



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Mehaanika ja tööstustehnika instituut

KUJUPINDADE TUVASTAMISE KONTSEPTSIOON

THE CONCEPT OF SURFACE GEOMETRIC INSPECTION

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Lenart Kivistik

Üliõpilaskood: 192098 MATM

Juhendaja: Martin Eerme, professor

Tallinn 2021

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.

“.....” 2021.

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 2021.

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”2021.

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Lenart Kivistik

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

mille juhendaja on Martin Eerme,

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.

_____ (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 tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Mehaanika ja tööstustehnika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Lenart Kivistik, 192098
Õppekava, peeriala: Tootearendus ja tootmistehnika, MATM
Juhendaja(d): professor, Martin Eerme, 6203270

Lõputöö teema:

KUJUPINDADE TUVASTAMISE KONTSEPTSIOON

THE CONCEPT OF SURFACE GEOMETRIC INSPECTION

Lõputöö põhieesmärgid:

1. anda ülevaade kavandatava kujupindade töötlemise tööprotsessist;
2. luua kujupindade tuvastamise kontseptsioon;
3. anda praktiline lahendus võimaliku arendusprojekti sõlmele.

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 26 mai 2021 a

Üliõpilane: Lenart Kivistik ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Martin Eerme ".....".....20.....a
/allkiri/

SISUKORD

SISUKORD.....	5
Lühendite ja tähiste loetelu.....	7
1 SISSEJUHATUS.....	8
1.1 ABB azipod 3D-kit tootearenduse projekt.....	8
1.2 Mõõtesüsteemi visioon.....	9
1.3 Ülesande püstitus ja töö ülesehitus.....	9
2 MÕÕTMINE TOOTMISPROTSESSIS.....	11
2.1 Mõõdetavad detailid.....	12
2.2 Hüdrauliline press ja asendiplaan.....	13
2.3 Painutamise tööprotsessi kirjeldus.....	14
3 MÕÕTESÜSTEEMIDE UURING.....	17
3.1 Optilised mõõtesüsteemid.....	18
3.2 Valmistoodete uuring.....	21
3.3 Valiku kirjeldus.....	24
4 MÕÕTESÜSTEEMI KIRJELDUS.....	25
4.1 Nõuded mõõtesüsteemile.....	25
4.1.1 Seadistused.....	26
4.2 Skanneri tööpõhimõtte ja mõõteseadme ehitus.....	28
4.3 Kauguse moodul.....	30
4.3.1 Laserimpulss meetod.....	30
4.3.2 Faasinihke meetod.....	31
4.3.3 Kauguse mooduli kokkuvõte.....	35
4.4 Baasmoodul ja nurkade leidmine.....	35
4.4.1 Detektorite massiivid.....	36
4.4.2 Optilised faasimassiivid.....	37
4.4.3 Mikroelektromehaaniline süsteem.....	38
4.4.4 Optomehaaniline süsteem.....	38
4.4.5 Elektromehaaniline süsteem.....	39
4.4.6 Baasmooduli kokkuvõte.....	40
4.5 Andmetöötlus.....	40
4.5.1 Tarkvara peamised tööriistad.....	41
4.5.2 Sidumise meetodid.....	42
4.5.3 Parima sobivuse meetod.....	44
4.5.4 Olemasolevate LiDAR skannerite tarkvara tööriistad.....	46
4.6 Operaatori tagasisidestuse lahendus.....	46
5 MÕÕTESÜSTEEMI ARENDUSPROJEKTI KONDIKAVA.....	49

6 NURGAPUNKTIDE TUVASTAMISEL PÕHINEV LAHENDUS.....	51
6.1 Andmetöötluse matemaatiline lahendus	51
6.2 Kodeeritud nurga markeri kinnituse lahendus	55
KOKKUVÕTE	57
SUMMARY.....	58
KIRJANDUS.....	59
LISAD	65
Lisa 1 Peeglid.....	66
Lisa 2 Matlab raportid.....	67
Lisa 3 Punktilve koordinaadid.....	72
GRAAFILINE OSA.....	73
GRAAFILISE MATERJALI LOETELU:	
Markeri hoidja leht 1	
Markeri hoidja leht 2	
Alusplaat detailijoonis	
Suunaja detailijoonis	
Modifitseeritud haarats detailijoonis	

Lühendite ja tähiste loetelu

TRI – triangulatsiooni meetod mõõtepunkti tuvastamiseks;

TOF – lennu aja meetod, kus objekti kaugus leitakse otseselt või kaudselt signaali edasi tagasi liikumiseks kuluva aja põhjal (ingl k *time of flight*);

SL – struktureeritud valguse meetod (ingl k *structured light*);

LiDAR - kauguse leidmise meetod, mis põhineb valguse lennu aja meetodil (ingl k *Light Detection And Ranging*);

OPA - optilised faasimassiivid (ingl k *optical phased arrays*);

MEMS – mikroelektromehaanikal mõhinev süsteem (ingl k *micro-electromechanical system*);

CAD – raalprojekteerimine (ingl k *computer-aided design*).

1 SISSEJUHATUS

Pindade mõõtesüsteemid on tööstuses laialt levinud ja igapäevased töövahendid. Enamasti kasutatakse valmistootena olemasolevaid standardlahendusi, erilahenduste puhul piirduakse lihtsamate rakiste või šabloonidega. Keerukamate süsteemide erilahenduste projekteerimine nõuab laiapõhjalisi teadmisi mitmes valdkonnas ja ajamahukat tootearenduse tsüklit. Tootmisettevõtte vajab selleks eraldi arendusmeeskonda, mis muudab erilahenduse projekteerimise enamus ettevõtetele kättesaamatuks. Seega on mõõtesüsteemi erilahenduse kasuks otsustamine ettevõtte jaoks pikalt ja kindlalt läbikaalutud otsus. Käesolev magistritöö kirjeldab Heavy Industry Estonia OÜ kujupindade tootmise protsessile võimaliku mõõtesüsteemi erilahenduse kontseptsiooni ja pakub praktilises osas matemaatilise lahenduse mõõtmistulemusena saadud punktipilve ja detaili mudeli võrdlemiseks. Võrdlemise reaalseks teostamiseks on projekteeritud mõõtmisel kasutatava markeri kinnitus.

Valiku kriteeriumiks antud ettevõtte jaoks oli: kas arendada erilahendus, mis arvestab olemasolevate lahendustega või kohendada oma töötavaid lahendusi uuele standardlahendusele sobivaks. Valitud on erilahendus kuna võimekus ja huvi selle loomiseks on olemas.

1.1 ABB azipod 3D-kit tootearenduse projekt

Heavy Industry Estonia OÜ on Eesti kapitalil põhinev rasketööstusettevõtte. Tooteportfelli kuuluvad peamiselt kruisi- ja uurimislaevade mootorid ja seadmed (sh azipodid), nafta ja gaasi platvormide seadmed (sh kraanad), tuuleparkide kered ja platvormid ja teised rasketööstuse seadmed. Ettevõtte asub Tallinnas ja omab tootmispinda ca 14 000 m², ettevõttes töötab ca 80 töötajat koos renditööjõuga. [1]

ABB azipod 3D-kit tootearenduse projekti raames planeerib Heavy Industry Estonia OÜ välja töötada tööprotsessi azipodide korpuse teraslehtede 3D-painutamiseks külmpressimise meetodil. Ettevõtte omab tööks sobilikku hüdraulilist pressi, mille juhtimissüsteemi modifitseerimine ja digitaliseerimine on projektis kesksel kohal. Tööprotsessi teeb keeruliseks suuremõõtmeliste (kuni 2 x 5 m) ja paksude (kuni 80 mm) teraslehtede kujupinna nõutud täpsus: maksimaalne lubatud tolerants ± 3 mm, siit tuleneb ka vajadus hästi toimiva mõõtesüsteemi järele.

1.2 Mõõtesüsteemi visioon

Visiooni väljatöötamisel on mõistlik seada kriteeriumid, mis hoiavad teemat laiali valgumast. Mõõtesüsteemi erilahenduse väljatöötamise arutelu toimus 27.01.21 autori, Martin Eerme ja Maarjus Kirsi osavõtul. Analüüsitava ABB azipod 3D-kit mõõtesüsteemile anti järgmised juhtmõtted:

- süsteemi eesmärk on tootmise protsessis operaatori tagasisidestamine ja kujupinna kvaliteedikontroll;
- mõõtmine toimub tootmise alas, „võimalusel pressi all“;
- mõõtmine on lihtne, vajab operaatori lühikoolitust;
- mõõtmine on suures osas automatiseeritud ja vajab minimaalset operaatori sekkumist;
- kasutatakse kaasaegset tehnoloogiat;
- mõõtmistulemus on lihtsasti jälgitav ja kasutatav tööprotsessis;
- mõõtesüsteem peab integreeruma olemasolevate lahendustega;
- mõõtmistulemusi tuleb salvestada tuleviku arenduste väljatöötamiseks.

Visioonis seatud juhtmõtted suunavad kasutama aktuaalseid meetodeid, kus täpsete mõõtesüsteemidega tagasisidestatakse operaatorit tööprotsessis. Sujuva tööprotsessi tagamiseks vaadeldakse kontaktivabu mõõtesüsteeme, mille tänane kiire areng on seotud isesõitvate autode vajaduse kasvuga. Lisaks võimaldab digitaliseeritud mõõtmine operaatori tagasisidestamisel uudset lähenemist liitreaalsuse näol.

