



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO  
INSENERITEADUSKOND  
Virumaa kolledž

## **UUTE TEHNOLOOGIATE RAKENDAMISE HINNANG GEODEETILISTES MÕÕTMISTES**

**Evaluation of the application of new technologies in geodetic  
measurements**

MASINAEHITUS- JA ENERGIATEHNOLOOGIA PROTSESSIDE JUHTIMINE  
ÕPPEKAVA LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Aleksandra Jurasseva

Üliõpilaskood: 178648

Juhendaja: Veronika Shirokova,  
vanemlektor, programmijuht

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“01” juuni 2021.

Autor: Aleksandra Jurasseva /digiallkiri/  
/ allkiri /

Töö vastab rakenduskõrgharidusõppe lõputööle/magistritööle esitatud nõuetele  
“01” juuni 2021.

Juhendaja: Veronika Shirokova /digiallkiri/  
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud  
“24” mai 2021.

Kaitsmiskomisjoni esimees Viktor Andrejev /digiallkiri/  
/ nimi ja allkiri /

## **LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS JA REPRODUTSEERIMISEKS**

Mina Aleksandra Jurasseva (sünnikuupäev: 17.09.1992)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Uute tehnoloogiate rakendamise hinnang geodeetilistes mõõtmistes mille juhendaja on Veroonika Shirokova,

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas 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 punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

# TalTech Inseneriteaduskond Virumaa kolledž

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Aleksandra Jurasseva, 178648

Õppekava, peaariala: EDJR16/17 Masinaehitus-ja energiatehnoloogia protsesside juhtimine

Juhendaja: programmijuht, vanemlektor, Veroonika Shirokova,  
veroonika.shirokova@taltech.ee

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) Uute tehnoloogiate rakendamise hinnang geodeetilistes mõõtmistes

(inglise keeles) Evaluation of the application of new technologies in geodetic measurements

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida ja hinnata dronide kasutamise võimalust geodeetilistes mõõtmistes
2. Hinnata dronide mõõtmiste täpsust võrreldes teiste geodeetiliste mõõtmisvahenditega

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Analüüsida dronide kasutamise võimalust geodeetilistes mõõtmistes	21.03
2.	Kirjeldada teisi mõõteseadmeid geodeetilisteks mõõtmisteks	11.04
3.	Hinnata dronide mõõtmiste täpsust, kasutades matemaatilisi mudeleid	30.04
4.	Diplomitöö kokku kirjutamine ja vormistamine	16.05

**Töö keel:** eesti keel      **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "04"juuni 2021a

**Üliõpilane:** Aleksandra Jurasseva      "04"juuni 2021a  
/digiallkiri/

**Juhendaja:** Veroonika Shirokova      "04"juuni 2021a  
/digiallkiri/

**Programmijuht:** Veroonika Shirokova      "04"juuni 2021a  
/digiallkiri/

# SISUKORD

EESSÕNA .....	6
SISSEJUHATUS .....	7
1 MEHITAMATA LENNUAPARAADID JA FOTOGRAMMEETRIA .....	8
1.1 Droonide kasutusvaldkond .....	8
1.2 Lennunduse reeglid ja seadused Eestis .....	9
1.3 Droonide mudelid .....	10
1.3.1 DJI Phantom 4 RTK .....	10
1.3.2 DJI Matrice 300 RTK .....	12
1.3.3 DJI Agras T16 .....	13
1.3.4 Typhoon H Pro RTF FPV .....	14
1.4 Fotogrammeetria .....	14
2 GEODEETILISED MÕÕTMISED DROONIGA.....	16
2.1 Objekti digitaalmuudeli loomine ja töötlemine.....	16
KOKKUVÕTE .....	21
SUMMARY.....	22
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	23
LISA .....	24

## **EESSÕNA**

Käesoleva lõputöö idee tekis tänu Eesti Energia Kaevanduse peaspetsialist Allan Viil, kelle igapäevane töö on seotud erinevate objektide geodeetiliste mõõtmistega. Kuna tänapäeval droone kasutusala on väga lai ning mõõtmised droonide abil on muutunud väga populaarseks erinevates valdkondades, siis

Autor avaldab tänu TalTech Tartu kolledži, küberfüüsikaliste süsteemide töörühma insenerile Rinaldo Rüütli suure abi eest lõputöö kirjutamisel, nimelt võimaluse andmisel kasutada tema poolt Kukruse mäest tehtud droonipilte, samuti läbiviidud konsultatsioonide eest.

Võtmesõnad: Kukruse mägi, droon, geodeetilised mõõtmised, fotogrammeetria, diplomitöö

## **SISSEJUHATUS**

Tänapäeval geodeesia ja markšneideri valdkonnas väga aktiivselt kasutatakse mehitamata lennuaparaadid. Kaevanduse ja karjääri spetsialistid kasutavad droone väga laiali pinnareljeefi digitaalmudeli loomiseks, geograafiliste andmete kogumiseks. Antud probleem on väga aktuaalne, kuna erinevate mõõteseadmetega (nimelt, teodoliidid, taheomeetrid jne) tehtud mõõtmised võtavad inimestel väga palju aega. Kuid mehitamata lennuaparaadid teostavad samasuguseid mõõtmisi mõne tunni jooksul.

Antud diplomitöö eesmärgiks on uute võimaluste demonstreerimiseks ja rakendamiseks geodeetilistes mõõtmistes. Alamülesandeks on näidata fotogrammeetria tööpõhimõtet ja olulisust üleval poolt nimetatud valdkonnas ning samuti on luua ja töödelda pinnareljeefi digitaalmudeli.

Fotogrammeetria – see on teadus, mis määrab suvalisest objektist tehtud piltidest täpseid mõõtmisi ja kolmemõõtmelisi andmeid. Antud meetod on väga populaarne suurte objektide (hooned, pinnareljeefid jt objektid) uurimiseks. Kasutades suhteliselt odavamaid kaameraid ja andmete töötlemiseks mõeldud laiali kasutatavaid tasuta tarkvarasid, on võimalik kasutada antud tehnoloogiat erinevates valdkondades ja tööstuse vajadustes. [1]

Antud töö koosneb teoreetilisest ja praktilisest osadest, kasutatud kirjanduse loetelust ja lisast. Teoreetiline osa annab ülevaade erinevatest mehitamata lennuaparaatidest (antud juhul droonidest), annab teadmisi lennunduseks reeglitest ja seadustest Eesti piires ning räägitakse fotogrammeetria kasutamisest ja rakendamisest.

Praktiline osa koosneb uuritud objekti digitaalmudeli loomisest, punktipilve etapiviisilist illustratsioonist, punktipilve edasisest töötlemisest ja filtreerimisest ning samuti on toodud uuritud objekti mudeli mõõtmestamine ja mastaabi loomine. Lisas on toodud punktide koordinaadid, mida on plaanis edaspidi uurida teatud ajavahemikutel.

