihti keeruline ja kalline. Võimalusel tasub mõlemat meetodit samaaegselt kasutada. [35]

Sageli kasutatakse süsteemi hajusvalguse kirjeldamiseks punktallika läbilaskvust PST (ingl - *Point Source Transmittance*) [36]. See on sensorile jõudva kogukiirgusvoo Φ_s suhe lõpmatuses

asuva punktallikalt lähtuva kiirgusvooga Φ_0 , mis jõuab kaamera avani [33]

$$\text{PST}(\theta) = \frac{\Phi_s(\theta)}{\Phi_0}.$$

Siin on θ nurk kaamera suuna (optilise peatelje) ja valgusallika vahel. Suuruste Φ_s ja Φ_0 täpsed definitsioon võib erinevates tekstides erineda [35].

3. Metoodika

Järgnevas peatükis kirjeldatakse objektiivide ning periskoopide karakteriseerimiseks läbi viidud mõõtmisi ning selleks kasutatud meetodeid.

3.1 Kaamera kalibreerimine

Nagu igat mõõtevahendit, on ka kaamerat vaja kalibreerida. Nii on võimalik pildi koordinaadid teisendada ruumi koordinaatideks. See on omakorda vajalik, et jäädvustatud piltide järgi saaks ümbritsevat ruumi korrektselt rekonstrueerida. Kaamera kalibratsiooni meetodid põhinevad juba tuttavaval nõelapea mudelil, millele lisatakse ka mittelineaarsetele moonutustele vastavad liikmed. Tulemusena leitakse kalibreerimisel teisenduses (2.4) vajalikud parameetrid.

Kaamera kalibreerimiseks on vaja leida koordinaatide (u, v) ja (X, Y, Z) komplekte piisavalt palju, et arvutada vastavad kaameramaatriksi komponendid ning kaamera asukohta ja asendit kirjeldavad suurused iga arvutusteks kasutatud pildi jaoks. Tihti kasutatakse selleks teadaoleva mustri märklauda. Võttes arvesse ka mittelineaarset moonutusi (nii radiaalset kui ka tangentsiaalset), võib see aga olla arvutuslikult võrdlemisi mahukas, sest ei leidu vastavat analüütilist lahendit [37]. Kuna arenemisruumi leidub alati, on kaamera kalibreerimise meetodeid välja pakutud arvukalt: kasutatakse erinevaid avaldise moonutuste jaoks, algoritme kalibratsiooni parameetrite hindamiseks või viise koordinaadi komplektide määramiseks. Kolm peamist meetodit, mis kirjanduses silma jäävad on avaldatud artiklites [24, 37, 38].

Artiklis [38] tutvustati kalibreerimismeetodit, mis on hiljem autori nime järgi tuntuks saanud Zhangi meetodina. Allpool kirjeldatav arvutuslik osa on Pythoni teegis OpenCV [39] mõningate muudatustega juba rakendatud. Seetõttu kasutati just seda meetodit ka käesolevas töös. Lisaks on Tartu Observatooriumis olemas ka sobilik malelauamustriga kalibratsiooni sihtmärk. OPICu kaamera peab olema kosmoses fokuseeritud lõpmatusse. Nii peab olema ka kalibreerimise ajal. See aga tähendab, et sihtmärk peab tunnuspunktide eristamiseks olema piisavalt suur ja lihtsalt paberile prinditud muster ei ole sobilik. Kasutatud sihtmärgil oli 70 tunnuspunkti.

Zhang'i meetod näeb ette, et kõik uuritavad ruumpunktid asuvad ühel tasandil ehk kasutatakse tasapinnalist sihtmärki. Siin kasutatakse peatükis 2.1 tutvustatud koordinaate ja suuruseid. Igal pildil eeldatakse, et see asub ruumis XY -tasandil ja $Z = 0$. Nii saab võrrandisüsteemi (2.2) kirja

panna kujul

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{H} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix},$$

kus

$$\mathbf{H} = \mathbf{K} \begin{pmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{t} \end{pmatrix}$$

on 3×3 maatriks. Iga pildi jaoks on võimalik leida selle maatriksi komponendid (konstandi täpsusega).

Kogu kaamera parameetrite hindamise protsessi võttis artikli autor kokku kuue sammuga:

1. Tuleb valida sobilik tasapinnaline sihtmärk, tüüpiliselt malelauamustriga.
2. Edasi tuleb sihtmärgist jäädvustada pilte. Radiaalse moonutuse parameetrite, aga ka põhipunkti koordinaatide täpsemaks määramiseks on kasulik, kui sihtmärk satub piltidel üle kogu vaatevälja.
3. Järgmiseks on vaja piltidelt leida tunnuspunktile, näiteks malelaua ruutude nurkadele, vastavad koordinaadid (u', v') pildil. Selleks on välja töötatud erinevaid algoritme, mida Zhang oma artiklis ei analüüsinud. Siin töös kasutatud OpenCV teegi algoritm põhineb artiklil [40]. Kõik pildid tuleks siiski hiljem koos leitud koordinaatidega üle vaadata, sest aegajalt tuvastab algoritm tunnuspunkti kohast, kus seda ei ole.
4. Edasi on vaja arvutada esialgsed hinnangud otsitavatele nõelapea mudeli parameetritele. Nimelt on vektorid \mathbf{r}_1 ja \mathbf{r}_2 omavahel ortonormaalised. Sellest tulenevate tingimuste põhjal tuletas Zhang analüütilised lahendid kaameramaatriksi \mathbf{K} ning vektorite \mathbf{r}_1 , \mathbf{r}_2 , \mathbf{r}_3 ja \mathbf{t} arvutamiseks \mathbf{H} komponentidest.
5. Nüüd on vaja leida ka hinnangud moonutusi kirjeldavatele parameetritele. Ka selleks esitati artiklis maatriksalgebral põhinev lahend. Zhang võttis arvesse vaid radiaalmoonutusi, kuid selles töös kasutatud OpenCV teegis on sarnasel viisil arvestatud ka tangentsiaalmoonutustega.
6. Kõige lõpuks peaks eelmistes punktides leitud esmaseid hinnanguid parandama. Minimeerida tuleks avaldist

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |\mathbf{m}_{ij} - \hat{\mathbf{m}}(\mathbf{K}, k_1, k_2, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, M_j)|^2. \quad (3.1)$$

Suurus \mathbf{m}_{ij} on siin i -ndalt pildilt tuvastatud j -s tunnuspunkt ja $\hat{\mathbf{m}}(\mathbf{K}, k_1, k_2, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, M_j)$ on sama pildi vastava ruumipunkti M_j hinnanguiline projektsioon kaamerasensorile. Siin töös võeti projektsiooni leidmisel arvesse ka kordajaid k_3 , p_1 ja p_2 .

