



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
EESTI MEREAKADEEMIA
Merenduskeskus

Artjom Zingfeld

**Avatud lähtekoodiga tarkava analüüs Pakri pankranniku 3D
mudeli konstrueerimise jaoks**

Lõputöö

Juhendaja: dotsent Inga Zaitseva-Pärnaste

Kaasjuhendaja: prof. Heiko Jens Herrmann

Tallinn, 2021

Olen koostanud töö iseseisvalt.

Töö koostamisel kasutatud kõikidele teiste autorite töödele, olulistele seisukohtadele ja andmetele on viidatud.

Artjom Zingfeld

27.07.2021

(allkiri, kuupäev)

Üliõpilase kood: 178466VDVR

Üliõpilase e-posti aadress: armaka@ttu.ee

Juhendaja dotsent Inga Zaitseva-Pärnaste:

Töö vastab lõputööle esitatud nõuetele

.....

(allkiri, kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees: dotsent Inga Zaitseva-Pärnaste

Lubatud kaitsmisele

.....

(ametikoht, nimi, allkiri, kuupäev)

Sisukord

Annotatsioon.....	4
Sissejuhatus	5
1 Teoreetilised põhimõtted	8
1.1 Varasemate tööde ülevaatus antud valdkonnas.....	8
1.2 Fotogrammeetria	10
1.3 Avatud lähtekoodiga tarkvara teoreetiline tutvustus.....	11
1.3.1 OpenDroneMap	12
1.3.2 COLMAP	13
1.3.3 Meshlab	13
1.4 Pakri pankranniku seire küsimused	13
2 Analüüs ja töö olemasolevate andmetega.....	15
2.1 Metoodika kirjeldus (välitööd)	16
2.2 Metoodika kirjeldus (tarkvara)	19
2.2.1 TalTech klatri ja pilvega ühendamine.....	20
2.2.2 Ettevalmistused tarkvara tööks.....	21
2.2.3 OpenDroneMap	22
2.2.4 COLMAP	25
2.2.5 Meshlab	28
3 Analüüsi tulemused	32
3.1 OpenDroneMap	32
3.2 COLMAP.....	33
3.3 Meshlab.....	34
Kokkuvõte	35
Võõrkeelne lühikokkuvõte	37
Viidatud allikad	39
Lisa 1 Ruumiliste mudelite genereerimise tarkvarad	41
Lisa 2 Trimble R6 põhiparameetrid	42
Lisa 3 Ruumiliste mudelite visualiseerimise tarkvarad.....	43

Annotatsioon

Käesoleva lõputöö põhiuurimisobjektiks on avatud lähtekoodiga tarkvara, mis võimaldab ruumiliste mudelite loomist ja visualiseerimist, ning põhieesmärgiks on erinevate avatud lähtekoodiga tarkvara võrdsustamine omavahel, tuvastades protsessi käigul parimat tarkvara, mida saaks kasutada Pakri pankranniku varisemisohu ennustamisel. Pakri pankrannik on läbiaegade olnud nii turistidele, kui ka teadlastele väga huvipakutavaks objektiks. Pankranniku osal, millest lõputöös räägitakse, asetseb Pakri tuletorn, mis on Eesti üks populaarsematest vaatamisväärsusest. Pakri meelitab teadlasi kivimite kihistuse rohkusega, ning anomaalselt kiire rannajoone transgressiooniga.

Antud lõputöö raames ruumimudelite loomiseks kasutati nii Kadi Kasepõllu poolt 2015. aastal kogutud andmeid, kui ka samuti autori poolt 2021. aastal kogutud andmeid. Üldiselt, viidi Pakri pankranniku andmete kogumine läbi drooni ja sellele paigaldatud kaamera abil, kuid selles lõputöös koguti andmeid alternatiivsel viisil – ilma droonita, tavalise kaamera abil. Samuti tuleb märkida, et uurimisobjektiks polnud Pakri pankrannik ise, vaid Laagna teel oleva pangamoodi kujund. Lõputöö olemus jääb muutumatuks, nimelt mudelite analüüs erinevate avatud lähtekoodiga tarkvara abil. Erinevalt varasematest Pakri pankranniku uurimistöödest, kus georeferentseerimise viisina kasutati drooni sisseehitatud *GPS*-seade, pakub antud lõputöö mudeli sidumiseks kohaliku koordinaatsüsteemiga täpsemat meetodit – *GPS RTK* tehnoloogiat, suurendades seeläbi saadud mudelite usaldusväärsust. Peamine erinevus *GPSi RTK* ja tavapärase *GPSi* vahel on see, et *RTK* saab püsijaamalt ¹pideva korrigeerimisvoo, mis aitab lõpuks parandada asukoha (X,Y) ja kõrguse (Z) ebatäpsusi. Mis puutub kasutatavatesse tarkvarasse, siis on väga oluline esile tõsta asjaolu, et need on tasuta, kuid on üsna võimelised konkureerima selle valdkonna kõige arenenumate kommertsprojektidega.

¹ Kõrgtäpsete *GPS*idega varustatud ehitist, kus arvutatakse raadiosignaalide satelliidilt väljastamishetkest kuni *GPSi* seadele signaali saabumiseni vahe antud keskkonnas, ning seejärel väljastatakse parandid (vahed) Interneti kaudu kasutaja *GPSi*

Sissejuhatus

Käesoleva lõputöö teema valimine oli tehtud Pakri pankranniku varinguohu aktuaalsuse põhjal. (Herrmann, Kasepõld, Zaitseva–Pärnaste, Pastorelli, Didenkulova 2015) Pakri pankrannik on transgressiooni staadiumis, viimased suurimad varingud olid aastatel 1996, 2003 ja 2008. (Einasto 2008) Varingute ennustamiseks on vaja üha täpsemaid ja usaldusväärsemaid meetodeid. Avatud lähtekoodiga tarkvara, ruumiliste mudelite loomise jaoks, ning drooni olemasolu aitab hinnata pankrannikut sellistest külgedest, kuhu inimjalg ei pääse. Mudeli põhjal teostatakse nii kvalitatiivne (pragude ja muude potentsiaalse varinguohtlikku kohtade visuaalne hindamine), kui ka kvantitatiivne analüüs, näiteks tarkvara kasutades mõõdetakse pankranniku ruumilise mudeli pealt pragude laiust või varisemisnurga väärtust.

Avatud lähtekoodiga tarkvara on viimasel ajal olnud väga populaarne ja selleks on mitu põhjust, nimelt:

- Igal arendajal on olemas õigus muuta lähtekoodi
- Lisada oma algoritme
- Kasutada lähtekoodi loogikat oma projekti loomisel

Avatud lähtekoodiga tarkvara on võimeline vabalt konkureerima kommertsettevõtetega just sellepärast, et sinna panustatakse tohutu hulk inimesi, kelle seast võib leida nii suurte kogemustega programmeerijad, kui ka teadlaseid.

Enamasti töödest, mida tehti Pakri pankranniku kohta, olid põhiliselt pühendatud mudeli konstrueerimisele, kasutades selleks erinevaid mitte-, kui ka kommerts tarkvara, kuigi sellist tööd, kus pannakse avatud lähtekoodiga tarkvara omavahel võrdlemisele, eesmärgil selgitada kõige mugavama kasutusel, kiirema töötlemisel ja täpsema mõõtmisel välja, siiski polnud. Mis puudutab just avatud lähtekoodiga tarkvara, siis 2019. aastal Lidia Mõsovski töös on olemas detailne kirjeldus ühest avatud lähtekoodiga tarkvarast, nimelt *OpenDroneMap*. (Lidia Mõsovski 2019) Väljaspool Eestit, on väärt tähele panna Prantsuse autorite poolt tehtud teadustööd. (Marion Jaud, Pauline Letortu, Claire Théry, Philippe Grandjean, Stéphane Costa, Olivier Maquaire, Robert Davidson, Nicolas Le Dantec 2019) Selle töö uurimisobjektiks on pankrannik Petty Ailly, mis asub Loode-Prantsusmaal, kuigi töö on pühendatud kaamera õige pildistamisenurga uurimisele, kus peamiselt vaadeldakse just sellest tulenev moonutus, sisaldab see töö siiski üsna asjakohaseid näiteid mudelite hindamise ja analüüsimise kohta, mida saab võtta arvesse käesoleva lõputöös. Samuti leidub huvitavaid materjale droonimõõdistuse abil saadud andmete analüüsi kohta autori

Michael Schwind töös, kus on kirjeldatud üksikasjalikult välitööde protsessid, kui ka sisetööd arvuti taga. (Michael Schwind 2016) Autor kasutas oma uurimisobjektideks hoonestatud ala Texas ja ühe metsa ala Alabamas USA osariikides. Markus Warne Rootsist võrdleb oma lõputöös kahte mudelit:

- Fotogrammeetria abil saadud mudelit
- 3D laserskanneriga saadud mudelit

Töös räägitakse nende kõvematest ja nõrgematest osadest. Välitööd olid tehtud Poolas, Gliwice linnas, kus uurimisobjektiks oli ülikooli üks korpustest. (Markus Warne 2015)

Käesoleva lõputöö raames vaadeldakse avatud lähtekoodiga tarkvara, mida saaks kasutada ruumilise mudeli loomiseks tehtud fotode põhjal, kus fotod ise pärinevad nii *TalTechi* ²arhiivist, kui ka välitöö käigul saadud autori poolt andmetest.

Lõputöö eesmärgi võib jagada kaheks osaks:

1. Analüüsida mittetulunduslikku tarkvara, mis võimaldab teatud arvu fotosid teisendada ja visualiseerida 3D-mudeliks (heade ja halbade omaduste kirjeldus)
2. Analüüsi põhjal valida parimat, mida tegelikult oleks võimalik tulevikus rakendada Pakri pankranniku mudeldamisel

Välitöö käigul andmete saamiseks, antud lõputöös, kasutati järgmiseid abivahendeid:

- *Canon EOS 350d+* (18-55mm lääts) fotokaamerat
- *Trimble S6 GPS RTK* vastuvõtjat

Lõputöö eesmärgi saavutamiseks kasutati järgmisi avatud lähtekoodiga tarkvara:

- *OpenDroneMap*
- *COLMAP*
- *Meshlab*

Selles lõputöös on mitu piirangut, mis võivad tulemusi mõjutada. Esimeseks piiranguks on fotokaamera enda võimekus, näiteks, laia objektiiviga tehtud fotod (*fish eye*) on ruumilise mudeli konstrueerimise jaoks parimad, võrreldes kitsaobjektiiviga kaameraga (mis oli kasutusel antud lõputöös) fotodega. Teiseks piiranguks on aga *GPS*-vastuvõtja täpsus, mida kasutatakse mudeli sidumisel *L-EST97* koordinaatsüsteemiga. Kolmandaks piiranguks on aga arvuti võimsus ehk

² Tallinna Tehnikaülikool

põhiparameetrid (*RAM*³, *CPU*⁴ arv), ning ka kasutatud avatud lähtekoodiga tarkvara enda piirangud (failide suurused, töötlemise kiirus).

Esimeses peatükis kirjeldatakse üksikasjalikult, millist tööd on selles valdkonnas mujal maailmas, kui ka Eestis tehtud ja mis on nende tööde tulemused. Antud peatükk räägib ka fotogrammeetria põhimõtetest just sellest vaatenurgast, et paremini aru saada, mida on tarvis teada enne andemete kogumist ehk pildistamist. Peatüki lõpus räägitakse ülevaatlikult kasutatavast tarkvarast.