# 1 MEHITAMATA LENNUAPARAADID JA FOTOGRAMMEETRIA

## 1.1 Droonide kasutusvaldkond

Mehitamata lennuaparaadid on leidnud rakenduse inimeste erinevates valdkondades, samuti ka geodeesias, teaduses mis tegeleb Maa kuju määramisega, maapinnal teatud punktide asukohadega jt. Praktilisest aspektidest geodeesia see on maa-alade mõõtmestamine erinevate objektide (teed, maanteed jt) ehitamiseks, kaartide koostamine projektide ja maa ning metsade kasutuselevõtmiseks, maa-alade kaardistamine hoonestuseks. Geodeesia spetsialistid teostavad mõõtmisi kaardistamise vajaduste jaoks, koostavad maakaarte ja maastiku reljefi kirjeldust, hindavad kinnistu maksumust korjatud geodeetilise ja kartograafilise dokumentatsiooni põhjal. Geodeetidel on alati suur kogemus maastiku pildistamisel, kasutades kasvõi satelliitpildistamist, elektroonilisi taheomeetreid, 3D skännereid, digitaalode, geodeetiline tarkvara jt. Geodeesia valdkonnas tänapäeval mehitamata lennuaparaatide kasutamine on muutunud igapäevaseks tööks. Droone kasutatakse piltide konstrueerimiseks, kaartide loomiseks ja ruumiliseks analüüsiks sellistes valdkondades nagu: [2]

- Maastiku topograafiline õhust pildistamine;
  - Mõõtmised maa ja hoonete arvestamisega, maa kasutusala identifitseerimine;
  - LiDAR visualiseerimine – detailide ja hoonete täpne visualiseerimine maa pinnal;
  - Geograafiliste infosüsteemide loomine ja hoonete ehituse tegevusala kontroll;
  - Põllumajandusalade monitoring;
  - Veekogude ja jõgede kontroll loodusliku hädaolukordade kõrvaldamiseks;
  - Metsaalade monitoring mitte sihtkasutuse määramiseks;
  - Katastri arvestushaldus ning registreerimata isehitatud objektide ülesleidmine.
- [2]

Tänapäeval mehitamata tehnika on kõige efektiivsem ja kiireim meetod õhu pildistamise jaoks. Samuti antud meetod on kõige odavam ning annab kõige kvaliteetsema pildi ja tulemuse. Droonide tugevused geodeesias: [2]

- Mõõtmiste tegemiseks ja andmete korjamiseks kuuluva aja säästmine;
- Ühe lennu jooksul drooni abil on võimalik uurida rohkem pinda ja ruumi;
- Droon teostan mõõtmisi erinevates valdkondades, näiteks põllumajanduses, mäenduses, karjäärides ja raskesti liigipääsetavates kohtades.

Iga suvaline mehitamata lennuaparaat ei sobi geodeetilisteks mõõtmisteks. Niisuguste mõõtmiste jaoks droonil peaksid olema järgmised karakteristikud:



- Aku olemasolu, mis võimaldab drooni püsida rohkem aega õhus ilma aku laadimiseta;
- Kaamera peaks olema hea kvaliteediga, et selle abil tehtud pildid oleksid hästi loetavad ja teravad.
- Mehitamata aparaat peab tõusma geodeeti jaoks vajaliku kõrguseni, seega ta peaks omandama võimsa signaali.

Tänapäeval eksisteerivad väga palju erinevaid droone, mis on mõeldud konkreetse ülesannete täitmiseks. Konkreetsed ülesanded on jaotatud rühmadeks: [2]

- Maastiku tüüp;
- Kliima tingimused;
- Uuritava objekti või territooriumi mõõtmed;
- Pildistamiseks kuuluv aeg;
- Lõpptulemused mida tahetakse saada.

## 1.2 Lennunduse reeglid ja seadused Eestis

Lähtudes lennuameti [3] kodulehel toodud informatsioonist võib teha järelduse, et lihtsalt niisama me ei saa Eesti territooriumil drooni lendama panna. Eksisteerib rida seadusi ja reegleid mida on vaja jälgida.

Eesti territooriumi põhiala peal on kontrolli teostamata õhuruum, kui taevas suurte linnade peal on kontrolli teostav. Kontrolli teostamata õhuruumis võib drooni lendama panna ilma lennuameti loata kõrguseni kuni 150 m. Kontrolli teostatavas õhuruumis kõik on aga väga keeruline. [3]

Kontrolli teostatavas ruumis drooni lendama panemiseks on vaja lennuloa üks kord ära vormistada, peale seda peaks lennuametile kooskõlastamiseks teada enda iga planeeritava lennu kohta. Lennuluba vormistatakse väga lihtne lennuameti kodulehel ning kehtib terve aasta. Lennuloaga kaasneb ka riigilõiv suuruses 45 eurot. Luba sisaldab droonioperaatori nimi ja andmed, kuhu lennuakadeemia hakkab saatma lennuga kaasnevaid ohutusreegleid. [3]

Kontrolli teostav õhuruum hõlmab Tallinna, Pärnu, Tartu ja Emari lennubaasi. Lendamised sellistes õhuruumides on vaja lennuametiga kooskõlastada ning see ei ole kiire protsess. Seega on vaja juba varakult ära planeerida oma lennumaršruudi ja õigeaegselt teatama sellest lennuametile. Kooskõlastamine on tasuta, mille peamiseks eesmärgiks on lennu sihitajatele teada anda drooni lennu kohast, ajast ja kõrgusest. Kui lennukõrgus ei ületa 150 m, siis kooskõlastamine võtab aega kuni 3 tööpäeva, kui kõrgus ületab piiri 150 m, siis sellisel juhul kooskõlastamiseks kuulub kuni 7 tööpäeva. Lennud kontrolli teostatavas õhuruumis Pärnus ja Tartus on seotud ajalimiidiga. Kui on plaanis nädalavahetusel drooni lendama panna ning kõrgus ei ületa 150 m, siis kooskõlastamiseks ning loa pole vaja. Kooskõlastamist ei nõuta kui droon pannakse

lendama Tallinna „Tsoonis 9“. kõrgusel kuni 60 m. See on eritsoon, kus on lubatud droonide lendamise panemist kõrgusel kuni 60 m ilma kooskõlastamata. Kuid enne lendamist drooni operaator peaks kuulama infotunni lennuametis, mis on seotud lennuterminoloogiaga NOTAM. Selles infotunnis räägitakse droonide juhtimisest, lennu ohutusreeglitest. Lennuloa olemasolul piisab infotunni üks kord küllastamiseks.

