

# **APOLLO 14 MAANDUMISKOHA FOTOGRAMMEERTILINE ANALÜÜS**

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Siim Erik Pugal, 179411YAFB  
Juhendaja: Vladislav-Veniamin Pustõnski  
Õppekava: Rakendusfüüsika

## Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Siim Erik Pugal  
[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.  
Juhendaja: Vladislav-Veniamin Pustõnski  
[allkiri ja kuupäev]

Töö on lubatud kaitsmisele.  
Kaitsmiskomisjoni esimees:  
[allkiri ja kuupäev]

# Sisukord

Annotatsioon.....	5
Abstract .....	6
Sissejuhatus.....	7
1 Fotogrammmeetrilise analüüsi alused .....	9
1.1 Parallaks .....	9
1.2 ImageModeler'i kasutamine .....	9
1.3 Fotoaparaatide spetsifikatsioonid.....	11
1.4 Mudeli täpsust mõjutavad faktorid.....	12
2 Piltide valik .....	14
3 Koordinaatsüsteemi loomine .....	16
3.1 Esialgne koordinaatsüsteem .....	16
3.2 Horizons.....	17
3.3 Maa ja Veenuse asukoha määramine .....	18
3.4 Päikese asukoha määramine.....	19
3.5 Suunanurkade teisendamine ühikvektoriks .....	20
3.6 Kolme taevakeha keskmine ühikvektor .....	21
3.7 Koordinaatide teisendamine .....	22
4 Andmete analüüs .....	23
4.1 Keskmise ühikvektori suuna määramine.....	23
4.2 Kaamera suunavektorite kujutamine.....	24
4.3 Lokaalse koordinaatsüsteemi alguskoha määramine .....	25
4.4 Kaardi kujutamine .....	25
5 Mudeli täpsuse hindamine.....	28
5.1 Võrdluskauguse määramine.....	28
5.2 Mõõtevigadest .....	28
5.3 Objektide dimensioonide võrdlus .....	28
5.3.1 Redel.....	28
5.3.2 <i>S-band</i> antenn .....	29
5.3.3 SWC .....	29
5.3.4 Lipp .....	30
5.3.5 Võrreldavate objektide koondtabel .....	31

5.4	Kaamerate orientatsiooni täpsuse hindamine Veenuse näiva kauguse järgi .....	31
5.5	Kaamerate orientatsiooni täpsuse hindamine vilude järgi .....	32
5.6	Kuumooduli kaldenurga arvutamine.....	32
5.7	Antenni suund Maale .....	33
	Kokkuvõte.....	35
	Tänuavaldused .....	36
	Kasutatud kirjandus.....	37
	Lisad.....	39
	Lisa 1 Transformeerimata kaamerate andmed .....	39
	Lisa 2 Transformeeritud kaamerate andmed.....	41
	Lisa 3 Lipu lokaatorite transformeeritud koordinaadid .....	43
	Lisa 4 Redeli lokaatorite transformeeritud koordinaadid .....	44
	Lisa 5 SWC lokaatorite transformeeritud koordinaadid.....	46
	Lisa 6 <i>S-band</i> antenni lokaatorite transformeeritud koordinaadid .....	47
	Lisa 7 Animatsioon telgede pööramisest .....	49

## Annotatsioon

1971. aasta veebruarikuus, kui Apollo 14 missiooni astronautid Alan Shepard ja Edgar Mitchell Kuu peale Fra Mauro mägismaad uurima läksid, jäädvustasid nad maandumiskohast 70 mm Hasselblad kaamerate abil mitu filmikassetti. Kasutades neid pilte saab fotogrammeetrilise analüüsi abil antud maandumiskoha stseenist luua 3D mudeli ning uurida selle kattuvust reaalsete kuumissioonidel kasutatud varustusega.

Fotogrammeetriline analüüs kujutab endast 2D piltide analüüsi, milledest on võimalik hiljem tänu parallaksi nähtusele luua ruumiline ettekujutus. Andmete kogumiseks ja töötlemiseks on kasutatud peamiselt kolme erinevat tarkvara. Esimene on hoonete modelleerimiseks mõeldud programm nimega ImageModeler, mida kasutatakse piltide fotogrammeetriliseks analüüsimiseks ja nendest andmete kogumiseks. Teiseks on Jet Propulsion Laboratory poolt välja töötatud astrosimulaator Horizons, millega saab infot erinevate taevakehade paiknemiste ning liikumiskiiruste kohta. Kolmanda tarkvarana kasutatakse Pythoni programmeerimiskeelt, mis oma multifunktsionaalsuse, kasutussõbraliku süntaksi ja täpsuse tõttu sobib antud töö andmete analüüsimiseks ja visuaalseks kujutamiseks.

Käesolev bakalaureusetöö süveneb ka detailselt matemaatilistesse valemitesse, mis olid vajalikud selle uurimustöö elluviimiseks. Välja toodud valemid pakuvad ideid ja mõtteid ka tulevaste missioonide uuringute jaoks, kohaliku koordinaatsüsteemi loomisest kuni koordinaattelgede suundade pööramiseni. Suur rõhk on pandud mudeli täpsuse hindamisele, kus võrreldakse uurimustöö mudelis paiknevate objektide mõõtmete kokkulangevust. Näiteks sellele kui täpselt langevad antud uurimustöö mudeliga kokku Apollo kuumooduli redeli, lipu, antenni ja tuule kompositsiooni seadeldise reaalsed dimensioonid.

45-st pildist, mis stseeni koostamisel loodi, saadi mudel, mille täpsus on võrdlemisi heas kooskõlas teadaolevate andmetega. Parimad tulemused kattusid kuni  $0,1^\circ$  täpsusega ning mõõtetulemused erinesid kuni 1 cm ulatuses. Täiendavalt pakub uurimustöö infot ka muude mõõteaspektide kohta, mis üksikpiltide analüüsist esialgu ei selgu.

## Abstract

In February of 1971, when Apollo 14 astronauts Alan Shepard and Edgar Mitchell went to the Moon to study the Fra Mauro formation, they took many pictures of their landing site with the 70 mm Hasselblad cameras. Using photogrammetric analysis, those pictures can be used to create a 3D model of the given landing site, which can be compared to the real equipment that was used on the lunar missions.

In this case, the photogrammetric analysis is the study of 2D pictures that can be made volumetric due to the phenomenon of parallax. To gather and process the data, three main softwares were used. First is a program meant for modelling buildings, named ImageModeler, which is used for photogrammetric analysis and data collecting. Second is an astrosimulator developed by the Jet Propulsion Laboratory named Horizons, which can be used to gather data about the locations and movements of different celestial objects. The third and final software is the Python programming language, which is used for its multifunctionality, user-friendly syntax and precise representation of the raw and visual data.

Furthermore, this bachelor's thesis goes into great detail about the mathematical equations that were used to carry out the research for this paper. These equations offer thoughts and ideas to study future missions, ranging from the establishment of the local coordinate system to the rotation of axes. A great amount of attention is concentrated on the assessment of the accuracy of the model, by comparing the objects brought out in the paper. For example, how well do the Apollo Lunar Module ladder, flagpole, antenna and a device for measuring the solar wind composition coincide with the real-life dimensions of the counterpart objects.

Of the 45 pictures that were used to create the scene, a model was obtained, which is in great correlation with the known data. The best results are consistent within  $0.1^\circ$  of accuracy and measurements differed within a range of 1 cm. Additionally, the paper offers information about the other measurement aspects that do not transpire from single image analysis.

## Sissejuhatus

Pindade kaardistamine nüüdisaegse tehnikaga on muutunud aastate möödudes kättesaadavamaks ja efektiivsemaks. Kastudes pilte, mis olid tehtud Apollo 14 meeskonna poolt Kuu pinnal ja kuumooduli akendest, on võimalik luua täpsemaid kaarte, mis annavad infot nii tulevaste missioonide jaoks kui ka ülevaate Kuu geograafilisest eripärast.

Kaardid, mis on koostatud orbiidilt tehtud piltide järgi, on parimal juhul 0,25 m/px lahutusvõimega ja seetõttu on ka orbiidilt eristatavad väiksemad objektid samas mõõtkavas [1]. Astronautide poolt tehtud fotod on palju kõrgema resolutsiooni tasemega, mistõttu on võimalik kaardistada teatud alasid tunduvalt kõrgema lahutusvõimega ja uurida lähemalt väikeseid objekte. Näiteks on piltide põhjal palju parem uurida kivide ja väikeste kraatrite jaotuseid ning muid sarnaseid pinnaomadusi. Lisaks saab fotogrammmeetrilise kaardistamise abil Kuu pinnale jäetud instrumentide täpse asukoha määramisega tõsta nende seadmete poolt kogutud andmete väärtust.

Apollo kuumooduli meeskonna poolt tehtud piltide põhjal luuakse Kuu maastikust kolmemõõtmeline keskkond. Selle protsessi abil, mida nimetatakse fotogrammmeetriliseks analüüsiks, saab anda täpse ettekujutuse Kuu pinnaomadustest, nende mõõtmetest ja ulatusest. Uuemad ja võimsamad arvutid suudavad kiiremini ja täpsemalt luua etteantud piltide abil stseeni, mis on väga oluline tulevikus planeeritavate mehitatud ja mehitamata missioonide maandumiskohtade valikul. Lisaks annab fotogrammmeetriline analüüs infot nii Kuu peal olevate geoloogiliste objektide kui ka astronoomiliste kehade asukohtade kohta.

Juba aastast 2018 on NASA andnud teada, et nad soovivad naasta Kuule nii mehitatud kui ka mehitamata missioonide kujul. Käesoleval aastal jõudsid nad kokkuleppele, millise firmaga neid tulevasi missioone läbi viia. Valituks osutus Elon Musk'i SpaceX. Musk'il on plaan alustada uute kuumissioonidega juba järgmise aasta (2022) alguses. NASA-l on SpaceX-i uute Starship rakettidega kavas suured plaanid. Aastal 2022 on plaanis saata erinevaid satelliite Kuu orbiidile, 2023 kuukulgureid spetsiaalsete puuridega, mis lähevad poolustelt vett otsima, ning aastal 2024 esimene naine ja järgmine mees Kuu lõunapoolusele [2].

Eeltoodud info valguses on Kuu pinna uurimine muutunud vägagi aktuaalseks ning oluliseks. Kuu uurimine annab inimkonnale võimaluse arendada erinevaid tehnoloogiaid, tutvuda lähemalt Maa ja Kuu arenguga, saada infot Kuul paiknevate ressursside ning nende kaevandamise kohta. Tulevane Artemise programm lubab inimestel rohkem ja lähemalt tutvuda Kuu omapärase pinnaga ning avada võimalusi uuteks teaduslikeks avastusteks. Täiendavalt pakuvad tulevased missioonid uut sorti andmeid ja pilte edaspidisteks fotogrammmeetrilisteks analüüsideks, et koguda rohkem infot järgnevate missioonide planeerimiseks.

Keskkonna modelleerimiseks mõeldud programme on hetkel mitmeid, kuid selle töö raames on Kuu pinna fotogrammmeetriliseks analüüsiks valitud tarkvara nimega ImageModeler. Olles küll peamiselt

mõeldud arhitektuuriliseks otstarbeks, sisaldab antud tarkvara täpselt vajalikke tööriistu, et luua kahemõõtmelistest piltidest ruumiline keskkond. Analüüs on tehtud 45 pildi alusel. Need pildid on tehtud Apollo 14 kuumooduli piirkonnas, milledest 6 on tehtud kuumooduli seest ja ülejäänud 39 pilti kuumooduli ümber olevatest punktidest.



# 1 Fotogrammmeetrilise analüüsi alused

## 1.1 Parallaks

Kolmedimensioonilise stseeni loomist kahemõõmeliste piltide põhjal nimetatakse fotogrammmeetriliseks analüüsiks. Antud protsess töötab järgmiselt. Analüüsitavatest piltidest valitakse mingisugused sihtobjektid, mida on pildistatud mitme erineva nurga alt. Nendele objektidele lisatakse lokaatoreid, mis hakkavad parallaksi nähtusest tulenevalt tekitama ruumilist stseeni.

Lihtsalt selgitades on parallaks nurk, mis on tekitatud vaatleja poolt kahest erinevast vaatluspunktist vastavale objektile langevatest kiirtest. Mida suurem on see nurk, seda parem ettekujutus ruumist tekib ning seda täpsemalt on võimalik hinnata vaatleja ja objekti vahelist kaugust. Näiteks astronoomias on parallaks väga oluline Maale lähedal asuvate tähtede kauguse hindamiseks.

## 1.2 ImageModeler'i kasutamine

Analüüsiks mõeldud tarkvara, ImageModeler, kasutamisel on vaja valida vaatlusobjekte, millel on karakteristikud teravad piirkonnad, et sama punkti saaks võimalikult täpselt erinevate piltide abil kindlaks määrata. Sellistele asukohtadele hakatakse lisama lokaatoreid, mis annavad täpse ettekujutuse ruumi mõõtmetest ning mängivad peamist rolli 3D stseeni ülesehitamisel. Lokaatorite asukoha valik on väga tähtis täpse stseeni loomiseks. Esiteks on oluline, et lokaatorid paikneksid võimalikult ühtlaselt nii pildi pinnal kui ka ruumis. See tähendab, et lokaatorid ei tohiks olla pildi peal ühes puntras ja vaatlusobjektid peaksid asetsema ruumis kaamerale nii lähedal kui ka kaugel. Eemal asuvad objektid, millele on vastavad lokaatorid seatud, lubavad täpsemalt määrata kaamera orientatsiooni ning ligidal asuvad objektid lubavad üksikasjalikumalt määrata kaamera koordinaate ruumis.

Kolmemõõtmelise ruumi loomise järjekord töötab järgmiselt. ImageModeler'i sisestatakse kaks pilti, kus hakatakse märgistama ühiseid lokaatoreid. Esimese kahe pildi korral nõuab ImageModeler stseeni loomiseks vähemalt 8 lokaatorit. Peale vastavate objektide märgistamist on oluline kaamerate kalibreerimine. See tähendab oma loomult seda, et ImageModeler hangib pildistavate kaamerate kohta käivad parameetrid, milleks on kaamerate asukohad ja suunad 3D-s ning kaameratele omased parameetrid nagu kaamera fokaalkaugus ja radiaalne moonutus. Nende andmete põhjal saab luua esialgse stseeni, mis annab esmase ettekujutuse meie uuritavast ruumist. Hoolikas kaamerate kalibreerimine on oluline täpse 3D mudeli loomisel, kuna iga tulevane samm hakkab sõltuma eelnevate kalibreeringute täpsusest.