Teine peatükk on pühendatud meetodika kirjeldusele. Alustades välitöödest, kasutades *GPS RTK* vastuvõtjat ja fotokaamerat, ning lõppedes sisetööga, kus kirjeldatakse detailsemalt tarkvaraga töötamise protsessid.

Kolmas peatükk on tehtud töö loogiline järeldus, kus antakse tarkvaradele hinnang, ning kirjeldatakse selgelt, tarkvarade tugevamaid ja nõrgemaid külgi, millele tuleb tähelepanu pöörata tarkvara valikul. Mis selle lõputöö raames õnnestus ja mis ei õnnestunud, samuti valitakse üks või mitu avatud lähtekoodiga tarkvara, mis on autori arvates ja uuringute järgi, töötamiseks kõige eelistatavamad, ning mida tulevikus saab rakendada Pakri pankranniku uurimisel.

³ *Random Access Memory* – operatiivmälu, mis vastutab arvuti töötamise kiirusest, mida rohkem *RAM*, seda rohkem arvutil kiirust

⁴ *Central Processing Unit* – protsessor, mida suurem *CPU*de arv, seda võimsam on arvuti

1 Teoreetilised põhimõtted

1.1 Varasemate tööde ülevaatus antud valdkonnas

Aastal 2015 loodi *Autodesk Recap* tarkvara abil Pakri pankranniku kõige esimene ruumiline mudel. (Kadi Kasepõld 2015) Alates sellest aastast alustati pankranniku seiret. 2018. aastal esitleti ka tööd Pakri pankranniku uurimise kohta, kus samuti oli kogutud drooni abil andmed ja nende põhjal loodi ruumilisi mudeleid, kuid seekord autor kasutas *Agisoft Metashape* tarkvara. (Artur Karjalainen 2018) Mis puutub tehtud tööde positiivsetesse aspektidesse, siis võib mainida Eesti koordinaatsüsteemiga sidumist droonile sisse ehitatud *GPS* abil, ning väga kvaliteetsete mudelite loomist, mis on hea töövahend pankranniku seisundi seiramiseks ja varinguhu tuvastamiseks. Siiski väärrib märkimist, et 2015. ja 2018. aastatel saadud ruumilised mudelid on tehtud, kasutades kommertstarkvara, kus litsentsihind on mõnikord väga kallis, lisaks eeltoodutele tasub mainida ka seda, et *GPS*, mis oli kasutusel mõõdistuse ajal ei olnud kõrgetäpne *GPS RTK*, mis omakorda võib mõjutada olulisemalt ruumilise mudeli täpsust. Lõpuks aastal 2019 Lidia Mõsovski poolt oli tehtud lõputöö teemal “Pakri pankranniku 3D mudeli rekonstrueerimine kasutades *ODM*⁵tarkvara“. Eestis antud töö oli unikaalne, kuna see kirjeldab üksikasjalikult just avatud lähtekoodiga tarkvara töötamise protsessi. Lõputöö eesmärgiks oli droonilt saadud fotode põhjal, mis oli tehtud aastatel 2015 ja 2018, teha ruumilise mudeli, ning selle analüüsimine ja kvaliteedi hindamine. Autor võrdles ka 2018. aastal ruumilise mudeli, mis oli tehtud kommertsliku tarkvara abil – *Agisoft Metashape* ja enda loodud mudeli, mille loomiseks kasutas avatud lähtekoodiga tarkvara – *ODM*. Autor pani tähele mõningaid varasemate tööde märkusi, nimelt, et kontrollpunkte, mida kasutati ruumilise mudeli sidumiseks koordinaatsüsteemiga, tehti mitte eriti soodsates kohtades (kus taimestiku kasv on aastaringselt erinev, ning võib tekitada probleeme kontrollpunktide tuvastamisele). Töö tulemuseks oli väga kvaliteetne ruumiline mudel, mis autori sõnul ei jää kuidagi alla 2015. ja 2018. aastatel tehtud mudelitele.

Mis puutub muusse maailma, siis Loode-Prantsusmaal oli tehtud väga huvitavat tööd. Antud töös drooni abil tehti mõõtmised Petty Ailly pankrannikust erinevate nurkade all:

- 20° nadiirist⁶
- 30° nadiirist

⁵ *OpenDroneMap*

⁶ Seniidi vastand

- 40° nadiirist

Mõõtmisandmete põhjal selgus, et pankranniku pildistamisel on ruumilise mudeli loomiseks kõige soodsam nurk just 40° nadiirist. Saadud vead (võrreldi looduses oleva objektide vahelise pikkuse ruumilise mudeli pealt võetud pikkusega), sõltuvalt nadiirist, on toodud allpool:

- 20° nadiirist = 5.5 cm
- 30° nadiirist = 5.9 cm
- 40° nadiirist = 4.9 cm

USA ühendriikides oli 2016. aastal tehtud töö, mis paneb juba otseselt rõhku tarkvaravõrdlustele. Oma töös autor võrdleb kaht kommertstarkvara: *Pix4D*, *Agisoft Metashape* ja ühe mittetulunduslikku tarkvara: *ODM*. Tehtud uuringute põhjal selgus, et parim töörist nende kolme tarkvarade seast on *Pix4D*. Just see tarkvara näitas parima ruumilise mudeli täpsust, nimelt 84.1% iga 4.6 cm kohta looduses (84.1% täpsusega on ruumilise mudeli punktiple pealt valitud üksiku punkti koordinaat leidub looduses selle sama asukohal raadiuses 4.6 cm). Mis puudutab puudujääke, siis sarnaselt *Agisoft Metashape*ga on ruumilisel mudelil tohtu “kaal” (väga palju mälu võtab, et hoida antud faili kõvakettal). Samuti on avastatud, et nii *Pix4D*, kui ka *Metashape* ei suuda õigesti reprodutseerida objektide teravaid nurki. Autor kirjeldas *ODM*is tehtud ruumilist mudelit väga positiivselt, tema sõnul on ruumiline mudel väga tihe ja isegi teravad nurgad on selgelt jälgitavad. *ODM*i tarkvara suurim puudus on ruumilist mudelit koordinaatsüsteemiga sidumine. Probleem seisnes selles, et kontrollpunktide kirjeldatavas failis on X,Y koordinaatide täpsus vaid kümnendkoht, mis võrdub kümne või rohkem sentimeetriga maastikul.

Väärrib märkimist ka 2015. aastal Rootsis tehtud tööd, kus vaatamata sellele, et autori peamiseks eesmärgiks oli võrrelda kahte ruumilise andmete saamise meetodi: 3D laserskaneerimine ja fotogrammeetria, töös siiski eksisteerib asjakohased ruumiliste mudelite analüüsimise kriteeriumid. Selle töö tulemuseks oli 3D laserskaneerimise ja fotogrammeetria abil saadud ruumiliste mudelite võrdlus, milles autor rõhutab tõsiasja, et fotogrammeetria printsiibi kasutatav tarkvara suudab konkureerida isegi selliste tõsiste tehnoloogiatega nagu 3D laserskannerist saadud ruumiliste mudelitega. Mis puutub ruumiliste mudelite täpsusesse, siis siinkohal kaldub autor 3D laserskaneerimisele, kuna fotogrammeetria printsiipi kasutatavas tarkvaras tekivad ebahomogeensete objektide reprodutseerimisel ebatäpsused. Hoolimata asjaolust, et droonide piltidelt saadud fotogrammeetria võttega töödeldud ruumilise mudeli täpsus jääb 3D

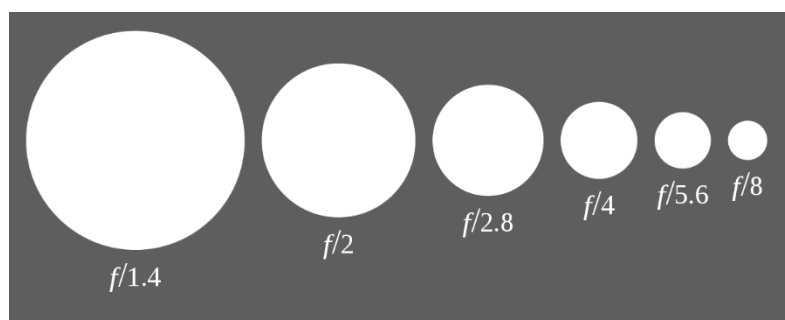
laserskannerilt saadud ruumilise mudeli täpsusele alla, jääb see ainsaks vahendiks raskesti ligipääsetavate kohtade uurimisel.

1.2 Fotogrammeetria

Fotogrammeetria on teadusharu, mis võimaldab määrata objektide kuju, mõõtmeid ja asendit fotode järgi, kus objektidega puudub füüsiline kontakt. (Schenk 2005) Fotogrammeetria pole kaamera kasutamisetä võimalik, pealegi saab kaamera asuda nii otse operaatori enda käes, kui ka mõnel autonoomsel seadmel – droonil.

Kuna fotod on põhimaterjal millest luuakse fotogrammeetria algoritmide (printsipiide) põhjal ruumilisi mudeleid on, ilmselgne, et palju olulisem on antud lõputöö raames aru saada fotokaamerate olulisemad parameetrid, kui fotogrammeetria füüsilised printsipiidid ise. Kaamera valikul ja kalibreerimisel tuleb eriti tähelepanu pöörata järgmistele kaamera parameetritele:

- Säriaeg – tähendab, kui kiiresti katik kaameras liigub (mõõdetakse millisekundites)
- Ava – kontrollib valguse hulka, mis peaks läätsetid tabama, mõõdetakse F-numbriga (Joonis 1)
- ISO – fotode terminoloogias nimetatakse seda ka kunstlikuks valguseks (*Photographylife* 2019) ehk valgusanduri tundlikuseks (mõõdetakse numbrites)



Joonis 1. F-numbriga tähistatakse ava suurust (Slazinik 2010)

Professionaalsed fotokaamerad ilmtingimata võtavad arvesse nende kolme parameetrite parimad väärtused. Üldiselt, need parameetrid täiendavad teineteist ja ühe või teise parameetri muutmise korral peab muutma ka ülejäänud parameetrid sobiva vastavusse.

Näiteks, mis puudutab fotode hägustamist, siis selle eest vastutab katiku sulgemiskiirus, see tähendab, et kui mitu fotot on udused, tasub, muude mehaaniliste kahjustuste puudumisel

tähelepanu pöörata selle kaamera säriajale. Rääkides august, mis reguleerib valgusvoogu sattumist läätsedesse, tasub märkida, et mida laiem on ava, õigemini öelda, mida suurem on F-arv, seda rohkem objekte kaadrisse sattub ja vastupidi, kuigi suurema ava korral ei pruugi olla hea fookus, mis omakorda tähendab fotode peal objektide teravust kahanemist. Harrastusfotograafide seas on kuuldavasti, et mida madalam on *ISO*, seda parem on fotode kvaliteet ja seda on lihtne seletada. Fakt on see, et *ISO* arv näitab kui palju valgust sattub kaamera sisese sensori peale, ning öeldakse, et *ISO* väärtused on madalad, siis kui need on 50, 80, 100 ja, vastavalt siis kõrged väärtused on siis, kui need on 3600, 5800, 6400. *ISO* reguleerib piksli küllastust (kui palju valgust võib absorbeerida antud piksel) ja soovi korral saab kasutaja neid muuta. Suurem *ISO* väärtus muudab foto näilisemaks (seda nimetatakse ka müra ehk üleküllastunud pikslid). Praktiliselt rääkides, suurema *ISO* korral fotod on liiga heledad siis ja ainult siis, kui fotod on tehtud päikese käes või muul hästi valgustatud kohal, aga suurema *ISO* väärtust võib kasutada, näiteks, õhtusel pildistamisel, sest see annab valgust juurde ja väljundina on tehtud pildid heledam, kui nad oleksid tehtud madalama *ISO* korral. Seega tuleb *ISO* väärtusega “mängida“ vastavalt olukorrale ja ilmastikutingimustele.