Mõnedel juhtudel vajatakse ka eriloa. See puudutab inimesi, kes soovib droone lendama panna kaitseobjektide, piiripunkti jt samasuguste objektide juures. Lennuamet tavaliselt edastab infot kellega peaks veel lisaks kooskõlastama oma lendu. Kahjuks hetkel ei eksisteeri veel ühist andmebaasi, kus saab leida infot kellega ning mis olukorrast on vaja oma lendu kooskõlastada. Näiteks, riigipiiri jaoks on selleks organisatsiooniks politsei ja piirivalveamet, aga kaitseobjekti jaoks – see on riigikaitse. [3]

### **1.3 Droonide mudelid**

Geodeetilised mehitamata lennuaparaadis on unikaalsed seadmed, mis ideaalselt sobivad antud valdkonda spetsialistide vajadustele. Antud aparaadid vastavad kaardistamise nõuetele. Kõige populaarsemad mudelid on DJI Phantom 4 RTK, DJI Matrice seeria ja teised mehitamata aparaadid, mis on antud valdkonna jaoks firmaga konstrueeritud. Samuti praktiliselt iga aparaati saab moderniseerida vastavalt mõõtmiste vajadustele lisades RTK mooduli ning rakendades spetsiaalset tarkvara, näiteks DJI Mavic 2 Pro. RTK positsioneerimise moodul (sisaldab GPS L1 L2, GLONASS L1 L2, Galileo E1 E5a ja BeiDou B1 B2) võimaldab minimiseerida punktide arvu, viimane säästab parameetrite häälestamiseks kuuluva aega kuni 75%. RTK mooduli all asub positsioneerimise satelliitsüsteemide moodul (GNSS), mis võimaldab tagada lennu stabiilsuse nõrga signaaliga kohtades, näiteks suurtes linnades.

#### **1.3.1 DJI Phantom 4 RTK**

DJI Phantom 4 RTK (vt joonis 1.1) oli määratud parimaks drooniks geodeetiliste mõõtmiste ja kartograafia jaoks. Antud droon on väga kompaktne ja täpne detailse kaartide loomiseks. DJI Phantom 4 RTK annab maksimaalselt täpseid andmeid, kasutades väiksema marsruudi punktide arvu. Drooni on sisse ehitatud uus RTK moodul, mis võimaldab maksimaalse täpsusega ning minimaalse veaga reaalajas andmeid saada. Antud droon sisaldab ka positsioneerimise satelliitsüsteemi mooduli, mis vastutab lennu stabiilsuse eest suvalisel alal. [4]



Joonis 1.1 DJI Phantom 4RTK [4]

DJI Phantom 4 RTK eelised:

- Maksimaalselt väga täpne süsteem piltide töötlemise jaoks, tänu 1-tollise maatriksile CMOS. Kvaliteetsed pildid (kuni 20 megapikslieni).
- Täpsete andmete korjamine TimeSync pealt. Antud süsteem võimaldab pidevat sidet kaamera, kontrolleri ja RTK mooduli vahel.
- Edastussüsteem OcuSync.
- Mobile SDK täistoetus.
- Ühildatavus mobiiljaamaga D-RTK 2. [4]

Puudusteks on ainult kõige hind.

DJI Phantom 4 RTK koos rakendusega GS RTK – see on täiskomplekt geodeedi jaoks korraliku töö teostamiseks.

Antud mehitamata lennuaparaat on kasutusel „Estonia“ kaevanduses. Pinna peal tehakse põhiselt ladude ja puistangute mõõtmisi. Estonia kaevanduses kõik mõõtetööd teostatakse markšneideri osakonna poolt kombineeritud süsteemiga, kasutades globaalnavigatsiooni süsteemi (GNSS) ja droone. Süsteemi GNSS mõõtmise täpsus vastavalt nõudmisele «Markšneiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord» [RT I, 18.08.2020, 3 - jõust. 21.08.2020] ja lisale «Fotogramm-meetrilise mõõdistuse nõuded mehitamata õhusõiduki kasutamisele markšneiderimõõdistusel [RT I, 18.08.2020, 3 -

jõust. 21.08.2020] peaks olema kontrollitud enne ja pärast mõõtmisi sooritamist geodeetilises punktis, mille andmed asuvad riigi andmebaasis.

### 1.3.2 DJI Matrice 300 RTK

See on uus tööstusdroneer (vt joonis 1.2), mis võib viibida õhus kuni 55 minutit. Kui kasutada seda droni koormusega 2,7 kg, siis aku peab vastu kuni 31 minutit. [4]



Joonis 1.2 DJI Matrice 300 RTK [4]

DJI Matrice 300 RTK eelised:

- Suur kaitseaste (IP 45), see tähendab seda, et droneer on kaitstud tolmu ja vee eest.
- Kaks akud isesoojenemise süsteemiga, mis võimaldab kasutada seda droni talvel temperatuuril kuni -20.
- Ohutu lennusüsteem.
- Inertsiaalplokkide olemasolu (IMU). IMU rikke korral võimaldab säilitada stabiilsust ja teostada ohutu maandumist.
- Kaks kompassi ja kaks baromeetrit.
- Kaitstud kokkupõrgete ja avarii eest. [4]

Antud droni või kasutada elektriliinide, puuraukude, veetorude, naftaplatvormide uurimiseks ning objektide kontrollimiseks õhust.

### 1.3.3 DJI Agras T16

See on esimene põllumajanduslik droon (vt joonis 1.3), mis on parendatud moodulkonstruktsiooniga ning suure pihustamisdiameetriga. Antud aparaat võimaldab kasutada rasket koormust ning muudab põllumajanduslikke protsesside efektiivsust. T16 omab tehisintellekti, peale seda võib teostada 3D mõõtmisi, et hõlmama suurt territooriumi. [4]



Joonis 1.3 DJI Agras T16 [4]

DJI Agras T16 peamised eelised:

- Kõrge IP tase, mis räägib sellest, et ta on hästi kaitstud tolmust ja veest.
- Paki maht – 16 liitrit, pihustamisdiameeter 6,5 m;
- Pihustamise maksimaalne kiirus 4,8 liitrit minutis.
- On võimalik töödelda 10 ha ühe tunni jooksul.
- Kaks IMU moodulit, kaks baromeetrit ohutu lennu jaoks
- RTK dupleerimine + satelliitsüsteem, mis võimaldab suure positsioneerimise täpsust.
- Parendatud raadarite süsteem
- Kaardistamine reaajas.
- Videolokaator kiire dünaamilise moodustamisega (tehnoloogia DBF).
- Andmete edastussüsteemi OcuSync 2.0 olemasolu
- stardimassi 39,5 kg. [4]

### 1.3.4 Typhoon H Pro RTF FPV

See on väga kerge mudel (vt joonis 1.4), mis on varustatud kollektori vaba mootoriga. Droon omab kokkupandava konstruktsiooni. Lennustardi ettevalmistamine ei võta väga palju aega ning ei nõua kokkupanemiseks eritööriistu. Peale starti droon saab püsida õhus kuni 25 minuti ning saab ületada 2 km vahemaad. Pildistamiseks on droon varustatud video võimalusega kaameraga. Kaamera saab pöörata 360 kraadi võrra. Operaator võib jälgida pildistamist ja filmimist online režiimis drooni ekraanil. Droon omab mitu lennurežiimi: liikumine programmeeritud marsruudi järgi, „tule minu järgi“ jt. Droon on väga kerge, mass ei ületa 1100 g. [4]



Joonis 1.4 Typhoon H Pro PTF FPV [4]

Typhoon H Pro RTF FPV eelised:

- Omab kõike vajalikke lennurežiime, mida kasutatakse geodeesia valdkonnas;
- Automatiseeritud lennustart, maandumine ja tagasimine;
- On olemas režiim, mis piirab lennutsoone;
- Väga hea baaskomplekteerimine;
- Sobib go pro jaoks. [4]

Puudusteks on antud aparadi sõltuvus kliimatingimustest ning väga väike lennukaugus ja lennuaeg.