Igal lokaatoril on ImageModeler'i tarkvaras kolm astet oma kvaliteedi ehk täpsuse kujutamiseks: punane, kollane ja roheline. Roheline näitab lokaatorite puhul edukat asukoha kattuvust, kollane kesist ning punane kõige halvemat. Selleks, et saada võimalikult täpne ettekujutus ruumis paiknevatest

objektidest, on oluline kontrollida lokaatorite asukohtade kokkulangevust ning stseeni muudatuste korral kalibreerida. Kui iga lokaatori täpsusega jäädakse rahule, saab liikuda edasi uute piltide lisamisega. Kolmanda ja edasiste piltide lisamiseks piisab ImageModeler'il juba kolmest lokaatorist, mille asukohad ruumis on juba eelnevalt teada eelmiste piltide analüüsist. Need esialgsed kolm lokaatorit on olulised peamiselt pildi stseeniga ühendamiseks. Mudeli täpsuse tõstmiseks on tähtis järgnevatele piltidele veel lokaatoreid juurde lisada. Iga uue lokaatori lisamisel on oluline kontrollida eelmiste üksiklokaatorite asukohti ja kvaliteeti, et stseeni suurendamisega oleks võimalik edukalt jätkata.

Täpse ja põhjaliku stseeni loomiseks on oluline lisada piisavalt palju lokaatoreid, ent mida suurem on lokaatorite arv, seda rohkem kulub tarkvaral arvutusteks aega ja seda ebastabiilsemaks ImageModeler muutub. Teatud juhtudel polegi ülesande jaoks välja valitud objekti võimalik tuvastada või uut pilti stseeni juurde lisada, sest tarkvara sisemised algoritmid ei suuda arvutusi teostada, olgugi et lahendus eksisteerib. Iga foto korral mängib olulist rolli ka sellele vastav fokaalkaugus. ImageModeler on võimeline selle ise välja arvutama, kuid täpsus suureneb, kui talle ette anda teadaolevaid fokaalkauguseid. Kauguste valikul on oluline teada, mille põhjal need määratakse.

Hiljem pannakse paika lokaalne koordinaatsüsteem, mille suuruskaala määratakse mingi kindla teadaoleva objekti dimensiooni põhjal. Kuna esialgne koorinaatsüsteem on seotud Apollo pildidel asuvate suvaliste objektidega, siis täpse kaardi jaoks on vaja 3D süsteemil lähtuda ilmakaartest ja kohalikust vertikaalst. Kui vaadata Kuu peal jäädvustatud fotosid, siis nende põhjal ei saa mingi kindla püstise keha, näiteks lipu või antenni, põhjal täpse lokaalse vertikaali suunda paika panna. Ülesande lahendamiseks kasutatakse taevakehi, kuna nende asukoht on meie jaoks JPL (Jet Propulsion Laboratory) Horizons astrosimulaatori poolt genereeritud efemeriidide<sup>1</sup> põhjal teada. Kui piltidelt saab tuvastada mitu tuntud taevakeha, siis on võimalik orienteerida stseen nende järgi. Antud protsess on mõnes mõttes sarnane viisiga, kuidas meremehed vanasti määrasid oma asukohti tähtede ja planeetide põhjal, kuid antud töös on olulisem orientatsiooni määramine.

Tulles tagasi fotogrammmeetrilise analüüsi juurde – lokaatorite lisamisel luuakse ruumiline stseen, kus pannakse paika lokaalne koordinaatsüsteem, mis on koostatud teatud objektidel paiknevate lokaatorite põhjal. See võimaldab leida suvalise lokaatori koordinaadid meie poolt valitud koordinaatsüsteemis. Nende lokaatorite põhjal luuaksegi stseenist 3D mudel, millest on võimalik koostada kaart. Kuna Kuu pinnal on väga omapärased valgustustingimused, olid astronautidel kaasas spetsiaalsed kaamerad, mis jäädvustaksid kõrge kvaliteedi ja täpsusega erinevaid pinnaomadused ja muud detailid.

---

<sup>1</sup>Efemeriid (ing. k. *ephemeris*) - tabel või andmefail, mis annab taevakehade arvutatud asukoha info pidevate intervallidega sätestatud ajavahemike tagant.

### 1.3 Fotoaparaatide spetsifikatsioonid

Fotoaparaadid, mida astronautid kasutasid, olid 70 mm filmiga Hasselblad kaamerad koos Zeiss Bigon f/5.6-60 mm optilise läätsesega [2]. Need olid modifitseeritud peamise nelja fokuseerimiskauguse jaoks: 5.3 ft, 15 ft, 74 ft ja lõpmatus. Antud kaameraga oli võimalik valida ka suvaline fokuseerimiskaugus, kuid astronautide poolt tehtud pildid vaheldusid reeglina nende nelja kauguse vahel. Fotoaparaadid olid modifitseeritud vastavate režiimide jaoks, et astronautid saaksid kiiresti valida eelnimetatud kauguste vahel. Iga pildi puhul on oluline kindlaks määrata sellele vastav objektiivi fokaalkaugus millimeetrites.

Astronautid kasutasid kuupinnal kokku kahte põhilist 70-mm Hasselblad Electric Data kaamerat. Fotoaparaatidel oli mootori jõul töötav mehhanism, mille toiteallikaks olid kaks nikkel-kaadmium (NiCd) patareid ning sisaldasid spetsiaalseid lainurkobjektive, mis olid mõeldud väga rangeks fotogrammmeetriliseks analüüsiks. Neil oli paigas ka 4 mm paksune *réseau* (eesti k. „võrestik“) plaat, mis sisaldas kokku 25 ristikest, mis omakorda moodustasid 5x5 võrestiku ning olid üksteisest 10 mm kaugusel [4]. Plaadi peamine ülesanne Apollo missioonide puhul oli kindlustada pildi täpne geomeetriline kuju. Kui film näiteks töötlemise käigus peaks deformeeruma, siis on võimalik selles sisalduvate ristikeste abil taastada pildi algne kuju, kuna iga ristikese kaugus üksteisest on alati konstante. Seega oli oluline, et kui Kuul pilte tehti, siis filmile jäädvustatud info jääks võimalikult terveks [5].

Apollo 14 meeskonna missiooniks ei olnud ainult dokumenteerida Kuule maandumist ja MET (ing. k. „Modular Equipment Transporter“ ehk moodulvarustuse transportija) käraga korraldatud uuringuid, vaid tuvastada ka sobivaid teaduslike piirkondi ja viia läbi eksperimente tulevaste missioonide jaoks. Fotoseadmed ja -materjalid olid spetsiifiliselt mõeldud potentsiaalsete maandumiskohtade pildistamiseks, teaduslikult huvipakkuvate piirkondade kaardistamiseks, Kuul maandumisjärgsete toimingute jäädvustamiseks, Kuu fotograafiaks, geoloogiliste näidiste dokumenteerimiseks ja paljuks muuks. Orbitaalfotod on Kuu piltide korral teostatud käsumoodulist Hasselbladi kaameraga, mille standardlääts fokaalkaugus oli 80 mm. Teist sorti 70 mm Hasselblad kaameratel, mida oli kaks kuumooduli pardal, oli paigas 60 mm fokaalkaugusega lääts [3]. Antud uurimustöös on kokku uuritud 45 erinevat pilti, mis oli tehtud kuumooduli ümber ja seest Alan B. Shepardi ning Edgar D. Mitchelli poolt.

Kuna pildid, mis Kuul tehti, salvestati algselt filmile, siis hiljem skaneeriti need digitaalse pildi jaoks formaadis, mille kuvasuhe oli 1x1 [5]. Meeles tuleb pidada, et reaalne pilt, mis sai filmile salvestatud, ei ole täpselt sisse skaneeritud. Tüüpiliselt on filmi äärtes näha väljalõikamisel esinenud tühja osa, mille peal pilt realselt ei eksisteeri ning seega ei saa kohe digitaalsest pildist eraldada reaalse filmi suuruse suhet. Siin tulevadki mängu *réseau* plaadi ristikesed, millede põhjal on võimalik kindlaks määrata reaalse filmi suurus ja kuvasuhe.

Käesolevas uurimustöös on stseeni täpsel ülesehitamisel suur roll fotoaparaatides oleva filmi suuruse arvutamisel *réseau* plaadi ristikesete põhjal. Ristikesed olid üksteisest täpselt 10 mm kaugusel [5]. Filmi laiuse ja kõrguse leidmiseks tuleb pildi suurused pikslites (3900x3900 px [6]) jagada pikslite vaheliste kauguste aritmeetilise keskmise väärtusega (pikslites) ning korrutada see suhe lõpuks 10 mm. Seda tuleb teha iga pildi korral, et leida neile vastavad filmikaadri kõrguse ja laiuse väärtused.

Seega valem filmi laiuse arvutamiseks on

$$W = \frac{3900}{w_{keskmise}} \cdot 10 \quad (1)$$

ning kõrguse jaoks

$$H = \frac{3900}{h_{keskmise}} \cdot 10. \quad (2)$$

Lisaks on oluline iga pildi korral määrata talle vastav fokaalkaugus. See saadakse nelja erineva fokuseerimiskauguse põhjal: 5.3 ft, 15 ft, 74 ft ja lõpmatus. Fokaalkauguste jaoks on vaja vastavad arvud korrutada läbi arvuga 304,8 mm/ft, mis annab meile otsitavad väärtused millimeetrites. Fokaalkaugus  $F$  leitakse aga valemist:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d} \quad (3)$$

Antud valemis  $f = 61,1$  mm on kaamera fookuskaugus, kui ta on fokuseeritud lõpmatusse ja  $d$  üks neljast ülalmainitud fokuseerimiskaugusest [4]. Tulemuseks ongi neli erinevat fokaalkaugust: 63,5 mm, 61,93 mm, 61,27 mm ja 61,1 mm. Need väärtused aitavad täpsustada ruumis paikneva kaamera asukohta pildistamise hetkel.

## 1.4 Mudeli täpsust mõjutavad faktorid

Kuna lokaatorite lisamise protsess toimub käsitsi, siis sellega seoses võivad esile kerkida mitmed keerukad probleemid, mis võivad raskendada täpsete lokaatorite asukoha määramist ja tuua sisse mõned vead. Ebatäpsusi võivad esile kutsuda järgmised nüansid:

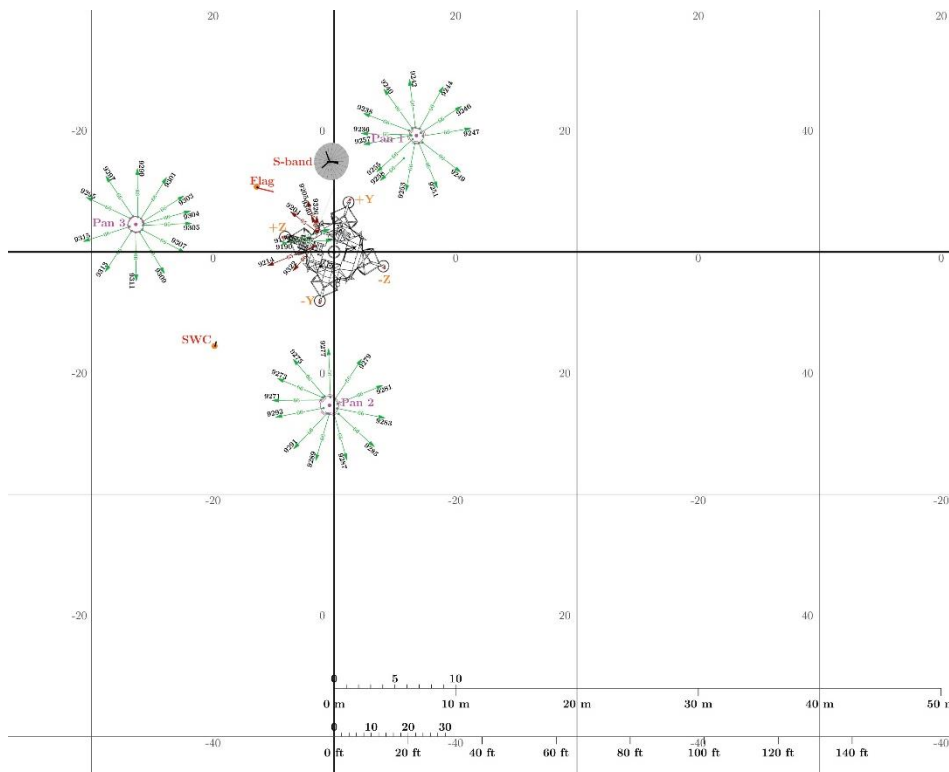
1. Nurgeliste kujude puudumine. Kui kaamera on suunatud kuumooduli poole, pole tegemist suure probleemiga. See hakkab esile tõusma peamiselt siis, kui kaamera keeratakse kuumoodulist eemale ning ruumis orienteerumine hakkab toimuma ainult Kuu pinnal olevate kivide põhjal. Kivide tüüpilise kumera kuju tõttu pole alati võimalik kindel olla sama lokaatori täpsel asukohas, mistõttu tuleb kivide valikul ning lokaatori nihutamisel olla võimalikult täpne.
2. Keerulised valgustustingimused. Kuna Kuul puudub Maaga sarnane atmosfäär, mõjutab see kõvasti valgustustingimusi Kuu pinnal. Päikesevalgus on antud tingimustes väga otsene, mistõttu võib suure kontrasti ja varjudest tingitud erinevuste tõttu sama kivi mitme erineva pildi peal olla väga ebaühtlase kujuga. Eeltoodud põhjusel olid astronautid sunnitud pildistama väga väikese avasuurusega, mis mõjutab väljaspool kaamera fookusvälja asuvaid objekte.

3. Pikselatsioon (ing. k. *pixelation*). Suurendades pilti liiga palju võivad nähtavale ilmuda üksikud pikslid, mis muudavad eriti väikestel kividel asuvate lokaatorite tuvastamise äärmiselt keeruliseks. See olukord võib peamiselt tekkida siis, kui on vaja tuvastada kindel objekt nii suurelt kauguselt, et pikslid on praktiliselt sama suured kui objekt ise. Võimalusel üritatakse vältida liiga väikeste kivide valimist, kuid suurendades võib kvaliteedi langemine põhjustada ebatäpsusi ka suuremate objektide puhul.
4. Fokaalkauguste ligikaudsed väärtused. Nagu varasemalt mainitud sai, oli Hasselblad kaameratel neli fokusseerimiskaugust (5.3 ft, 15 ft, 74 ft ja lõpmatus). Vastavad fokaalkaugused iga režiimi jaoks on vastavalt 63.50 mm, 61.93 mm, 61.27 mm ja 61,1 mm, mis on vajalikud fotogrammeetrilise analüüsi jaoks. Eeltoodud väärtused põhinevad piltide analüüsil, kus on uuritud esiplaani ja tausta teravust, et määrata vastav fokaalkaugus.
5. Fotoaparaadis oleva filmi ligikaudne suurus. Filmi suurus on arvutatud Hasselblad kaameratesse sisse ehitatud *réseau* plaatide põhjal. Digitaalsed pildid on reeglina kärbitud ülekatttega, mistõttu ei saa digitaalse resolutsiooni parameetrite abil filmi tõelist suurust määrata. Seda saab aga teha *réseau* võre põhjal, kuna ristikesed võres on üksteisest konstantsel kaugusel. Samas pole igal pildil ristikesi tumeda taevaplaani või mõne muu keeruka asukoha tõttu näha, mistõttu tuleb nende asukoht määrata eelmiste ristikeste kauguste alusel ning seeläbi võib ristikeste asukoha täpsus kannatada.