3.2 Kaamera vaatekoonuse asukohta leidmine

Kaamerale optimaalse periskoobi loomiseks on vaja teada nii vaatenurga suurust kui ka vastavat vaatekoonuse tipu asukohta. Mida lähemal on viimane pildisensorile, seda suurem peab olema sama vaatenurga suuruse korral periskoop, et vältida mehaanilist vinjeteerimist. Vaatekoonuse täpne kuju ja asukoht aga olenevad suuresti objektiivist. Järelikult on lõplik instrument kompaktsem, kui valida objektiiv, mille puhul asub see võimalikult kaugel sensorist.

Geomeetrilise optika põhjal on võimalik kirja panna seosed, mille abil vajalikud hinnangud leida. Teades vaatenurga suurust α , on kaamera keskpunktist mingil kaugusel l kaamera vaateväli leitav valemiga (2.6). Seega, kuna vaatevälja suuruse ja kauguse l vahel on lineaarne seos, siis mõõtes erinevatele kaugustele vastavaid vaatevälja suuruseid, on võimalik leida hinnang nii vaatenurga väärtusele kui ka kaamera keskpunkti asukohale. Selleks võib fikseerida x - ja y -teljed joonisel 3.1 toodud viisil optilise peateljega paralleelsel tasandil (ehk x -telg asub optilisel peateljel). Nii kehtib äärmise kiire jaoks sirge võrrand

$$y = \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)x + b, \quad (3.2)$$

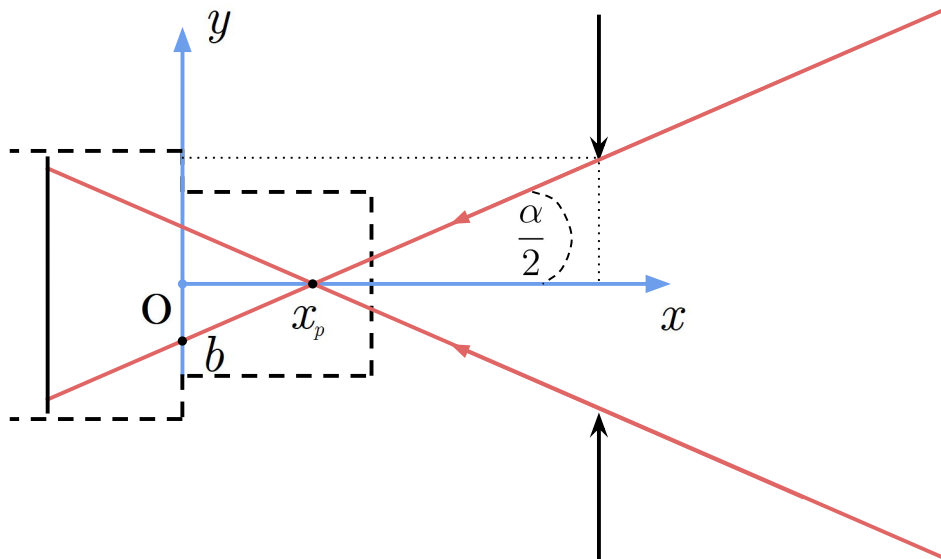
kus α on kogu vaatenurk. Leides katseliselt piisavalt (x, y) paare, võib lineaarse regressioonijoonet sobitamisel leida hinnangu kaamera vaatekoonuse tipu asukohale valitud võrdluspunkti O suhtes kujul

$$x_p = -\frac{b}{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (3.3)$$

Juhul, kui aga kaamera on fookuseeritud lõpmatusse, võib seoses (3.2) oleva tõusu $\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ leida ka valemist (2.4), sest fookuskaugus on teada. Edasi võib fikseeritud tõusu väärtusega otsitava vabaliikme leida lihtsalt suuruste y ja $\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)x$ vahena.

Selleks, et leida väärtuste (x, y) paare, fikseeriti kaamera lineaarselt liikuvale alusele nii, et vaatevälja jäi ühtlaselt valgustatud valge sein. Liikumine sai toimuda optilise peateljega samas sihis. Aluse otsa, kaamera ja seina vahele oli kinnitatud diafragma. Kaamera optiline peatelg ja diafragma keskoht olid kollineaarsed.

Edasi leiti erinevatel kaugustel vähim diafragma suurus, mille puhul ei tekkinud pildil enam mehaanilist vinjeteerimist. Pildistamise ajaks laotati kaamera ja diafragma peale tume paber, et diafragma põhjustatud vinjeteerimine oleks pildil kontrastsem. Sellisel juhul võib eeldada, et vastav diafragma diameeter on võrdne vaatevälja diagonaalse mõõtmega vastaval kaugusel. Veendumaks, et pildil tõepoolest ei ole diafragmast tulenevat vinjeteerimist, uuriti suhtelist valguse intensiivsust samal kaugusel erineva diafragma diameetri korral jäädvustatud piltide diagonaalidel.



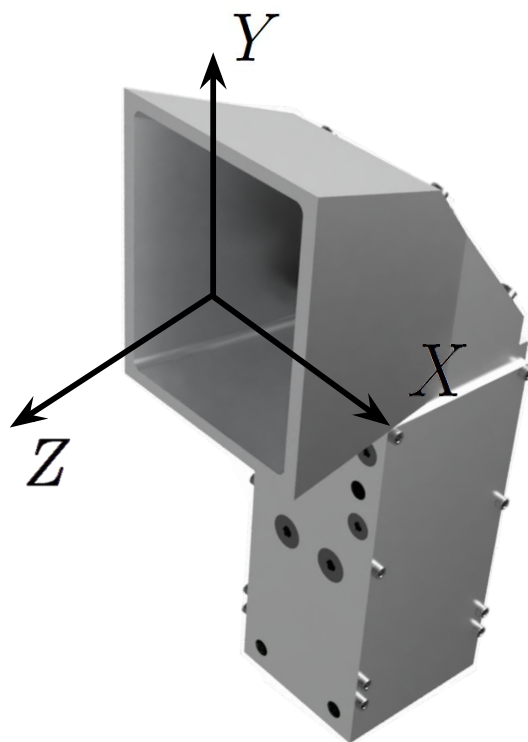
Joonis 3.1. Joonisel on näidatud xy -koordinaadistiku asetus kaamera suhtes (sinine teljestik). Punasega on märgitud kiired, mis langevad sensori äärde. Neist ülemise langeva kiire jaoks kehtib sirge võrrand (3.2).

3.3 Persikoop ja hajusvalgus

Komeedist möödalennul on oluline, et Päikeselt lähtuv valgus jäädvustatavaid pilte ei rikuks. See tähendab, et sondi trajektoori arvutamisel tuleb arvesse võtta, millistest suundadest Päike liigset hajusvalgust tekitab. Hajusvalguse vähendamiseks on OPICu periskoobil ka varjuk. Selle efektiivsuse kontrollimiseks korraldati eksperimentaalne PST mõõtmine sarnaselt nagu kirjeldatud viites [33].