## 1.4 Fotogrammeetria

Kartograafias kahemõõtmelisest piltidest täpsete kolmemõõtmeliste mudelite loomiseks droonide abil kasutatakse fotogrammeetriat. Geograafilise sidumisega mõnede

aeropiltide ühendamise ja töödeldamise kaudu fotogrammeetrilisi meetodeid kasutatakse sisendandmete loomiseks, nimelt: [1]

- Kolmemõõtmelised punktipilved;
- Digitaalsed reljeefi mudelid;
- ortomosaiik.

Piltide fotogrammeetriline töötlemine omab järgmised eelised: [1]

1) objektide piltide järgi võib saada arvulisi andmeid, nimelt väga suure tihedusega, mida pole võimalik kätte saada tavaliste mõõtmiste käigus;

2) Arvulist ja graafilist informatsiooni Objekti kohta võib saada kontaktivaba meetodil. See on väga kasulik kui objekt asub ohtlikus kohas;

3) Operaator, kes tegeleb fotogrammeetriaga, asub inimeste jaoks magavas tingimuses (nt kabinetides);

Fotogrammeetriaga tegelev tarkvara omab lihtsat kasutussüsteemi. Tarkvara registreerib automaatselt ühispunkte iga pildi vahel ning seejärel arvutab nende vahelisi kauguse 3D ruumis. Tulemuseks saame punktipilve, mida saab muunduda võrkudesüsteemiks. Mõned tõsisemad programmid sisaldavad pilvede puhastamiseks erinevaid funktsioone (filtreid), et vähendada pilve tihedust, parendada kvaliteedi. Kuna antus töös uuriti Kukruse tuhamägi, siis on otstarbekas väikse raadiusega fotogrammeetriat kombineerida aerofotogrammeetriaga. Viimane tähendab seda, et kaamerat paigaldatakse lennuaparaadile (tavaliselt see on mehitamata lennuaparaat) hoonete, mägede, linnade pildistamiseks. Kvaliteetse 3D mudeli loomiseks on vaja teha kümneid, sadu või tuhande fotosid. Edasi saadud andmeid töödeldatakse arvutiprogrammis. Parema kvaliteedi tagamiseks piltide kattuvus peaks olema 80%. [1]

## 2 GEODEETILISED MÕÖTMISED DROONIGA

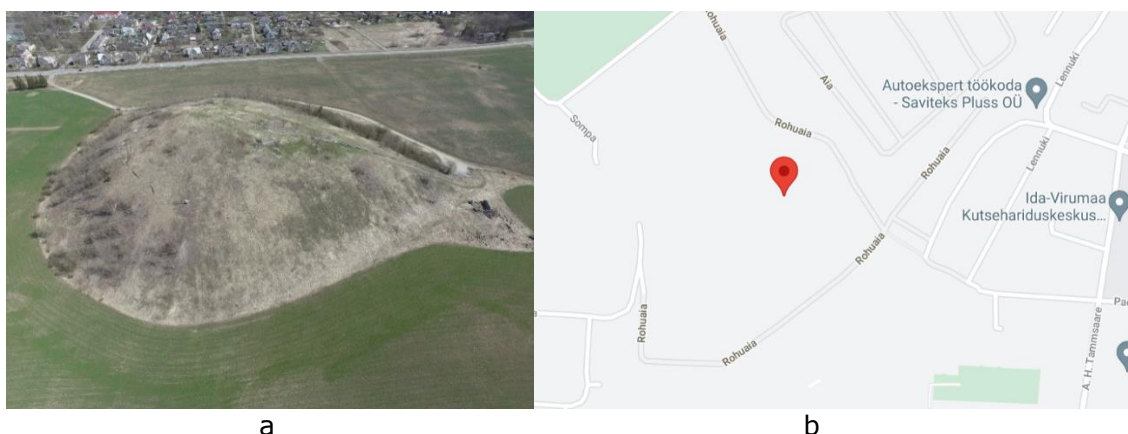
Maastiku digitaalmodeli moodustamise täpsuse suurendamise piki kaevandi see on väga aktuaalne ülesanne. Mäetööstuse ohutus sõltub kaevandi seisukorrast. Väga tähtis on ka kaevandi geomeetria. Viimastele hästi mõjutavad erosiooni protsessid, kliima, hüdroloogia. Kaevandi seisundi monitoorimiseks on vaja digitaalset mudelit. Viimase moodustamiseks nõutakse plaanilist õhust pildistamist, samuti on vaja kaevandi pinnast ja selle ääres asuvatest aladest pilte. Pildistamise kõrgus arvutatakse lähtudes kaamera tehnilisest parameetritest ning peaks tagama iga järjestikku tehtud piltide paari nõutud kattumist (kõige parem kattumine on 80%). [5]

Kaevandi digitaalmodeli loomiseks on vaja määrata pildistamise punktide koordinaadid. Selleks kasutatakse geodeetilisi vastuvõtjaid (näiteks, GPS navigaator). Lennuaparaatide (antud juhul drooni) koordinaatide järgi ning kauguste järgi punktideni Maa pinnal arvutatakse maapinna punktide koordinaadid, konstrueeritakse punktipilv, mis kujutab ennast vaadeldud kaevandi punktmudeli. Antud pilve ja aeropiltide pealepanekute tulemusena moodustub kaevandi kolmemõõtmeline mudel. Saadud punktipilv töödeldakse tarkvara abil, määratakse kaugusi ja objektide mõõtmeid. [5]

### 2.1 Objekti digitaalmodeli loomine ja töötlemine

Antud töös on demonstreeritud droonide kasutamise võimalus geodeetiliste mõõtmiste jaoks. Samuti näidatakse ka uuritavast objektidest digitaalmodeli loomist.