## 2 Piltide valik

Antud uurimustöö jaoks on valitud 45 pilti, milledest valdav enamik pärineb kuumooduli ümber paiknevast kolmest panoraamist. Kasutatud kaamerad olid ühtlaselt üles seatud ümber kuumooduli, et tagada 360-kraadine ülevaade. Selle jaoks olid kaamerate panoraamid paigutatud kolme seierkella numbritest lähtunud suuna peale: neli, kaheksa ja kaksteist.

Kella 12 panoraam oli üles seatud kuumooduli sissepääsu luugi vastassuunda ehk tema panoraami relatiivseks keskkohaks oli kuumooduli sisse- ja väljapääsu poolne osa ehk tema läänepoolne külg. Kella 4 peal asuv panoraam paiknes kella 12 panoraami vaatest vasakul, *S-band*<sup>2</sup> (eesti k. „S-riba“) antenni ja lipu poolses osas, mille vaade oli peamiselt orienteeritud kuumooduli põhjapoolsele küljele. Viimaks, kella 8 panoraam pildistas kuumooduli lõunapoolset külge, mille vasakusse ossa jääb kella 12 kaamera asukoht (Joonis 1).



**Joonis 1** Vertikaalne vaade maandumiskohast [21]

Ekspeditsiooni jäädvustamine ja dokumenteerimine oli oluline missiooni osa ning sarnaselt käituti ka kahel eelmisel ekspeditsioonil. Sellised kaamerate asukohad tagavad head parallaksi nurgad erinevate panoraamide vahel, mille tulemusena katavad nad maandumiskoha kõik suunad 360-kraadises vaates.

<sup>2</sup> Mikrolaine diapsoonis funktsioneeriv antenn, mis töötab sagedusvahemikus 2,1 kuni 2,3 GHz [20].

Töös kasutatud ülejäänud piltide seast on enamik tehtud kuumooduli erinevatest akendest, et tagada suurem parallaksi nurk ja lisa vaatevinkel kaugemate objektide asukoha hinnangu jaoks.

Panoraamidest on pilte valitud üle ühe, sest nii on tagatud maastiku katmise pidevus iga panoraami jaoks. See on oluline nii arvutusaegade kokkuhoidmiseks kui ka ImageModeler'i stabiilsuse tagamiseks. Ühes panoraamis on kokku umbes 24 pilti, seega antud töös kasutati nendest pooli ühe asukoha jaoks. Samas on vastavalt vajadusele lisatud ka teisi pilte, näiteks neid, kus esinevad Veenus ja Maa. Tulevikus on potentsiaalselt võimalik suurema mahuga töö jaoks piltide arvu suurendada, mis hõlmaks kõiki võimalikke pildistamise asukohti Kuul ning aitaks koostada täielikku kaarti, mis kataks ka alasid, mis asuvad kaugemal kuumoodulist nagu ALSEP-i (ing. k. „Apollo Lunar Surface Experiments Package“, tõlgituna Apollo Kuupinna Eksperimentide Komplekt) paigalduse koht jms.

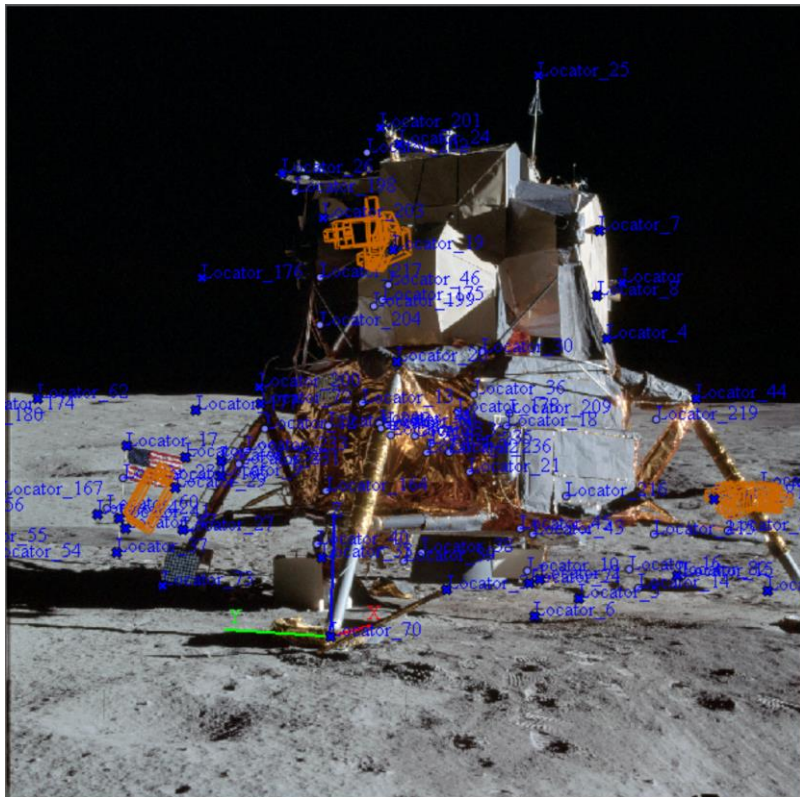
Fotod on nummerdatud järgmises formaadis: AS14-64-XXXX või AS14-66-XXXX. Numbrid 64 ja 66 näitavad kataloogile vastavat kasseti numbrit ehk 64 on mustvalgest ning 66 värvilisest. Neljakohaline number XXXX tähistab konkreetse foto identifitseerimisnumbrit. Edaspidiselt hakatakse konkreetsetele piltidele viitama ainult nende neljakohaliste ID numbrite põhjal.

### 3 Koordinaatsüsteemi loomine

#### 3.1 Esialgne koordinaatsüsteem

Kaardi koostamise jaoks on oluline määratleda koordinaatide alguspunkt ning õiged ilmakaarte suunad. Samas on esialgne koordinaatsüsteem paika pandud Kuu pinnal olevatest objektidest, mistõttu pole see oma loomult topotsentriliste koordinaatidega (ehk lokaalsete horisontaalkoordinaatidega) otseselt seotud.

Selleks, et kaart oleks üles ehitatud korrektsete ilmakaarte alusel, on lähtutud taevas paiknevast kolmest taevakehast: Päike, Maa ja Veenus. Koordinaatide alguspunktiks on valitud kuumooduli tugijalgade keskkohkt, kuid esialgu on see ImageModeler'is seotud kella 8 panoraamipoolse tugijala taldriku külge (Joonis 2). Esialgse koordinaatsüsteemi määramiseks on vaja 3 lokaatorit, mis panevad paika alguspunkti ja telgede suunad. Tulenevalt tarkvara eripäradest, ei ole võimalik antud asukohta ega vastavaid suundasid hiljem stseenis enam muuta. Analüüsi puudutavas peatükis kirjeldatakse lähemalt koordinaatide alguspunkti nihutamist ja suundade teisendamist.

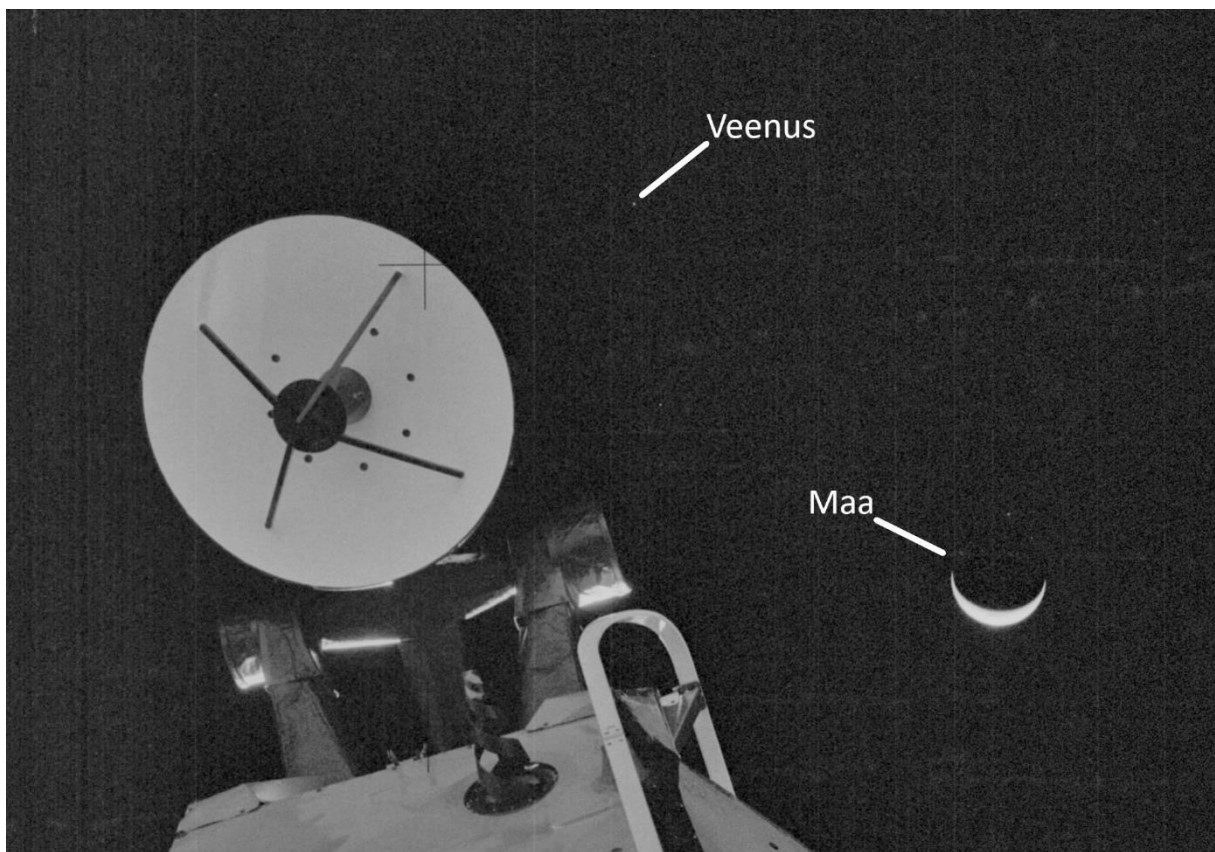


**Joonis 2** Algne koordinaatsüsteem

Peale piltide edukat lisamist tuleb määrata täpne maailmakaarte ja lokaalse vertikaaliga seotud koordinaatsüsteem, mille loomiseks kasutatakse piltidele jäädvustatud taevakehi. Ilmatelgede täpseks määratlemiseks on vaja ImageModeler'i süsteemi telgi keerata reaalsete ilmakaarte suundade peale.



Selle Apollo missiooni korral suutis Alan Shepardi pildile jäädvustada lisaks Päikesele ja Maale ka Veenuse asukoha taevaplaanil (Joonis 3). Koordinaatide keeramise jaoks on oluline teada Maale, Veenusele ja Päikesele vastavat ühikvektorit ImageModeler'i süsteemis ja Horizons süsteemis ehk kus antud taevakehad realselt antud hetkel asusid. Kuna Päike on piltide taustal oma kõrge ereduse tõttu peidetud suure halo taha, on taevakeha suund määratud ImageModeler'is vilude analüüsi põhjal. Maa ja Veenuse suunad on määratletud otseste piltide põhjal.



**Joonis 3** Foto 9197. Pilt, millel Shepard tabas Maa pildistamisel ka Veenuse asukoha taevaplaanil

### 3.2 Horizons

Päikese asukoha teadasaamiseks pildistamise hetkel on kasutatud JPL poolt välja töötatud astrosimulaatorit nimega Horizons On-Line Ephemeris System või lühidalt Horizons [7]. Antud simulaatorit on kasutatud oma suure täpsuse, põhjaliku info ja kasutussõbralikkuse tõttu. Selle kasutamiseks on oluline andmetest välja lugeda sihtmärgiks seatud taevakeha kõrgusnurk (EL) ja asimuut ehk suunanurk (AZ). Selleks, et saada kätte täpsed väärtused mõne taevakeha asukoha kohta, on oluline teada lisaks vaatlusasukohale (Apollo 14 maandumiskoht Kuul) ja sihtmärgile (Veenus, Maa, Päike) ka aega, millal pildid vaadeldavast taevakehast tehti.

NASA kasutab oma dokumentides peamiselt kahte tüüpi aega: GET ja GMT. GET ehk *Ground Elapsed Time* (eesti k. „maapealne möödunud aeg“), mis loeb aega loenduri alguses negatiivselt ja kui saabub raketi õhkutõusu hetk ehk *Range Zero* ehk 000:00:00, siis peale seda hakatakse aega lugema positiivselt. Näiteks kui õhkutõusuni on jäänud 8 minutit, siis GET näitab aega -000:08:00, ja kui rakett on juba õhus ning saavutanud peale 1 minutit ja 8 sekundit helikiiruse, siis GET kuvab aega 000:01:08.0 [8]. GMT on Greenwichi kohalik keskmine päikeseaeg ning on ajaliselt sama *Universal Time* ehk UT (eesti k. maailmaaeg) ajavahemikuga.

Astronautide ja juhtimiskeskuse vahelistest audiokõnedest selgub, et Shepard tegi antud pildid (9190 ja 9196) Veenusest ja Maast kell 135:04 GET aja järgi ehk 6. veebruaril 1971. aastal kell 12:07 GMT/UT [9] ning kella 4 ja 8 panoraamid, mis jäädvustasid *S-band* antenni ja lipu vilud, tehti umbes kell 114:53 GET ehk 15:56 GMT/UT, 5. veebruar 1971 [10]. Meeles tuleb pidada, et antud seeriates on pilte mitu, seega tuleb eeldada, et pildid on tehtud mõni minut enne ja pärast etteantud aega.