1.3 Ülesande püstitus ja töö ülesehitus

Visiooni realiseerimiseks on seatud tööle järgmised ülesanded:

- anda ülevaade kavandatava kujupindade töötlemise tööprotsessist;
- valida visioonile vastav mõõtesüsteemi meetod;
- kirjeldada mõõtesüsteemi tehnilised nõuded vastavalt valitud meetodile;
- luua kujupindade tuvastamise kontseptsioon;
- pakkuda kondikava mõõtesüsteemi arendusprojektile;
- anda praktiline lahendus edasise arendusprojekti sõlmele.

Töö ülesehitus järgib ülesande püstitust. Esimeses osas kirjeldatakse kujupindade tootmise tööprotsess. Järgnevalt antakse ülevaade tööstuses kasutuses olevates mõõtmistehnoloogiatest ja valitakse sobiv lahendus. Mõõtesüsteemi kirjelduse peatükis antakse põhjalik ülevaade mõõtesüsteemi ehitusest ja valitakse sobivad lahendused moodulite kaupa. Mõõtesüsteemi arendusprojekti kondikavas on

kokkuvõtvalt toodud eelnevates punktides esitatud arusaamad kujupindade tuvastamisest ehk kujupindade tuvastamise kontseptsioon. Lisaks arutlus projekti edasiste võimalike suundade üle. Praktilises osas on toodud valitud ülesande lahendus Matlab tarkvaras ja projekteeritud markeri kinnitus Solidworks tarkvaras.

Märksõnad: kujupindade tuvastamine, mõõtesüsteem, laserskaneerimine, magistritöö.

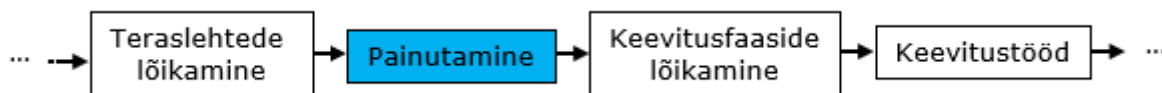
2 MÕÕTMINE TOOTMISPROTSESSIS

Mõõtesüsteemi valikul on oluline mõista kogu tootmisprotsessi ja koguda piisavalt taustainfot sobivate kriteeriumite määramiseks. Mõõdetavad detailid kuuluvad ABB Marine poolt välja töötatud azipod-seadme korpuse koostu. Korpuse ligikaudne mass on 60 tonni. Azipod-seade ehk pöördkäitur on üks laevamootori tüüpidest, mis on laeva kerele kinnitatud veealuses osas ja pööratav vertikaaltelje suhtes. Sõukruvi pööratavus võimaldab laevu manööverdada efektiivsel moel. Sele 2.1 on näidatud kruisilaeva pikkusega 360 m ahtris asuvad 3 azipod-seade.



Sele 2.1 Kruisilaeva pöördkäiturid [2]

ABB azipod-seadme korpused on keevis-konstruktsioonid, mille detailid on eelnevalt lõigatud ja painutatud. Täna Heavy Industry Estonia OÜ ostab eeltöödeldud detailid ja teostab keevitustööd. ABB Azipod 3D-kit tootearenduse projekti raames soovib ettevõtte omandada võimekust korpuse detailide tootmiseks. Tulevane tootmisprotsessi lõik, mis kirjeldab mõõdetava detaili töötlemist ettevõttes enne ja peale painutamist on toodud Sele 2.2.

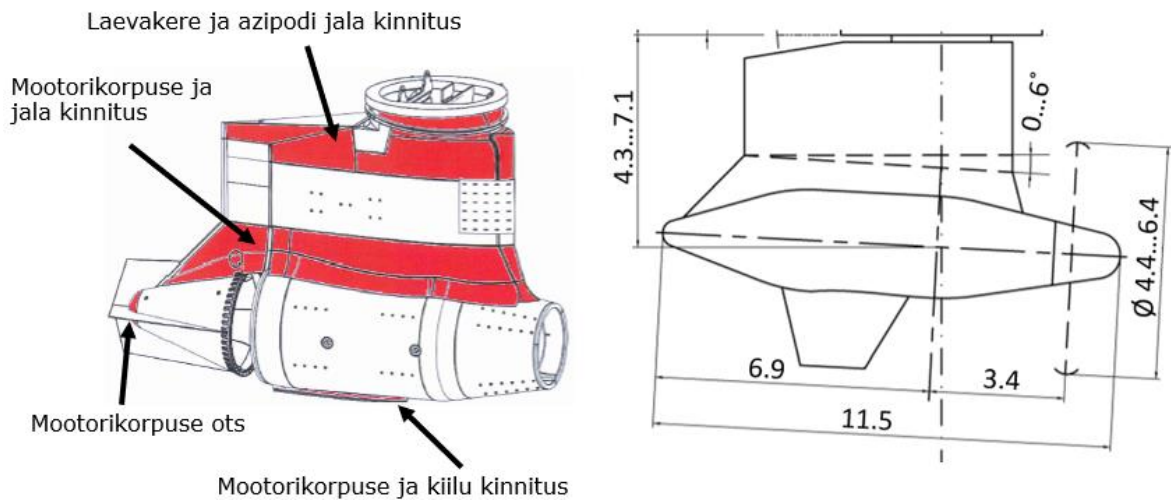


Sele 2.2 Detaili tootmisprotsessi lõik

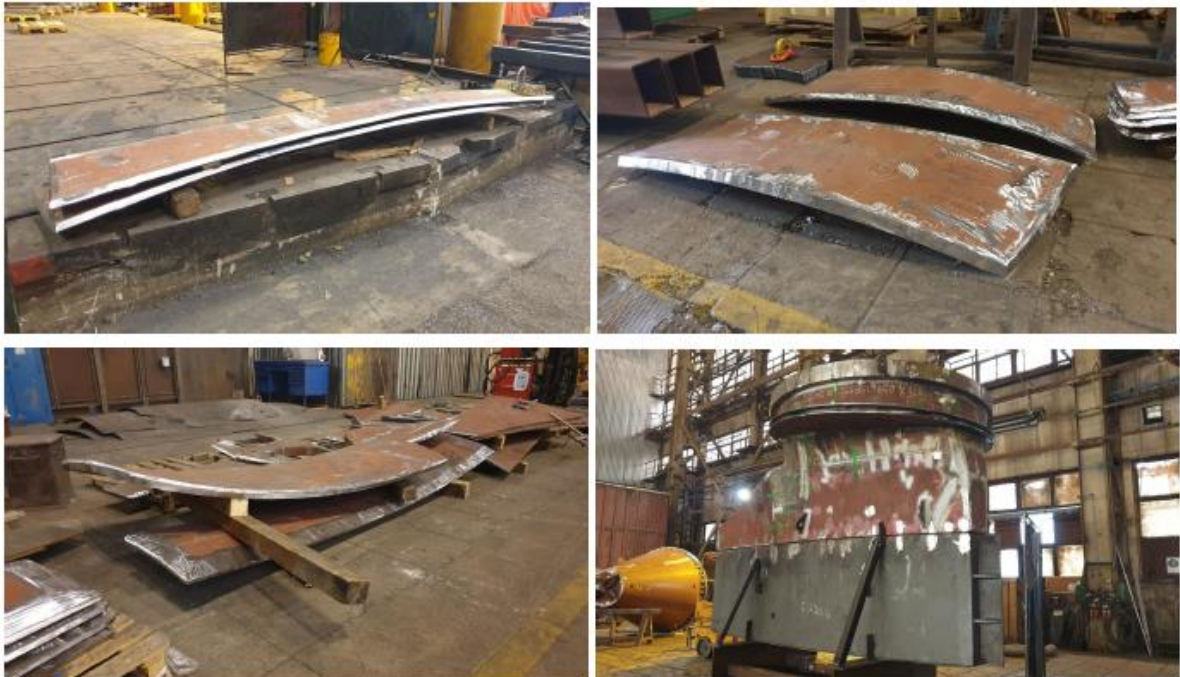
Järgnevalt on täpsemalt kirjeldatud detailid, hüdrauliline press, asendiplaan ja tööprotsess.

2.1 Mõõdetavad detailid

Mõõdetavateks detailideks on 3D-painutatud teraslehed, mis paiknevad korpuse neljas alas. 3D-painutatud on laevakere ja azipodi jala kinnitus, mootorikorpuse ja jala kinnitus, mootorikorpuse ots, mootorikorpuse ja kiilu kinnitus. Painutatud alad ja seadme mõõtmed on näidatud Sele 2.3. Järgneval Sele 2.4 on piltidel näha detailide muutuv kumerus, keevitusfaasid ja pinna kerge roostekate ning laevakere ja azipodi jala kinnituse keevis-konstruktsioon.