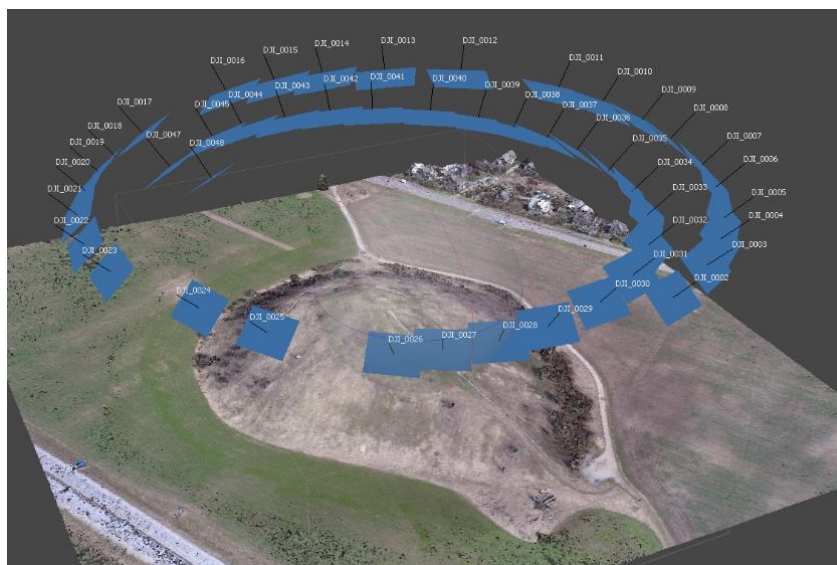
Töös oli uuritud tuhamäe Kukruse (vt Joonis 2.1 a), mis asub Eestis, Ida-Virumaa maakonnas (vt Joonis 2.1 b). Antud tuhamäe andmed ja punktipilv oli antud TalTech Tartu kolledži inseneri Rinaldo Rüütli poolt erialapraktika II käigus. Pildid oli tehtud drooni DJI Matrice 100 abil. Oli tehtud kokku 46 aerofotod (vt Joonis 2.2).



Joonis 2.1 Kukruse tuhamägi: a) mäest tehtud üksikfoto; b) Google map-ist võetud mäe asukoht [6]



Kuna antud mägi on ümardatud kujuga, siis on otstarbekas alguses teha fotod ümber mägi ning edasi erinevates nurkadest. Sellisel juhul on võimalik saada maksimaalselt usaldatava digitaalmudeli.



Joonis 2.2 Aeropiltide asukoht ja vaatenurk

Digitaalmudeli loomiseks ning hiljem selle töötlemiseks oli võetud juba valmis punktipilv. Viimase töötlemiseks on kasutatud tasuta tarkvara CloudCompare [7]. Antud tarkvara on vabalt kättesaadav ning ei nõua litsentsi. See on universaalne programm punktipilve töötlemiseks ning nende pilvedega juhtimiseks. Tarkvara sisaldab filtreerimist punktide skalaarväärtuste järgi (näiteks, LAS klassifitseerimine, redigeerimine, võrkude moodustamine jne) [8-10].

Töö alguses punktipilv laaditakse tarkvara ülesse. Saadud kuju sisaldab umbes 4 miljonit punkte. Edasi on vaja määrata mastaabi, nulltasest, mille suhtes hakatakse määrama punktide asukohta ning samuti kaugusi. Teise sõnadega tekitatakse lokaalse koordinaatsüsteemi.

Kurkuse tuhamäe teoreetilisteks parameetriteks [6] on võetud kõrgus 40 m ja pindala 4,85 ha. Eeldades, et mäe põhja pindala on ringjoone kujuline, siis võib määrata mäe läbimõõtu (valem 2.1)

$$S = \pi r^2 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2, \quad (2.1)$$

kus

$S$  – Kukuruse mäe pindala;

$\pi = 3,14$  – konstant;

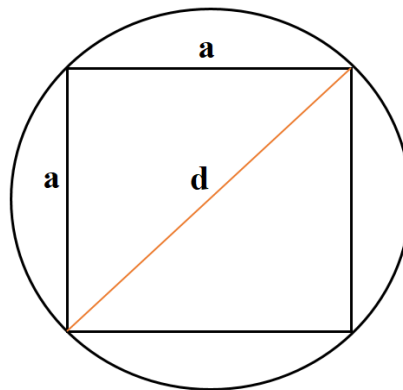
$r$  – ringjoone raadius (see on mäe alus);

$d$  – ringjoone diameeter.

Seega mäe diameetriks saame:

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{4,85 \cdot 10^4}{\pi}} \approx 250 \text{ m.}$$

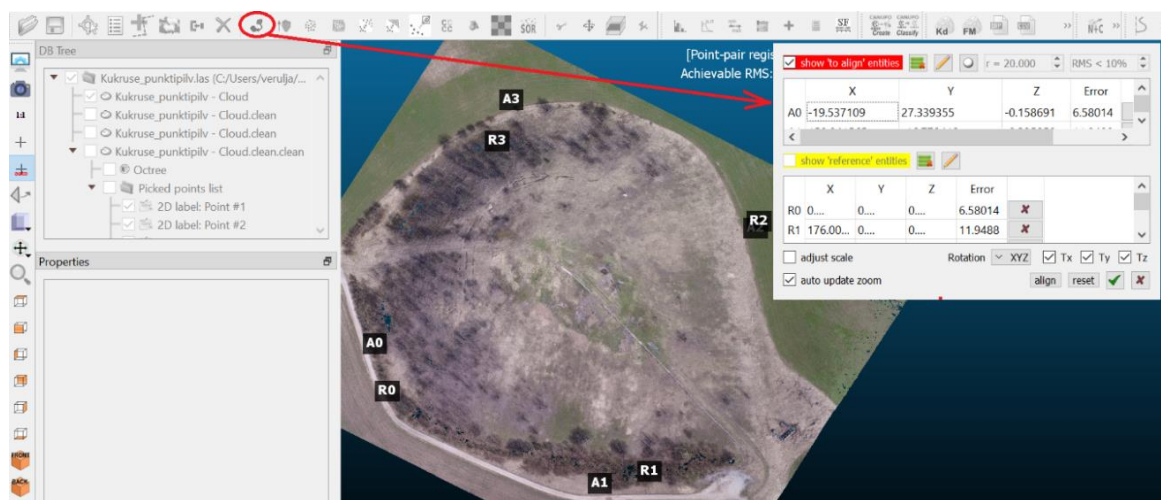
Kõigepealt peaks tarkvaras määrama mastaabi. Selleks on vaja kasutada tasandusfunktsiooni 4-ja punkti järgi (Aligns cloud by picking equivalent point pairs). Selleks asendame ringjoone selle sisse joonestatud ruuduga (vt joonis 2.3). Seega ruudu diagonaal on võrdne ringjoone läbimõõduga  $d$  ning ruudu pikkus on võrdne:  $a = \frac{250}{\sqrt{2}} \approx 176 \text{ m.}$