### 3.3 Maa ja Veenuse asukoha määramine

Ühikvektorite määramine ImageModeler'i andmete põhjal toimub Maa ja Veenuse jaoks järgmiselt. Kuna on teada kummagi taevakeha lokaatori ja kahe pildistava kaamera koordinaadid, siis esmalt leitakse kahe Maad ja Veenust pildistava kaamera (9190 ja 9196) poolt moodustatud keskmine vektor. Keskmise vektori arvutamine toimub vastavale valemile

$$\vec{k} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \vec{k}_m \quad (4)$$

ehk

$$\vec{k} = \frac{\vec{k}_1 + \vec{k}_2}{2},$$

kus  $\vec{k}_1$  ja  $\vec{k}_2$  on kaamerate 9190 ja 9196 asukohtade vektorid,  $n$  kaamerate arv ja  $\vec{k}$  nende aritmeetiline keskmine vektor. Saadud väärtus lahutatakse Veenuse ja Maa asukoha lokaatorite koordinaatide poolt moodustatud vektorist vastavalt valemile

$$\vec{v} = \vec{l} - \vec{k}, \quad (5)$$

kus  $\vec{v}$  on Veenusele (või Maale) vastav vektor,  $\vec{l}$  on Veenuse (või Maa) lokaatori vektor ja  $\vec{k}$  on eelnevalt saadud kaamerate keskmine vektor.

Siinkohal võib tekkida küsimus, miks ei määrata Maa ja Veenuse asukohad otse koordinaatsüsteemi alguse suhtes ehk miks ei või kasutada Maal või Veenusel paiknevaid lokaatoreid, mis ImageModeler'i süsteemist kergesti kätte saaks. Reaalsuses on Maa ja Veenuse asukohad väga kaugel. Maa paikneb Kuust ca 400 000 km kaugusel ja Veenus võib väikseimal juhul olla ca 40 miljoni km kaugusel [11]. Kui ImageModeler suudaks sellised kaugused paika panna, oleks koordinaatide alguspunkti suhtes nende

suunavektorite määramine lihtne. Parallaksi abil kauguse määramine töötab kõige paremini siis, kui parallaksinurk on suur ehk pildistavad kaamerad on nii üksteisest kui ka sihitud objektist piisavalt kaugel. Mainitud kaamerad, mis Maa ja Veenuse pildile tabasid, on antud olukorras üksteisele väga lähedal.

Objektide vaheliste kauguste mõõtmiseks on kasutatud Eukleidilise pikkuse valemit

$$R = \|\vec{a}\| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}, \quad (6)$$

mille abil saab näidata kui lähedal kaamerad pildistamise hetkel üksteisele olid. Selle jaoks võetakse kahe kaamera asukoha vektori vahel absoluutväärtus, mille tulemusena tekib uus vektor, kus moodul vastavalt valemile (6) on

$$|\vec{a} - \vec{b}| \approx 15,1 \text{ cm}.$$

Fotod 9190 ja 9196, millel Maa ja Veenus paiknevad, on üksteisele üsna lähedal, mistõttu toob väiksemgi nihe nende kahe kaamera vahel sisse sellise tulemuse, kus Maa ja Veenus paiknevad koordinaatide alguspunktist vaid mõnekümne meetri kaugusel. Seetõttu ongi oluline nende taevakehade ühikvektorid määrata kaamerate 9190 ja 9196 asukohtade abil, mitte koordinaatsüsteemi alguse põhjal.

Selleks, et leida mõlemale taevakehale vastavad ühikvektorid, tuleb esmalt leida vektorite koordinaatide põhjal nende Eukleidiline pikkus kasutades valemit (6) ning see väärtus jagatakse läbi iga vektori komponendiga ehk

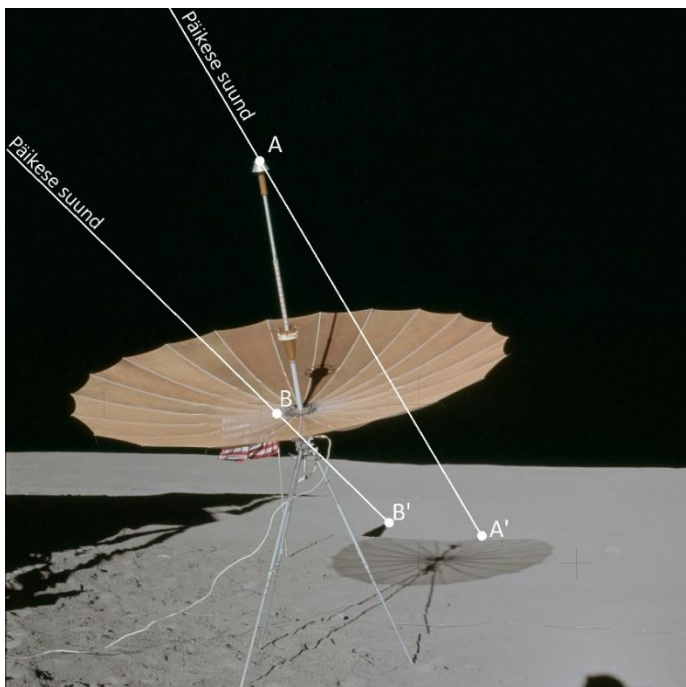
$$\vec{\rho} = \frac{1}{R}(x; y; z). \quad (7)$$

### 3.4 Päikese asukoha määramine

Päikese ühikvektori määramiseks täpselt samamoodi käituda ei saa. On oluline mainida, et Apollo 14 piltidel on Päikese ümber suur halo, mistõttu pole võimalik sarnaselt Maale ja Veenusele Päikese asukoha vektorit taevakeha keskkoha lokaatori abil määrata. Selle asemel on analüüsitud *S-band* antenni ja lipu poolt moodustatud vilude suundi. Antenni ja lipu vilud paiknevad kella 4-se panoraami poolses osas (Joonis 4). ImageModeler'i põhjal saab kindlaks määrata lipu ja antenni ning nende varju tippude vektorid. Saadud väärtuste põhjal on võimalik kindlaks määrata lipu ja antenni viludele vastav Päikese suuna ühikvektor.

Käitudes sarnaselt Maa või Veenuse vektori leidmisele, saab leida ka lipu ja antenni vilude poolt moodustatud Päikese vektori. Leides objekti tipu vektori, lahutatakse sarnaselt valemile (5) maha selle tulemustest vilu tipu koordinaadid ja saadakse kätte Päikese vektor. Tehes seda nii lipu kui ka antenni

korral, leitakse sarnaselt valemitele (6) ja (7) lipu ja antenni ühikvektorid. Hiljem leitakse sarnaselt valemile (4) Päikese ühikvektorite keskmine vektor, mis muudetakse valemi (7) abil tagasi ühikvektoriks.



**Joonis 4** Lipu ja S-band antenni vilud

### 3.5 Suunanurkade teisendamine ühikvektoriks

Peale Maa, Veenuse ja Päikese suunda näitavate ühikvektorite leidmist ImageModeler'is, saab kasutada Horizons astrosimulaatorit, et leida nende taevakehade reaalsed asukohad Apollo 14 maandumisplatsilt vaadates. Selleks on olulised kaks eelevalt mainitud väärtust: kõrgusnurk ja suunanurk. Esimene väärtus on nurk XY-tasandi ja ühikvektori vahel. Teine väärtus on nurk XY-tasandile projekteeritud ühikvektori ja põhja suunda näitava ilmakaare vaheline nurk. Algses ImageModeler'i süsteemis on selleks X-telg, kuid pärast koordinaatide teisendamist muutub see Y-teljeks. Horizons annab oma asimuudi väärtused süsteemis, kus seda loetakse põhjast päripäeva. Eelkirjeldatud lahendust rakendati käesolevas uurimustöös, kuid näiteks astronoomias loetakse seda tihti hoopis lõuna suunast.

Uurides ImageModeler'i poolt moodustatud koordinaatide süsteemi ja reaalseid taevakehade asukohti, on tuletatud iga taevakeha ühikvektori koordinaadi jaoks järgmised valemid:

$$x' = R \cdot \cos(AZ) \cdot \cos(EL) = \sin(AZ) \cdot \cos(EL), \quad (8)$$

$$y' = R \cdot \sin(AZ) \cdot \cos(EL) = \cos(AZ) \cdot \cos(EL), \quad (9)$$

$$z' = R \cdot \sin(EL) = \sin(EL). \quad (10)$$

Antud valemite  $R = 1$  (ühikvektori pikkus),  $AZ$  on asimuut ehk suunanurk ning  $EL$  on kõrgusnurk. Tuleb jällegi meeles pidada, et panoraamid Päikesest jaoks on tehtud 5. veebruaril ja pildid Maast ja Veenusest 6. veebruaril, seega tuleb Horizons simulaatorit kasutades valida välja lisaks vaatleja asukohale ja vaadeldavale sihtmärgile ka õige ajahetk.

### 3.6 Kolme taevakeha keskmine ühikvektor

Nüüd kui on võimalik olemasolevate valemite põhjal ImageModeler'ist kätte saada iga taevakeha ühikvektorid lokaatorite koordinaatidest lähtuvalt ning Horizons süsteemist asimuudi ja kõrgusnurga abil reaalsed taevakehade ühikvektorid, tuleb leida kummagi süsteemi puhul kolme taevakeha keskmine ühikvektor vastavalt valemitele (4) ja (7).

Põhjus, miks ainult ühest taevakehast täpse koordinaatsüsteemi koostada ei saa, on järgmine. Ühe taevakeha abil pole võimalik leida samaaegselt horisontaalset koordinaatsüsteemi. Pöörlemisel ainult ümber ühe taevakeha suunavektori jääb ainult üks vabadusaste, mille tulemusena ei saa leida samaaegselt horisontaalset koordinaatsüsteemi. Seega on vaja vähemalt teada kahe taevakeha asukohta. Mida rohkem neid on, seda täpsemalt on võimalik horisontaalset koordinaatsüsteemi määratleda. Ehk, kui kogu ImageModeler'i koordinaatsüsteemi keerataks ainult Veenuse ühikvektori põhjal reaalse Veenuse ühikvektori peale, siis see ei garanteeri, et Maale ja Päiksele vastavad ühikvektorid paiknevad pärast teisendusi reaalsete taevakehade asukohtade peal. Selleks, et tagada maksimaalne täpsus peale koordinaatsüsteemi teisendusi, on oluline kasutada vähemalt kahe taevakeha ühikvektoreid. Kuna antud juhul on olemas kolm taevakeha, siis on täpsus nende korraga kasutamisel kõrgem.

Kolme taevakeha keskmine ühikvektor töötab juhisenä, mis on suunatud tühjale ruumile kolme taevakeha vahel enne ja pärast teisendusi, ning mängib olulist rolli suuna- ja kõrgusnurkade kindlaks määramisel. Koordinaatide pööramise tulemusena on eesmärk ImageModeler'i kolme ühikvektori suunad viia kooskõlasse reaalsete Päikese, Maa ja Veenuse ühikvektoritega. Seega on oluline leida enne teisendusi, mis on algne keskmine ühikvektori suuna- ja kõrgusnurk ning mis nurkade all see keskmine vektor lõpetama peab. Kui on oluline teada mingi vektori asimuut ehk suunanurk, kasutatakse järgmisi valemeid:

$$AZ = \begin{cases} -\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{y}{x}\right), & x < 0 \\ \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{y}{x}\right), & x \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

ja kõrgusnurga jaoks

$$EL = \arcsin\left(\frac{z}{|u|}\right) = \arcsin(z), \quad (12)$$

kus  $\vec{u} = (x, y, z)$  on ühikvektor.

### 3.7 Koordinaatide teisendamine

ImageModeler'i koordinaatteljetiku pööramisel õige suuna- ja kõrgusnurga peale on oluline teada, mis suunas koordinaate pöörata tuleb ja mitme kraadi võrra. Koordinaatide pööramine ümber X-, Y- ja Z-telje toimub järgmise kolme valemi põhjal:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Ülalolevates valemities tähistavad  $\phi, \theta$  ja  $\psi$  mingit pööramise nurka, kus  $x, y$  ja  $z$  on algsed vektori koordinaadid ja  $x', y'$  ja  $z'$  uued vektori väärtused.

Korrektseks koordinaatide teisendamiseks on oluline teada, mis nurga all algselt Päikese, Maa ja Veenuse ühikvektor ImageModeler'i keskkonnas on ning mis nurga alla tuleb antud keskmise vektor keerata, et see vastaks reaalsele keskmisele ühikvektorile, mis on saadud Horizons andmete põhjal. Mainitud reaalne ühikvektor ongi koostatud nende Horizons'i andmete põhjal, mis aastal, kuupäeval ja kellaajal antud taevakehad reaalselt paiknesid, kui need astronautide piltidele jäädvustati. Seega, kui on olemas nii ImageModeler'i ja Horizons süsteemi poolt saadud keskmised ühikvektorid, siis on valemite (11) ja (12) abil võimalik teada saada, mis tõusu- ja suunanurkade all antud vektor algselt on ning mis nurga all ta lõpetama peab.

## 4 Andmete analüüs

### 4.1 Keskmise ühikvektori suuna määramine

Peale oluliste andmete ja valemite leidmist saab hakata tegelema vektorite teisendamisega.

Algse ImageModeler'i koordinaatsüsteemi põhjal on kolme taevakeha keskmine ühikvektori asimuut valemi (11) põhjal ca  $-80,11^\circ$  ja kõrgusnurk valemi (12) korral ca  $49,77^\circ$ . Seega antud ühikvektor alustab eeltoodud nurkade all ning samade valemite põhjal on vaja tal Horizons andmete alusel lõpetada  $-87,79^\circ$  asimuudi ja  $50,65^\circ$  kõrgusnurga all. Esimeseks sammuks selle suunas on vaja pöörata koordinaattelgi ümber Z-telje  $80,11^\circ$  vastupäeva, et asimuudi nurk oleks  $0^\circ$ , mille tulemusena asub ühikvektor XZ-tasandis  $49,77^\circ$  kõrgusnurga all. Teiseks keeratakse antud nurka Y-telje ümber vastupäeva  $49,77^\circ$ . Selle tulemusena paikneb kolme taevakeha keskmine ühikvektor X-teljel koordinaatidega (1, 0, 0).

Järgmiseks hakatakse leidma parimat nurka, millega vektorit ümber X-telje pöörata, et ruutkeskmiste hälbed oleksid minimaalsed. Seda nimetatakse Gaussi keskmiseks ruutvea valemiks. On selge, et kolme taevakeha keskmine ühikvektor oma väärtust ei muuda, kuid ülejäänud kolme ühikvektori, mis on selle keskmisega seotud, väärtused hakkavad muutuma. Protsess otsitava nurga leidmiseks töötab järgneva põhimõtte alusel. Alustades suvalisest proovinurgast, keeratakse koordinaatsüsteem X-telje suhtes nii, et transformeeritud koordinaatsüsteemis tegelike taevakehade ühikvektorite ja mudelis nendele vastavatele ühikvektoritele leitud koordinaatide ruutude summa oleks minimaalne. Valem keskmise ruutvea arvutamise jaoks on

$$v = \frac{1}{k} \sqrt{\sum_{k=1}^n \Delta x_k^2 + \Delta y_k^2 + \Delta z_k^2}. \quad (16)$$

Neljanda sammuna tuleb antud vektor keerata veel  $-50,65^\circ$  ümber Y-telje ehk päripäeva ja  $-87,79^\circ$  päripäeva ümber Z-telje. Peale seda peaksid keskmised ühikvektorid omavahel kattuma, kuid vajadusel tuleb kraade ümber X-telje veel korrigeerida, et keskmine ruutviga koordinaatide vahel oleks minimaalne. See tähendab, et tuleb leida hälve iga taevakeha kolme koordinaadi põhjal ning need seejärel kokku liita.