Sele 2.3 Korpus, kus 3D-painutatud detailid (punased) ja paremal mõõtmed meetrites [3, 4]



Sele 2.4 Ostetud detailid ja keevis-konstruktsioon [3]

Tabel 2.1 võtab kokku mõõtmise jaoks olulise info. Pinnale lubatud tolerants on ± 3 mm, mille alusel on mõõtesüsteemile valitud katse määramatuse suhe (ingl k *test uncertainty ratio*, TUR) 4 : 1 ehk $\pm 0,75$ mm. Katse määramatuse suhe on valitud ANSI/NCSL Z540.3-2006 (ingl k *Requirements for Calibration of Measuring and Test Equipment section 5.3*) standardi alusel ja on piisav mõõteseadme esialgseks valikuks. ISO/IEC 17025:2017 (ingl k *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*) määrab katseseadme määramatusele edasised nõuded, mis on vajalikud arvesse võtta seadme valiku või projekteerimise hilisemas staadiumis. [5]


Tabel 2.1 Detaili andmed

Detaili mõõtmed	pikkus 3...5 m laius 1...2 m kõrgus 30...80 mm
Mõõdetav pind	kerge roostekate
Mõõdetav kuju	muutuva kumerusega pinnad
Pinna lubatud tolerants	± 3 mm
Kaal	1,2...3,9 tonni
Erinevaid detaile	8...12
Materjal	konstruktsiooniteras (AH36, S355JR)

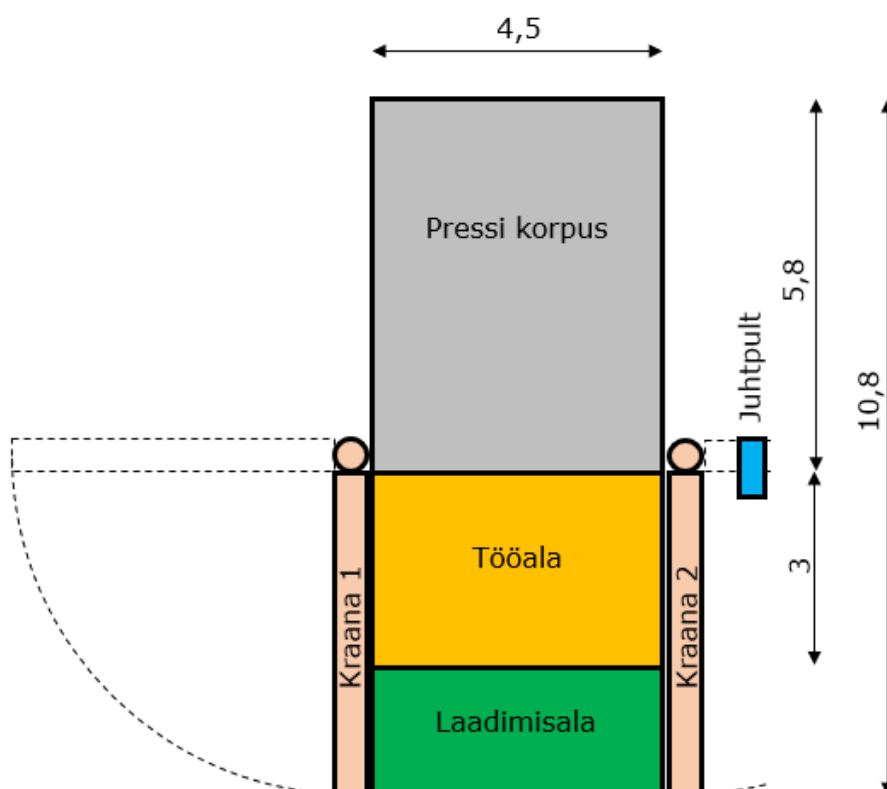
2.2 Hüdrauliline press ja asendiplaan

Suuremõõtmeliste teraslehtede painutamine toimub üldiselt valtsimise teel. Kuna ABB azipod-seadme korpuse detailidel on kumerused muutuva raadiuse ja mitme telje ümber pole ainult valtsimisega võimalik vajalikku kuju saavutada. Laevatööstuses kasutatakse muutuva kumerusega pindade saamiseks valamise, joonkuumutuse ja pressimise meetodit. Heavy Industry Estonia OÜ soovib kasutada pressimise meetodit, kuna ettevõtte omab tööks sobilikku hüdraulilist pressi (Sele 2.5). Tabel 2.2 on toodud pressi peamised andmed.

Tabel 2.2 Hüdrauliline press

Tüüp	C-raam	
Survejõud	1250 tonni	
Töökäigu pikkus	120 cm	
Silindri kolvivaraste läbimõõdud	2 x 96 cm, 4 x 20 cm	
Kaal	300 tonni	
Masina jalajälg	6,9 x 11,8 m	
Masina kõrgus	7 m	
Tööala	3 x 4,5 m	
Laadimisala	2 x 4,5 m	
Maksimaalne avatus	2,2 m	
Kraanade arv ja tõstejõud	2 x 3 t	
Sele 2.5 Hüdrauliline press		

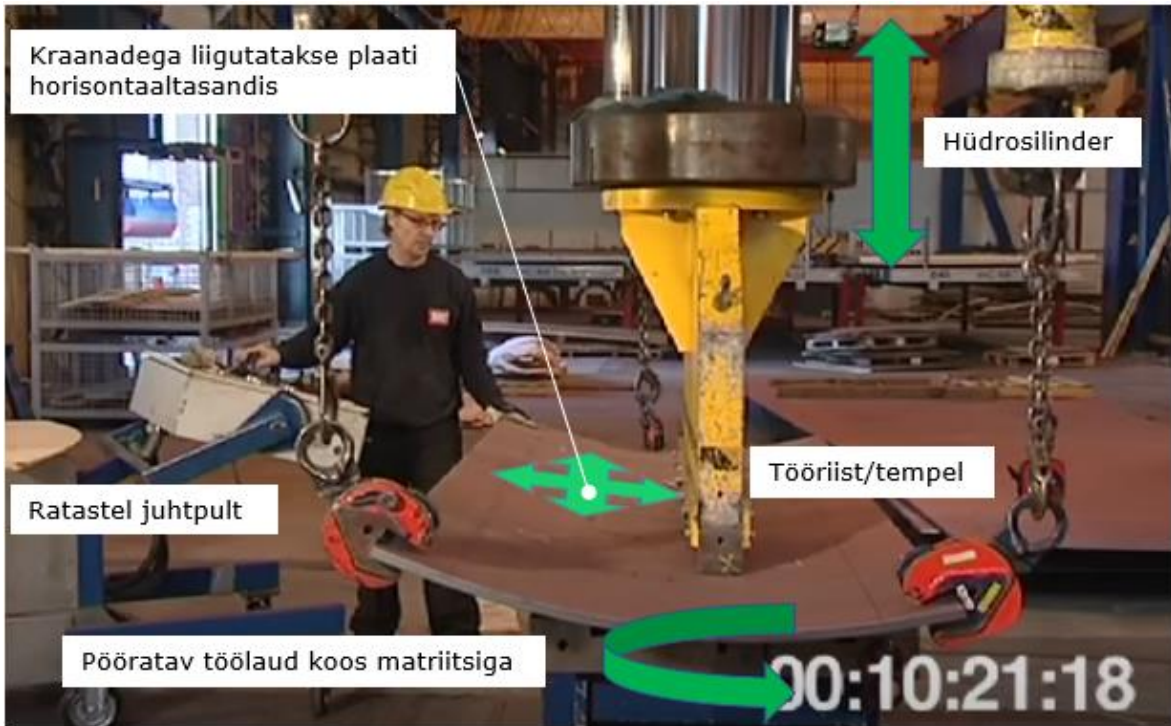
3D-painutamise täpne tööprotsess on väljatöötamisel ning hetkel puuduvad lisaseadmed nagu matriitsid, templid, uuendatud juhtpult ja detaili liigutamise süsteem. Sele 2.6 on toodud pressi asendiplaan. Asendiplaanilt ja pressi seelt nähtub, et võimaliku staatilise või pressi korpuse laiuse ulatuses liikuva mõõtmisseadme paigutamiseks on sobivad alad pressi raami eesmine külg ja tööala tagune sein. Tööalal piirab mõõtmisi maksimaalne pressi avatus, ehk mõõdetav pind jääb mõõteseadme suhtes nurga alla. Laadimisalal mõõtmiste teostamisel on mõõtmisseadme minimaalne kõrgus detailist 4 m ja maksimaalne 7 m, mille piirab pressi eesmise külje mõõtmed.