1.3 Avatud lähtekoodiga tarkvara teoreetiline tutvustus

Käeolevas peatükis tutvustatakse lühidalt tarkvara, mida autor kasutas ruumiliste mudelite loomiseks ja visualiseerimiseks. Üldiselt on avatud lähtekoodiga tarkvara sisuliselt failide kogum, mis on sageli pakitud tihendatud *.zip*-vormingus ja üleslaetud Internetis tasuta allalaadimiseks.

Avatud lähtekoodiga tarkvara eelised on:

- **Hind:**
Agisoft Metashape Professional Edition 2930,36 EUR (seisuga 01.03.2021)
OpenDroneMap 0 EUR (seisuga 01.03.2021)
- **Kontroll programmi üle:**
Kuna lähtekood on kasutajale täielikult ligipääsetav, saab ta programmi käitumist täpselt oma vajadustele vastavalt muuta, mida ei saa teha kommertsprogrammides, kus juurdepääs lähtefailidele on suletud
- **Uudsus:**

Mitmete teiste arendajate ja mitte ainult üksikisikute, vaid ka suuretevõtete panus, kes investeerivad avatud lähtekoodidega projektide väljatöötamisse, seega värskendused avatud lähtekoodiga tarkvaral esinevad sagedamini.

1.3.1 OpenDroneMap

Insenerivaldkonna avatud lähtekoodiga tarkvara üks eredamaid ja võib-olla edukamaid esindajaid on *OpenDroneMap*. See on noor ja väga paljulubav toode, mis tuli turule 2013. aastal. Tänu asutajate uuenduslikkusele ja potentsiaalile sai programm 2014. aastal toetuse selliselt ettevõttelt nagu *FOSS*, mille põhitegevuseks on tööstusmajanduse valdkonna statistiliste andmete koostamine, pole raske arvata, miks just see ettevõtte väljendas arendatava projekti vastu nii suurt huvi.

Ruumilise mudeli loomine on tavaliselt inimsilmale varjatud, see tähendab, et kasutaja sisetab vajalikke andmeid käsuritta ja käivitab tarkvara ka sealt, kuigi ruumilist mudelit visualiseerimiseks juba kasutatakse erinevaid avatud lähtekoodiga tarkvarasid, näiteks *Meshlab*.

Nagu juba mainitud, laieneb tarkvara *OpenDroneMap* rakendusala insenerivaldkonnale, tüüpilised ülesanded, mis sellele tarkvarale selles valdkonnas seatakse, on:

- Töökoguste ja materjalide suuremahuline mõõtmine
- Järelevalve
- Infrastruktuuri prognoosimine, samuti igasuguste visuaalsete riskide tuvastamine

Lisaks inseneritööle on tarkvara ennast suurepäraselt tõestanud põllumajanduse tööstuses, kus selle tehnoloogia rakendamine leiti järgmistest töödest:

- Taimestiku tervise jälgimine
- Vähendatud taimestiku seire, riskianalüüs
- Katastritööde kavandamine või tööstuspiirkondade laiendamine koos edasise arenguprognoosiga

Tänu *OpenDroneMapi* pakutavatele tehnoloogiatele on tehtud suuri samme tarkvara suunas, mis on abiks ülemaailmsetele hädaolukordadele. Hästi üles ehitatud mudel võimaldab tuvastada järgmiseid ohtusid:

- Üleujutust

- Kivide moodustumist
- Tammide rikkumist
- Seismiliselt aktiivsete tsoonide jälgimist
- Rannajoone seiret (transgressioon)

1.3.2 COLMAP

COLMAP on 2016. aastal Johannes Schönbergeri poolt alustatud projekt. Selle avatud lähtekoodiga tarkvara iseloomulikuks omaduseks on see, et tänu kavalalt kirjutatud algoritmidele saab see tarkvara töödelda ja ruumiliseks mudeliks luua ka kvaliteedi mõttes kõige kohutavamad fotod, mis omakorda tähendab seda, et isegi ilma hea kaamerata, mis pole muidugi soovitatav, saab teha korraliku ja täpset ruumilist mudelit. *COLMAP* ei ole nii suur ja rahastatud projekt nagu *OpenDroneMap*, seega puuduvad täpsemad andmed selle tarkvara rakendamisevaldkonna kohta, kuigi tööde hulgast, mis olid tehtud kasutades *COLMAP* tarkvara on arusaadav, et peamiseks kasutusvaldkonnaks on väikeste ja keskmiste objektide reprodutseerimine. *COLMAP* on leidnud rakendust isegi väga väikeste objektide detailiseerimisel ja digitaliseerimisel, nagu antiiksed skulptuurid. *COLMAP*i tarkvara kasutamine jaotakse kaheks osaks: mudeldamise tarkvaraks ja visualiseerimise kasutajaliideseks.

1.3.3 Meshlab

Itaaliast pärit *Meshlab* on samuti avatud lähtekoodiga tarkvara. Sellise tarkvara peamiseks eesmärgiks on fotogrammeetria abil loodud ruumiliste mudelite visualiseerimine. Kuna tarkvara spektr piirdub vaid visualiseerimisega on aretajad panustanud maksimaalselt tarkvara kasutamise mugavusse ja visualiseeritud ruumilise mudeli usaldusväärsusse. Vaatamata asjaolule, et *OpenDroneMap*i, kui ka *COLMAP*i tarkvarad võimaldavad oma loodud ruumiliste mudelite visualiseerimist, siiski eelistavad kasutajad *Meshlab*i, tänu selle mugavale kasutajaliidesele. Antud avatud lähtekoodiga tarkvara rakendusala laieneb väikeste objektide detailiseerimisest, näiteks, need, mida saab luua *COLMAP*i abil, kuni hoonete või muude ehitiste visualiseerimiseni, kus kõige sagedasemateks kasutajateks on eramajade või väikeste elamispiindade arhitektid.

1.4 Pakri pankranniku seire küsimused

Pakri pankranniku ruumilise mudeli loomisel on kaks peamist eesmärki:

- Varingute prognoosimine

- Pankranniku üldise seisundi seire

Eesmärkide täitmiseks tuleb luua üsna täpne ruumiline mudel, mille pealt oleks võimalik teatud objekte füüsiliselt mõõta. Objektide mõõtmiseks peab kõigepealt väga täpselt siduma ruumilist mudelit kohalikku koordinaatsüsteemiga. Peale seda peab veenduma, et ruumiline mudel ise on selge (mõõtkava suurendamisel ja vähendamisel ruumiline mudel ei lähe hägusemaks ja saab säilitada teravaid nurki). Siis ja alles siis ruumiline mudel on tõesti teaduslikuks kasutamiseks valmis.

2 Analüüs ja töö olemasolevate andmetega

Analüüsi ja töö andmetega võib jagada kahte etappi. Esimeseks etapiks on Pakri pankranniku *TalTech* Eesti Mereakadeemia üliõpilase Kadi Kasepõllu poolt 16.07.2015 tehtud fotode järgi ruumiliste mudelite loomine ja sellele järgnev analüüs. Pakri pankranniku 2015. aastal uuritud ala (vt Joonis 2) asub Pakri tuletorni läheduses ja pankranniku kõige varisenud kohas. Koha eripäraks on Pakri vana tuletorn (tulepaak), mis hetke seisuga on varisemisjärgus ehk osa fassaadist ulatub juba rannajoonest kaugemale. Seista rannajoone läheduses, suhteliselt ohutu, kuid pole soovitatav, sest kivimite murde dünaamika on üsna kõrge. Välitöödeks, täpsemini kontrollpunktide loomiseks, on mugav kasutada lähedal asuvat teed (Majake tee), kui ka läheduses asuva hoone (Majaka tee 43) väljaulatuvaid osi.



Joonis 2. Pakri uuritav ala (Maa-amet)

Teiseks etapiks on aga autori isiklik analüüs ja välitöö. Olude sunnil ei olnud võimalik Pakrile pankrannikut mõõtma minna ja otsustati analoogi otsida Tallinna piires. Esiteks, oli oluline leida objekt, millel oleks vähemalt sarnane struktuur, nagu Pakri pankrannikul, ja see leiti - Laagna tänaval oleva osa kivistunud maa-alustest kivimitest. Uuritav ala asus Arbu tn 1 maja vastas, täpsemini, kus Varraku tn mahasõit linna suunas saab Laagna teega kokku (Joonis 3). Objekti valik oli tehtud mitte ainult Pakri pankranniku mõningase sarnasuse, vaid ka selgelt väljendatud ümbritsevate objektite põhjal, mis saaksid olla potentsiaalsed kontrollpunktide kohad.



Joonis 3. Laagna teel uuritav ala (Maa-amet)

Edaspidi lõputöös kasutatakse lühendit **Laagna**, kui mainitakse Laagna teel uuritavat ala ja **Pakrit**, kui mainitakse vastavalt Pakri klindiga seotud tööala.

2.1 Metoodika kirjeldus (välitööd)

Välitöö mõiste tähendab antud kontekstis järgmist:

- pildistamist
- kontrollpunkte mõõtmist *GPS RTK* tehnoloogia abil

Pildistamine toimus kaamera (*Canon EOS 350d+*) abil. Selleks, et elimineerida positsioonilisi ebatäpsusi, oli kasutusel *GPS RTK* vastuvõtjat, mille abil oli maastikul mõõdetud kontrollpunktid. *GPS RTK* tehnoloogia valik oli põhjendatud selle laialdase vajadusega kõigi geodeesia ja mitte ainult seotud välitööde teostamisel. *GPS RTK* vastuvõtjana kasutati *Trimble R6* (vt Joonis 4).



Joonis 4. *GPS RTK Trimble R6* komplekt

RTK tehnoloogia omakorda eeldab mõõdistuse parandite kasutamist, käesoleva lõputöö raames kasutati mõõtmise läbiviimiseks ettevõtte HADES INVEST OÜ püsijaamast saadud positsioonilisi parandeid. Püsijaam ise paikneb Tallinnas Sõjamäe tänaval, Lasnamäe LO-s, mis asub orienteeruvalt 5 km kaugusel Laagnast.

Võttes arvesse asjaolu, et püsijaama asukoht ja kõrgtäpse *GPS RTK* vastuvõtja (mille detailsemad andmed on esitatud Lisas 2) kasutamise ala oli praktiliselt üksteise kõrval, võime julgelt öelda, et kõik Laagnal tehtud mõõtmised on täpsed⁷.