Katse viidi läbi pimedas ruumis. Valgusallikana kasutati LED (ingl *light emitting diode*) lampi. Kaamera asetati sellega sama kõrgele lauale nii, et valgusvihk langes periskoobiava keskele. Kaamerat pöörati ümber joonisel 3.2 toodud Y -telje mõne kraadi võrra ja tehti pilt. Vastava pöördnurga hindamiseks oli kaamera alla lauale teibitud valge paber, millele tõmmati periskoobiavaga paralleelne joon iga kord, kui tehti pilt. Hiljem oli nende joonte järgi võimalik igale pildile vastav pöördnurk otsevaate suhtes arvutada. Sama katse viidi läbi ka pöörates kaamerat ümber X -telje.

Sellistes oludes ei ole võimalik saada radiomeetriliselt absoluutselt täpseid tulemusi; esiteks ei ole valgusallikas kuigi sarnane punktallikale ja selle kiirgusvoog ei ole teada. Vältimatu on ka tõsiasi, et kui valgusallikas on vaateväljas, on vastav pilt suuretenäosusega ülesäritatud. Ideaalselt tuleks mõõtmine läbi viia mustas puharuumis, et vältida peegeldumisi ja liigset hajumist [41]. Nii oleks tulemus sarnasem kosmose keskkonnale.



Joonis 3.2. Joonisel on näidatud teljed, mille ümber katsetuses kaamerat keerati. Teljed on joonisel 1.1 toodutega võrreldes pööratud 180° ümber Y-telje.

4. Tulemused ja analüüs

Järgnevas peatükis antakse ülevaade OPICu esmaseks karakteriseerimiseks läbiviidud mõõtmiste tulemustest. Eraldi analüüsitakse periskoobi ja uue varjuki mõju hajusvalgusele ja pildi vinjeteerimisele. Lisaks võetakse kokku peamised töö käigus saadud tulemused, mida arvestati edasiseks arenduseks objektiivivalimisel. Kuna katsetused ei ole läbi viidud labori tingimustes, siis arutletakse ka võimalike puuduste ja nende tagajärgede üle.

4.1 Mõõtmised objektiivide karakteriseerimiseks

4.1.1 Kaamera kalibreerimine

Peatükis 3.2.1 kirjeldatud kaamera kalibreerimise protseduur läbiti kõigi nelja objektiiviga. Nii leiti kaameramaatriksis K olevate parameetrite f , u_0 ja v_0 hinnangud, mis on toodud tabelis 4.1. Teegist OpenCV saadavad tulemused on algselt antud pikslites. Parameetrite u_0 ja v_0 jaoks on see loomulik; need väljendavad põhipunkti asukohta sensoril. Fookuskauguse ühiku teisendamiseks võeti arvesse, et sensori CMV4000 ühe piksli mõõtmed on $5,5 \mu\text{m} \times 5,5 \mu\text{m}$.

Objektiiv	f (pikslit)	f (mm)	u_0 (pikslit)	v_0 (pikslit)	RMS (pikslit)
FL-CC3516-2M	6202	34,1	1022	1024	0,406
EO 35181	6461	35,3	1022	1022	0,407
LM35JCM-V	6497	35,7	1022	1023	0,446
LM35HC-V	6419	35,3	1023	1022	0,390

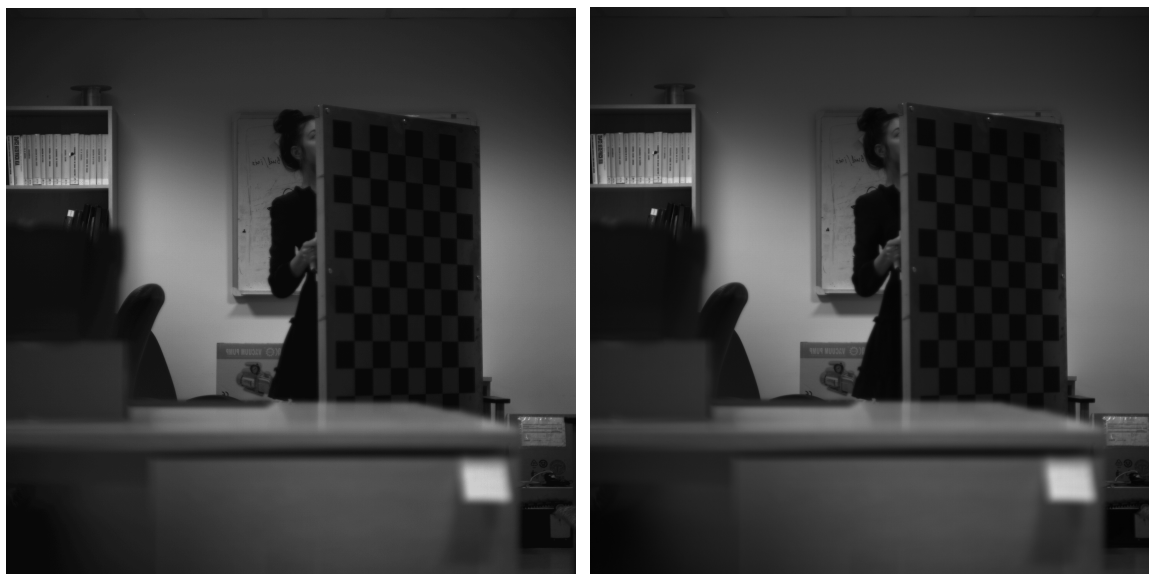
Tabel 4.1. Zhangi meetodiga kaamera kalibreerimisel leitud maatriksi K olulised elemendid.

Tootja poolt on kõikide uuritud objektiivide fokaalkauguse väärtuseks antud 35 mm. Tabelist on näha, et objektiivi FL-CC3516-2M fookuskaugus erineb andmelehel toodust enim. Kuid peaaegu sama palju lahkneb ka LM35JCM-V objektiivi fookuskauguse väärtus. Siiski ei erine ükski tulemus oodatust rohkem kui millimeetri võrra. Kuna sensoril on 2048×2048 pikslit, on põhipunkti koordinaatide väärtused 1024 läheduses üllatavalt hea tulemus. Väikse ja ka keskmise vaateväljaga kaamerate puhul on see hinnang standardsete kalibreerimismeetodite (mida on ka siin töös kasutatud meetod) puhul üpriski varieeruv [42].

Objektiiv	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2
FL-CC3516-2M	0,043	1,340	-43,020	0,002	0
EO 35181	0,016	3,039	-40,602	-0.003	-0.002
LM35JCM-V	-0,105	-3,937	13,446	0	0
LM35HC-V	-0,064	-4,257	-6,016	-0,001	0,001

Tabel 4.2. Zhangi meetodiga kaamera kalibreerimisel leitud moonutuste parameetrid.