Sele 2.6 Asendiplaan

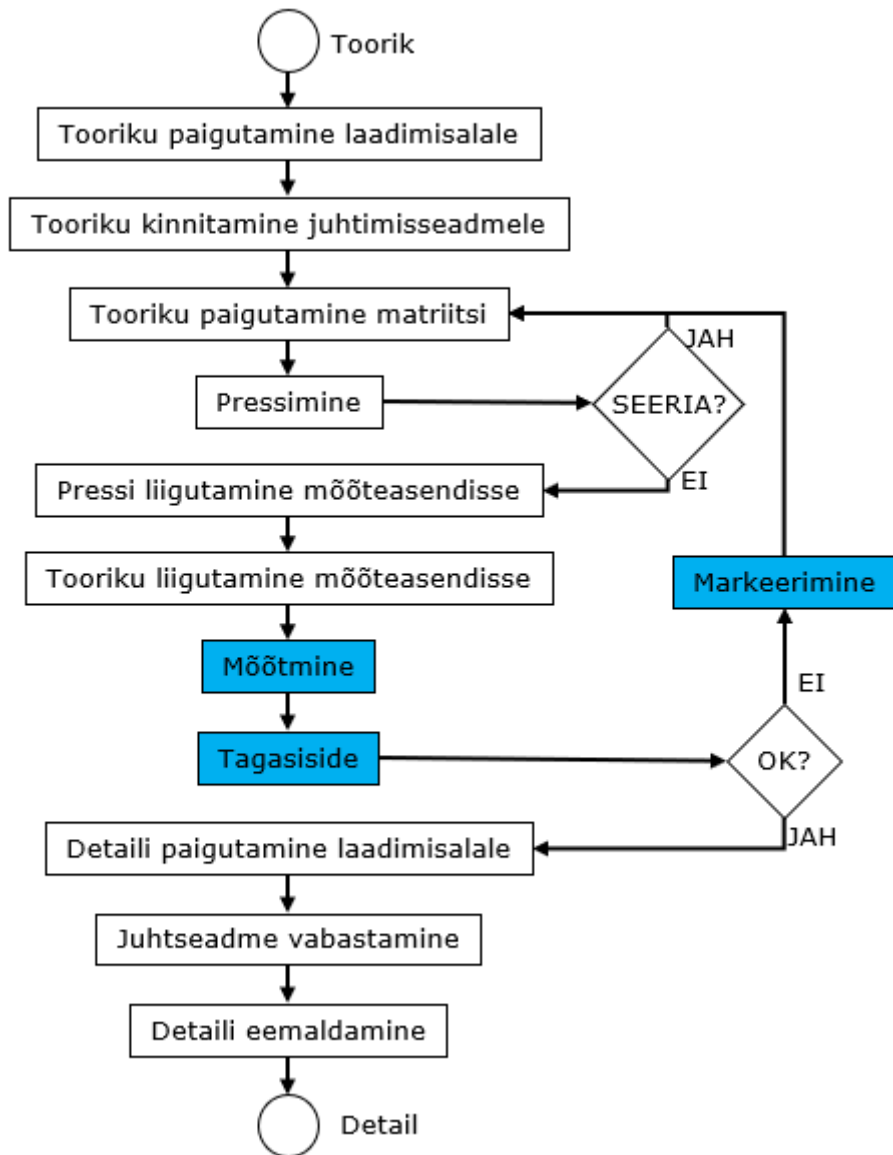
2.3 Painutamise tööprotsessi kirjeldus

Tööprotsessi kirjeldamisel on võetud eeskujuks ettevõtte Neiland sadulpindade tootmise meetod. Neiland kasutab pindade töötlemiseks lühematel külgedel külmpressimist ja pikematel valtsimist. Pressimisel liigutab pingioperaator töödeldavat teraslehte telfrite abil. Detaili mõõdetakse puidust šabloonidega ja markeeritakse kriidiga. Sele 2.7 on toodud kaader videost, mis tutvustab ettevõtte Neiland meetodit.



Sele 2.7 Ettevõtte Neiland tööprotsessi näidis [6]

Sele 2.8 on Heavy Industry Estonia kujupindade painutamise tööprotsess. Tööprotsess algab tooriku paigutamisega laadimisalale, seejärel läbib pressimise seeria. Pressimist on otstarbekas sooritada seeriatena, kuna nii vähendatakse lisategevusi. Peale pressimist toimub digitaliseeritud mõõtmine ja tagasiside. Sobivusel eemaldatakse detail seadmest, mittesobivusel markeeritakse ja alustatakse uut pressimise seeriat. Sinisega märgitud tegevused mõjutavad otseselt mõõtesüsteemi valikut.

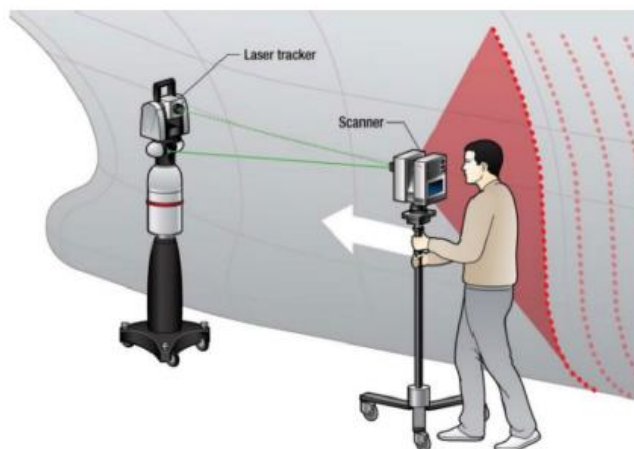


Sele 2.8 Mõõtmise kujupindade töötlemise tööprotsessis

3 MÕÖTESÜSTEEMIDE UURING

Eelnevalt tuleb märkida, et uuringu eesmärk on tutvuda valmistootena olemasolevate mõõtesüsteemide meetoditega, mitte sobiva terviklahenduse valimine.

Suuremõõtmeliste pindade kontrollimiseks on tööstuses levinud šabloonide ja optiliste mõõtesüsteemide kasutamine. Šabloonidega mõõtmine on enamlevinud, kasutatakse nii tootmise abistamiseks kui ka lõpliku kvaliteedi kontrollimiseks. Optilised mõõtesüsteemid leiavad peamiselt rakendust alla 1 mm täpsust nõudvatel mõõtmistel kvaliteedi kontrollimiseks. Harva kasutatakse optilisi mõõtesüsteeme suuremõõtmeliste detailide tootmisel operaatori pidevaks tagasisidestamiseks. Optilised mõõtmised sooritatakse enamasti mõõteruumis või eraldi ülesvõttega. Eraldi ülesvõtte puhul kasutatakse ühte mõõtesüsteemi paljude erinevate detailide mõõtmiseks. Eraldi ülesvõtte on ajakulukas ja vajab spetsialiseerunud tööjõudu, kuna iga mõõtmine on erinev ja vajab eraldi ülesseadmist. Mõõteruumis mõõtmisel paigutatakse detail enamasti kinnitusrakisesse ja spetsialist teostab protseduuri järgi mõõtmise. Sele 3.1 toimub optilise mõõtesüsteemiga laevakere eraldi ülesvõtte ja Sele 3.2 on toodud šablooniga sadulpinna mõõtmine.



Sele 3.1 Laser skanneri ja jälgijaga laevakere mõõtmine eraldi ülesvõttega [7]



Sele 3.2 Šablooniga mõõtmine [6]

Visioonist lähtuvalt püütakse mõõtesüsteemi meetodi valikul viia mõõteruumi lahendus eraldi ülesvõtte keskkonda ehk tootmisalale.

Tabel 3.1 Optilise ja šablooniga mõõtmise võrdlus

	Šabloon	Optiline
Meetodi levik	üldlevinud	levinud täpsust nõudvates tootmistes
Kasutamise lihtsus	intuiitivne ja enamasti lihtne kasutada	oleneb seadistusest
Mõõtmistulemuse markeerimine	otsene	kaudne
Mõõdetava ala suurus	piiritletud	kogu pind
Mõõtmisele kuluv aeg	oleneb detaili keerukusest	oleneb seadistusest
Mõõtmeseadmete hind	madal	kõrge
Inimese osalus	kõrge	madal
Digitaliseerimise võimalus	madal	kõrge
Seadmete kogus	igale detailile eraldi šabloon	üks seade, erinev seadistus
Protokolli koostamine	käsitsi	automaatne
Kalibreerimine	igale šabloonile	mõõteseadmele
Hoiustamise ala	suur	väike
Süsteemi juurutamine	kiire	aeganõudev
Uute detailide lisamine	aeganõudev	kiire, oleneb keerukusest
Tarkvara vajalikkus	puudub	kõrge
Mõjutus materjalist	madal	kõrge
Mõjutus keskkonnast	mõõdukas	kõrge