Tuleb välja, et parim võimalik nurk, mida ümber X-telje pöörata, on ligikaudu  $11,03^\circ$  päripäeva. Selle väärtuse kinnitamiseks kirjutati Pythonis kood, mis käib läbi kõik eelnevad valemid ning leiab etteantud vahemikust väikseima võimaliku keskmise ruutvea väärtuse. Otsitava väärtuse leidmiseks võeti vabalt valitud väikese sammupikkusega vahemik. Kui optimaalne väärtus jäi otsitava vahemiku piiridesse, liigutati piire rohkem otsitava vahemiku keskosa suunas ning sammu pikkus muudeti väiksemaks. Koodi täpsuse jaoks võeti vahemik  $-12,0$  kuni  $-11,0$ , mille sammupikkuseks oli  $10^{-7}$ . Isegi sellise täpsusastme

juures selgus, et sajandikest edasi ümardamisel see lõppvastusele nähtavat mõju ei avalda, kuna nurkade täpsus on mudelis ca  $0,1^\circ$ .

Nüüdseks on teada kõik viis peamist pööret, mida on vaja erinevatele koordinaattelgedele rakendada ning mis järjekorras seda oleks mõistlik teha. Viimaks on oluline veel pöörata ImageModeler'i koordinaatteljestikku  $90^\circ$  päripäeva, sest ImageModeler'i algses süsteemis on x-telg algselt suunaga lõunast põhja ja y-telg suunaga idast läände. Reaalsetel kaartidel jookseb y-telg aga lõunast põhja ning x-telg läänest itta, mistõttu on vaja, et viimane pööre seaks paika vastavad teljed kooskõlasse kokkulepitud normidega. Kuna aga viimane pööre eelnevalt mainitud viiesammulises koordinaatide teisendamise protsessis toimub sarnaselt Z-telje ümber nagu praegune  $90^\circ$  pööre, siis on kaks viimast sammu omavahel võimalik kokku liita. Selle tulemusena saadakse kätte viimase nurga jaoks vajaliku nihke väärtus, milleks on ligikaudu  $2,21^\circ$ .

## 4.2 Kaamera suunavektorite kujutamine

Oluline on välja tuua viis, kuidas kaamerate nurgad on kujutatud ImageModeler'is. Meetodeid vektorite esitamiseks on mitmeid, kuid antud uurimustöös on tegemist peamiselt kahega. Esimene on *pitch-roll-yaw* (eesti k. tõusu-kalde-suunanurga) meetod, teiste sõnadega *intrinsic rotations* (pöörlemisnurgad koordinaattelgede suhtes, mis on seotud kehaga/kaameraga). Teiseks on XYZ-telgede rotatsioonid ehk *extrinsic rotations*. Esimest meetodit on kasutatud andmete kujutamiseks asimuudi ja kõrgusnurga väärtustena, kuid ImageModeler annab algsete vektorite suunad XYZ-telgede rotatsioonide kujul. Selleks, et nendega oleks võimalik töötada, tuleb need muuta üle *pitch-roll-yaw* nurkadeks.

ImageModeler'is on kaamera suunad määratud rotatsioonidega kindlas järjekorras X-, Y- ja Z- telgede suhtes. Selleks, et andmed oleksid edaspidiselt viiesammulisele algoritmile töödeldavad, peavad kaamera esialgsed suunad olema kujutatud samamoodi nagu nad olid ImageModeler'i esialgses teisendamata mudelis. Selleks võetakse ühikvektor suunaga (0, 0, -1) ning vastavalt iga kaamera XYZ-rotatsioonidele keeratakse iga kaamera suunavektor, vastavalt valemitele (13)-(15), paika temale omaste nurkade järgi.

Seega saab ImageModeler'ist nüüd eksportida andmeid nende töötlemise jaoks. Igal kaameral on algselt paigas oma identifitseerimisumber, kolm asukoha koordinaati ning kolm kaamera pöörlemisnurka koordinaattelgede suhtes. Nagu eelnevalt mainitud sai, on oluline samm muuta *intrinsic rotations* üle *extrinsic rotations* peale. Kaamerate suunavektorite õigete koordinaatide saamiseks tuleb vektor (0, 0, -1) keerata vastavate koordinaattelgede nurkade suhtes ning rakendatakse nii asukoha kui ka suunavektorele viiesammulist koordinaatide teisendamise algoritmi. Peale seda viiakse kaamera suunavektorid üle EZ ja AZ andmetele ehk kõrgus- ja suunanurgale.

Antud uurimustöös on kõrgusnurga puhul kasutatud sama vahemikku, mida Horizonsi puhul ehk vahemik  $-90^\circ$  kuni  $90^\circ$ . Seega  $-90^\circ$  oleks suunaga alla,  $0^\circ$  oleks horisondi kõrgusnurk ja  $90^\circ$  oleks vertikaalse suunaga otse üles. Asimuudi definitsioon käesolevas uurimustöös, sarnaselt Horizonsiga, on



nurk Y-teljega XY-tasapinnas. Järelikult asub asimuut vahemikus  $-180^\circ$  kuni  $180^\circ$ , olenevalt sellest, kas on liigutud päri- või vastupäeva. Sarnaselt tavaliste kaartidega on päripäeva liigutatud suunad negatiivsed ja vastupäeva positiivsed.

### 4.3 Lokaalse koordinaatsüsteemi alguskoha määramine

Peale kaamerate suuna- ja asukoha koordinaatide teisendamist nihutatakse kõik asukohakoordinaadid uue koordinaatide alguspunkti suhtes. Nõuetekohase koordinaatide alguspunkti sätestamisega saab luua korrektse ning arusaadava ettekujutuse kaamerate paigutusest. Antud stseeni analüüsimiseks on keskpunktiks määratud kuumooduli keskkoh, mis on saadud nelja kuumooduli jalgade talldrikute keskpunktide koordinaatide põhjal.

Jalatalldrikute X-, Y- ja Z-koordinaadid on transformeeritud läbi viiesammulise koordinaatide teisendamise funktsiooni õigesse koordinaatteljestikku. Nendest uutest koordinaatidest on leitud valemi (4) abil uus koordinaatide alguspunkt, mis asub nüüdsest kuumooduli keskosas. Selleks, et liigutada ülejäänud kaamerad vastavalt uue alguspunkti järgi, nihutatakse kaamerate koordinaate uue vektori võrra vastavalt valemile (5) ehk kaamera asukoha koordinaatidest lahutatakse maha kuumooduli jalgade keskmistatud vektor.

### 4.4 Kaardi kujutamine

Ruumilise ettekujutuse loomiseks Apollo 14 kuumooduli maandumiskohast on vajalik teada ainult paari olulist funktsiooni Pythonis, kus enamik selle uurimustöö arvutusi tehtud on.

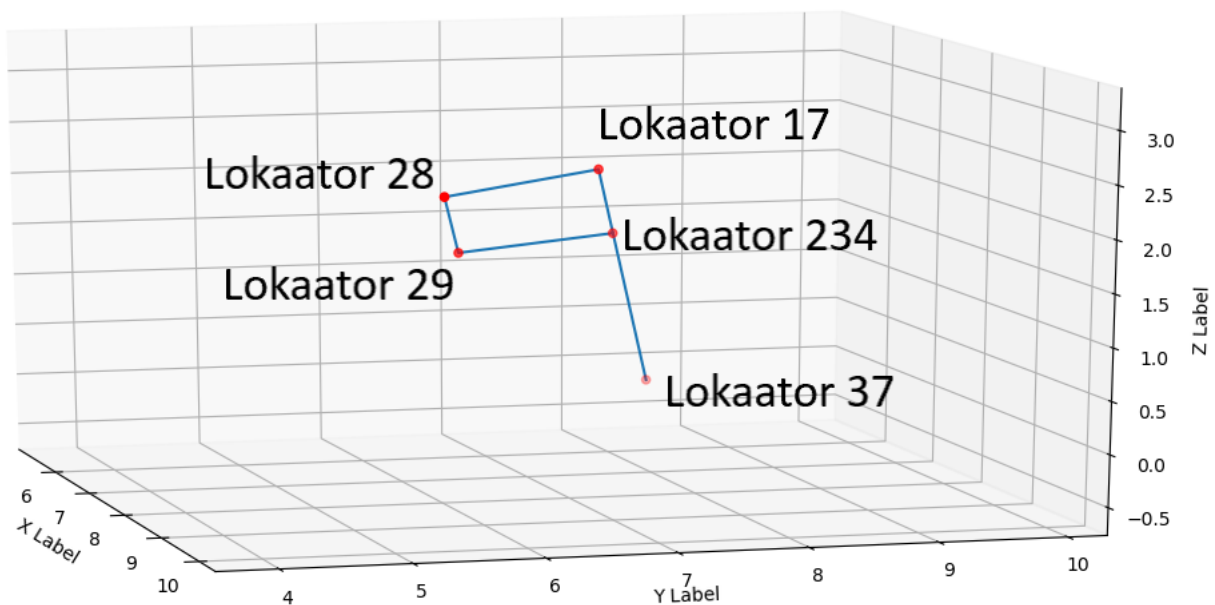
Alustades stseeni kaameratest, tuleb kõigepealt eraldada ImageModeler'ist vajalikud andmed kaamerate esialgsete asukohtade ja vaatamissuundade kohta. Peale kaamerate suundade ja koordinaatide transformeerimist on võimalik neid 3D mudelisse lisada. Põhifunktsioon, mis aitab graafiliselt nii 2D-s kui ka 3D-s kujutada nooli, on *quiver*, mida kasutatakse antud uurimustöös kaamerate visuaalseks kujutamiseks. Noole alguspunkt kujutab kaamera asukohti ning noole siht kaamera suunda. Sarnaselt töötab ka kõnealune funktsioon. Siin on väike lõik sellest, kuidas ta koodis välja näeb:

```
X, Y, Z, U, V, W = zip(*data)
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
ax.quiver(X, Y, Z, U, V, W)
```

Esimesel real on algandmed nime *data* all, mis on listide massiiv ning sisaldab infot nii kaamerate transformeeritud asukohtade kui ka suundade kohta. Funktsioon *zip* eraldab algandmed eraldi

korteežideks niikaua kuni sisendid lõppevad. Põhimõtteliselt eraldab see käsk *data* eraldi andmehulkadeks, et need oleks *quiver* funktsioonile „mõistetavad“. Teine ja kolmas rida on vajalikud käsud graafiku kujutamiseks 3D-s. Sellele aga järgneb viimane rida, kus *quiver*’i poolt koostatud nooled kujutatakse meie eelnevalt sätestatud 3D ruumis. Esimesed kolm argumenti *X*, *Y*, *Z* on kaamera asukoha andmed ning *U*, *V*, *W* on kaamera suunda kujutava vektori väärtused.

Ülejäänud objektide jaoks, mis stseenis esinevad, lähenetakse sarnaselt kuid lihtsamini. ImageModeler’st eraldatakse seekord objektide lokaatorid, mis aitaks kujutada tema kontuure ning mis oleksid omavahel lihtsasti ühendatavad. Enne lokaatorite väärtuste transformeerimist sarnaselt kaameratega uude koordinaatsüsteemi on vajalik paika panna järjekord, mida mööda saaks kogu kontuuri ühe joonega läbida. Toome lihtsa näite lipu puhul.



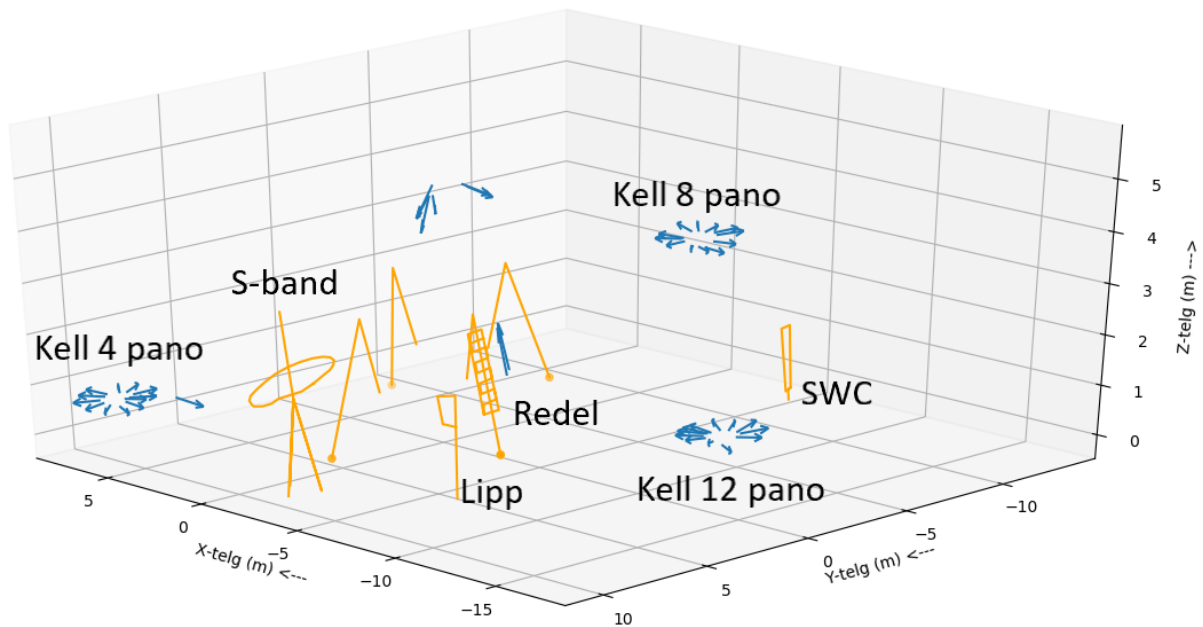
**Joonis 5** Lipu kontuurid kujutatud Pythoni abil

Joonisel 5 on lipu piirjoon kujutatud sinise värviga ning lokaatorid, mis teda ühendavad, punasega. Antud olukorras on joonisel kujutatud lokaatorite järjekorraks 37, 17, 28, 29 ja 234 .

```
X_flag, Y_flag, Z_flag = zip(*flag_dat)
ax.plot(X_flag, Y_flag, Z_flag, color='blue')
```

Eeltoodud kood on vajalik lipu kujutamiseks. Sarnaselt nooli kujutava koodiga sisaldavad väärtused *X\_flag*, *Y\_flag*, *Z\_flag* lipu lokaatorite transformeeritud XYZ-koordinaate ning käsuga *plot* on kujutatud sinine joon.