Joonis 2.3 Matemaatiline mudel tasandusfunktsiooni kasutamiseks

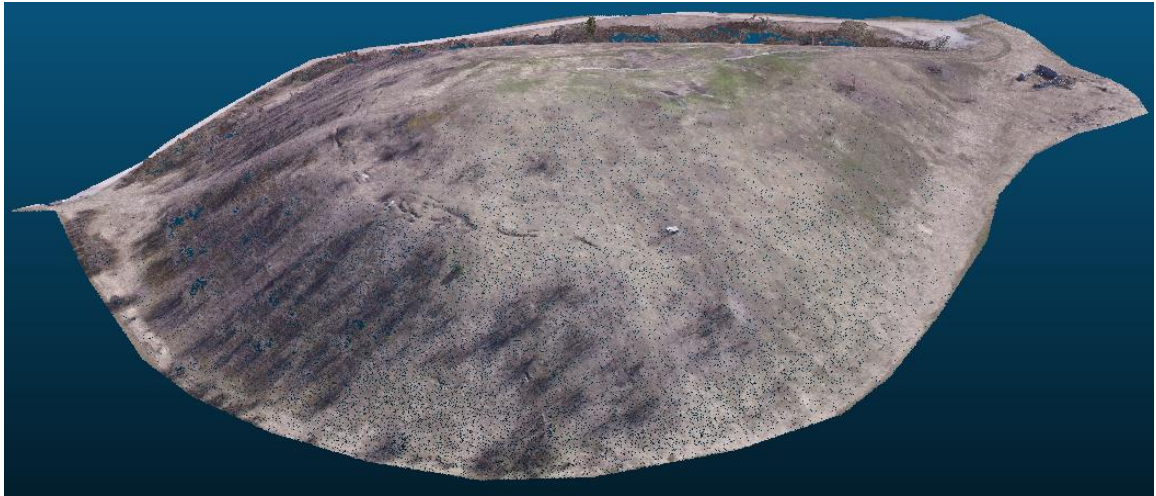
Ruudu külje pikkust kasutatakse üleminekumatriksi koostamiseks (vt joonis 2.4). Saadud matriks on toodud valemis 2.2:

$$\begin{pmatrix} -0.210110 & -0.977664 & 0.005199 & 931.359070 \\ -0.977528 & 0.210168 & 0.016409 & 642.615417 \\ -0.017135 & -0.001634 & -0.999852 & 20.906773 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 1.000000 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$



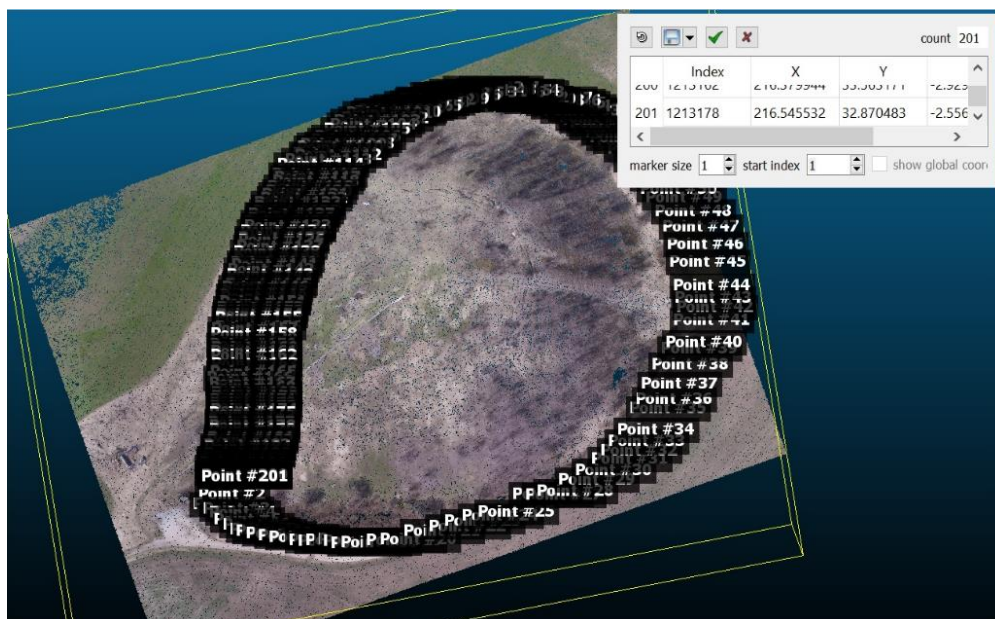
Joonis 2.4 Üleminekumatriksi koostamine tarkvaras CloudCompare

Punktipilve edasiseks töötlemiseks on vaja rakendada erinevaid filtreid. Antud töös on kasutatud järgmist filtreerimist: SOR filter, Noise filter. Seega pilve tihedus moodustub umbes 1 miljonit punkti (vt Joonis 2.5).



Joonis 2.5 Punktipilve peale filtrite kasutamist

Peale pilve kalibreerimist ja mastaabi määramist võib teostada mõõtmisi. Antud töö eesmärgiks on demonstreerida digitaalvõimalusi krundi liikumise või kaevandi kahanemise jälgimiseks erinevatel ajahetkedel. Seega üheks näiteks on võetud punktide hulk mäe piki übermõõtu. Funktsiooni Point Picking abil võib teostada üksikute punktide asukoha, punktide vahelise kauguse ja nurkade määramiseks. Juhul, kui on vaja saada teatud punktide kogumi, siis on otstarbekas kasutada funktsiooni Point List picking. Võetud punktide kogum on näidatud joonisel 2.6.



Joonis 2.6 Funktsiooni Point List picking kasutame punktide asukoha määramiseks

Saadud punktide koordinaadid võib salvestada erineval kujul (kohalikes koordinaatides, globaalkoordinaatides, pilvede kujul jne). Töö Lisas on toodud punktide koordinaadid (x, y, z) formaadis ASCII. Saadud punkte võib importida teiste arvutiprogrammidesse (näiteks, Excel või MatLab) ning teostada edasiset töötlemist ja modelleerimist vastavalt vajadustele.

Krundi kahanemise jälgimiseks on vaja drooniga soorida analoogilisi mõõtmisi teatud ajavahemiku pärast (näiteks ühe aasta pärast). Hiljem antud piltidest on vaja moodustada punktipilve, seda pilve töödelda ning saada uusi koordinaate mäe piki übermõõtu. Saadud andmed võrreldakse eelmiste andmetega ning saadetakse krundi liikumise pildi.

## KOKKUVÕTE

Antud töö käigus oli teostatud järgmised praktilised mõõtmised ja saadud järgmised tulemused:

1. On toodud ülevaade mehitamata lennuaparaatidest, nende eelistest ja puudustest sõltuvalt mõõtmise objektidest.
2. Fotogrammeetria teaduse rakendamine geodeetilistes mõõtmistes kaevandi kahanemise ja krundi liikumise uurimiseks.
3. On näidatud Kukruse tuhamäe digitaalmudeli loomine laiali kasutatavas tarkvaras CloudCompare. On töödeldud juba valmistehtud punktipilv, mis oli antud Tartu kolledži küberfüüsikaliste süsteemide töörühma inseneri poolt Rinaldo Rüütli. Mastaabi määramiseks oli võetud mäe reaalsed andmed, nagu kõrgus 40 m ja pindala 4,85 ha. Selleks koostati üleminekumaatriksi.
4. Punktipilve töötlemiseks, täpsemalt pilve tiheduse vähendamiseks, on kasutatud erinevaid filtreid. Selliste meetoditega pilve tihendus on vähendatud praktiliselt 2 korda.
5. On tehtud punktide mõõtmised (ehk punktide koordinaatide salvestamised) piki mäe ümbermõõtu. Viimane on tehtud selleks, et hiljem teatud aja möödumist jälgida neid punkte ning määrata krundi liikumist või kaevandi kahanemist.