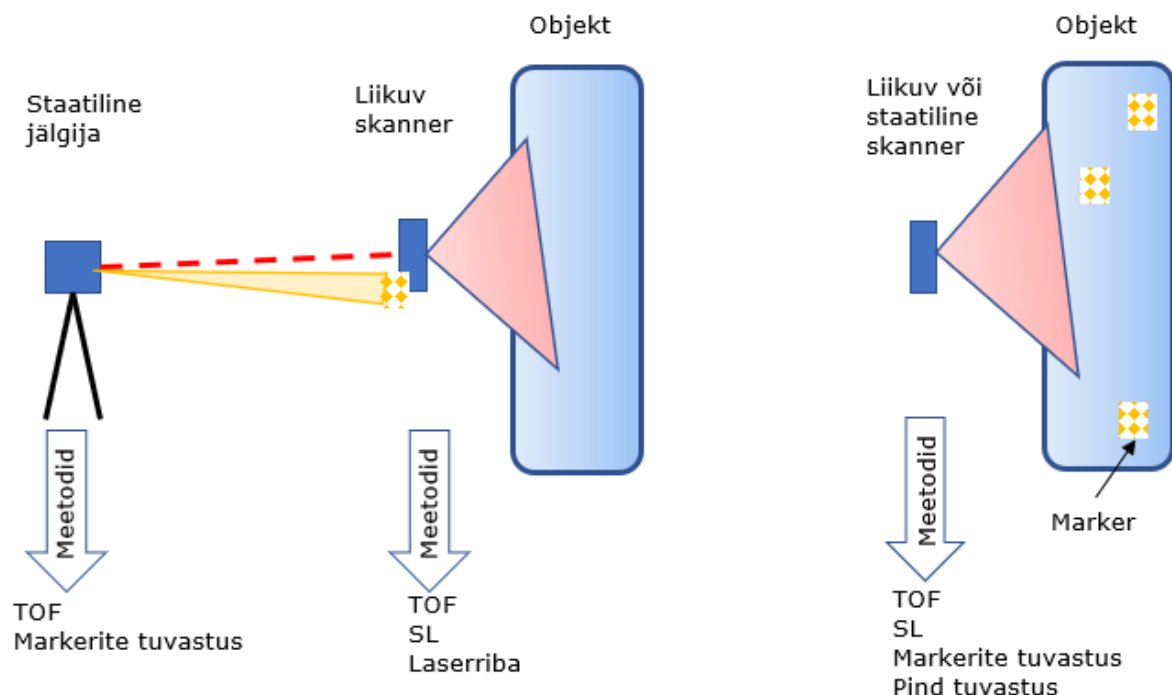
Tabel 3.1 toodud võrdluses on optiliste süsteemide peamisteks eeliseks inimese madal osalus, kõrge digitaliseerimise võimalus ja väljakujunenud lahenduse kiirus ning uute või muudetud toodete lisamise lihtsus. Suurimateks puudusteks on aeganõudev süsteemi juurutamine ja suur sõltuvus tarkvara pakettidest. Järgnevalt keskendutakse optiliste süsteemide võrdlusele.

3.1 Optilised mõõtesüsteemid

Tänapäeval on optilisi mõõtesüsteeme laias valikus ja erinevate toimimise meetoditega. Lisaks hoiab isesõitvate sõidukite kasvav vajadus ja arvutustehnika

areng optilised mõõtesüsteemid pidevas arengus, seega ei ole veel välja kujunenud ühtseid standardeid. Käesolevas töös on aluseks võetud Remondino F. ja El-Hakim S. artikkel, kus optilised mõõtesüsteemid on jaotatud aktiivse või passiivse sensoriga meetoditeks. Järgnevalt on antud üldine ülevaade tööstuses peamiselt kasutatavate aktiivse sensoriga optiliste mõõtesüsteemide toimimisest ja võrreldud olemasolevaid tooteid. [8]

Töös uuritud seadmed mõõdavad punkti kaugust järgmistel põhimõtetel: lennu aeg (TOF) ja triangulatsioon (TRI). Lennu aja meetodid jagunevad otsese ja kaudse ajamõõtmise alusel, kuid on käesolevas peatükis koondatud ühe põhimõtte alla. TRI põhimõtet kasutavad struktureeritud valguse (SL), markerite tuvastus, pinna tuvastus ning laserriba meetodid. Punkt pilve punktide asukoha määramiseks on vajalik skaneeriva seadme positsioneerimine, mille saab liigitada skanneri jälgimise, kogutud andmete ja seadme põhiseks. Uuritud süsteemide skanneri jälgimine toimub TOF ja markerite tuvastuse meetodil; kogutud andmete põhine positsioneerimine toimub SL, markerite tuvastuse ja pinna tuvastuse meetodil; seadmepõhine toimub TOF meetodil staatilise skanneriga üksik ülesvõttel. Sele 3.3 on vasakul skanneri jälgimise meetod ja paremal kogutud andmete ja seadmepõhine meetod.



Sele 3.3 Punkti ja skanneri positsioneerimise meetodid

Järgnevalt on lühidalt kirjeldatud eelnevalt toodud meetodeid:

- **TOF JA TRI kauguse leidmine;**

TOF meetodil leitakse punkti kaugus suunates signaal soovitud mõõtealale ja hinnates peegeldunud kiire parameetreid. Valguse TOF meetodeid on täpsemalt kirjeldatud järgmises peatükis. Triangulatsiooni meetod põhineb kolmnurkade arvutusel, kus punktide kaugus arvutatakse vastuvõtja erinevatest positsioonidest punkti tõmmatud mõtteliste sirgete abil. [9] Vaadeldavate punktide täpsemaks tuvastamiseks kasutatakse suunatud laserriba, markereid ja struktureeritud valgust.

- **Seadme positsioneerimine;**

- **Skanneri jälgimine;**

Staatiliste jälgijate eesmärk on positsioneerida liikuv skanner. Liikuva seadmega on võimalus mõõta suuremat ala ning suurendada täpsust minnes skanneriga detailile lähemale. Jälgija lisab igale punktile skanneri asendi määratluse ruumis ehk punkti positsioneerimine toimub kahe sensoriga. Sele 3.4 all vasakus nurgas on laserjälgimisega TOF skanner, millele on kinnitatud markeerimise seade. Mõõdetud punkti koordinaadid saadakse lihtsustatult järgmise mõttekäiguga:

- skanner mõõdab punkti oma koordinaadistikus $P_{SK}(x,y,z)$;
- koordinaatide transformatsioon eelkalibreeritud markeerimise seadme koordinaadistikku $P_{SK}(x,y,z) \rightarrow P_{MS}(x',y',z')$;
- koordinaatide transformatsioon laserjälgija koordinaadistikku $P_{MS}(x',y',z') \rightarrow P_{LJ}(x'',y'',z'')$.

Markerite tuvastusega skanneri jälgimine on toodud Sele 3.4 paremal üleval nurgas. Skanner MetraSCAN on varustatud markeritega, mida positsioneeritakse piiratud alas C-Track jälgijaga. C-Track kasutab triangulatsiooni meetodit kahe sünkroonselt töötava kaamera abil; [7][10]

- **Kogutud andmete põhine;**

Kogutud andmete põhine seadme asukoha leidmine toimub jäädvustatud piltidel teadaolevate objektide kaudu. Objektidena kasutatakse kodeeritud markereid ja pinnal tuvastatud kujundeid. Tuvastatud kujundilt on võimalik tõmmata mõtteline sirge kaamera sensorile, mitme joone ühendamine annab kaamera positsiooni. Fotogramm-meetria meetodid on jõudsalt arenevad ja ühes skanneris kombineeritakse enamasti mitut meetodit ning kasutatakse mitut vastuvõtjat ja saatjat. Näiteks valikus olev seade DPI-8 töötab 2 kaameraga videogramm-meetrial, kus seade positsioneeritakse mitme järjestikuse kaadri analüüsimisel; [11]

- **Seadmepõhine.**

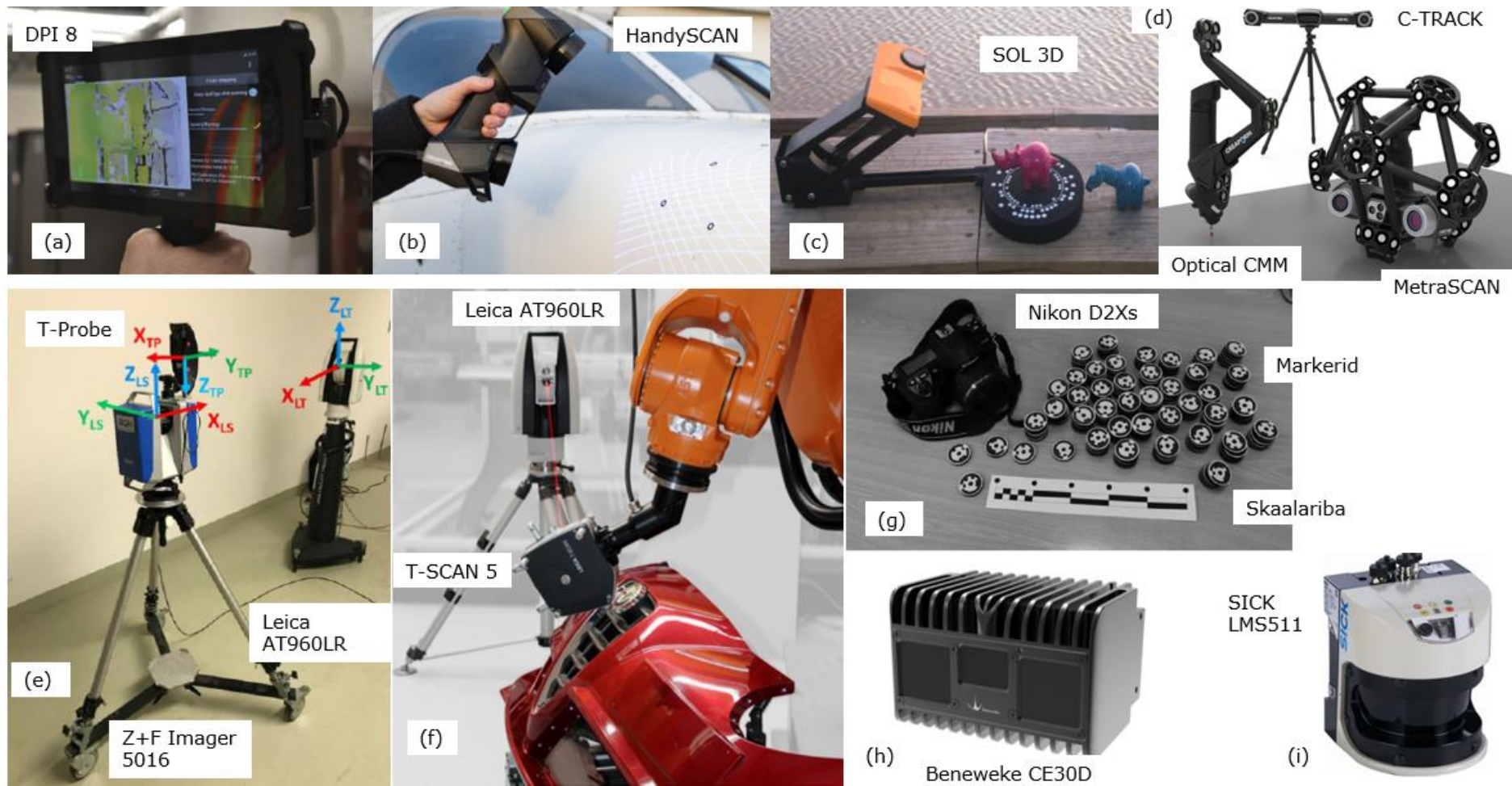
Punktide koordinaadid saadakse sarnaselt skanneri jälgimise meetodile. TOF meetodil laserskaneerimine ühest positsioonist on seadmepõhine, kuna punktid salvestatakse seadme sisese koordinaadistiku suhtes. [11]