Kasutades neid teadmisi, saab kujutada ruumiliselt kaamerate ja erinevate objektide asukohti.



**Joonis 6** Lõplik stseeni mudel kujutanuna Pythonis

Joonisel 6 on kujutatud Apollo 14 maandumiskoha täisstseeni mudel 3Ds. Sinised nooled kujutavad kaamerate suundasid. Liikudes mööda pilti vasakult paremale on näha panoraame järgimises kellaosuti suundades: 4, 8 ja 12. Vasakpoolseima panoraamist paremal on näha *S-band* antenni, mille kõrval on lipp. Viimase taga on näha kuumooduli jalgu ning kella 12 panoraami vastas olevale jalale on kinnitatud ka redel ning SWC asub kella 8-st panoraamist paremal. Nooled, mis on tehtud kuumooduli jalgade kohalt, on jäädvustatud kuumooduli akendest ning kaks pilti, mis on tehtud redelist paremal, on kaks kaamerat, mis jätsid filmile Maa ja Veenuse asukoha taevaplaanil.

## 5 Mudeli täpsuse hindamine

### 5.1 Võrdluskauguse määramine

Mudeli täpsuse kontrollimiseks on käesolevas lõputöös välja valitud mõned silmajäävad objektid, mille dimensioone on võimalik võrrelda Apollo missiooni puudutavate manuaalide- ja dokumentidega. Esmalt tuletatakse meelde, kuidas esialgne koordinaatsüsteem ImageModeler'is loodi ning kuidas määrati algne suuruskaala objektide vaheliste kauguste määramiseks.

ImageModeler'is toimub koordinaatsüsteemi paika panemine kasutaja poolt määratud lokaatorite abil. Kasutaja saab ise valida endale sobiva koordinaatide alguspunkti, kust on võimalik välja lohistada soovitud suunad X-, Y- ja Z-telgede jaoks, sidudes need enda poolt valitud lokaatoritega. Algne koordinaatsüsteem oli määratud kuumooduli kella 8 jalataldriku keskkoha. Mõõtkava, mis on võimalikult korrektne ja reaalingimustele sarnane, on määratud kuumooduli jalasõlmede diagonaalide vaheliste kauguste põhjal, milleks on 5,954 m [12]. Selle määramiseks on võetud üks teadatuntud mõõtmega kuumooduli detail, mooduli jala taldriku läbimõõt, ning võrreldud selle ja jalasõlmede diagonaali pikslite suhet. Selle võrdluskauguse põhjal on paika pandud kogu mõõtkava, mida võrreldakse teiste objektide dimensioonidega, et kontrollida skaala täpsust.

### 5.2 Mõõtevigadest

Täpsete andmete puudumise tõttu on määramatuse põhjalik hindamine raskendatud. Määramatuse leidmiseks saab mõõta äratuntavate objektide dimensioone ImageModeler'i mudelis ning võrrelda neid suurusi dokumentides olevate väärtustega.

Kirjeldatud määramatused tekivad mudeli ebatäpsuste tõttu. Kuna lokaatoreid lisatakse kasutaja poolt manuaalselt vastavalt tema heakskiidu järgi, mida aga mõjutavad veel lisafaktorid, mis on välja toodud esimeses peatükis, siis võivad lokaatorite asukohad sisaldada vigu 2-3 cm ulatuses. Lisaks leiab tegelike suuruste ebatäpsus aset ka kättesaadavates allikates, kuna kõik väärtused on ümardatud tolli täpsusega.

### 5.3 Objektide dimensioonide võrdlus

#### 5.3.1 Redel

Esmalt vaadatakse kuumooduli kella 12 suunas asetseva jala küljes olevat redelit. Redeliastemete pikkus on 20 tolli ehk 51 cm ning astmetevaheline kaugus 9 tolli ehk 23 cm [13]. Oluline on mainida, et antud andmed on ümardatud tolli täpsusega, mistõttu töös kasutatud mudeli täpsus on suurem kui ümardamistäpsus. Osaline erinevus dokumendi ja mudeli andmete vahel on tingitud just ümardamisest, mitte mudeli vigadest. Mõõtes ära kõik vajalikud trepiastmete ja -vahelised pikkused,

saab järgmised tulemused. Redeli astmete keskmiseks väärtuseks tuli ca 51,8 cm ning astmete vaheliseks kauguseks saadi ca 22,0 cm.

### 5.3.2 *S-band* antenn

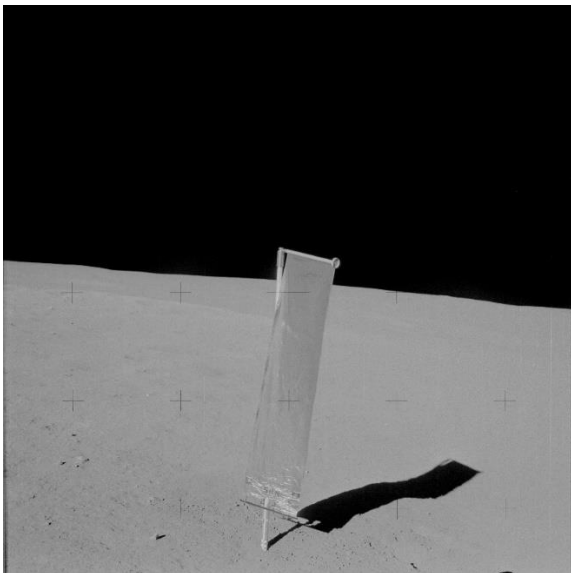
*S-band* antenni diski diameeter on umbes 3 m ja statiiv, millele ta toetub, on umbes 2 m kõrgusel kuupinnast (reguleeritav 150 – 200 cm)[14][15]. Diski läbimõõtuude määramiseks valiti diskil paiknevat kaks lokaatorit, mis läbisid ringi keskohta ning ei kaldunud sellest liiga palju kõrvale. Statiivi kõrguse määramiseks koostati pinnal paikneva kolme lokaatori põhjal tasandi võrrand, mille põhjal sai jalgade ristumiskoha koordinaadid projekteerida eelnevalt mainitud tasandile ning võrrelda Z-koordinaatide vahet ristumispunkti ja tasandi vahel. Diski keskmiseks läbimõõduks saadi ligikaudu 312,6 cm ja selle kõrgus kuupinnast umbes 184,7 cm.



**Joonis 7** *S-band* antenn koos lipuga

### 5.3.3 SWC

Kolmandaks on seadeldis Päikese tuule kompositsiooni mõõtmisteks ehk SWC (*Solar Wind Composition*). Antud seadeldis koosneb ülipuhtast alumiiniumpurjest ja raamist, mis seda paigal hoiab. Purje dimensioonid on 140 cm korda 30 cm [16]. Kuna purje lahti pakkimine ja õige nurga valimine moonutas ning kortsutas purje kuju, siis olid purje tegelikud mõõtmed peale paigaldust 33,9 cm korda 126,7 cm.



**Joonis 8** *Solar Wind Composition Experiment*

#### 5.3.4 Lipp

Kuna lipu konstruktsioon koosnes teleskoopilisest vardas, siis oli võimalik selle kõrgust reguleerida, kuid oma täispikkuses oli varras umbes 2 meetri kõrgune 38[14]. Lipuvarra disainimisel olulist rolli mänginud Jack Kinzleri poolt loodud algse sketši kohaselt oli varra maksimaalne kõrgus 82 tolli ehk 208 cm [17]. Fotogrammmeetrilise analüüsi käigus oli võimalik tuvastada, et lipuvarras, mis püstitati Apollo 14 maandumiskoha juures, oli umbes 202,4 cm kõrge.



**Joonis 9** *Alan Shepard koos Ameerika lipuga (pildistatud Edgar Mitchelli poolt)*

### 5.3.5 Võrreldavate objektide koondtabel

**Tabel 1** Dimensioonide võrdlused

	Dokumentide alusel (cm)	Uurimistöö alusel (cm)	Standardhälve (cm)
Redeli astmete laius	51	51,8	0,5
Redeli astmetevaheline kaugus	23	22,0	0,9
<i>S-band</i> antenni diski läbimõõt	308	312,6	4,0
<i>S-band</i> antenni diski kõrgus kuupinnast	150 - 200	184,7	-
SWC pikkus	30	33,9	1,6
SWC laius	140	126,7	0,5
Lipp	208	202,4	-

Tabelis olevatel, diski kõrgustel kuupinnast ning lipu, andmetel puuduvad standardhälvete väärtused, sest nende mõõtmete leidmisel ei ole kasutatud keskmistatud väärtuseid. Kuna ülejäänud andmete korral on leitud standardhälve kogu andmehulga põhjal, siis on kasutatud selle leidmiseks valemit

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - x_i)^2}{n}}, \quad (17)$$

kus  $x$  on kõikide mõõtmete keskmine väärtus, mis on leitud valemi (4) põhjal,  $x_i$  on väärtus antud andmehulga ja  $n$  on andmehulga maht.

Tabeli viimase veeru analüüsist selgub, et väärtused, mis puudutavad redeli ning SWC laiust ja pikkust, on leitud üsna väheste vahelduvusega andmete põhjal. SWC pikkuse suurem erinevus tuleneb suure tõenäosusega alumiinumpurje omapärasest moonutusest. Põhiline väärtus, mis silma torkab on *S-band* antenni iseloomulikult suur standardhälve. See on põhjustatud asjaolust, et antenni diski ribade otstele polnud võimalik erinevate nähtavust takistavate asjaolude tõttu lokaatoreid korralikult lisada.

### 5.4 Kaamerate orientatsiooni täpsuse hindamine Veenuse näiva kauguse järgi

Vaatekiired, näiteks Veenuseni, peaksid olema reaalsuses paralleelsed. Selleks, et leida, mis kaugusel Veenus antud koordinaatsüsteemis asub, tuleb tema vektor määrata Veenusele vastava lokaatori ja pildistava kaamerate keskmistatud koordinaatide abiga, kasutades valemit (2). Nende koordinaatide abil on võimalik moodustada vastavad vektorid ning sarnaselt valemile (5) lahutatakse Veenuse

lokaatori vektorist kaamera asukoha vektor, mille tulemuseks on Veenuse vektor, mille moodul antud süsteemis on ligikaudu 100 m.

Peale kahe kaamera vahelise nihke ja hinnangulise Veenuse kauguse teadasaamist on võimalik leida nurk kahe kaamera vaatesuuna vea hindamiseks. Selleks on kasutatud valemit (6), kus  $s$  on kahe kaamera vaheline kaugus ja  $r$  on moodul ehk Veenuse kaugus ImageModeler'i mudelis. Valemist

$$\theta = \frac{s}{r} \quad (18)$$

on avaldatud  $\theta$  ning saadud tulemuseks

$$\theta = 0,1^\circ.$$

Seega võib väita, et individuaalsete kaamerate orienteerimise täpsus on suurusjärguliselt kümnendik kraadi.

## 5.5 Kaamerate orientatsiooni täpsuse hindamine vilude järgi

Eespool olevas peatükis, kus räägiti Päikese asukoha määramisest, selgitati, et Päikse ühikvektor koostati lipu ja antenni vilude abil. Kahe objekti vilude järgi saadud päikese suunavektorid peavad olema reaalsuses paralleelsed, aga mudeli ebatäpsuse tõttu on nende vektorite vahel olemas väike nurk. Selle nurga saab määrata järgmise valemi põhjal:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{|\vec{v} \cdot \vec{m}|}{\|\vec{m}\|}\right). \quad (19)$$

Valemis olevad  $\vec{v}$  ja  $\vec{m}$  on päikese suunavektorid. Antud uurimistöö mudelis on antenni ja lipu poolt koostatud vektorite vaheline nurk ligikaudu

$$\alpha = 0,1^\circ.$$

Seega on Päikese vilude suunavektorid saamas suurusjärgus nagu Maa ja Veenuse kaamerad.

## 5.6 Kuumooduli kaldenurga arvutamine

Tulenevalt laskumisnurkadest ja selle mõjust maandumiskoha nähtavusele, pidid Apollo 14 astronautid Shepard ja Mitchell maanduma künkale, mis jättis nende kuumooduli kerge nurga alla. Dokumendis, mis analüüsib Apollo kuumoodulite maandumisdünaamikat, on kirjas, et Apollo 14 moodul maandus Kuul  $7,1^\circ$  nurga all [18]. Kasutades fotogrammmeetrilist analüüsi on võimalik seda väärtust kontrollida. Selle hindamiseks on võimalik leida kuumooduli jalasõlmede koordinaadid, nende pikitelgede ühikvektorite põhjal koostada kuumooduli horisontaalpinna normaalvektor ning lõpuks leida nurk



kuumooduli normaalvektori ja lokaalse vertikaali vahel. Valem normaalvektori arvutamiseks on järgmine:

$$\vec{n} = \vec{v} \times \vec{p} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \end{vmatrix}. \quad (20)$$

Esmalt leitakse nelja sõlme<sup>3</sup> koordinaadid, mis teisendatakse ja nihutatakse uude koordinaatsüsteemi. Saadud punktidest koostatakse seejärel viis erinevat vektorit, mille omavahelistest ristkorrutistest leitakse vastavalt valemile (20) neli erinevat kuumooduli kalde normaalvektorit. Uued vektorid teisendatakse ühikvektoriteks, peale mida leitakse keskmine ühikvektori väärtus valemite (4) ja (7) kohaselt, mille tulemusena jäävad järgi viimase vektori X-, Y- ja Z- koordinaadid.

Viimase kaldenurga saamiseks leitakse esmalt kohaliku vertikaali ja jalasõlmede poolt koostatud tasandi normaalvektori vaheline nurk vastavalt valemile (19). Peale viimase keskmistatud normaalvektori leidmist ning valemi (19) rakendamist, saadi kätte nurk, mille väärtuseks on ligikaudu

$$\alpha = 7,1^\circ,$$

mis on praktiliselt võrdne kuumooduli navigatsiooni arvuti poolt mõõdetud väärtusega.

## 5.7 Antenni suund Maale

Püstitatav *S-band* antenn oli olemas juba Apollo 11 missioonil<sup>4</sup>, kuid leidis kastust alles Apollo 12 ja 14 missioonidel. Tegemist oli antenniga, mis pakkus astronautide ja Houstoni vahel tugevamat televisiooni signaali. Paigaldamisel oleks teoorias pidanud piisama ainult ühest inimesest, kuid praktikas oli antenni paigaldamine kahe mehe töö. Pärast seda, kui antenni umbkaudne suund oli paigas, pidid Shepard ja Mitchell koos antenni täpse suuna Maale paika saama. Samal ajal kui üks astronautidest, vaadates läbi spetsiaalse sihiku ja tegi kohandusi kõrgusnurga osas, hoidis teine antenni võimalikult paigal, et see ümber ei kukuks [15].