Ettevalmistus Laagna töötamiseks oli väga lihtne:

- Tutvustus kaameraga, mis oli autorile väljastatud lõputöö juhendaja poolt
- *GPS RTK* vastuvõtja rent ettevõttest Geodeesia24 OÜ

Varustusega tutvumise protsess ei tekitanud autorile raskusi, kuna tal oli varasem kogemus otseselt kaamera ja vastuvõtja kasutamisega seotud valdkondades. Kohale jõudes oli ülesandeks maastiku põhjalik uurimine ja võimalike kontrollpunktide väljaselgitamine, mida oleks võimalik seejärel *GPS RTK* vastuvõtjaga mõõta. Oli määratud viis kontrollpunkti, mille hulgas olid:

- 2 valgustusposti
- 2 betoonkaevu kaant (Joonis 5)
- Liiklusmärk



Joonis 5. Kontrollpunktid – kaks betoonkaevud

⁷ Täpsus on loomulikult seotud *RTK* tehnoloogia enda täpsusega, mille keskmiseks veaks on aga 2 – 4 cm.

Teine, mitte vähem oluline etapp oli Laagna kalju pildistamine. Väga oluline punkt siin kohal on see, et fotod olid tehtud ainult ühelt liikumistrajektorilt (vt Joonis 6), samas kui ülejäänud pildistamiseks mõeldud asukohad olid kas:

- ohtlikud, tänu aktiivse liikumisele piki külgnevat Laagna teed
- võimatud, seoses piiratud juurdepääsuga kalju mõnede osadele



Joonis 6. Pildistamise tehnika (Maa-amet)

Pildistamise ajal tehti Laagnal vaid 60 fotot. Fotod olid tehtud järjest ja iga järgmine enamasti kattis eelmise 60% võrra (siinkohal tuleb rõhutada, et just iga järgnev foto oli 60% kattuvuses eelmisega, kuigi, kasutades *fish eye* tehnoloogiat on võimalik teha nii, et iga üksik foto on kattuvuses kõike teiste fotodega 60% võrra). Läbitud distants pildistamise ajal oli 60 m, igast seisundist olid tehtud kolm fotot (vasakult küljelt, eespoolt ja paremalt küljelt (vt. Joonis 7)), sammuks oli 3 meetrit.



Joonis 7. Pildistamise protsess

Oleks õige mainida asjaolu, et kõik autori poolt tehtud fotod on ilma autosid, inimesi ja muid liikuvaid objekte kaadrisse toomata, mis annab järgneva töötlemise (puhastamise) osas suurema eelise. Pildistamise tehnikat saab seostada ka eelistega, näiteks, Laagna kalju pildistati rangelt ühe nurga all (kaamera objektiivi siht oli alati kaljuga risti). “Varasemate tööde ülevaatus antud valdkonnas“ alapeatükkis toodud teadaolevatele faktidele võib väita, et pildistamise ajal fotode moonutus lähenes nullile. Vaatamata eelistele on selles tehnikas ja üldiselt välitööde teostamisel ajal esinesid oma puudused, nimelt objektiivi kitsus. Ühelt küljelt aitab kitsas objektiiv foto moonutusi mingil määral vähendada, kuid selle peamiseks puuduseks on see, et mudeli loomisel on parim variant iga foto 60-protsendiline kattuvus või rohkem kõikide ülejäänute piltidega, kuid see pole alati võimalik. Selles olukorras on palju parem lahendus kasutada *fish eye* tehnoloogiat, mis laieneb objektiivi vaatevälja, kasutades selleks lisaläätsed, ning võimaldab suurema objektide arvu sattuda pildi peale, mis on küll positiivne mõju tulevase ruumilise mudeli tihedusele ja kvaliteedile.

2.2 Metoodika kirjeldus (tarkvara)

Eelnevalt loetletud avatud lähtekoodiga tarkvara kasutamiseks peab tõenäoliselt oma arvutisse paigaldama *GNU/Linux*, edaspidi *Linux*, operatsioonsüsteemi. Peale *Linux*i otse arvutisse paigaldamist võib kasutada ka *Oracle*i virtuaalmasina⁸ ja käivitada sealt *Linux*i. Käesoleva lõputöö raames oli paigaldatud *Linux*, kui primaarne operatsioonisüsteem arvutile *Hp Pavillion*, mille põhiparameetrid on järgmised:

- 8 Gb RAM (operatiivmälu)
- 500 Gb HDD (kõvakettas)
- AMD A6-9220 Radeon CPU (protessor)
- AMD Stoney GRAPHICS (videokaart)

Siin konteksti tasub mainida, et kõik edasised käsud, mida sisestatakse käsuritta ei seletata lõputöös lahti, selleks, et paremini aru saada igast käsust, mida autor kasutab erinevatel situatsioonidel, on tarbis kirjutada *Linux*i käsureas järgmist: **man <ja peale tühiku lisada käsk ise>**, see omakorda avaneb hüpikakna koos detailsema kirjeldusega iga käsu kohta.

⁸ *Oracle* ettevõtte poolt loodud tarkvara, mis emuleerib operatsioonsüsteemi

2.2.1 TalTech klasteri ja pilvega ühendamine

Kui *Linux* on paigaldatud, saab alustada klasteri⁹ ja pilve¹⁰, ühendamisega, ning seejärel kaustade loomisega kasutaja töölaua¹¹. Klasteri- ja pilvega ühendamise protseduur on hädavajalik, kuna tavaline sülearvuti või statsionaarne arvuti ei suuda käsitleda nii suurt andmemahutu, mis tekiks fotode ruumiliseks mudeliks töötlemisel ja ruumilise mudeli kuvamisel. Õnneks, Tallinna Tehnikaülikooli Küberneetika Instituut pakub võimalust kasutada klasterit ja pilve, mis võimaldab töödelda suuremahulised andmed, ning vähendab töötlemisaega päevadest minutiteks. *TalTechi* klasteri põhiparameetrid on:

- 1 Tb RAM
- 128 CPU

Pilve põhiparameetrid:

- 16 Mb RAM
- 8 CPU

Klasteri- ja pilvega ühendamine toimub läbi *SSH*¹² protokolliga. Selleks, et ühe arvuti (autori arvuti) ühendada *TalTech* klasteri- ja pilvega, tuleb genereerida ning seejärel edastada *SSH*-võti¹³ *TalTech* süsteemiadministraatorile (edaspidi *admin*) selleks, et tema saaks uut kasutajat registreerida nii pilvel, kui ka klasteril. Genereerida saab kasutades vastava käsu:

- `ssh-keygen -t rsa`

Peale seda tuleb kuvada käsureas selle sama *SSH* võti, et oleks võimalik kopeerida selle sisu:

- `cat >> ~/.ssh/id_rsa.pub`

Vajutades *Enteri*, ekraanile kuvab pikk *SSH* võti, see on vaja hiire abil kopeerida ja saata *adminile*.

Nüüd on kasutusel kolm arvutit, üks on enda oma, teine on klaster ja kolmas on pilv.

⁹ Mitu võimsamad arvutid ühendatud ühte võrku kaablite abil, mille peamiseks eesmärgiks on anda lisa mälu ja võimsust kasutajate arvutitele.

¹⁰ Sarnane klasteri tehnoloogia, ainus erinevus on see, et arvutid ei ole reeglina ühendatud omavahel kaablitega ühes kohas, vaid võivad ühendatud Interneti kaudu ja niimoodi jagavad ressursse.

¹¹ Arvutis olev kaustade kogum, mis kuulub ainult ühe kasutajale

¹² Protokoll (reeglite kogum), mille järgi saab edastada andmed ühelt arvutilt teisele, erinevalt *HTTP* protokollist on *SSH* krüpteeritud ja paremini kaitstud, mis teeb failide edastamine isegi nõrgalt kaitstud keskkonnas võimalikuks.

¹³ Pikk kood, mis kuulub ainult ühe kasutajale (sarnast koodi *Linux* süsteemis pole)

2.2.2 Ettevalmistused tarkvara tööks

Esimesena sammuna, mida tasub teha peale ligipääsu klastril- ja pilvele saamisest on genereerida *SSH*-võti, kuid nüüd pilves ja klastris eraldi. Pilvele saab pääseda käsuga:

- `ssh -X armaka14@193.40.156.154`

Pilvel on olemas *OpenDroneMap* ja *Meshlab* tarkvara eelnevalt paigaldatud. Klastrile saab siseneda ainult sidepunkti ¹⁵ kaudu:

- `ssh armaka@base.hpc.taltech.ee`

Sidepunktist saab valida millist arvutit soovitakse kasutada, sõltuvalt otstarbest. Lõputöö raames kasutati amp klastrit, millesse saab pääseda järgmise käsu abil:

- `ssh armaka@amp` (siin asub tarkvara *COLMAP*)

Järgmiseks tegevuseks on kõigi arvutite *SSH*-võtme kopeerimine, kuhu kasutaja on tarkvara vahetamisel või failide ülekandmisel otseselt kohustatud sisenema, ning asetama need võtmed igasse arvutisse vastava autoriseerimise faili, teisisõnu, iga arvuti peab omama kõikide teiste arvutite *SSH*-võtmed. Autoriseerimise faili, kuhu lähevad kõik *SSH*-võtmed, saab täita käsuga:

- `cat > ~/.ssh/authorized_keys`
- ja nüüd tuleb sisestada kopeeritud võti

Kui operatsioon on teostatud igal arvutil siis saab salasõna sisestamata liikuda arvutist arvutile ja saatma faile ilma tõrgeteta. Teiseks sammuks on iga arvuti kasutaja töölaua kahte kaustade loomine:

- *opendronemap*
- *colmap*

Kaustade sees tuleb lisaks teha veel kahte kausta:

- 2015 (aasta, mille andmed tahetakse kasutada)

¹⁴Kasutajal tuleb sisestada oma *TalTech* kasutajanimi

¹⁵ Sidepunkt klastril on vaheklaster, kuhu sisenedes kasutaja saab valida, mis arvutit täpsemalt tema tahab kasutada (valik võib sõltuda otstarbest, näiteks suure töötlemisprogrammi puhul, ilmselt vaja võimsama arvutit, kuid tekstifaili kirjutamiseks piisab kõige nõrgema arvutist, selline jaotus aitab hoida arvuti ressursse ehk *CPU* ja *RAM*).

- 2021 (aasta, millal tööd reaalselt läbi viidi)

Nende kahe (2015 ja 2021) kaustade sees tuleb veel luua ühe kausta:

- *images*

Kolmandaks ehk lõplikuks sammuks on vaja eksportida tehtud 2021 aastal pildid pilve arvutisse. Kui see on tehtud saab sealt saata pildid iga teise arvutisse vastava käsuga (näiteks pilve ja sidepunkti failide vahetus):

- `scp -r armaka@193.40.156.154:/home/armaka/<piltide kaust>/ armaka@base.hpc.taltech.ee:/ceph/home/armaka/colmap/images/`

Varasemad andmed saab kätte täpsustades kausta asukoha arvutis *admini* käest, kui see on teada, siis saab iga kaustas nimega 2015/*images* luua linki¹⁶ (*COLMAP* kausta näitel):

- `ln -s <varasemate andmete kausta asukoht> /home/armaka/colmap/2015/images/`

Nüüd, kui kõik kaustad on vastavalt konfigureeritud võib alustada andmete töötlemisega. Admete töötlemise järjekord on selline, et esmalt luuakse ruumilist mudelit andmetest, mis oli võetud *TalTech* arhiivist (2015 aastal mõõdetud Pakril) ja seejärel andmetest, mis pärinevad autori poolt kogutud andmetest 2021 aastal Laagnal.