3.2 Valmistoodete uuring

Mõõtesüsteemide uuringul peamiseks eesmärgiks oli välja selgitada piisava täpsusega meetodid. Lisaks uuriti mõõtmiseks vajalikke seadmeid, skanneri kaugust objektist ja hinda. Tulemused on toodud Tabel 3.2 ja Sele 3.4. Tabel 3.3 on antud hinnang uuritud mõõtmismeetoditele.

Tabel 3.2 Mõõtesüsteemide andmed [10-23]

Meetod	Seadmed	Mudel (tähistus seel)	Hind, tuhat €	täpsus	Objekti suurus (seadme kaugus), m	Seadme positsioneerimine
TOF	skanner	Surphaser SR100	90	<0,3 mm @ 3 m	1..7 (1...7)	seadmepõhine
		Z+F Imager 5016 (e)	80	<1 mm + 10 µm/m	0,3...365	
		Artec Ray	56	0,7 mm @ 15 m	1...50	
		SICK LMS511 (i)	10	25 mm (1...10 m)	1...80	
		Beneweke CE30D (h)	1,2	≤15 cm	>1 cm (0...30)	
jälgimisega (TOF) ja TOF	skanner laserjälgija sond (<i>probe</i>)	Z+F Imager 5016 (e) Leica AT960LR (e) Leica T-Probe (e)	250	<1 mm + 10 µm/m 15 µm + 6 µm/m 35 µm	0,3...365 (0,5...5)	skanneri jälgimine
jälgimisega (TOF) ja laserriba	riba skanner laserjälgija	Leica T-SCAN 5 (f) Leica AT960LR (f)	250	80 µm + 3 µm/m 15 µm + 6 µm/m	0...60 (<0,5)	skanneri jälgimine
SL	skanner	DPI-8 (a)	5	15 mm	0..8 (0,6...3,7)	kogutud andmete põhine
		ARTEC LEO	27	0,1 mm + 0,3 mm/m	0..8 (0,35...1,2)	
markerid ja SL	skanner markerid	HandySCAN BLK (b) SOL 3D (c)	50 0,7	20 µm + 40 µm/m 0,1 mm	0...4 (0,3...1) <0,2 (0,05)	kogutud andmete põhine
jälgimisega (markerid) ja SL	skanner jälgija	MetraSCAN 3D (d) CF C-TRACK (d)	80	40 µm	0,2...6 (0,3...1)	skanneri jälgimine
markerid ja pind	kaamera markerid skaalariba	Nikon D2Xs (g) Canon 6D	5	3 mm	0...30 (1...10)	kogutud andmete põhine
markerid	kaamera markerid skaalariba	Nikon D2Xs (g) V-Stars	5	0,5 mm 4 µm + 4 µm/m	0...30 (1...10)	kogutud andmete põhine



Sele 3.4 Mõõtesüsteemide valik: a[13], b[22], c[23], d[10], e[7], f[24], g[9], h[17] ja i[21], tähistuse vastavus seadme mudelile on toodud Tabel 3.2 veerus „Mudel“.

Tabel 3.3 Sobivuse hindamine

Meetod	Töö keskkond	Täpsus 5m mõõtmisel, mm (vajalik 0,75 mm)	Objekti suurus (m)	Seadme kaugus (m)	Seadme positioneerimine	Lisaseadmete vajalikkus
TOF (Surphaser SR100)	tehas	0,3	1...7	1..7	seadmepõhine	-
TOF (SICK LMS511)	tehas	25	0...80	3...10	seadmepõhine	-
jälgimisega (TOF) ja TOF (Leica, Imager)	mööteruum	0,8	0,3...365	0,5...5	skanneri jälgimine	rada
jälgimisega (TOF) ja laser (Leica, Leica)	mööteruum	0,1	0...60	0...0,5	skanneri jälgimine	robot
jälgimisega (markerid) ja SL (MetraSCAN 3D)	mööteruum	0,040	0,2...6	0,3...1	skanneri jälgimine	robot
SL (DPI-8)	tehas	1	0...8	0,35...1,2	kogutud andmete põhine	robot
SL (ARTEC LEO)	tehas	15	0...8	0,6...3,7	kogutud andmete põhine	rada
SL (HandySCAN BLK)	mööteruum	0,2	0...4	0,3...1	kogutud andmete põhine	markerid + robot
SL (Sol 3D)	mööteruum	(0,1 objekt 20cm ³)	<0,2	<0,2	kogutud andmete põhine	pole võimalik
markerid ja pind (Nikon D2Xs)	tehas	3	0...30	1...10	kogutud andmete põhine	markerid + kaamera positsioonid
markerid (V-Stars)	mööteruum	4µm + 4µm/m	0...30	1...10	kogutud andmete põhine	markerid + kaamera positsioonid
markerid (Nikon D2Xs)	tehas	0,5	0...30	1...10	kogutud andmete põhine	markerid + kaamera positsioonid

*roheline väljendab sobivust, kollane raskendatud sobivust ja punane mittesobivust.

3.3 Valiku kirjeldus

Mõõtesüsteemide uuringust selgus, et ABB azipod-seadme korpuse detailide punktide mõõtmise sobivaks meetodiks on seadmepõhine TOF. TOF meetodil töötavat seadet on võimalik projekteerida vastavaks eelkõige visioonile ja järgnevatele nõuetele:

- mõõtemääramatus alla 0,75 mm;
- tsehhi töökeskkond;
- skanneri kaugus mõõdetavast objektist >4 m;
- mõõdetava objekti pindala 3 x 5 m²;
- mõõtmise lihtsus, kuna toimub ühest seadmest ja ühest positsioonist;
- automatiseeritav, vajab vähest operaatori sekkumist.

Vajalik täpsus on võimalik saavutada ka TRI meetoditega, kuid need on välistatud peamiselt mõõteruumi ja lisaseadmete vajadusest. Lisaseadmete vajalikkus tuleneb skanneri kaugusest objektist, kui skanner asub objektile lähemal kui 3 m on vajalik skanneri liigutamine. Markerite kasutamise meetod välistati mõõtmise keerukuse tõttu. Markerid tuleb objektile kuvada või füüsiliselt paigaldada ning pildistamine toimub ligikaudu kümnest kaamera positsioonist, mis paiknevad suures ulatuses ümber detaili.

Täpsemad nõuded mõõtesüsteemile on koostatud uuringu alusel ja kokku võetud punktis 4.1. Järgnev peatükk keskendub valitud TOF mõõtesüsteemi täpsemale uurimisele.


4 MÕÖTESÜSTEEMI KIRJELDUS

Järgnev peatükk on valmistootena olemasolevate mõõtesüsteemide analüüsi tulemus ja sisend ABB azipod-seadme korpuse detailide mõõtesüsteemi projekteerimisele. Visiooni, tööprotsessi sobivust (Sele 2.8), mõõtesüsteemi paiknemisest tootmisalal ja täpsust rahuldavad nõuded mõõtesüsteemile on järgnevalt kirja pandud. Detailed nõuded katavad mõõteseadet, ühtlasi on toodud ka lahendusvariandid nõuete realiseerimiseks. Üldisemalt on kirjas nõuded digitaalsele andmetöötlusele, mõõtetulemuste esitamisele ja pingioperaatori tegevused vigade markeerimisel. Üldisemad teemad saavad detailse lahenduse projekti edasises käigus.