Tabelis 4.2 on toodud ka kaamera kalibreerimisel saadud radiaalsete ja tangentsiaalsete moonutuste parameetrid. Kuna nendel suurustel puudub otsene füüsikaline tõlgendus, on keeruline vaid leitud väärtuste põhjal midagi järeldada. Küll aga tasub märkida, et ka nende tulemuste põhjal on tangentsiaalmoonutuste osakaal ebaoluline. Tihti kasutatakse kaamera kalibratsiooni kvaliteedi hindamiseks avaldise (3.1) järgi leitud ruutkeskmist (RMS - *room-mean-square*). Iga objektiivi jaoks on see suurus toodud tabeli 4.1 viimases veerus. Need väärtused on üsna lähedal Zhangi alguses artiklis [38] avaldatud tulemustele. Kuna aga kasutatud meetodiga kaamera kalibreerimine põhineb osaliselt avaldise (3.1) minimeerimisel ja RMS on monotoonne funktsioon sellest, ei ole RMS parim näitaja tulemuse täpsuse hindamiseks [43].



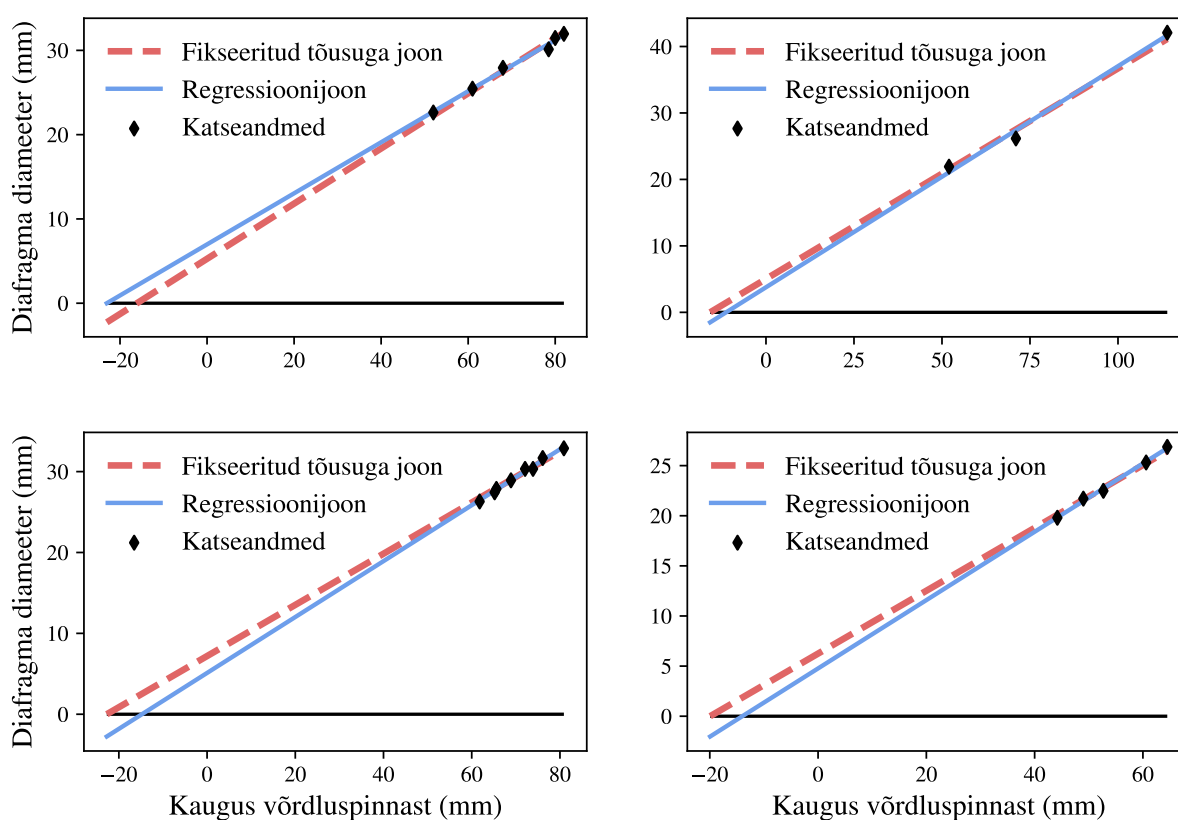
Joonis 4.1. Kaamera kalibreerimise käigus objektiiviga EO 35181 jäädvustatud pilt. Vasakul pool on originaal ja paremal olevalt pildilt on moonutused digitaalselt eemaldatud.

Joonisel 4.1 kõrvutatud piltidelt on näha, et kuigi objektiivi EO 35181 jaoks leitud radiaalsete moonutuste kordajad on suhteliselt suured, ei ole moonutused eriti silmatorkavad. Ehkki tulemustes ei paista tõsiseid probleeme, tasub siiski analüüsida ka võimalikke puudusi. Heikkilä [44] pööras tähelepanu ühtlase valgustatuse tähtsusele, illustreerides seda eksperimentaalselt. Valgusallika väljavahetamisel erinesid tuvastatud tunnuspunktide asukohad kuni piksli võrra. Kuna nende asukohtade täpsaks määramiseks jälgib OpenCV algoritm valguse intensiivsuse muutust,

oli ruumi ja seetõttu ka sihtmärgi ebahütlane valgustus kateooriliselt valede tunnuspunktide peamine põhjustaja.

4.1.2 Objektiivide vaatekoonused

Objektiivide vaatekoonuste kirjeldamiseks viidi läbi peatükis 3.2 kirjeldatud eksperiment. Koordinaadistiku jaoks valitud võrdluspinnaks valiti kaameramooduli ja objektiivi adapteri esikülge. Horisontaalse vaatenurga jaoks kohandatud katsetulemused kui ka nende põhjal arvatud regressiooni jooned on toodud joonisel 4.2. Lisaks on graafikutel kujutatud ka valemile (2.5) vastava tõusuga sirge, kus fookuskauguseks f on iga objektiivi jaoks võetud kaamera kalibreerimisel saadud tulemus ja sensori mõõde d on arvatud pikslite suuruse ja arvu järgi.



Joonis 4.2. Kaamera vaatekoonuse tipu asukoha mõõtmise tulemused. Graafikud vastavad objektiividele alustades vasakult ülevalt päripäeva FL-CC3516-2M, EO 35181, LM35JCM-V, LM35HC-V. Musta horisontaalse joonega on tähistatud optiline peatelg.