2.2.3 OpenDroneMap

Pakri pankranniku mõõdistamise ajal 2015 aastal oli drooni sisse ehitatud *GPS* vastuvõtja, mis võimaldas pildistamise ajal salvestada kaamera täpsema asukoha, mille kaudu, siis tarkvara saaks arvutada kõiki punktide koordinaadid, kasutades fotogrammeetria põhimõtet, sellisel juhul ei pidanud autor ise siduma mudeli koordinaatsüsteemiga, vaid lihtsalt hakata peale otse töötlemise protsessiga. Selleks, et käivitada *OpenDroneMapi* tuleb siseneda pilve arvutisse ja kasutada järgmist käsu:

- `singularity run --bind ~/opendronemap/2015:/datasets/code docker://opendronemap/odm -project-path /datasets`

¹⁶ Link ei ole kaust vaid viide, kuhu tuleb protsessorile vaadata, et vajalikud andmed saada (hea viis salvestada arvutite mälu ressurse)

Peale käsu kinnitamist kuvab ekraanile väga palju erinevaid andmeid (vt Joonis 8).

```
File Edit View Search Terminal Help
2021-07-15 16:15:18,452 INFO: -----
2021-07-15 16:15:18,497 INFO: IMG 8363.JPG resection inliers: 3629 / 3641
2021-07-15 16:15:18,530 INFO: Adding IMG 8363.JPG to the reconstruction
2021-07-15 16:15:18,710 INFO: -----
2021-07-15 16:15:18,762 INFO: IMG 8357.JPG resection inliers: 3799 / 3820
2021-07-15 16:15:18,799 INFO: Adding IMG 8357.JPG to the reconstruction
2021-07-15 16:15:18,965 INFO: -----
2021-07-15 16:15:19,006 INFO: IMG 8365.JPG resection inliers: 3363 / 3393
2021-07-15 16:15:19,037 INFO: Adding IMG 8365.JPG to the reconstruction
2021-07-15 16:15:19,157 INFO: Shots and/or GCPs are well-conditioned. Using naive 3D-3D alignment.
2021-07-15 16:15:27,165 DEBUG: Ceres Solver Report: Iterations: 101, Initial cost: 6.925727e+02, Final cost:
2021-07-15 16:15:27,301 INFO: Removed outliers: 937
2021-07-15 16:15:27,437 INFO: -----
2021-07-15 16:15:27,479 INFO: IMG 8360.JPG resection inliers: 3237 / 3262
2021-07-15 16:15:27,513 INFO: Adding IMG 8360.JPG to the reconstruction
2021-07-15 16:15:27,680 INFO: -----
2021-07-15 16:15:27,717 INFO: IMG 8354.JPG resection inliers: 3288 / 3299
2021-07-15 16:15:27,748 INFO: Adding IMG 8354.JPG to the reconstruction
2021-07-15 16:15:27,879 INFO: -----
2021-07-15 16:15:27,920 INFO: IMG 8353.JPG resection inliers: 3506 / 3534
2021-07-15 16:15:27,954 INFO: Adding IMG 8353.JPG to the reconstruction
2021-07-15 16:15:28,062 INFO: Shots and/or GCPs are well-conditioned. Using naive 3D-3D alignment.
2021-07-15 16:15:39,191 DEBUG: Ceres Solver Report: Iterations: 101, Initial cost: 7.202785e+02, Final cost:
2021-07-15 16:15:39,495 INFO: Removed outliers: 975
2021-07-15 16:15:39,549 INFO: -----
2021-07-15 16:15:39,596 INFO: IMG 8368.JPG resection inliers: 3119 / 3141
2021-07-15 16:15:39,628 INFO: Adding IMG 8368.JPG to the reconstruction
2021-07-15 16:15:39,814 INFO: -----
2021-07-15 16:15:39,850 INFO: IMG 8376.JPG resection inliers: 2874 / 2948
2021-07-15 16:15:39,878 INFO: Adding IMG 8376.JPG to the reconstruction
2021-07-15 16:15:40,029 INFO: -----
2021-07-15 16:15:40,066 INFO: IMG 8356.JPG resection inliers: 2838 / 2883
2021-07-15 16:15:40,093 INFO: Adding IMG 8356.JPG to the reconstruction
2021-07-15 16:15:40,236 INFO: Re-triangulating
```

Joonis 8. *OpenDroneMap* töötlemine

Pilve kasutamise suurima eeliseks ongi töötlemise aeg, kuigi *OpenDroneMap* tarkvara on loodud selliselt, et arvuti resursside kasutamine on väga nutikalt läbi mõeldud, mis annab töötlemise ajal veelgi suurima kiiruse, lõppkokkuvõttes see võtab ca 10 minutit. Valmis visualiseerimiseks kaust on esitatud Joonisel 9 (kus ruumiline mudel ise asetseb kaustas *odm_texturing*).

```
armaka@sfml:~/opendronemap/2015$ ls
cameras.json  odm_filterpoints  odm_textured_model_geo.json
images        odm_georeferencing  odm_texturing
images.json   odm_meshing        odm_texturing_25d
img_list.txt  odm_orthophoto     opensfm
odm_dem       odm_report
```

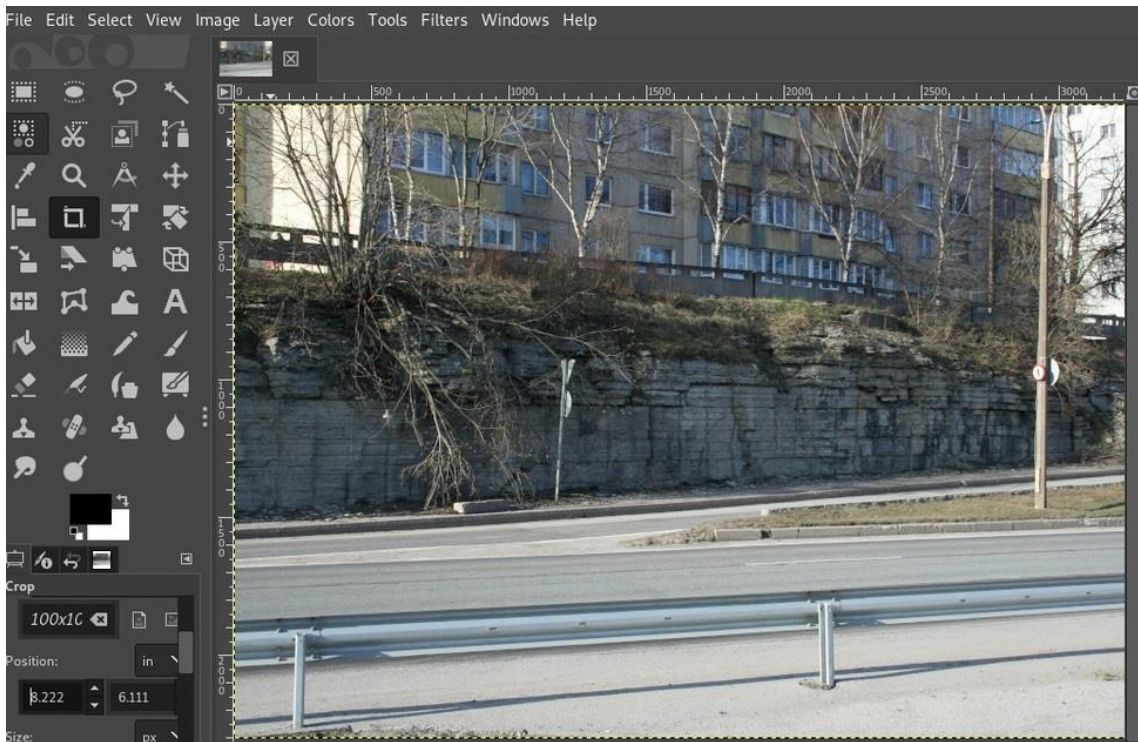
Joonis 9. Valmis *OpenDroneMap*i töökaust

Andmetega, mis on pärit aastast 2021, tuleb natukene rohkem tööd, nimelt, on vaja luua faili, mille kaudu saaks siduda piltide peal olevad pikslite asukohad (X,Y) maastikul mõõdetud kontrollpunktidega (X,Y). Vastavalt *OpenDroneMap* dokumentatsioonile tuleb teha fail nimega *gcp_list.txt*. Pikslite asukohtade tuvastamiseks aitab kaasa avatud lähtekoodiga tarkvara *GIMP* (Joonis 10), mida saab alla laadida kasutaja enda arvutisse kasutades selleks käsu:

- `apt-get install gimp`

*GIMP*i käivitamiseks kasutatakse käsu:

- `gimp`



Joonis 10. GIMP kasutajaliides koos pildiga ühest kontrollpunktist (liikumärk kalju juures)

Piltide üleslaadimine tööekraanile toimub läbi *File – Open*, ning seejärel hiire abil sihitakse kontrollpunkti asukohale ja alt saab näha (pildi peal nähtamatu) pikslite koordinaadid, mida tulebki kasutada *gcp_list.txt* failis kontrollpunktide seostamisel (vt Joonis 11). *OpenDroneMap* arendajad ütlevad, et iga kontrollpunkt peab olema nähtav ja tuvastatud (võetud pikslite koordinaadid) vähemalt viite piltide pealt.

```

GNU nano 4.8 gcp_list.txt
+proj=llcc +lat_1=59.33333333333334 +lat_2=58 +lat_0=57.51756393065556 +lon_0=24 +x_0=500000 +y_0=6375000 +ellps=GRS80 +tows84=0,0,0,0,0,0 +units=m +no_defl
6589501,769 548066,106 36,189 1176 1432 IMG_8339.JPG
6589501,769 548066,106 36,189 2180 1404 IMG_8340.JPG
6589501,769 548066,106 36,189 3196 1440 IMG_8341.JPG
6589495,827 548046,583 36,042 0956 1432 IMG_8343.JPG
6589501,769 548066,106 36,189 2880 1496 IMG_8344.JPG
6589495,827 548046,583 36,042 1376 1596 IMG_8345.JPG
6589495,827 548046,583 36,042 2520 1624 IMG_8346.JPG
6589495,827 548046,583 36,042 0644 1452 IMG_8347.JPG
6589501,769 548066,106 36,189 3156 1332 IMG_8347.JPG
6589494,889 548026,474 41,499 1160 0652 IMG_8350.JPG
6589495,613 548028,280 41,627 1428 0624 IMG_8350.JPG
6589494,889 548026,474 41,499 1064 0588 IMG_8353.JPG
6589495,613 548028,280 41,627 1388 0556 IMG_8353.JPG
6589494,889 548026,474 41,499 2438 0568 IMG_8354.JPG
6589495,613 548028,280 41,627 2756 0538 IMG_8354.JPG
6589492,839 548015,714 35,891 0984 1444 IMG_8354.JPG
6589494,889 548026,474 41,499 0816 0492 IMG_8357.JPG
6589495,613 548028,280 41,627 1144 0476 IMG_8357.JPG
6589494,889 548026,474 41,499 2312 0528 IMG_8358.JPG
6589495,613 548028,280 41,627 2648 0504 IMG_8358.JPG
6589492,839 548015,714 35,891 0568 1500 IMG_8359.JPG
6589492,839 548015,714 35,891 1320 1476 IMG_8360.JPG
6589492,839 548015,714 35,891 1216 1456 IMG_8365.JPG
6589492,839 548015,714 35,891 2428 1448 IMG_8366.JPG
6589495,827 548046,583 36,042 1256 1320 IMG_8367.JPG
6589494,889 548026,474 41,499 1468 0520 IMG_8369.JPG
6589495,613 548028,280 41,627 1740 0516 IMG_8369.JPG

```

Joonis 11. Andmetega täis *gcp_list.txt* fail

Faili päises on välja toodud Eesti koordinaatsüsteemi põhiprojektsiooni *LEST97* parameetrid, ning seejärel ridadena lisatud kontrollpunktide koordinaadid (X,Y,Z), pikslite koordinaadid (X,Y) ja

pildi täis nimi. Fail `gcp.txt` ise peab asuma kaustas 2021 koos *image* kaustaga. *OpenDroneMapi* käivitamine toimub täpselt samamoodi nagu varemgi.