4.1 Nõuded mõõtesüsteemile

Tabel 4.1 Mõõtesüsteemi nõuded ja võrdlus SURPHASER SR_100-ga [13]

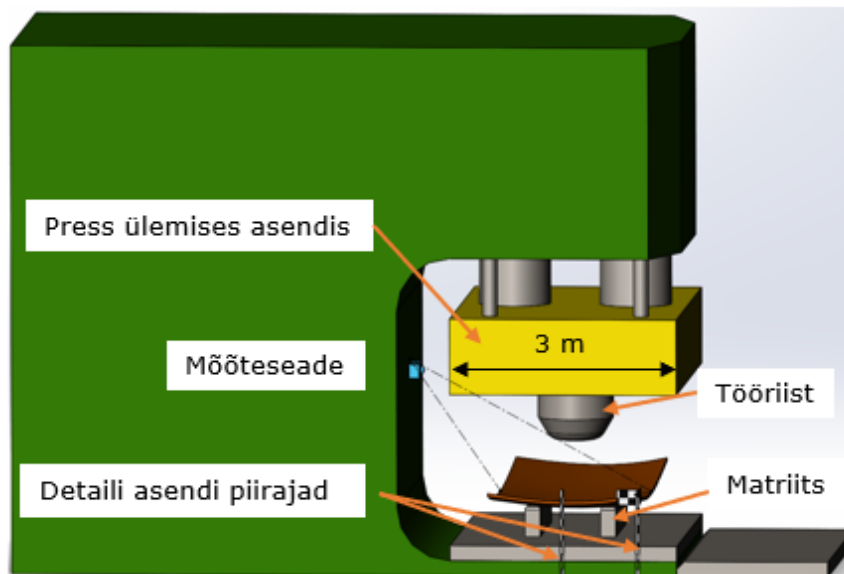
	Nõuded	Võrdlus, SURPHASER SR_100
Meetod	seadmepõhine TOF	seadmepõhine TOF, faasinihke meetodil
Seade	LiDAR skanner	LiDAR skanner
Tööulatus (<i>Range</i>)	1-10m	1-7
Mõõteala (<i>Field of view</i>)	horisontaalne 90°, vertikaalne 45°	horisontaalne 360°, vertikaalne 270°
Täpsus	0,75 mm (10x täpsem tolerantsist)	<0,3 mm @ 3m
Töökeskkond	tehase tsehh. Tolmu, vibratsiooni ja põrutus kindel või korpuse kasutamise võimalus.	Tehas
Ühenduvus	juhe, WiFi	juhe, WiFi
Arvuti	vajalik	vajalik
Punktipilv	1 cm võrk ca 250 000 punkti detailil	208 - 1 200 tuhat punkti/s
Skaneerimise kiirus	1-3 min	4.5 min 270° x 360° ülesvõte ~1.1 min 270° x 90°
Mõõtmed	pole piiratud	381 mm L x 219 mm H x 120 mm W
Kaal	pole piiratud	11 kg
Peamine kasutusvaldkond	kordus mõõtmised	pöördprojekteerimine
Andmetöötlus		
Seadme kalibreerimine	vajalik	olemas
Markerite tuvastus	vajalik	olemas
Reaalajas andmete töötlus	pole vajalik	olemas
Reaalajas andmete kvaliteedi kontroll	pole vajalik	olemas
Eelvaate ülesvõte	pole vajalik	olemas
Punktide <i>mesh</i>	pole vajalik	olemas
Ala puhastamine	vajalik	olemas
Kehvade punktide eemaldamine	vajalik	olemas

	Nõuded	Võrdlus, SURPHASER SR_100
<i>Data export</i>	vajalik	olemas
<i>Color image mapping</i>	pole vajalik	olemas
<i>Video mapping</i>	vajalik	puudub
Mitme pilve liitmine	pole vajalik	olemas
Visualiseerimine	vajalik	olemas
<i>Geometric fit</i>	vajalik	puudub
<i>Best fit</i>	vajalik	puudub
Kasutajaliides	vajalik	puudub
Sele 4.1 SURPHASER SR_100 [13]		

TOF meetodil töötavaid laserskannereid nimetatakse täpsemalt LiDAR skanneriteks, kus LiDAR väljendab valguse tuvastust ja kauguse leidmist ehk signaali kandjaks on valgus. Võrdlus seadmega SURPHASER SR_100 on toodud, kuna olemasolevatest seadmetest on selle vastavus ABB azipod-seadme korpuse detailide mõõtesüsteemi nõuetele kõige parem. SR_100 seade on üldiselt mõeldud pöördprojekteerimiseks, kus iga objekti mõõdistamine koostatakse eraldi projektina. Laserskaneerimisel paigutatakse SR_100 kolmjalale. Ülemise U-kujulise osa pöörlemisega saadakse horisontaalne ja kerakujulise osa pöörlemisega vertikaalne laserkiire liikumine. Kaugus leitakse faasinihke meetodil. SR_100 tarkvara pakub lahendust kogu mõõtmisprotsessile ja punktipilve kuvamisele. Mõõtetulemuste kõrgemad analüüsi (punktipilve ja mudeli sidumine) võimalused ja kasutajaliides tootmise abistamiseks puuduvad.

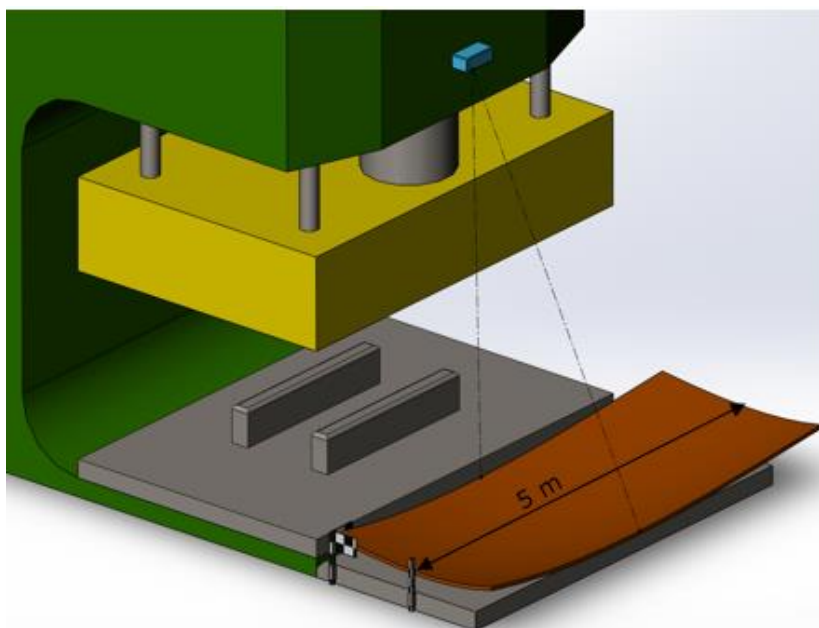
4.1.1 Seadistused

Seadistuse all peetakse silmas mõõteseadme asukohta ja mõõtmisega seotud lisategevusi. Parim lahendus detailide mõõtmiseks on matriitsil nõ pressi all Sele 4.2. Tööprotsessis pressimise seerias (Sele 2.8) tõstetakse tööriista minimaalselt suurusjärgus 10 cm. Sellise vahe puhul jääb mõõdetava detaili pind ja mõõteseadme andur terava nurga alla. Parema tulemuse saamiseks tuleb press seada maksimaalselt avatud olekusse, nii on kirjeldatud nurk maksimaalne.



Sele 4.2 Seadistus 1

Seadistuse 1 (Sele 4.2) ja pressi andmete (Tabel 2.2) põhjal on minimaalne detailile langeva mõõtekiire nurk ligikaudu 30 kraadi. Uuringud näitavad, et sellise nurga puhul on peegeldunud kiire intensiivsus vähenenud 40-60% võrreldes pinnalt risti peegeldunud kiirega. [25] Lisaks on matriits, tööriist, pressi käik ja hetkel teadmata muutujad ABB azipod 3D-kit tootearenduse projekti käigus suures osas väljakujunemisel. Seega on Sele 4.3 pakutud ka üldisem lahendus detaili mõõtmiseks. Lahenduse puuduseks on lisa tegevus, kus detail tuleb matriitsilt liigutada laadimisalale.



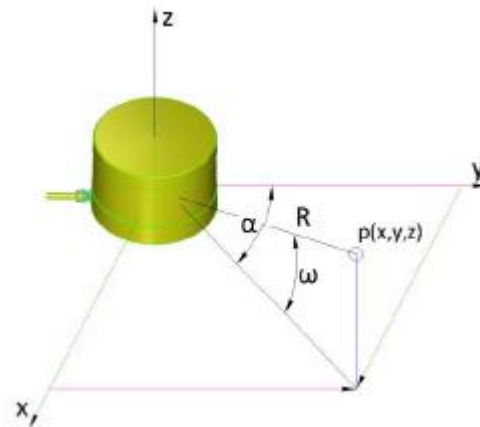
Sele 4.3 Seadistus 2

4.2 Skanneri tööpõhimõte ja mõteseadme ehitus

Laserskaneerimisel luuakse objektist punktipilv punkti kauguse, horisontaal- ja vertikaalnurga alusel. Punkti kaugus leitakse laserkaugusemõõtja ja nurgad eraldi mehhanismide abil. Sele 4.4 on visualiseeritud seos ristkoordinaatide ja skaneeritud punkti andmete vahel. Punkti ristkoordinaadid leitakse valemiga 4.1. [26]

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cdot \cos \omega \cdot \sin \alpha \\ R \cdot \cos \omega \cdot \cos \alpha \\ R \cdot \sin \omega \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

kus x, y, z on punkti koordinaadid skanneri koordinaadistikus;
 R on skanneri ja punkti vaheline kaugus;
 ω on punkti kohavektori vertikaalnurk mõõdetud skanneri xy -tasapinnast;
 α on punkti kohavektori horisontaalnurk mõõdetud skanneri yz -tasapinnast.