Arvatud vaatekoonuse tipu kaugused valitud võrdluspinnast mööda optilist peatelge on toodud tabelis 4.1. Teises tulbas toodud väärtused on leitud regressiooni joone tõusu ja vabaliikme jagatisena. Viimases tulbas on x_p asukoht leitud valemi (2.5) järgi leitud tõusuga sirge järgi. Kahel erineval viisil leitud väärtused on märkimisväärselt erinevad: parimal juhul 4,5 mm ja halvimal 7,9 mm. Suuresti tuleneb see sellest, et katsepunktid paiknevad otsitavast punktist suhteliselt kaugel. See tähendab, et katseandmete piirkonnast sirget edasi ekstrapoleerides muutub väike viga sirge tõusus oluliseks. Võrdluseks on toodud tabeli 4.3 kolmandas tulbas regressioonijoon

tõusust valemi (2.5) põhjal arvatud fookuskaugused. Lisaks on toodud neljandas tulbas tõusule vastav horisontaalne vaatenurk. Arvestades leitud fokaalkauguste mõningast lahkenemist kalibratsiooni tulemustest, tundub andmete analüüsiks fikseeritud tõusuga joon korrektsem.

Objektiiv	x_p (mm), regressioon	f (mm)	α (°)	x_p (mm), fikseeritud
FL-CC3516-2M	-23,0	37,2	17,2	-16,1
EO 35181	-11,3	33,9	18,8	-15,8
LM35JCM-V	-14,0	33,1	19,3	-19,8
LM35HC-V	-14,8	32,6	19,7	-22,7

Tabel 4.3. Mõõtmiste põhjal leitud vaatekoonuse tipu asukohad valitud võrdluspinna suhtes.

Läbi viidud katsetuses ei ole arvesse võetud, et tõenäoliselt tekitab pildil vinjeteerimist ka napilt vaateväljast välja jääv diafragma ja seetõttu võivad mõõdetud vaatevälja laiused (ehk diafragma diameetrid) olla reaalsest suuremad. Selles veendumiseks tasub uurida jooniseid 2.2 ja 3.1. Nimelt valguskoonused, nagu need on kujutatud esimesel joonisel, on joonisel 3.1 vaatevälja piiravate kiirte puhul diafragma poolt takistatud. Kaamerast kaugenedes takistab diafragma aina suuremat osa valguskoonusest, mis sensoril ühte punkti koondub. Seda efekti on küll keeruline kvantitatiivselt hinnata, aga siiski võib see mingil määral seletada, miks kolmel graafikul neljast on regressiooni joone tõus suurem, kui tegeliku fokaalkauguse põhjal oodata võiks. Siiski ei ole see mõju ilmselt nii tugev, et üksi lahknemusi põhjendada. Ka võrdluspinna ja diafragma vahelise kauguse mõõtmine suurendas arvatavasti tegelikku mõõtemääramatust, kuid see viga ei ole arvatavasti süstemaatiline.

Selleks, et sobilik objektiiv valida, mõõdeti OPICu projekti raames ka valikus olevate mudelite impulsskostet tähti pildistades. Nii selle tulemuse kui ka siin ja eelnevas alapeatükis kirjeldatud katsetuste põhjal valiti edasiseks arenduseks Kowa LM35JCM-V mudel. Valikus olnud kolmest (neljas mudel LM35HC-V oli liiga suur) kahe mitte valituks osutunu puhul võib tähendada võrdlemisi suuri radiaalse moonutuse koefitsiente. Mudeli FL-CC3516-2M puhul tundub kaamera kalibratsiooni põhjal fookuskaugus veidi väiksem, kui on antud andmelehel. Lisaks oli selle objektiivi impulsskoste valitud Kowa mudeliga võrreldes nullist erinev suuremas piirkonnas. Vaatekoonuse omaduste poolest olid kõik objektiivid sobilikud.

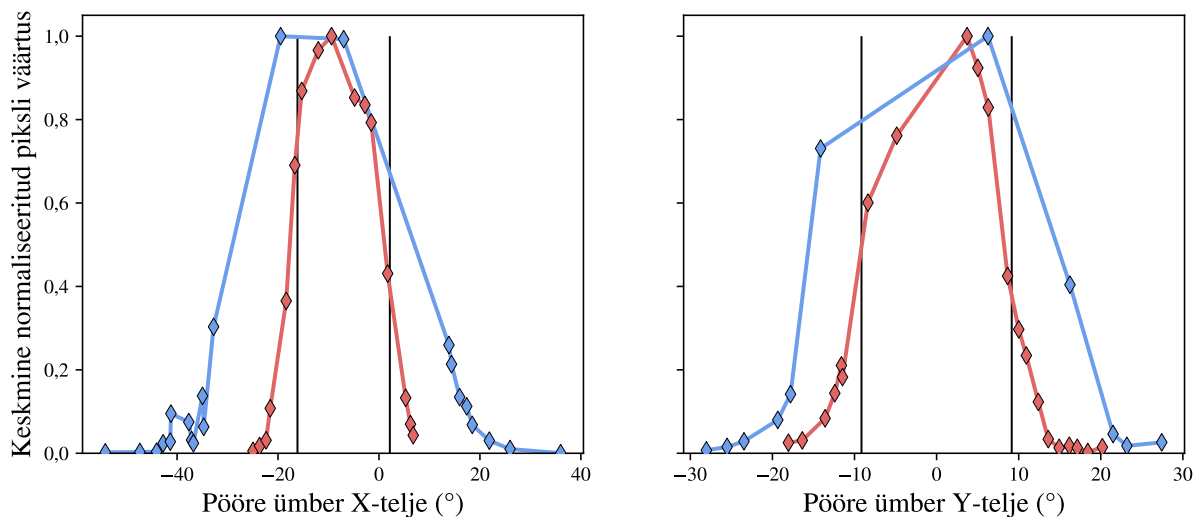
4.2 Periskoop ja varjuk

Järgnevalt on kirjas tulemused, mis puudutavad OPICu periskoobi ehituse mõju pildile. Hajusvalgust uuriti selle töö raames selleks, et hinnata nurkade vahemikku, kust suunast võiks Päike kosmoses rikkuda pilte sihtmärgist. See vahemik on esmaselt oluline Komeedipüüduuri teadustii- mi jaoks. Töös uuritud uus periskoop on disainitud vastavalt LM35JCM-V objektiivi eelmises

alapeatükis karakteriseeritud vaateväljale. Võrreldi ka seda, mil määral tekitavad periskoobid vinjeteerimist.

4.2.1 Hajusvalgus

Peatükis 3.3 on tutvustatud hajusvalguse uurimiseks kasutatud meetodikat. Sel viisil katsetati kaht periskoobi mudelit, mida kirjeldati lühidalt esimeses peatükis. Otsesteks mõõtmistulemusteks olid paberile tõmmatud sirged jooned ja igale joonele vastav pilt. Kaamera pöördenurkade arvutamiseks skanniti paberil kujutatu arvutisse. Seejärel leiti piltidelt sirge võrrandid, mille alusel arvutati igale pildile vastav pöore. Ordinaatide väärtuste arvutamiseks keskmistati igale joonele vastava pildi kõikide pikslite väärtused. Hiljem normaliseeriti kogu graafik suurima väärtuse järgi. Need tulemused on toodud joonisel 4.3.