2.2.4 COLMAP

*COLMAP*iga töötamise alustamiseks peab kõigepealt logida sisse klastrisse amp.

Kuna klaster on süsteem, milles reeglina töötab suur hulk kasutajaid üheaegselt, ja selleks on vaja mis tahes käsu käivitamisel protsessorile “otse öelda” mitu ressursi antud käsu jaoks on kasutada vaja (vaikimisi kasutatakse kõike ressursesse, mis võib põhjustada teistel kasutajatel ettearvamatuid tulemusi). Ressursi jaotamiseks tuleb iga käsu, mis on seotud andmete töötlemisega käivitada järgmiselt (üldine kuju):

- `srun -n 1 -cpus-per-task=16 -gres=gpu:1 <siia tuleb sisestada käsu>`

Tasub ka mainida, et *COLMAP* siamaani ei toeta kontrollpunktide kaudu ruumilise mudeli seostamist koordinaatsüsteemiga, vaid kasutab kaamera asukoha enda koordinaate selleks, seega siit ilmnebki *COLMAPi* esimene puudus – ta ei suuda siduda ruumilise mudeli koordinaatsüsteemiga kontrollpunktide faili järgi.

Ruumilise mudeli genereerimise alustamiseks tuleb kirjutada järgmine käsk:

- `srun -n 1 -cpus-per-task=16 -gres=gpu:1 colmap automatic-reconstruction -image-path <täis tee kaustani, kus on salvestatud pildid> --workspace-path <täis tee kaustani, kus on salvestatud piltide kaust> --num_threads 16`

Peale *Enteri* vajutamist alustatakse töötlemise protsessiga, mida saab näha Joonisel 12, sellel ajal ei tohi käsurea akent sulgeda või Interneti ühendust katkestada.

```
armaka@amp: ~/colmap/2015
File Edit View Search Terminal Help
Name: DJI02786-corrected.jpg
Dimensions: 2384 x 1688
Camera: #1 - SIMPLE_RADIAL
Focal Length: 1907.20px (Prior)
Features: 10292
Processed file [56/249]
Name: DJI02775-corrected.jpg
Dimensions: 2384 x 1688
Camera: #1 - SIMPLE_RADIAL
Focal Length: 1907.20px (Prior)
Features: 11650
Processed file [57/249]
Name: DJI02771-corrected.jpg
Dimensions: 2384 x 1688
Camera: #1 - SIMPLE_RADIAL
Focal Length: 1907.20px (Prior)
Features: 10386
Processed file [58/249]
```

Joonis 12. COLMAP ruumilise mudeli konstrueerimine

Peale konstrueerimise protsessi lõpetamist tekivad kaks abikausta ja üks fail töökaustas, sisenedes kausta *dense* ja seejärel 0 kuvad ekraanil (vt Joonis 13) fail *fused.ply*, milleks on COLMAPi abil loodud ruumiline mudel.

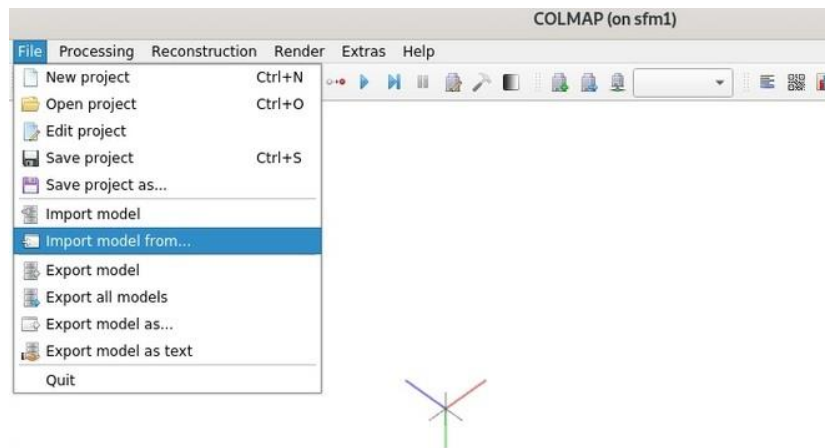
```
armaka@sfm1:~/colmap/2015/data$ ls
database.db dense sparse
armaka@sfm1:~/colmap/2015/data$ cd dense/
armaka@sfm1:~/colmap/2015/data/dense$ cd 0/
armaka@sfm1:~/colmap/2015/data/dense/0$ ls
fused.ply images run-colmap-geometric.sh sparse
fused.ply.vis meshed-poisson.ply run-colmap-photometric.sh stereo
armaka@sfm1:~/colmap/2015/data/dense/0$
```

Joonis 13. COLMAPi abil loodud ruumilise mudeli fail

COLMAPiga ruumiliste mudelite konstrueerimise protsessid nii 2015, kui ka 2021 aastatel on sarnased ja töötlemiseks võtab aega keskmiselt 40 minutit (suure andmemahu korral võib see aeg kahekordistada).

COLMAPi abil loodud ruumilised mudelid võib ka kuvada COLMAPi graafilise kasutajaliidesega, et seda käivitada tuleb sisestada järgmine käsk:

- colmap gui (avanenud rakenduse kasutajaliides on esitatud Joonisel 14)



Joonis 14. COLMAP kasutajaliides

Joonisel 14 näha mitte ainult COLMAPi graafilise kasutajaliidest, vaid ka ruumiliste mudelite kuvamise viis ehk *File – Import Model From ...*. Aastal 2015 ruumilise mudeli kuvamiseks (vt Joonis 15) võtab vaid 30 sekundit.



Joonis 15. COLMAPi graafilises kasutajaliidises loodud Pakri ruumiline mudel

Loodud ruumilise mudeli tihedus on 17806632 punkti. Graafiline kasutajaliides reageerib klikkide peale suhteliselt kiiresti, ning on mugav mudeli pöörlema erinevate telgede ümber. Kahjuks, kasutajaliidesel puuduvad erinevad võimalused kauguse mõõtmiseks mudelilt, seega pole võimalik hinnata mudeli täpsust. Vaatamata puudustele, on ruumilise mudeli kvaliteet väga kõrge (seda tõestab mudelil olevad teravad servad, mis päris selgelt iseloomustavad pankranniku kuju). See aga omakorda annab võimalusi täpsema kvalitatiivse hinnangu läbi viimisele.

Aastal 2021 autori poolt tehtud ruumiline mudel on esitatud Joonisel 16.



Joonis 16. Laagna ruumiline mudel

Kuna andmeid oli vähem, seega ka ruumilise mudeli punkte oluliselt vähem, kui Pakri omal – 2491088. Mudeli teravus on selgelt paistav, seega võib väita, et antud mudel on kõrge kvaliteediga.

Üheks suurimaks *COLMAPi* graafilise kasutajaliidese puuduseks on võimetus visualiseerida üks kõik millist faili formaate peale *.ply*, teisisõnu, ainult *COLMAPi* mudelid saaksid olla visualiseeritud graafilises kasutajaliideses.

2.2.5 Meshlab

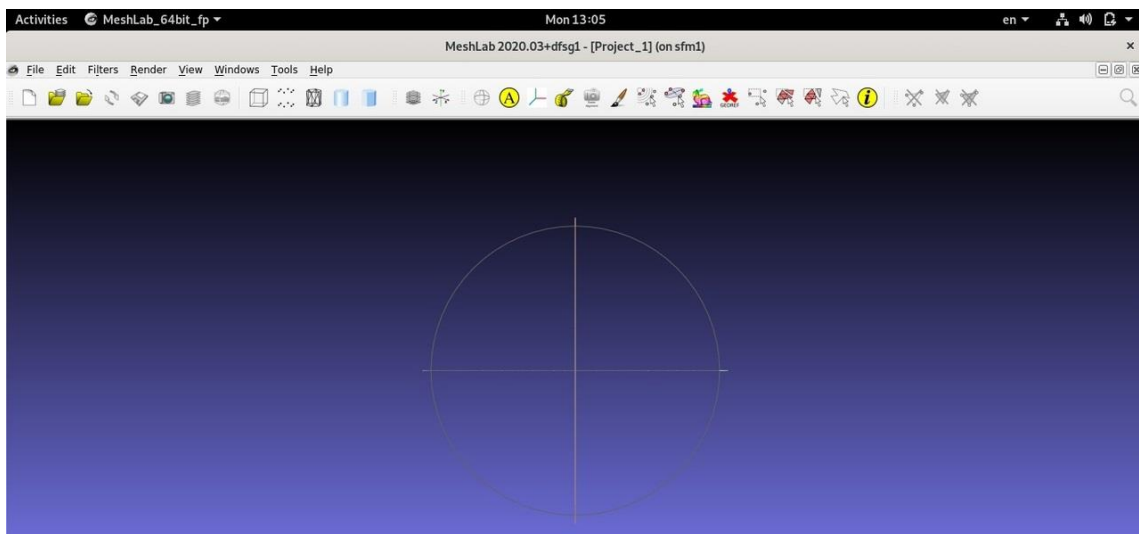
Antud avatud lähtekoodiga tarkvara on ruumiliste mudelite visualiseerimiseks töörist. Siiski on olemas üks oluline piirang (kõike ruumilisi mudeleid ei ole võimalik kuvada):

- Ruumilise mudeli faili suurus peab olema väiksem, kui 50 Mb

Meshlabi tarkvara on paigaldatud ainult pilve arvutis. Selleks, et avada *Meshlab* programmi tuleb sisetada käsuritta:

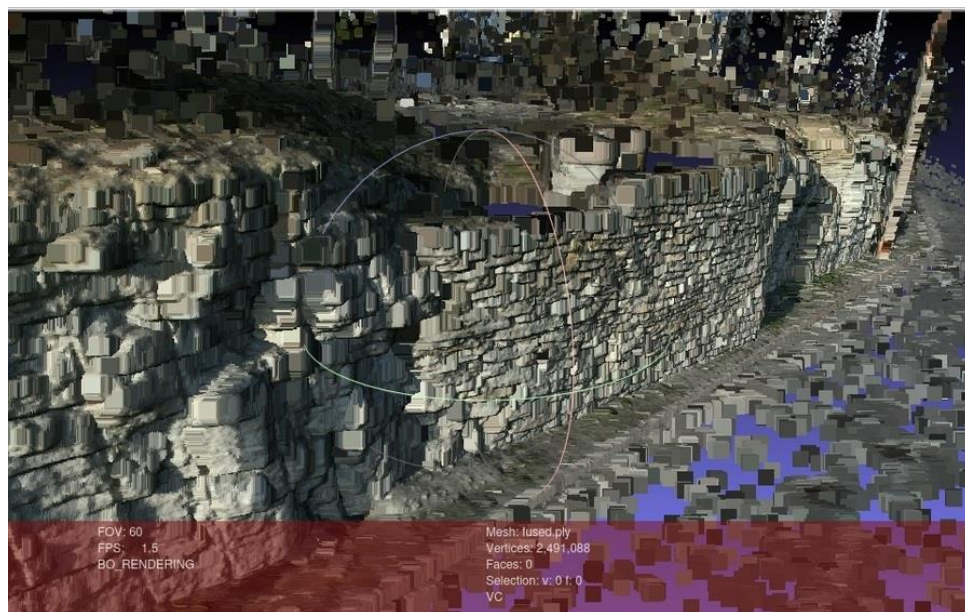
- meshlab

Peale käsu sisestamist kuvab kasutaja ekraanile kasutajaliides (vt Joonis 17).