Saadud andmete põhjal võib luua 3D mudeli, mida saab hiljem töödelda mingis teises tarkvaras (nt MatLab või Excel, jt) ning hiljem teostada erinevaid soojus- või seismilisi arvutusi (näiteks, lahendada probleemi suure temperatuuri olemasoluga mäe sees).

## **SUMMARY**

During this work: Evaluation of the application of new technologies in geodetic measurements, some studies and measuring were undertaken by the author Aleksandra Jurasseva:

1. The review of pilotless aircrafts is conducted. Their advantages and defects are detected for this task.

2. Application of science of photometry is shown in the surveyor measuring for research fallouts of soil.

3. In this work the construction of digital model of mountain Kukruse is shown in the program CloudCompare. The prepared cloud of points was processed. This information of the mountain was taken for basis of scale (area 4,8 ha and height 40 m) Matrix of transformation was used in these calculations.

4. To work with the cloud it was necessary to reduce its density. Different filters were used for this purpose. Thus, cloud was reduced in 2 times.

To know moving of mountain it was necessary to do measuring of coordinates of points on a perimeter.

This information helps to make 3D Model. With this model it is possible to work in other programs. Also, it will help to do thermal or seismic calculations. For example, the decision of problem of large temperature into the mountain.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Linder W. Digital Fotogrammetry. Springer, Kindle Edition, 2013.
2. Стагин С.С., Гетманцев А.Ю. Перспективы использования средств радиоэлектронной борьбы в комплексах с беспилотными летательными аппаратами: конф. г. Коломна, 2016. 274 с. 244-248.
3. Lennuameti koduleht. [Online] <https://www.ecaa.ee/en>.
4. Droonide müük Eestis. [Online] [www.droon.ee](http://www.droon.ee).
5. Рощин Д. А. Повышение точности формирования цифровой модели местности вдоль железнодорожного пути. – Измерительная техника, 2021, № 2, с. 22-29.
6. Google kaardid. [Online] <https://www.google.com/maps>.
7. CloudCompare, version 2.6.1. User manual. [Online] <http://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf> (02.02.2018).
8. Волгин Д.Ю. Метод решения задач мониторинга объектов культурного наследия на основе информационного моделирования: Выпускная квалификационная работа бакалавра. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, 2018.
9. Siro S. Concept of the drone testing center at Tallinn University of Technology. Tallinn, Tallinna Tehnikaülikool, 2020.
10. Eker R., Aydin A., Hübl J. Unmanned aerial vehicle (UAV)-based monitoring of a landslide: Gallenzerkogel landslide (Ybbs-Lower Austria) case study. - Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190, 28.

# LISA

Tabel Punktide koordinaadid Kukruse tuhamäe piki übermõõtu

X	Y	Z
223.804382324219	19.531738281250	0.409343719482
219.786682128906	23.546447753906	-1.596961975098
218.785827636719	15.956237792969	0.385581970215
215.908508300781	12.781555175781	0.322519302368
213.960815429688	8.355957031250	0.341779708862
209.810119628906	4.648925781250	0.274364471436
206.664306640625	1.334167480469	0.229612350464
203.627014160156	-0.423522949219	0.250982284546
198.203735351563	-2.741638183594	0.220746994019
191.938964843750	-5.353820800781	0.148307800293
186.554992675781	-7.636413574219	0.120857238770
176.601623535156	-11.467834472656	-0.016777038574
171.796264648438	-12.676879882813	-0.045600891113
167.451049804688	-13.120422363281	-0.072471618652
161.038452148438	-14.041015625000	-0.172929763794
158.213378906250	-15.554138183594	-0.188449859619
154.599243164063	-17.821105957031	-0.228439331055
149.137329101563	-18.445129394531	-0.367095947266
135.757324218750	-20.022766113281	-0.570573806763
128.493103027344	-20.950622558594	-0.611570358276
115.477661132813	-18.601135253906	-0.326637268066
101.763244628906	-18.585937500000	-0.163663864136
93.109375000000	-17.284301757813	0.005731582642
83.666809082031	-16.168823242188	0.032951354980
74.887023925781	-15.885742187500	0.150970458984
54.944702148438	-10.093688964844	-1.644931793213
48.476440429688	-11.308166503906	-0.059251785278
42.050048828125	-10.370788574219	-0.123287200928
29.766235351563	-6.941894531250	01.282054901123
20.060485839844	-3.882202148438	-1.902400970459
10.630187988281	1.182922363281	-1.195209503174
5.202331542969	5.459899902344	-0.287113189697



X	Y	Z
0.276489257813	9.952758789063	-0.220989227295
-5.378723144531	15.472595214844	-0.255821228027
-13.504760742188	26.013793945313	-0.256097793579
-17.725097656250	30.842407226563	-0.275808334351
-21.726440429688	38.372314453125	-1.209194183350
-29.369750976563	47.555114746094	-2.172393798828
-35.547790527344	55.760314941406	-1.807821273804
-38.423706054688	58.759094238281	-1.873575210571
-44.036926269531	70.853576660156	-0.839149475098
-46.741943359375	78.319030761719	0.134431838989
-46.971496582031	83.444091796875	-0.080698013306
-46.946594238281	89.993652343750	-1.282276153564
-46.959106445313	104.191345214844	-0.582271575928
-47.238891601563	114.205261230469	-1.112491607666
-46.246582031250	124.941345214844	-0.316047668457
-43.538513183594	134.628814697266	-0.066974639893
-39.998779296875	143.153900146484	-0.021678924561
-37.915039062500	148.886444091797	0.298263549805
-35.293823242188	155.479675292969	0.308078765869
-30.879272460938	160.724456787109	-0.067966461182
-28.458068847656	167.921875000000	0.256771087646
-24.261596679688	172.806396484375	-4.148916244507
-19.012451171875	180.689178466797	0.023336410522
-15.723937988281	182.560394287109	-1.673114776611
-13.871032714844	186.466827392578	-0.157157897949
-7.856750488281	190.712799072266	-0.516273498535
-6.345886230469	193.395599365234	-0.106336593628
-3.393737792969	195.528137207031	-0.685081481934
-1.537780761719	197.478179931641	-0.522411346436
1.400085449219	202.632263183594	-0.493564605713
5.996704101563	202.789642333984	-0.998157501221
10.379821777344	206.189605712891	-1.436647415161
12.934814453125	208.529785156250	-0.874881744385
15.403991699219	210.672210693359	-0.701866149902