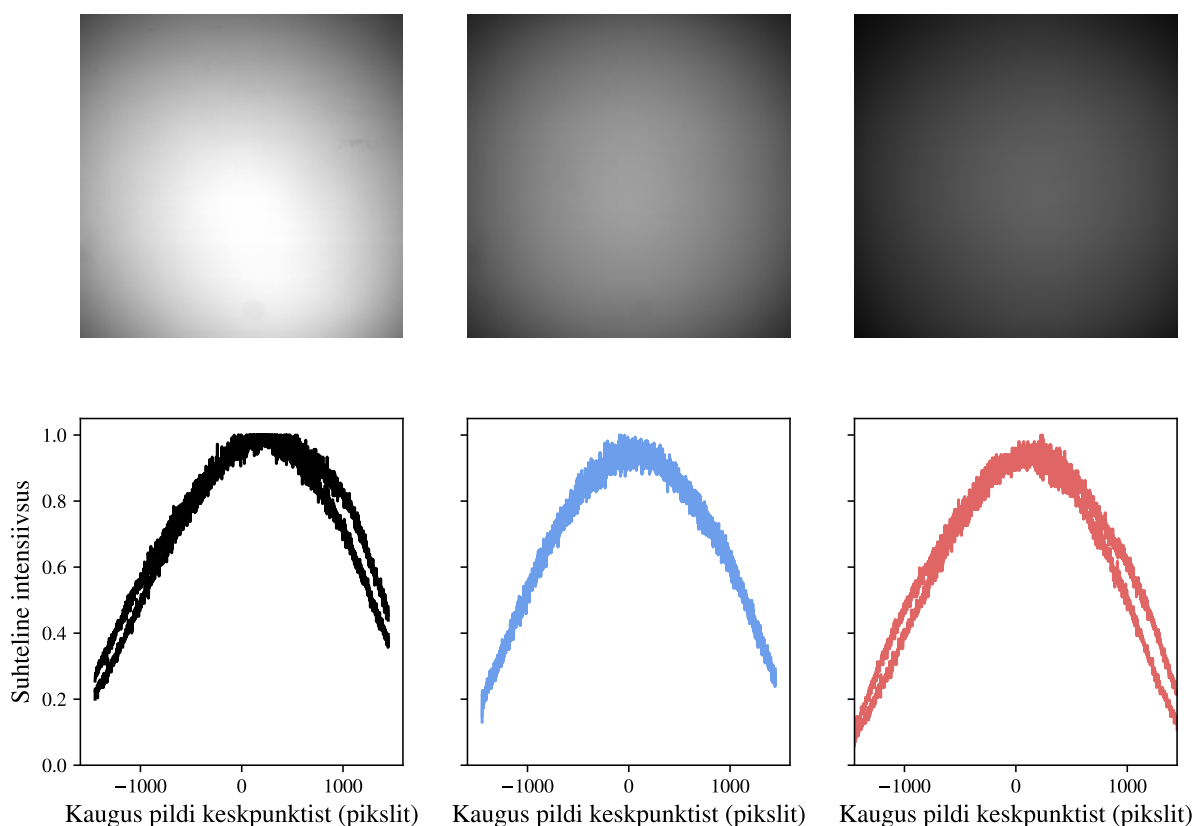


Joonis 4.3. Katsetulemused nii algse periskoobiga (sinine) kui ka uuema ja hajusvalguse blokeerimiseks optimaalsema periskoobiga (punane). Mustade püstjoonetega on märgitud vaatevälja piirid

Joonisel 4.3 kujutatud graafikutel vastab pöördele 0° ümber X -telje suund, kus valgusvihk langes Z -telje suunas. Tulenevalt periskoobi disainist ei lange see suund aga kokku optilise peateljega, vaid on 7° võrra nihkes. Katsetuste põhjal võib öelda, et otsitav nurkade vahemik pöördel ümber X -telje on ligikaudu -42° kuni 22° ja ümber Y -telje -25° kuni 25° . Vasakpoolsel graafikul võib tähele panna madalat piiki 40° ümbruses, mis tekib, sest sellest suunas saab valgus langeda otse objektiivile läätsele. Lisaks on näha, et vaatevälja läheduses, kuid sellest välja jääva valgusallika korral jõuab kaamerasse suhteliselt suur hulk hajusvalgust. Seda põhjustab ilmselt periskoobi seintelt peegeldumine. Veel on joonisel 4.3 toodud ka uuema periskoobiga tehtud sama katsetuse tulemused. Otsitav nurkade vahemik on märkimisväärselt paranenud: X -telje puhul on see nüüd -22° kuni 6° ja Y -telje puhul -16° – 16° .

Saadud tulemused on kooskõlas ka simuleeritud hajusvalguse analüüsidega. Esialgse periskoobi puhul võis simuleeritud PST põhjal ennustada otsitavaks vahemikuks X-telje korral -41° kuni 17° . Väike piik aga oleks selle kohaselt tekkida vahemikus 32° – 39° . On võimalik, et mõõtmise ajal ei olnud periskoop ülejäänud instrumendi külge piisavalt tugevalt kinnitatud ja oli seega mõne kraadi võrra viltu. Y-telje puhul kattub eksperimentaalselt leitud nurkade vahemik simulatsiooni paremini: simulatsiooni põhjal võis vahemikuks ennustada -24° kuni 24° . Vaatamata katse mitte-ideaalsetele oludele on tulemused küllaltki head. Kokkulangevused eksperimendi ja simulatsiooni vahel suurendavad nende usaldusväärsust.

4.2.2 Vinjeteerimine



Joonis 4.4. Vasakult paremale on ülereal real pildid jäädvustatud ilma periskoobita, vana periskoobiga ning uue periskoobiga. Alumisel real on kujutatud samas veerus vastavate piltide diagonaalide normaliseeritud intensiivsuste graafikud.

Vinjeteerimise uurimiseks jäädvustati ühtlaselt valgustatud valgest seinast pilt, nii et süsteemi optiline peatelg oleks sellega võimalikult täpselt risti. Diagonaalidel olevate pikslite väärtused normaliseeriti iga pildi jaoks eraldi ja seejärel koostati neist graafikud.

Kuna joonisel 4.4 toodud pildid on tehtud erineval ajal, on üldine valguse intensiivsus erinev. See aga ei sega suhtelise intensiivsuse uurimist. Graafikutelt on näha, et vinjeteerimine suureneb vähesel määral mõlema periskoobi puhul, võrreldes pildiga, mis on jäädvustatud

ilma periskoobita. Samas tasub tähele panna, et ilma periskoobita tehtud pilt tundub graafiku tipu lameduse põhjal üle säritatud. Seega võivad pikslite suhtelise intensiivsuse väärtused olla veidi suuremad, kui need oleksid ülesäritamata pildi korral. Ühtlasi tuleneb selle graafiku ebasümmeertilisus tõenäoliselt viltusest kinnitusest. Oluline on aga, et uue periskoobi korral ei ole pildil näha rohkem vinjeteerimist.