Joonis 17. Meshlabi kasutajaliides

Ruumilise mudeli kuvamiseks vaja navigeerida *File – Import Mesh*. Alustades 2015 aasta COLMAPi mudeliga võib kohe öelda, et, kahjuks, antud mudeli kuvamine ei õnnestunud, kuna ruumilise mudeli faili suurus oli rohkem kui 500 Mb, seega ei ole võimeline Meshlab tegeleda selliste tüüpi failidega. Mis puudutab aga sama tarkvara abil loodud mudelit, kuid 2021 aastal, siis see sai edukalt genereeritud, ning ruumilise mudeli pilt on ilusti näha Joonisel 18.



Joonis 18. Meshlabi COLMAP ruumiline mudel 2021

Ruumiline mudel on terava servadega, mis on abiks kvantitatiivse hinnangul, kuigi kvalitatiivse hinnangu vaatenurgast on see nõrk mudel, kuna objektide kujundid on raskesti arusaadavad (kus, mis asub). Sama aasta, vaid *OpenDroneMapi* abil loodud, ruumilise mudeli saab ka visualiseerida (vt Joonis 19).



Joonis 19. Meshlabi abil visualiseeritud *OpenDroneMapi* mudel 2021

OpenDroneMapi ruumiline mudel on visuaalselt oluliselt parema väljanägemisega, kui sama mudel *COLMAPi* abil loodud, kuid samal ajal *COLMAPi* mudel on soodsam erinevate kvantitatiivse hinnangute mõttes (tänu teravatele servadele). Parki ruumiline mudel, mis oli loodud *OpenDroneMapi* abil samuti sai ilusti visualiseeritud *Meshlabi* (Joonis 20).



Joonis 20. *OpenDroneMapi* ruumiline mudel, mis on visualisieritud *Meshlabi* abil

Kahjuks, ei saa objektiivselt panna võrdlemisele kaht *COLMAPi* ja *OpenDroneMapi* abil genereeritud mudelit *Meshlabi*s, kuna see lihtsalt ei võimalda *COLMAPi* oma kuvada. Võib ainult oletada, et *COLMAPi* mudel oleks teravam, kui *OpenDroneMapi* oma, kuid visuaalselt näeb teine parem välja.

3 Analüüsi tulemused

Tarkvara analüüs tehakse eelmise peatükki põhjal, kus kirjeldati tarkvarade kõiki positiivseid ja negatiivseid omadusi üldistatud kujul. Antud peatükis valitakse parima avatud lähtekoodiga tarkvara lõputöö eesmärgi saavutamiseks võttes arvesse kõiki olevaid faktoreid, mis võivad seda mõjutada.

Ruumiliste mudelite kvaliteedi võib ilmtingimata hinnata kasutades järgmisi mõisteid:

- Ruumilise mudeli täpsus (kas pikkus maastikul ja mudelil on samad?)
- Georeferentseerimise võimalused
- Ruumilise mudeli tihedus (kui palju punkte on genereeritud ruumilises mudelis)
- Töötlemise kiirus
- Kasutaja sõbralikkus (mugavus manipuleerida, tööriistade olemasolu)

Kõik ülaltoodud omadused on tõsiseks aluseks tarkvara lõpliku hinnangu andmisel kui parimaks vahendiks Pakri pankranniku seiramiseks. Allpeatükkides on kirjeldatud need samad mõisted iga tarkvara kohta, ning Lisas 1 on välja toodud kokkuvõtlik tabel, kus on kirjeldatud just Pakri ruumilise mudeli loomise põhinäitajad, kuigi “täpsus“ lahtrisse on pandud väärtus, mis on saadud hinnates täpsuse Laagna ruumilise mudeli (eeldades, et edaspidi Pakril hakatakse kasutama *GPS RTK* tehnoloogiad).

3.1 OpenDroneMap

Kõigist selles lõputöös kasutatavatest tarkavarast võimaldab ainult *OpenDroneMap* ruumilise mudeli tõeliselt siduda koordinaatsüsteemiga mitte ainult kaamera asukoha järgi (seda tehnikat kasutati 2015. aastal Pakri mõõtmisel), vaid ka kontrollpunktide faili järgi. See omakorda tähendab, et mingi üksiku objekti jaoks ei ole vaja tuua drooni kohale, et teostada mõõdistust, vaid piisab fotoaparaadist ja *RTK GPS*ist. *OpenDroneMap*i abil saadud mudelite täpsused olid kontrollitud järgmiselt:

1. Võeti vastava aasta ruumilise mudeli *Meshlab*is lahti (kuna *COLMAP*i graafiline kasutajaliides ei võimalda kuvada mudeleid, mis ei ole loodud *COLMAP*i abil)
2. Laagna ruumilise mudeli jaoks mõõdeti pikkuse kahe kontrollpunktide vahel [m] (kaks betoonakaevu) mudelilt, ning võrreldi sama pikkusega Maa-ameti geoportaalist võetud

pikkusega, ja siis Pakri näitel kasutati selle jaoks Pakri tulepaagi aluse diameetri pikkuse [m] mudelilt, ning Maa-ametist võetud pikkuse¹⁷

3. Iga olukorra jaoks saadud vahed [m] ongi ruumiliste mudelite täpsused¹⁸

Ruumilise mudeli genereerimine ei võta palju aega, keskmiselt 10 minutit, ning faili suurus on piisavalt väike, et oleks võimalik seda avada igasuguste tänapäeval enimkasutatavate visualiseerimiseks tarkvarade abil. Mis puudutab kasutaja sõbralikusse, siis siin võib ainult mainida, et terve mudel luuakse ainult ühe käsu abil, lähtudes sellest on alus arvata, et tarkvara on kasutajasõbralik.

3.2 COLMAP

Kahjuks, ei võimalda *COLMAP* georeferentseerimist otse kontrollpunktide kasutamisest, kuigi võimaldab seda kaamera enda sisse ehitatud *GPS*i abil, mis on heaks uudiseks droonimõõdistamisel ja halvaks fotokaamerate kasutajatele. *COLMAP*i graafiline kasutajaliides ei võimalda kauguste mõõtmist mudelilt, mis teeb võimatuks mudeli täpsuse hindamist (ehk teisisõnu, antud lõputöös ei osanud võimalikuks välja selgitada *COLMAP*i abil loodud mudelid, kuna Pakri mudel ei avane *Meshlab*i kasutajaliideses, ning *COLMAP*i enda kodumaine kasutajaliidese ei oma selliseid tööriste, millega saaks kaugusi mõõta, samas Laagna mudel ei olnud georeferentseeritud). Üks puudustest ka ruumilise faili suurused, näiteks *Meshlab* ei võimalda seda kuvamast, see tähendab, et *COLMAP*i suuremahulised ruumilised mudelid saab ainult kvalitatiivselt hinnata *COLMAP*i graafilises kasutajaliideses. Mis puudutab aga kvalitatiivse hinnangusse, siis *COLMAP*i mudelit, mis on visualiseeritud just *COLMAP*i graafilises keskkonnas on väga kõrge kvaliteediga just mudeli teravuse puhul ja on parim töörist selleks. Töötlemise kiiruse poolt, on jah, *COLMAP* jääb *OpenDroneMap*i alla, teostades ruumilise mudeli genereerimist pealgi neli korda aeglasem. Kasutajasõbralikkus on nagugi *OpenDroneMap*i puhul päris hea tasemel ehk piisab vaid ühest käsust ja graafilise kasutajaliidese puhul võib väga mugavalt mudeli pöörelda, näiteks Pakri pankranniku pragude tuvastamisel ja uurimisel.

¹⁷ Maa-ameti andmete usaldatavus võib varieeruda 1 – 50 cm täpsusega, kuna andmed pärinevad nii geodeetilistelt alustelt (täpsemad), kui ka *LIDAR*i tehnoloogia abil saadud andmetelt (nõrgema täpsusega)

¹⁸ Mõlemad visualiseerimistarkvarad ehk nii *COLMAP* graafiline kasutajaliides, kui ka *Meshlab* ei võimalda ruumilise mudeli registreerida ükskõik millises koordinaatsüsteemis (mudelid ise on georeferentseeritud, aga visualiseerimisrakendused kasutavad kuvamiseks enda relatiivse koordinaatsüsteemi, kuigi säilitades objektide vahelised õiged pikkused)

3.3 Meshlab

Meshlabi saab hinnata ainult visualiseerimise vahendi seisukohalt. Tehtud töö tagajärjel võib väita, et tarkvara on päris võimas:

- Võimaldab kuvada mitukümmend faili tüüpi
- Omab tööristu, mille abil saab andmed kvantitatiivselt töödelda
- Töötab kiiresti
- Väga kasutajasõbralik

Kuigi samal ajal on üks suur ja märkimisväärne puudus – ei võimalda töödelda faile, mille suurus on suurem kui 500 Mb. Kahju on ka see fakt, et mudeli kuvamisel ei loo tarkvara mudelile vastava koordinaatsüsteemi keskkonna, vaid kasutab enda relatiivse, kus (0,0,0) punkt ehk koordinaatide alguspunkt asub mingis kindlas kohas ruumilise mudeli suhtes, kuigi samaks, hea on see, et kaugused on säilitud, ning see ei riku võimalust kvantitatiivse hinnangule (tarkvara kui ruumiliste mudelite visualiseerimise vahend on pandud võrdlemisele teiste, antud lõputöös käsitlevate, tarkvaradega Lisas 3).

Kokkuvõte

Lõputöö alguses oli tehtud teoreetiline ekskursioon sellistesse kontseptsioonidesse nagu fotogrammeetria, ilma milleta poleks ehk isegi soovitatav rääkida fotodel põhinevatest ruumimudelitest, ning kuidas seda teadusharu kasutavad tänapäeva fotoaparaadid, et koguda andmeid edasiseks töötlemiseks. Edasi oli lõputöös kirjeldatud üksikasjalikult Laagna teel välitööde teostamise meetodeid ning objekti enda lühikirjelduse (selle eripära ja uurimise põhjused). Lõputöö sissejuhatuses esitletud piirangutest on märgatult mõjutas ruumiliste mudelite kvaliteedi *fish eye* tehnoloogia puudumine, sest välitöö käigul saadud fotod ei kattu üksteisega piisavalt (ideaalis, pildistades mingi objekti, iga üksik foto peab kattuma 60% iga ülejäänud fotodest). Väga positiivne aspekt oli aga see, et Laagna tee objekt on *GPS*-püsijaamale suhteliselt lähedal, mistõttu paranduste edastamine toimub peaaegu silmapilkselt, samuti võimaldas avatud maastik (polnud puid ja kõrgmaid ehitisi läheduses) täielikult kasutada *GPS RTK* vastuvõtja kõiki tugevaimaid külgi. *TalTechi* poolt pakutavaid võimsamaid arvuteid (klaster, pilv) aitasid avatud lähtekoodiga tarkvara pika töötlemise protsessidest ära unustada.