X	Y	Z
19.696655273438	212.545654296875	-0.777820587158
24.129882812500	212.404479980469	-0.690076828003
27.637268066406	210.474761962891	-9.595825195313
31.656860351563	212.435852050781	-8.808635711670
33.996704101563	219.322937011719	-0.285198211670
36.619323730469	220.690338134766	-0.094099044800
40.503417968750	221.725311279297	0.036094665527
43.789428710938	221.485107421875	-0.061777114868
46.672668457031	224.793853759766	0.278554916382
48.669616699219	224.153045654297	0.266418457031
51.777893066406	222.038970947266	-3.498668670654
52.347595214844	221.834625244141	-3.439050674438
53.166503906250	222.895996093750	-2.536245346069
55.409057617188	226.823486328125	0.473304748535
58.486877441406	223.616363525391	-2.655780792236
62.819152832031	226.464721679688	0.519947052002
65.932373046875	226.011505126953	0.513694763184
67.403564453125	224.803619384766	0.435512542725
71.640014648438	226.394531250000	0.711683273315
73.268920898438	226.882843017578	0.790174484253
74.006835937500	224.031951904297	0.430177688599
78.870727539063	224.724548339844	0.605855941772
80.692932128906	225.636291503906	0.715305328369
81.636718750000	225.020538330078	0.633094787598
84.234069824219	224.103973388672	0.648559570313
87.567382812500	224.794403076172	0.809242248535
88.953735351563	223.171783447266	0.565788269043
93.498474121094	223.783142089844	0.710468292236
95.723205566406	223.449981689453	0.667560577393
99.349243164063	223.102813720703	0.638711929321
103.848815917969	223.731414794922	0.705427169800
105.754943847656	223.115081787109	0.642215728760
110.022949218750	223.280639648438	0.728132247925
113.124145507813	220.800720214844	0.645549774170

X	Y	Z
117.344726562500	220.226440429688	0.621065139771
119.486755371094	218.499847412109	0.603866577148
123.122192382813	216.523406982422	0.208274841309
128.677429199219	213.423828125000	0.484336853027
130.763366699219	212.194183349609	0.587020874023
132.896545410156	210.150970458984	0.651592254639
136.900512695313	210.526458740234	0.862602233887
138.850769042969	209.135711669922	0.845916748047
141.570434570313	206.360809326172	0.796516418457
140.767456054688	205.146148681641	0.682394027710
146.145751953125	203.616546630859	0.868282318115
150.702026367188	201.807617187500	1.039314270020
151.787109375000	196.280059814453	0.709205627441
154.472717285156	196.897949218750	0.869329452515
153.489562988281	194.768798828125	0.685253143311
154.370422363281	192.784484863281	0.551254272461
157.606811523438	190.272033691406	0.491844177246
159.062622070313	188.036773681641	0.440727233887
161.147766113281	186.616546630859	0.394256591797
162.473205566406	184.569183349609	0.331542968750
166.002685546875	182.560394287109	0.388936996460
166.397033691406	180.244232177734	0.232959747314
167.403808593750	177.913665771484	0.150939941406
169.425231933594	176.482635498047	0.157970428467
170.261779785156	176.816284179688	0.283809661865
170.287475585938	174.082946777344	-0.034954071045
172.728576660156	172.611663818359	0.098615646362
172.760131835938	170.786834716797	-0.123195648193
173.515686035156	168.947784423828	-0.298471450806
173.431884765625	168.523834228516	-0.356872558594
173.005981445313	170.550781250000	-0.116790771484
175.585021972656	167.663269042969	-0.306793212891
177.290710449219	164.187408447266	-0.402973175049
177.695495605469	162.929992675781	-0.396499633789

X	Y	Z
178.801391601563	159.536132812500	-0.615474700928
180.809875488281	156.866546630859	-0.463813781738
181.676025390625	152.305267333984	-0.771202087402
183.289978027344	150.802062988281	-0.633457183838
183.384216308594	149.583404541016	-0.781984329224
185.604431152344	147.356140136719	-0.624963760376
186.501708984375	144.455505371094	-0.509880065918
187.442016601563	140.206390380859	-0.738746643066
187.986572265625	138.875946044922	-0.792755126953
189.846130371094	138.096893310547	-0.627845764160
190.594726562500	135.348510742188	-0.900093078613
191.785156250000	133.334564208984	-0.985961914063
191.414306640625	132.168487548828	-1.286067962646
192.625427246094	130.161010742188	-1.237705230713
192.493041992188	129.397033691406	-1.375949859619
194.334106445313	126.659118652344	-1.576333999634
194.716003417969	124.454467773438	-1.990585327148
195.324768066406	122.549560546875	-2.329729080200
196.094726562500	120.776794433594	-2.552848815918
196.845031738281	115.322265625000	-3.701618194580
198.920776367188	114.939514160156	-2.946994781494
199.796020507813	112.039672851563	-3.072046279907
200.794677734375	105.929443359375	-3.420167922974
200.282958984375	103.888305664063	-3.840381622314
201.265319824219	101.577575683594	-3.814189910889
201.642517089844	99.222534179688	-4.292942047119
201.839904785156	94.201477050781	-5.644504547119
202.741210937500	89.340087890625	-6.828762054443
202.922790527344	88.703918457031	-6.960277557373
205.099975585938	86.464355468750	-6.509639739990
204.345397949219	82.523620605469	-7.983444213867
204.462280273438	79.755187988281	-8.706369400024
203.982421875000	75.894775390625	-10.016403198242
204.259765625000	73.255676269531	-10.569351196289

X	Y	Z
205.114440917969	71.692871093750	-10.563549041748
205.290527343750	69.367126464844	-11.118877410889
205.500793457031	67.711608886719	-11.463001251221
205.487304687500	65.709228515625	-11.857986450195
206.688171386719	63.983642578125	-11.654026031494
207.513305664063	59.597106933594	-12.080776214600
207.773742675781	58.649658203125	-11.888938903809
207.925537109375	56.727661132813	-11.478626251221
208.245117187500	54.862304687500	-11.171531677246
209.463317871094	51.441650390625	-10.485223770142
209.800781250000	50.771484375000	-10.353446960449
210.068054199219	49.375732421875	-10.169931411743
212.319702148438	47.449340820313	-9.642757415771
212.094909667969	45.963256835938	-9.409275054932
212.901306152344	42.695434570313	-8.307540893555
213.103393554688	43.035034179688	-8.389930725098
215.093017578125	41.288146972656	-7.366100311279
215.093017578125	41.288146972656	-7.366100311279
215.817321777344	40.100341796875	-6.609712600708
215.966003417969	39.173645019531	-6.042064666748
215.947692871094	38.942810058594	-5.899923324585
217.342529296875	37.625915527344	-4.891132354736
216.696655273438	36.182678222656	-4.224071502686
216.382385253906	37.218505859375	-4.834800720215
216.549133300781	35.356994628906	-3.806325912476
217.791015625000	34.813537597656	-3.377723693848
217.203002929688	34.795043945313	-3.401088714600
216.792419433594	34.365478515625	-3.271251678467
216.964538574219	33.419128417969	-2.811817169189
216.379943847656	33.563171386719	-2.929508209229
216.545532226563	32.870483398438	-2.556961059570