4.3 Pildikvaliteedi simulatsioon

Selle töö viimaseks eesmärgiks oli hinnata eeldatavat pildikvaliteeti ülal kirjeldatud tulemuste põhjal. Varasemalt on OPICu projekti raames SISPO (ingl - *Space Imaging Simulator for Proximity Operations*) [45] keskkonnas renderdatud mõned pildid komeedist. Järgnevalt on neile lisatud nii kaamera kalibratsiooni tulemusena leitud Kowa objektiivi LM35JCM-V mittelineaarsed moonutused kui ka uue periskoobiga kaasnev vinjeteerimine.

Joonist 4.5 uurides võib öelda, et vaatevälja keskel moonutusi praktiliselt pole. Samuti ei häiri ka vinjeteerimine vaadet komeedile. OPICu ülesannetest olulisim on komeedi morfoloogia uurimine. Joonise 4.5 põhjal ei takista vinjeteerimine ega mittelineaarsed moonutused eesmärgi täitmist, kui komeet jääb vaatevälja keskosasse. Selleks, et komeedi tuumast nii selge pilt jäädvustada, peaks OPIC sellel väga lähedal olema. Komeedipüüdu, ega sondi B2 trajektoori ei ole aga veel teada. Hetkeennustuste kohaselt on tõenäolisim möödalennu kaugus 400 km.

Joonisel 4.6 on simuleeritud vaade komeedile ja selle tolmu keskkonnale hetked pärast sondi B2 eraldumist. Parempoolsel pildil võib peamiselt tähendada komeedisaba tuhmumist vinjeteerimise tõttu. Komeedi tuum on moonutuste tõttu näiliselt nihkunud vaatevälja ääre poole. Nii kaugelt ei ole OPICu asukohta komeedi tuuma kuju jälgides korrektselt võimalik määrata. Parallaksi jälgimiseks on aga vaatamata vinjeteerimisele piisavalt tähti tuvastatavad, kuid parandamata või valesti parandatud moonutus võib tulemust rikkuda. Esimeses faasis peale eraldumist asukoha usaldusväärseks hindamiseks tasub kaamera kalibratsiooniga veel edasi tegeleda.

Kokkuvõte

Selle töö eesmärgiks oli karakteriseerida OPICu kandidaatkomponente ja seejärel hinnata kuidas valik mõjutab eeldatavat pildi kvaliteeti. Lugejale anti esimeses peatükis ülevaade Komeedipüüdu missioonist ja instrumendi OPIC osast selles. OPICu ülesandeks on möödalennul komeedist või tähtedevahelisest objektist pilte jäädvustada selle kuju ja pinnase analüüsimiseks, kui ka kosmosesondi B2 asukohta määramiseks.

Teises peatükis tutvustati matemaatilisi seoseid, millel järgnevad katsetused põhinevad. Uuriti nõelapea kaamera mudelilt ja lineaarseid võrrandeid, mis seovad ruumi punkti koordinaadid kaamerasensori koordinaadistikuga. Realistliku läätse süsteemiga arvestamiseks lisati neile ka liikmed mittelineaarsete moonutuste jaoks. Selles töös arvestati radiaalse ja tangentsiaalse moonutusega. Kuna kiirteoptika ei ennusta valgusehulga jaotust fokaaltasandil korrektselt, kirjeldati ka kaht selleks olulist nähtust: hajusvalgust ja vinjeteerimist.

Töö teises pooles kirjeldati eesmärkide täitmiseks vajalikke eksperimente ja nende tulemusi. Kõikide valikus olevate objektiividega viidi läbi kaamera kalibreerimise protsess, mille põhjal leiti hinnang nende kaameramaatriksi komponentidele ja moonutuste koefitsientidele. Veel uuriti täpsemalt objektiivide vaatekoonuste omadusi: vaatenurk ja koonuse tipu asukohta optika suhtes. Need tulemused ei osutunud objektiivi valimisel oluliseks, küll aga olid need vajalikud uue periskoobi disainimiseks. Edasiseks arenduseks valiti Kowa objektiiv LM35JCM-V.

Lisaks uuriti töö käigus nii esmase kui ka uue periskoobi puhul nurkade vahemikku, kust paistes Päike OPICu eesmärkide täitmist takistab. Uue periskoobi puhul oli see vahemik eksperimendi põhjal tunduvalt väiksem. Need tulemused on kooskõlas hajusvalguse simulatsioonidega. Pildi kvaliteedi ennustamiseks uuriti ka, mil määral tekitavad periskoobid pildil vinjeteerimist. Lõpetuseks uuriti valitud objektiivi ja uusima periskoobi omaduste (kaameramaatriks, moonutuste koefitsiendid ja vinjeteerimine) mõju pildi kvaliteedile simuleeritud piltide abil. Siin töös leitud tulemusi arvestades jätkub OPICu inseneeria mudeli ehitamine.

Kirjandus

- [1] J. P. Sánchez, G. H. Jones ja C. Snodgrass, “Comet interceptor: an ESA mission to a dynamically new solar system object,” 2020.
- [2] H. U. Keller, S. Mottola, S. F. Hviid, J. Agarwal, E. Kührt, Y. Skorov, K. Otto, J-B Vincent, N. Oklay, S. E. Schröder *et al.*, “Seasonal mass transfer on the nucleus of comet 67P/Chuyumov–Gerasimenko,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 469, lk S357–S371, 2017.
- [3] C. Snodgrass ja G. H. Jones, “The European Space Agency’s comet interceptor lies in wait,” *Nature communications*, vol. 10, no. 1, lk 1–4, 2019.
- [4] A. Slavinskis, A. Näsilä, M. Pajusalu, J. Praks, A. Reinart, I. Iakubivskyi, T. Kohout, C. Snodgrass, ja G. Jones, “OPTical Imager for Comets (OPIC) for proposed F mission Comet Interceptor,” kogumikus *EPSC-DPS Joint Meeting 2019*, vol. 2019, lk EPSC–DPS2019, 2019.
- [5] P. R. Weissman, “The oort cloud,” *Nature*, vol. 344, no. 6269, lk 825–830, 1990.
- [6] R. Reinhard, “The Giotto encounter with comet Halley,” *Nature*, vol. 321, no. 6067, lk 313–318, 1986.
- [7] W. H. Blume, “Deep impact mission design,” *Space Science Reviews*, vol. 117, no. 1-2, lk 23–42, 2005.
- [8] M. G. G. T. Taylor, N. Altobelli, B. J. Buratti ja M. Choukroun, “The Rosetta mission orbiter science overview: the comet phase,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 375, no. 2097, p. 20160262, 2017.
- [9] J. P. Sánchez, D. Morante, P. Hermosin, D. Ranuschio, A. Estalella, D. Viera, S. Centuori, G. Jones, C. Snodgrass, A. C. Levasseur-Regourd *et al.*, “ESA F-Class Comet Interceptor: Trajectory design to intercept a yet-to-be-discovered comet,” *Acta Astronautica*, 2021.
- [10] M. Pajusalu, J. Kivastik, I. Iakubivskyi, ja A. Slavinskis, “Developing autonomous image capturing systems for maximum science yield for high fly-by velocity small solar system body exploration,” kogumikus *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*, International Astronautical Federation, IAF, 2020.