Lõputöö tulemusena oli valitud välja kahte avatud lähtekoodiga tarkvara, mis on suurepärased vahendid Pakri pankranniku ruumimudeli loomiseks. Fakt on see, et mõlemal neist kahest tarkvaradest on teatud (ainulaadne) omadus, mis lõppkokkuvõttes üldpilti täiendab. Teisisõnu, üks tarkvara on ühes aspektis hea, teine aga teises ja kuna need on kergesti arvutisse installitavad ning hõlpsasti kasutatavad (kõik käsud on väga selged), siis tuleks just neid kahte tarkvara kasutada Pakri pankranniku uurimisel. Hetke seisuga on, kahjuks, ainsa ja parima kvantitatiivse analüüsi jaoks ruumilise mudeli loojaks ongi *OpenDroneMap*, tänu oma paindlikku georeferentseerimise võimalusele. Kvantitatiivse analüüs on kõige paremini teha *OpenDroneMapi* abil loodud mudeli põhjal, sest see tarkvara võimaldab täpselt ja ilma suurte andmekaotusteta luua mõõduka mudelifaili, mida saab mitte ainult georeferentseerida kahel viisil (kasutades kontrollpunkte faili või drooni sisse ehitatud *GPS* seadet), kuid ka seda saab avada mis tahes ruumilise mudeli visualiseerimise rakenduses. Renderdamiseks võib kahtlemata kasutada *Meshlabi*. Väga kasutajasõbralik liides ja paljude võimaluste rohkus muudavad selle rakenduse heaks abimeheks *OpenDroneMapi* mudelite uurimisel.

Arvestades antud lõputöös esinenud piiranguga *COLMAPi* tarkvara peale, nimelt võimatus visualiseerida oma ruumilise mudeleid *Meshlabis*, saab seda hinnata ainult kvalitatiivse võimaluste seisukohalt. Sellest lähtudes, kvalitatiivse analüüsi korral ei ole parima tööristi kui

COLMAPi ruumiline mudel (tänu oma teravusele, kuigi oli eelnevalt lõputöös mainitud, et Laagna mudel, mis oli visualiseeritud *Meshlabis* ei ole piisavalt “loomulik“, siis seda võib kergelt välistada just kasutades *fish eye* tehnoloogiat, mis aitab kaasa tihedama mudeli loomisel, ning seega kaovad ka erinevad segasused kohad mudelil), mis on visualiseeritud *COLMAPi* enda graafilises kasutajaliideses. Seega pole Pakri pankranniku uute pragude tuvastamisel täpsemat programmi, mis aitaks kasutajal tõepoolest probleemi nii igast küljest näha, kui ka reaalselt hinnata olukorra seisundi.

Tehtud töö ja Pakri klindi analüüsiks vajalike tarkavarade eduka kindlakstegemise põhjal võib julgelt öelda, et selle lõputöö eesmärk on tõesti täidetud ja suure kindlusega on võimalik neid tarkvarasid sedalaadi uuringutes kasutama hakata (nagu praktika on näidanud, saab mõlemate tarkvarade abil lahendada kõik selle valdkonna probleemid piisava täpsusega). Pakri analoogobjektile (Laagna teel) tehtud töö põhjal on võimalik korrigeerida eelmist tehtud töid, nimelt muuta suurema täpsuse saavutamiseks kohustuslikuks drooni sisseehitatud *GPSi* asemel *GPSi RTK* vastuvõtja kasutamine, samuti võib ka vabalt kasutada antud lõputöös loetletud avatud lähtekoodiga tarkvarad ruumiliste mudelite loomisel kvaliteeti kaotamata.

Võõrkeelne lühikokkuvõte

At the beginning of the thesis, a theoretical tour of concepts such as photogrammetry was made, without which it might not even be advisable to talk about photo-based spatial models, and how this discipline is now used by cameras to collect data for further processing. Next, the thesis described in detail the methods of fieldwork on Laagna Road and a brief description of the surveying area itself (its specifics and reasons for research). Regarding the limitations presented in the introduction of the thesis, the quality of the spatial models was significantly affected by the lack of fish eye technology, as the photos obtained during the fieldwork do not overlap by 60% each other. However, a very positive aspect was that the Laagna Road site is relatively close to the GPS basestation, so the transmission of corrections is almost instantaneous, and the open landscape (no trees and tall buildings nearby) allowed to fully use all the strengths of the GPS RTK signal receiving (see Appendix 3). The powerful computers (cluster, cloud) offered by TalTech helped to forget about the long lasting process of the spatial models construction.

As a result of the thesis, two open source software were selected, which are excellent tools for creating a spatial model of the Pakri klint. The fact is that both of these two programs have a certain (unique) feature that ultimately complements the overall picture. In other words, one program is good in one aspect and second in another, and because they are easy to install on a computer as well as easy in use (all commands are very clear), these two programs should be used as main studying and monitoring tools of the Pakri klint. Quantitative analysis is best done on the basis of a model created with OpenDroneMap, as it is this program that allows you to create a moderate model file accurately and without large data losses, which can not only be georeferenced in two ways (via ground control points file or drone internal GPS receiver), but can also be opened in any model visualization application, as an example, Meshlab can be used for rendering OpenDroneMap models. Very user-friendly interface and the abundance of many features make this application a good helper for OpenDroneMap models visualization.

For qualitative analysis, there is no better tool than the COLMAP, which spatial model is visualized in COLMAP's own graphical user interface. Thus, this is the precisest program for identifying new cracks in the Pakri klint, which would really help the user to see the problem from all sides, as well as to be able to visually assess the condition of the situation based on the good quality of the model. Based on the work done and the successful identification of the programs needed to analyze the Pakri klint, it is safe to say that the aim of this thesis has indeed been met

and can be used in this type of research with no doubt (as practice has shown, both programs can solve all problems with a greater accuracy). Based on the work done on Pakri's analog site (Laagna Road), it is possible to make some correction with relation to the previous works, namely to make it mandatory to use a GPS RTK receiver instead of drone built-in GPS for achieving greater accuracy, and to use free open source software, since it can be a good replacement for proprietary software with no lacks in functionality and, what's more important, accuracy of the spatial model.

Viidatud allikad

Einasto, R. (2008).

Miks Pakri pank variseb? - Eesti Loodus, 2008/4

Schwind, M. (2016). *Comparing and characterizing three-dimensional point clouds derived by structure from motion photogrammetry*. Texas A&M University, 12.2014

<https://tamucc-ir.tdl.org/bitstream/handle/1969.6/1137/Schwind%2C%20Michael%20thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (03.02.2021)

Warne, M. (2015). *Photogrammetric software as an alternative to 3D laser scanning in an amateur environment*. KTH Royal Institute of Technology, 2015

<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:826106/FULLTEXT01.pdf> (04.02.2021)

Jaud, M., Letortu, P., Théry, C., Grandjean, P., Costa, S., Maquaire, O., Davidson, R., Le Dantec, N. (2019). *UAV survey of a coastal cliff face – Selection of the best imaging angle*. HAL, 14.03.2019

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02067558/document> (05.02.2021)

Mõsovski, L. (2020). Pakri pankranniku 3D mudeli rekonstrueerimine kasutades ODM tarkvara. Tallinna Tehnikaülikool, 09.06.2020

<https://digikogu.taltech.ee/et/Item/fed7c145-ce07-4d30-844e-e60b2e948c9e> (16.03.2021)

Kasepõld, K. (2015). Paldiski pankranniku 3D mudeli rekonstrueerimine. Tallinna Tehnikaülikool, 10.06.2015

<https://digikogu.taltech.ee/et/Item/8428a09b-0252-4cdf-97f0-420aa88554bb> (16.03.2021)

Karjalainen, A. (2018).

Pakri pankranniku muutuste kvalitatiivne hinnang – Tallinna Tehnikaülikool, 2018/37

Herrmann, H., Kasepõld, K., Zaitseva-Pärnaste, I., Pastorelli, E., Didenkulova, I. (2015).

Photogrammetry based methodology for construction of a first reference 3D model of

Pakri Cliff for future monitoring of coastal changes and hazard assessment for Pakri lighthouse – Tallinna Tehnikaülikool, 2015/57

Schenk, T. (2005). *Introduction to Photogrammetry*. The Ohio State University, 08.2005
mat.uc.pt/~gil/downloads/IntroPhoto.pdf (20.03.2021)

Slazinik, C. (2010). *Understanding aperture (and how to use it)*. ClickItANotch, 29.11.2010
<https://clickitupanotch.com/aperture-the-basics/> (20.03.2021)

Mansurov, N. (2019). *What is ISO? The Complete Guide for Beginners*. Photographylife, 14.08.2019

<https://photographylife.com/what-is-iso-in-photography> (21.03.2021)

Saraf, S. (2020). *Leveraging Commercial and Open Source Software to Process and Visualize Advanced 3D Models on a Web-Based Software Platform*. University of Cincinnati, 09.11.2020
https://etd.ohiolink.edu/apexprod/rws_etd/send_file/send?accession=ucin1613748656629076&disposition=inline (21.03.2021)

Lisa 1 Ruumiliste mudelite genereerimise tarkvarad

	<i>OpenDroneMap</i>	<i>COLMAP</i>
Täpsus	< 40 cm	?
Georeferentseerimine	jah	jah (ainult kaamera järgi)
Mudeli tihedus	2 593 543	17 806 632
Töötlemise kiirus	10 minutit	40 minutit
Kasutaja sõbralik	jah	jah

Tabel 1. *COLMAP*i ja *OpenDroneMap*i põhiparameetrite võrdlustabel

Lisa 2 Trimble R6 põhiparameetrid

Staatilise mõõtmise täpsus	3 mm (X,Y) ja 3.5 mm (Z)
Kinemaatilise mõõtmise täpsus	8 mm (X,Y) ja 15 mm (Z)
GPS-seadme kaal	1.52 kg
Opereerimise temperatuur	-40°C kuni 65°C
Eluiga täislaetutuna	5 tundi
GPS-seadme ja juhitud maksimaalne opereerimise vahedkaugus	10 km
Kas veekindel?	jah
Hind (uus)	40 000 EUR

Tabel 2. *Trimble* R6 põhiparameetrite tabel

Lisa 3 Ruumiliste mudelite visualiseerimise tarkvarad

	<i>COLMAP</i>	<i>Meshlab</i>
Maksimaalne faili suurus, mida suudab töödelda	Ei ole määratud	500 Mb
Kas kasutaja sõbralik?	Jah	Jah
Kas on võimalik kaugusi mõõta?	Ei	Jah
Kas punktide koordinaadid on kohalikku koordinaatsüsteemis?	Ei	Ei
Mudeli laadimise kiirus	1 minut	10 sekundit

Tabel 3. *COLMAP*i ja *Meshlab*i visualiseerimise kasutajaliidese põhiparameetrite võrdlustabel

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Artjom Zingfeld (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Avatud lähtekoodiga tarkvara analüüs Pakri pankranniku 3D mudeli konstrueerimise jaoks, (*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Inga Zaitseva-Pärnaste, (*juhendaja nimi*)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

15.12.2021 (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtjaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.