Selleks, et kontrollida kui täpselt astronautid antenni Maale suunasid, on oluline ImageModeler'is leida antenni ja Maa suunavektorid ning võrrelda neid omavahel. Kuna Maa suunavektori leidmisest on juba eelvas alampeatükis kirjutatud, siis sellel teemal käesolevas alampeatükis pikemalt ei peatuta.

Antenni suunavektori leidmine antud olukorras on sarnane Päikese suunavektori leidmisega, kuid seekord on oluline vaid antenni diski keskoht ning antenni tipu koordinaadid, et valemi (5) abil saaks koostada antenni suunavektori.

<sup>3</sup>Jalasõlmed olid peamised tugevate liitmikud, mis fikseerisid omavahel kuumooduli struktuuri raketti külge.

<sup>4</sup>Apollo 11 missioonil otsustati seda mitte püstitada aja säästmiseks, kuna raadiosignaali läbi kuumooduli antenni oli piisavalt tugev [15].

Kui mõlemad suunavektorid on käes, saab need panna valemisse (19), mis annab tulemuseks

$$\alpha = 0,9^\circ.$$

Tulemuse põhjal saab järeldada, et antenni Shepardi ja Mitchelli poolt antud mudelis oli üpriski täpselt püsti pandud. Andmed, mis puudutavad antenni tõelist suunanurka, on kahjuks puudlikud ja seetõttu ei ole võimalik leida, kui suur on reaalne sihtimisviga, kuid võib leida, kui suur on mudeli maksimaalne eksimisviga. Antenni varda suunavektorit saab kujutada kahe suunavektori kaudu, millest kumbki võib varieeruda maksimaalselt 3 cm ulatuses. See tähendab, et lokaatorite summaarsed positsioneerimisvead võivad halvimal juhul olla 6 cm. Kasutades ImageModeler'i andmeid, on võimalik tuvastada, et antenni varda pikkus on ca 1,7 m. Kasutades valemit (18), saab kätte maksimaalse vea nurga, milleks on

$$\theta = 1,9^\circ.$$

Seega on kõrvalekalde väärtus mõõtemääramatuse vahemiku sees ehk  $0 < \alpha < 1,9^\circ$ . Kui varras oleks pikem, oleks määramatus väiksem. Siinkohal kehtib lihtne üldine reegel: mida pikem on objekt, seda täpsem on tema suuna määramine, sest suuna määramise täpsus sõltub individuaalsete lokaatorite asukohtade määramise täpsusest. Et saada ettekujutus, kui täpselt peaks antenn olema Maale suunatud ehk leida tema suunadiagrammi väärtus, kasutatakse valemit

$$\theta = k \frac{\lambda}{d}, \quad (21)$$

kus  $k$  on antenni kujust ja peegeldusest sõltuv kordaja,  $\lambda$  on raadiolaine pikkus ja  $d$  on eelnevalt leitud antenni läbimõõt. Seega on oluline teada kordaja ja lainepikkuse väärtuseid. Ligikaudse hinnangu saamiseks kasutatakse  $k$  korral väärtust  $70^\circ$ , mis on tüüpiline väärtus paraboolse antenni jaoks [19]. Apollo 14 missiooni korral kasutati andmemahu üleslaadimiseks sagedust mis on umbes 2200 MHz ehk selle lainepikkus oleks umbes 0,14 m [20]. Kasutades eespool leitud antenni läbimõõdu pikkust, mis on märgitud Tabelis 1, on *S-band* antenni suunanurgaks valemi (21) põhjal umbes  $3^\circ$ . Seega on antenni kiirguslaius suurem, kui Maa ketta nurkläbimõõt ning antenni suunamise viga ei mängi suurt rolli.

## Kokkuvõte

Käesolev fotogrammmeetrilise analüüsi mudel Apollo 14 maandumiskoha piirkonnast võtab enda alla 45 Hasselblad kaamerate poolt jäädvustatud pildi põhjal koostatud ala, millest 6 on tehtud kuumooduli seest ning ülejäänud mooduli ümber.

Andmete kogumiseks kasutatud tarkvara abil tuleb analüüsida pilte. Koostatud mudeli täpsust saab kontrollida reaalsete objektide mõõtmete tulemuste võrdluse kaudu. Esialgu luuakse pilditest ImageModeler'is 3D mudel, mille koordinaatteljed ja suunad teisendatakse paika Horizons astrosimulaatori poolt väljastavate andmete põhjal. Kasutades koordinaattelgede pööramise valemeid ja vektoralgebrad, on võimalik luua ettekujutus maandumiskoha stseenist, mille paigutus on defineeritud kolme pildistatud taevakeha kaudu.

Koostatud stseeni mudeli ja mõõtkava määramise abil saab leida erinevate kuumooduli ümber paiknevate objektide mõõtmed, mida on võimalik võrrelda dokumentide poolt pakutud väärtustega. Kui erinevates manuaalides ja muudes allikates on erinevate tehnikavahendite mõõtmed ümardatud tolli täpsusega, siis käesoleva uurimistöö mudel pakub väärtuseid, mis on ümardatud sentimeetri täpsusega. Antud uurimistöö mudel lubab ka leida objektide moonutustest tulenevad dimensioonide muutused, mistõttu vahelduvad lahti pakitavate tehnikavahendite, näiteks SWC, mõõtmed rohkem kui näiteks redeli omad.

Fotogrammmeetrilise analüüsi põhjal on võimalik kontrollida ka muid olulisi aspekte nagu näiteks kuumooduli kaldenurka kuupinna suhtes. Selgub, et antud uurimistöös esitatud väärtus on väga heas kooskõlas NASA poolt avaldatud andmetega. Lisaks on antud uurimistöös leitud nurk, mis näitab kui täpselt suutsid astronautid Shepard ja Mitchell *S-band* antenni Maale suunata, mida üksikpiltide analüüsist kuidagi näha pole. Fotogrammmeetrilise analüüsi põhjal selgub, kuidas erinevad objektid, kehad ja pildistavad kaamerad omavahel üksteise suhtes paiknevad.

Mudeli täiendamiseks on kindlasti veel arenguruumi. Antud töö uuris ainult kuumooduli maandumispaika, kuid Apollo 14 missioonil kasutati ka veel MET käru, mille abil liikusid nad teistesse uurimispaikadesse, kus nad samuti suurel hulgal erinevaid pilte tegid. Lisaks on NASA lubanud uuesti Kuule naasta mehitatud missioonide kujul, mille käigus on tulevikus võimalik omandada veelgi suurema kvaliteetiga pilte, mida saab kasutada tulevasteks selenoloogilisteks uuringuteks.

## Tänuavaldused

Eelkõige sooviksin tänada oma juhendajat oma suure abivalmiduse, toetava ja suunava rolli tõttu, kes suutis leida aega nii tööpäevadel kui ka riiklikel pühadel, et olla valmis selgitama või aitama töö erinevate aspektide osas. Tema pühendumus ja põhjalikkus on olnud suureks inspiratsiooniks ning motivaatoriks antud bakalaureusetöö kirjutamisel. Kindlasti soovin tänada ka oma elukaaslast, kes mängis väga tähtsat osa nii töö vormistamisel, ortograafiliste paranduste tegemisel kui ka matemaatiliste arvutuste kontrollimisel ja täiustamisel. Nimelt oleks ilma temata see töö olnud suures osas mitteloetav ning antenni disk seisaks kuupinnast valel kõrgusel. Lisaks avaldan ka suured tänuavaldused ka oma sõpradele ja pereliikmetele, kes olid kõik abiks õigekirja ja grammatika kontrollimisel.

## Kasutatud kirjandus

- [1] Skimming the Moon. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera, 2011. [Internet]. Link: <http://lroc.sese.asu.edu/posts/379>. [Kasutatud 28 juuli 2021].
- [2] Witt M, Rowe J. As Artemis Moves Forward, NASA Picks SpaceX to Land Next Americans on Moon. Moon to Mars. NASA, 2021. [Internet]. Link: <https://www.nasa.gov/press-release/as-artemis-moves-forward-nasa-picks-spacex-to-land-next-americans-on-moon>. [Kasutatud 25 juuli 2021].
- [3] Apollo 14 missioon. Mission Photography. Lunar and Planetary Institute, 2019. [Internet]. Link: [https://www.lpi.usra.edu/lunar/missions/apollo/apollo\\_14/photography/](https://www.lpi.usra.edu/lunar/missions/apollo/apollo_14/photography/). [Kasutatud 25 juuli 2021].
- [4] Biogon f/5.6-60 mm. Carl Zeiss. [Internet]. Link: [https://www.hq.nasa.gov/alsj/Biogon5.6\\_60mm\\_ZEISS.pdf](https://www.hq.nasa.gov/alsj/Biogon5.6_60mm_ZEISS.pdf). [Kasutatud 25 juuli 2021].
- [5] Réseau plate. Apollo Lunar Surface Journal, 2003. [Internet]. Link: <https://www.hq.nasa.gov/alsj/alsj-reseau.html>. [Kasutatud 25 juuli 2021].
- [6] Apollo 14. 70mm Hasselblad Image Catalog. Apollo Image Atlas. Lunar Surface Journal, 2019. [Internet]. Link: <https://www.lpi.usra.edu/resources/apollo/catalog/70mm/mission/?14>. [Kasutatud 25 juuli 2021].
- [7] HORIZONS Web-Interface. Jet Propulsion Laboratory. [Internet]. Link: <https://ssd.jpl.nasa.gov/Horizons.cgi>. [Kasutatud 25 juuli 2021].
- [8] Apollo 14 Timeline. [Internet]. Link: [https://history.nasa.gov/SP-4029/Apollo\\_14i\\_Timeline.htm](https://history.nasa.gov/SP-4029/Apollo_14i_Timeline.htm). [Kasutatud 25 juuli 2021].
- [9] Lunsford DR, Jones EM. Venus over the Apollo 14 LM. Apollo Lunar Surface Journal, 2007. Link: <https://www.hq.nasa.gov/alsj/a14/a14Venus.html>. [Kasutatud 25 juuli 2021].
- [10] Jones EM. Apollo 14 Image Library. Apollo 14 Multimedia, 1996. [Internet]. Link: <https://history.nasa.gov/alsj/a14/images14.html>. [Kasutatud 25 juuli 2021].
- [11] Cain F. The Moon and Venus. Universe Today, 2002. [Internet]. Link: <https://www.universetoday.com/19936/the-moon-and-venus/>. [Kasutatud 25 juuli 2021].
- [12] Virtual AGC — AGS — LVDC — Gemini. [Internet]. Link: [https://www.ibiblio.org/apollo/Documents/LM\\_Structures/](https://www.ibiblio.org/apollo/Documents/LM_Structures/). [Kasutatud 28 juuli 2021].

- [13] Quick Reference Data. Lunar Module. Apollo News Reference. [Internet]. Link: [https://www.hq.nasa.gov/alsj/LM04\\_Lunar\\_Module\\_ppLV1-17.pdf](https://www.hq.nasa.gov/alsj/LM04_Lunar_Module_ppLV1-17.pdf). [Kasutatud 25 juuli 2021].
- [14] Fincannon J. Jones EM. Apollo 14 Flag Deployment. Apollo Lunar Surface Journal, 2012. [Internet]. Link: <https://www.hq.nasa.gov/alsj/a14/a14FlagDeployment.html>. [Kasutatud 25 juuli 2021].
- [15] Working on the Moon. Lessons from Apollo. Erectable *S-band* Antenna Deployment", 2010. [Internet]. Link: <https://www.workingonthemoon.com/WOTM-Erectable-S-band.html>. [Kasutatud 25 juuli 2021].
- [16] Apollo 14 Mission. Science Experiments. Lunar and Planetary Institute, 2019. [Internet]. Link: [https://www.lpi.usra.edu/lunar/missions/apollo/apollo\\_14/experiments/swc/](https://www.lpi.usra.edu/lunar/missions/apollo/apollo_14/experiments/swc/). [Kasutatud 25 juuli 2021].
- [17] Platoff A. Where No Flag Has Gone Before: Political and Technical Aspects of Placing a Flag on the Moon. NASA Contractor Report 188251, 1993. [Internet]. Link: <https://www.hq.nasa.gov/alsj/alsj-usflag.html>. [Kasutatud 25 juuli 2021].
- [18] George A. Zupp, PhD. Apollo 14 Lunar Landing. An Analysis and a Historical Review of the Apollo Program Lunar Module Touchdown Dynamics, 2013. Peatükk 7.4. [Internet]. Link: <https://www.lpi.usra.edu/lunar/documents/SP-2013-605.pdf>. [Kasutatud 28 juuli 2021].
- [19] Minoli D. Satellite Systems Engineering in an IPv6 Environment, 2009. Lk. 78. [Internet]. Link: [https://books.google.ee/books?id=4yJi1UQDPp8C&q=%22beamwidth%22+%22parabolic+antenna%22&pg=PA80&redir\\_esc=y#v=snippet&q=%22beamwidth%22%20%22parabolic%20antenna%22&f=false](https://books.google.ee/books?id=4yJi1UQDPp8C&q=%22beamwidth%22+%22parabolic+antenna%22&pg=PA80&redir_esc=y#v=snippet&q=%22beamwidth%22%20%22parabolic%20antenna%22&f=false). [Kasutatud 28 juuli 2021].
- [20] Signal Characteristics . The Apollo Unified S Band Communications System. AB9IL.net, 2005. Link: <https://www.ab9il.net/aviation/apollo-s-band.html>. [Kasutatud 28 juuli 2021].
- [21] Joonis genereeritud V.-V. Pustõnski poolt kirjutatud arvutikoodi abil.

## Lisad

### Lisa 1 Transformeerimata kaamerate andmed

ID – kaamera identifitseerimisnumber

X, Y, Z – kaamera asukoha koordinaadid

RX, RY, RZ - rotatsioonid vastavate telgede suhtes algasendist (0, 0, -1).