- [11] G. Brydon ja G. H. Jones, “Comet Interceptor’s EnVisS Camera: Multispectral and Polarimetric Full-sky Imager for a Comet Flyby,” kogumikus *EPSC-DPS Meeting*, 2019.
- [12] Edmund Optics, “35mm, f/1.65 Cr Series Fixed Focal Length Lens | Edmund Optics.” <https://www.edmundoptics.com/p/35mm-f-165-cr-series-fixed-focal-length-lens/34867/>. 17.05.2021.
- [13] Kowa Lenses, “Kowa 2/3"LM35JCM-V Lens.” <https://lenses.kowa-usa.com/anti-shock-vibration-jcm-v-series/1252-lm35jcm-v.html>. 17.05.2021.
- [14] Ricoh International B.V., “F1.6/35mm - Ricoh International B.V.” <https://www.ricoh-iosd.eu/en/product/FL-CC3516-2M/2-Megapixel-Lenses-compact.html>. 17.05.2021.
- [15] Kowa Lenses, “LM35HC-V - Kowa Lenses.” <https://lenses.kowa-usa.com/1-anti-shock-vibration-hc-v-series/1267-lm35hc-v.html>. 17.05.2021.
- [16] A. Nikolajev, “Design and analysis of a periscope for a comet research spacecraft,” baka-laureusetöö, Tartu Observatory, 2021.
- [17] R. Hartley ja A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*. New York, NY: Cambridge University Press, 2004.
- [18] W. Förstner ja B. P. Wrobel, *Photogrammetric computer vision*. Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- [19] D. C. Brown, “Close-range camera calibration,” *Photogramm*, vol. 37, no. 8, lk 855–866, 1971.
- [20] D. C. Brown, “Decentering distortion of lenses,” *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1966.
- [21] A. W. Fitzgibbon, “Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion,” kogumikus *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001*, vol. 1, lk I–I, IEEE, 2001.
- [22] F. Devernay ja O. Faugeras, “Straight lines have to be straight,” *Machine vision and applications*, vol. 13, no. 1, lk 14–24, 2001.
- [23] J. Weng, P. Cohen ja M. Herniou, “Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation,” *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 14, no. 10, lk 965–980, 1992.
- [24] R. Tsai, “A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses,” *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 3, no. 4, lk 323–344, 1987.

- [25] R. G. Willson ja S. A. Shafer, “What is the center of the image?,” *JOSA A*, vol. 11, no. 11, lk 2946–2955, 1994.
- [26] G.-Q. Wei ja S. De Ma, “Implicit and explicit camera calibration: Theory and experiments,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 16, no. 5, lk 469–480, 1994.
- [27] W. J. Smith, *Modern optical engineering: the design of optical systems*. McGraw-Hill Education, 2000.
- [28] D. B. Goldman, “Vignette and exposure calibration and compensation,” *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 32, no. 12, lk 2276–2288, 2010.
- [29] R. Sidney, *Applied photographic optics*. Routledge, 2002.
- [30] M. Aggarwal, H. Hua ja N. Ahuja, “On cosine-fourth and vignetting effects in real lenses,” kogumikus *Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001*, vol. 1, lk 472–479, IEEE, 2001.
- [31] V. N. Mahajan, *Optical imaging and aberrations: Ray geometrical optics*, vol. 45. SPIE press, 1998.
- [32] R. Szeliski, *Computer vision: algorithms and applications*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [33] E. C. Fest, *Stray Light Analysis and Control*. Bellingham, WA. USA: SPIE Press, 2013.
- [34] J. M. Palmer ja B. G. Grant, *The Art of Radiometry*. Bellingham, WA. USA: SPIE, 2009.
- [35] M. Bass, C. DeCusatis, J. Enoch, V. Lakshminarayanan, G. Li, C. MacDonald ja E. V. Mahajan, V. Štryland, *Handbook of Optics*, vol. Vol. 2. McGraw-Hill Professional, 3 ed., 2010.
- [36] L. Blarre ja A. Mestreau, “Stray light characterization of optical systems,” kogumikus *Specification, Production, and Testing of Optical Components and Systems*, vol. 2775, lk 279–286, International Society for Optics and Photonics, 1996.
- [37] J. Heikkilä ja O. Silvén, “A four-step camera calibration procedure with implicit image correction,” kogumikus *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, lk 1106–1112, IEEE, 1997.
- [38] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration,” *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 22, no. 11, lk 1330–1334, 2000.
- [39] G. Bradski, “The opencv library,” *Dr. Dobb’s Journal of Software Tools*, 2000.

- [40] W. Förstner, “A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and center of circular features,” kogumikus *Proc. of the Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, Switzerland*, lk 281–305, 1987.
- [41] J. Fleming, F. Grochocki, S. Finch, T. Willis ja P. Kaptchen, “New stray light test facility and initial results,” kogumikus *Optical System Contamination: Effects, Measurements, and Control 2008*, vol. 7069, p. 706900, International Society for Optics and Photonics, 2008.
- [42] A. Ruiz, P. E. López-de Teruel ja G. García-Mateos, “A note on principal point estimability,” kogumikus *Object recognition supported by user interaction for service robots*, vol. 2, lk 304–307, IEEE, 2002.
- [43] O. Semeniuta, “Analysis of camera calibration with respect to measurement accuracy,” *Procedia Cirp*, vol. 41, lk 765–770, 2016.
- [44] J. Heikkilä, “Geometric camera calibration using circular control points,” *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 22, no. 10, lk 1066–1077, 2000.
- [45] M. Pajusalu, I. Iakubivskyi, G. J. Schwarzkopf, T. Väisänen, M. Bühner, O. Knuuttila, H. Teras, M. F. Palos, J. Praks ja A. Slavinskis, “SISPO: Space Imaging Simulator for Proximity Operations,” *arXiv preprint arXiv:2105.06771*, 2021.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Karin Kruuse,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

Komeedivaatluskaamera OPIC esialgse mudeli karakteriseerimine

mille juhendajad on Mihkel Pajusalu, PhD ja Joosep Kivastik, MSc, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Karin Kruuse

17.08.2021