ID	X	Y	Z	RX	RY	RZ
9255	14.9968	-3.63932	1.77541	87.9441	-6.3981	58.6135
9277	-7.38704	-3.07077	0.936211	97.5494	-1.37131	-71.8345
9258	13.299	-3.37784	1.50513	75.0562	-4.5603	59.4279
9305	1.94309	15.7018	1.95608	92.7092	5.28784	-161.652
9257	15.2572	-3.44364	1.83391	93.3358	-6.91721	26.824
9307	1.57182	15.6742	1.92219	90.3585	4.68106	167.792
9253	14.7071	-3.91147	1.74005	85.1662	-2.64388	95.7961
9236	15.2866	-3.32368	1.80271	89.4095	-7.83966	14.5428
9303	2.21347	15.802	2.00936	94.5416	4.71771	-131.62
9326	4.99188	1.60054	5.02732	62.2393	-8.49394	-67.1647
9238	15.6097	-3.15794	1.8009	91.1215	-5.46912	-4.72871
9275	-7.44503	-2.56767	0.927067	97.247	-4.6255	-34.0988
9340	5.14375	1.60019	4.84618	57.8874	-9.3566	-46.0646
9309	1.34886	15.8269	1.90302	87.2346	2.62141	136.966
9273	-7.57609	-2.41807	0.898786	94.1074	-4.71905	-6.91091
9322	3.84143	1.53617	4.83153	72.4103	-1.97201	64.5472
9279	-7.46846	-3.46337	0.910019	97.6134	2.78867	-107.423
9251	14.8276	-4.22045	1.74826	85.7215	0.224944	128.71
9281	-7.72799	-3.78126	0.823636	94.4623	4.80436	-141.774
9283	-8.11879	-3.85294	0.874852	91.7109	4.91842	-175.481
9311	1.19888	16.1214	1.89823	90.3427	0.598584	107.117
9249	14.9702	-4.4867	1.71433	87.3721	0.617669	158.187
9214	3.70201	1.65593	4.77331	78.8663	-7.593	38.5856
9313	1.24287	16.4487	1.93914	88.7208	-3.44305	73.3266
9315	1.54565	16.7006	1.97146	91.6633	-6.26438	34.046
9271	-7.81357	-2.36736	0.845069	89.1722	-6.96927	16.6782

9285	-8.51436	-4.08675	0.766152	89.1528	3.38439	153.309
9287	-8.56291	-3.69898	0.807014	84.7554	0.583279	121.451
9289	-8.74927	-3.3513	0.818044	85.5855	-2.02129	89.96
9291	-8.74497	-3.15742	0.802923	89.7437	-5.86239	63.0796
9293	-8.39015	-2.76223	0.800665	90.2404	-7.34359	26.9292
9301	2.41592	16.0088	2.03714	98.5362	2.1314	-105.818
9205	5.14272	1.5738	4.84578	77.6392	3.79232	-56.034
9299	2.48579	16.2932	2.06209	100.502	-0.273357	-73.4029
9204	5.0553	1.69584	4.85494	80.9107	3.29205	-23.1409
9297	2.42089	16.7116	2.06087	101.754	-6.4452	-40.7796
9295	2.23003	16.9305	1.99548	93.0277	-8.67816	-9.98534
9190	3.82564	4.18553	1.46657	152.86	1.80168	-171.485
9196	3.70499	4.15347	1.55078	154.36	0.523071	-159.513
9240	15.8521	-3.3615	1.83998	93.4838	-4.17433	-38.2053
9242	15.9903	-3.58488	1.865	95.5038	-1.75587	-67.0001
9244	15.9766	-3.94204	1.85145	95.0686	0.781741	-103.207
9246	15.6909	-4.13776	1.83837	93.2311	2.41412	-130.754
9247	15.4953	-4.37991	1.80878	91.2396	4.02195	-155.085
9304	2.06905	15.6982	1.96596	93.6555	5.03276	-148.572



## Lisa 2 Transformeeritud kaamerate andmed

EL\_uus – kõrgusnurk

AZ\_uus - suunanurk

ID	X	Y	Z	EL_uus	AZ_uus
9255	6.469638	9.306969	0.728569	2.25727	-132.196
9277	-0.3178	-11.9773	2.452952	0.447956	-2.19383
9258	5.74739	7.727333	0.644559	-10.5485	-133.306
9305	-15.7481	2.220954	1.549079	3.058709	87.72242
9257	6.353838	9.616389	0.747826	4.032477	-100.594
9307	-15.8249	1.855245	1.559519	4.263406	118.1752
9253	6.650429	8.951376	0.739075	2.018421	-169.442
9236	6.247204	9.67366	0.708109	-1.41049	-88.4075
9303	-15.7693	2.512905	1.566274	1.297921	57.8496
9326	-1.39041	1.615938	4.87551	-34.5292	-1.99537
9238	6.178311	10.02716	0.661624	-1.97843	-69.2485
9275	-0.81695	-11.8949	2.428073	1.408992	-40.0016
9340	-1.34571	1.738285	4.678255	-38.4089	-23.4464
9309	-16.0335	1.682465	1.559393	3.631949	149.0617
9273	-0.99688	-11.9821	2.408441	0.765155	-66.9828
9322	-1.64775	0.477366	4.816837	-12.6883	-139.142
9279	0.036704	-12.1665	2.453911	2.061427	33.59652
9251	6.98066	8.982023	0.747135	2.50028	157.4843
9281	0.270389	-12.5122	2.41235	2.381436	67.92009
9283	0.22953	-12.8982	2.511466	3.743614	101.4812
9311	-16.3581	1.620144	1.558775	7.432526	179.099
9249	7.276489	9.04033	0.708919	2.221203	127.981
9214	-1.80105	0.370322	4.769795	-9.0119	-112.124
9313	-16.6606	1.757408	1.57966	4.327442	-146.955
9315	-16.8182	2.119508	1.565534	3.24149	-107.753
9271	-1.11131	-12.2011	2.380268	-1.38486	-90.5365
9285	0.344738	-13.3532	2.459696	4.418806	132.6696
9287	-0.04158	-13.2875	2.488506	1.749293	164.7122

9289	-0.42757	-13.3678	2.505406	2.209217	-163.676
9291	-0.61236	-13.3121	2.481236	4.48336	-136.68
9293	-0.8927	-12.8651	2.420386	0.950041	-100.709
9301	-15.9117	2.766364	1.561235	2.859059	31.88757
9205	-1.32066	1.729975	4.679157	-19.235	-19.1002
9299	-16.1655	2.914497	1.565215	3.415874	-0.53806
9204	-1.46235	1.681435	4.692876	-13.9498	-52.263
9297	-16.5853	2.967897	1.552783	5.466806	-33.8585
9295	-16.8481	2.838282	1.500128	-0.64736	-64.1688
9190	-4.15963	0.778367	1.36109	63.94553	87.12131
9196	-4.16345	0.664892	1.460007	63.66755	72.20914
9240	6.441029	10.20689	0.681539	-2.62969	-35.8438
9242	6.69383	10.2801	0.70041	-1.60245	-6.98278
9244	7.033081	10.16684	0.704516	-0.80006	29.30447
9246	7.141364	9.838893	0.733251	-0.11322	56.89731
9247	7.319566	9.581989	0.737284	0.776558	81.22509
9304	-15.7095	2.341252	1.544511	2.392506	74.70175

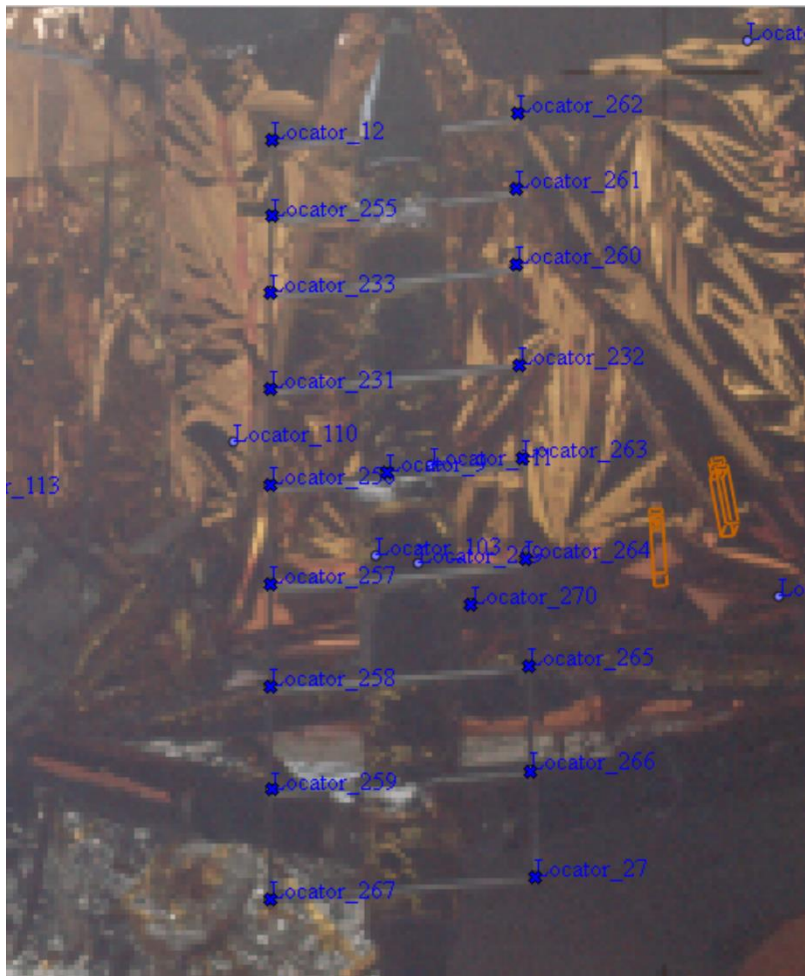
### Lisa 3 Lipu lokaatorite transformeeritud koordinaadid

ID	X_flag	Y_flag	Z_flag
37	-6.382781	5.394061	-0.391585
17	-6.225925	5.272164	1.622624
28	-5.018068	4.980268	1.462155
29	-5.156509	4.879374	0.919688
234	-6.274255	5.303611	1.014099



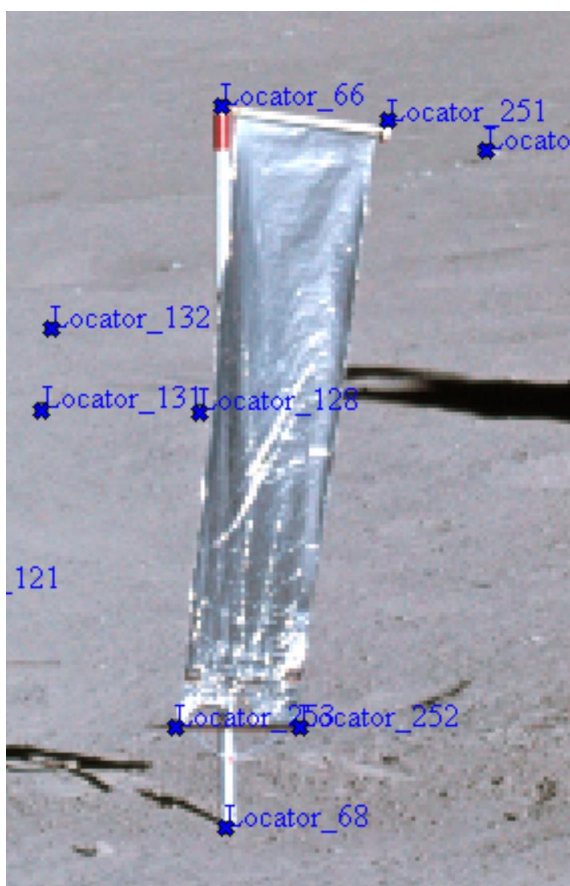
#### Lisa 4 Redeli lokaatorite transformeeritud koordinaadid

ID	X_ladder	Y_ladder	Z_ladder
261	-3.169308	0.95976	2.021964
255	-3.019122	1.448038	1.954238
233	-3.140401	1.454585	1.794624
260	-3.292198	0.968036	1.861554
232	-3.392878	0.967769	1.657713
231	-3.248422	1.456831	1.593949
256	-3.350129	1.458658	1.39937
263	-3.495567	0.965627	1.470691
264	-3.595024	0.966039	1.273854
257	-3.46134	1.458004	1.203242
258	-3.555531	1.460612	1.003922
265	-3.700161	0.964045	1.066712
266	-3.797976	0.967576	0.868849
259	-3.662442	1.459285	0.80614
267	-3.761335	1.462571	0.59905
27	-3.916551	0.966107	0.672169
262	-3.049882	0.946703	2.182769
12	-2.881638	1.443211	2.119537



## Lisa 5 SWC lokaatorite transformeeritud koordinaadid

ID	X_SWC	Y_SWC	Z_SWC
68	-9.860712	-7.733825	0.590208
253	-9.821746	-7.857458	0.813885
66	-9.805363	-7.723893	2.069233
251	-9.735832	-7.378563	2.026296
252	-9.88733	-7.543643	0.77448



Lisa 6 *S-band* antenni lokaatorite transformeeritud koordinaadid

ID	X_Sband	Y_Sband	Z_Sband
36	0.339696	7.409398	2.824787
238	-0.354486	7.489264	1.198669
237	0.308302	7.306088	-0.635621
39	-0.999553	6.963564	-0.631541
38	-0.662092	8.254497	-0.638189
21	0.256702	6.025192	1.295111
242	-0.127952	5.945838	1.469509
22	-0.584311	5.970911	1.64515
241	-0.957622	6.148089	1.794587
23	-1.31131	6.425908	1.948766
59	-1.535362	6.806249	2.06672
239	-1.643982	7.255549	2.132328
34	-1.633394	7.721297	2.147377
61	-1.491353	8.158814	2.108663
240	-1.237231	8.546942	2.018965
35	-0.900223	8.828116	1.882375
235	-0.530191	8.985561	1.710906
236	-0.117617	9.014765	1.530182
246	0.356575	8.919793	1.335887
244	0.702852	8.685293	1.176034
245	0.986152	8.330086	1.037393
249	1.312089	7.959241	0.929959
250	1.326568	7.503833	0.88679
248	1.322566	7.094916	0.898724
247	1.28789	6.783392	0.966783
243	0.643317	6.258616	1.121549





## Lisa 7 Animatsioon telgede pööramisest

Siin on QR koodiga toodud välja GIF faili koordinaatide pööramise etappide kohta. Joonistel on välja toodud nelja erineva värviga vektorid. Roheline tähistab Maale, lilla Veenusele ja punane Päikesele vastavat ühikvektorit. Nende vektorite skaalat on vähendatud poole võrra, et rõhutada viimast, sinist vektorit, mis tähistab kolme tavakeha keskmist vektorit. Mustade nooltega on välja toodud XYZ-koordinaattelgede positiivsed suunad. Animatsioon koosneb seitsmest sammust:

1. Vektorite algne positsioon.
2. Telgede pööramine Z-telje suhtes  $80,11^\circ$  võrra.
3. Telgede pööramine Y-telje suhtes  $49,77^\circ$  võrra.
4. Telgede pööramine X-telje suhtes  $-11,03^\circ$  võrra.
5. Telgede pööramine Y-telje suhtes  $-50,65^\circ$  võrra.
6. Telgede pööramine Z-telje suhtes  $-87,79^\circ$  võrra.
7. Viimane positsioon ehk telgede pööramine Z-telje suhtes  $90^\circ$  võrra.