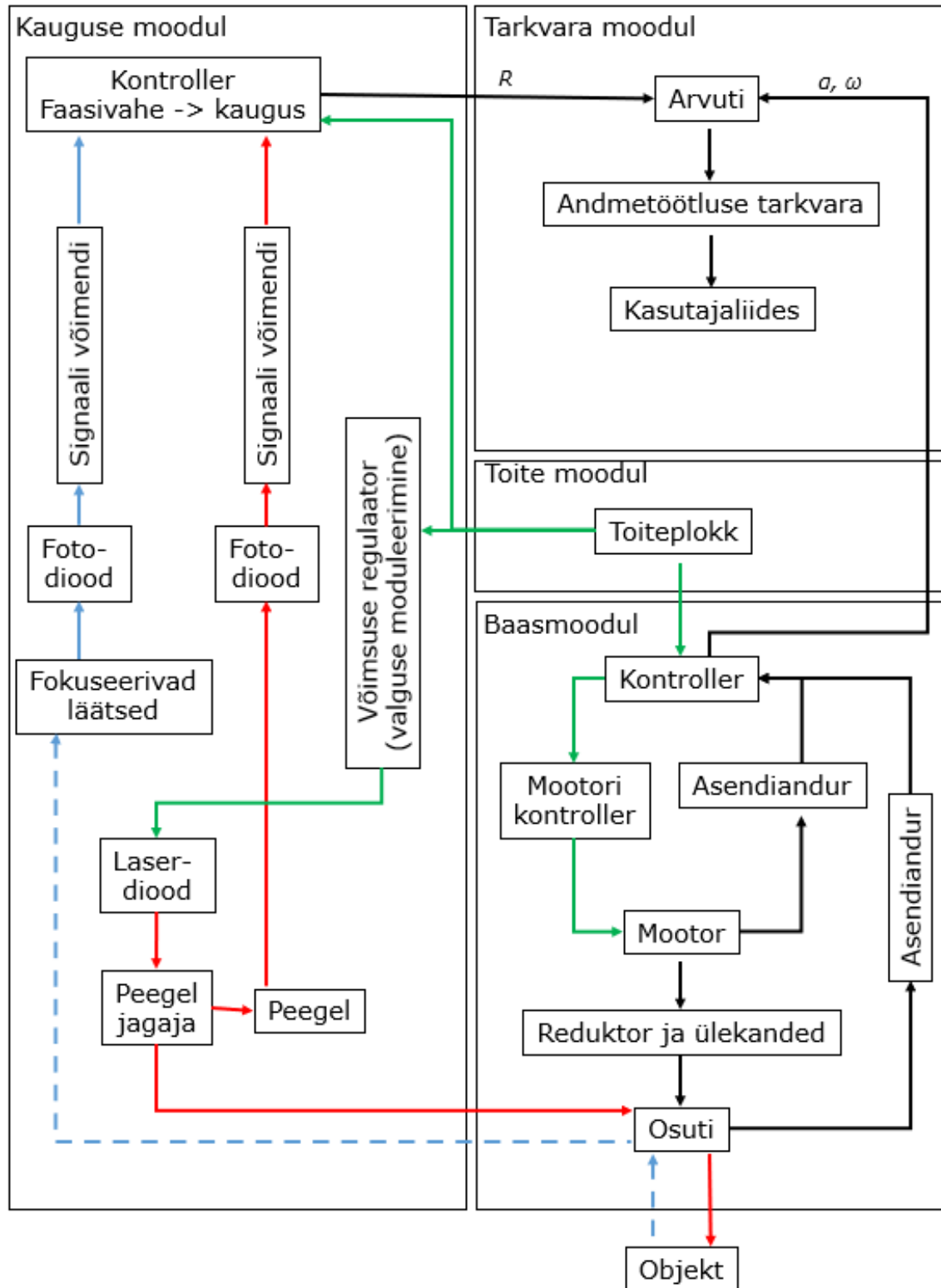


Sele 4.4 Skaneeritud punkti koordinaadid [26]

Üldpildi andmiseks laserskaneerimise seadmest on Sele 4.5 kirjeldatud faasinihke meetodil töötava laserskanner-i ehitust. Seadme ehitus on jaotatud kauguse, baas- ja toitemooduliks ning tarkvaramoodul on eraldiseisvas arvutis.

Kauguse moodulit varustab toiteplokk elektrienergiaga, energia suunatakse võimsuse regulaatorisse, kus toimub laserdiodi poolt kiiratava valguse moduleerimine. Laserdiod kiirgab pidevat valgust peegeljagajale, kust üks vihk suunatakse otse fotodiodile ja teine baasmooduli osutile, mis suunab kiire objektile. Objektilt peegeldunud kiir suunatakse fotodiodile läbi fokuseeriva läätsesüsteemi. Mõlemale fotodiodile langenud kiire elektriline signaal võimendatakse ja suunatakse kontrollerrisse, mis leiab signaalide parameetrite abil objekti kauguse.

Baasmooduli eesmärgiks on kiiratud ja peegeldunud laserkiire suunamine ning kaugusele vertikaal- ja horisontaalnurga lisamine. Laserkiire suunamiseks on mitmeid meetodeid, täpsetel mõõteseadmetel on levinuim elektromehaaniline juhtimine, mille liikumist on kirjeldatud punktis 4.4.5.



Sele 4.5 Faasinihke kaugusemõõtja tööpõhimõtte jaotatud mooduliteks

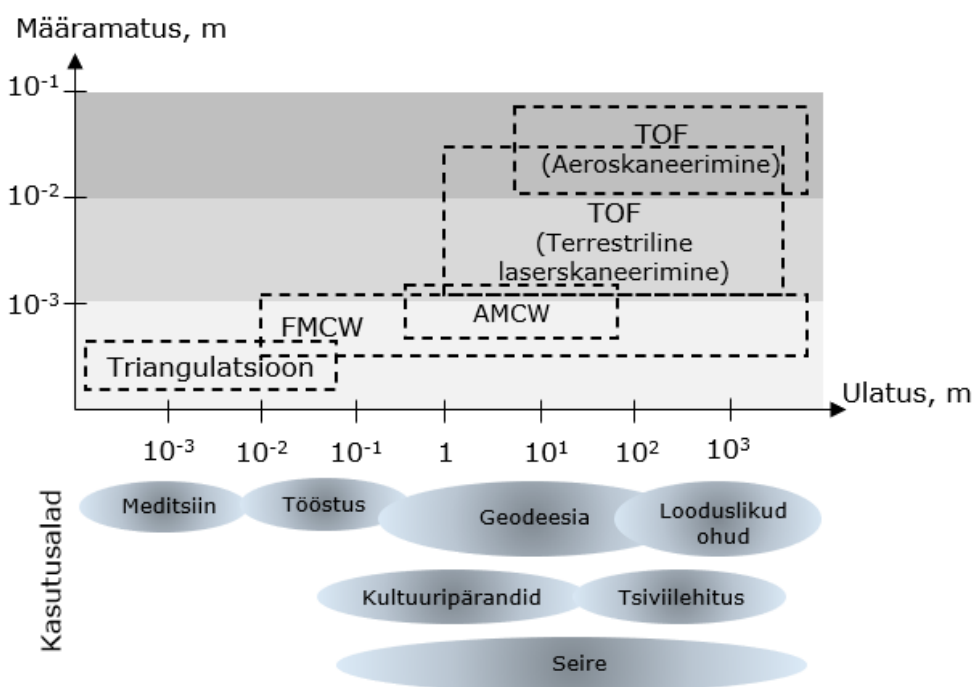
Kogutud andmed: punkti kaugus, peegeldunud laserkiire intensiivsus, vertikaal- ja horisontaalnurk salvestatakse mäluseadmesse või juhitakse tarkvaramooduli arvutisse. Laserkiire intensiivsuse parameeter võimaldab hinnata kauguse mõõtmise täpsust, pinna omadusi ja materjali. [27]

4.3 Kauguse moodul

TOF laserskaneerimine jaguneb kauguse leidmisel järgmisteks meetoditeks:

- laserimpulss – mõõdab otseselt signaali edasi-tagasi liikumiseks kulunud aega,
- faasinihe - mõõdab kaudselt signaali edasi-tagasi liikumist faasinihke abil,
 - amplituudi moduleerimine,
 - sageduse moduleerimine.

Sele 4.6 illustreerib meetodite mõõtemääramatust, seadme kaugust objektist ja rakenduse valdkondi.



Sele 4.6 Laserskaneerimisel kasutatavad kauguse leidmise meetodid, kus TOF laserimpulss meetod, AMCW - amplituudi moduleerimise meetod, FMCW - sageduse moduleerimise meetod [28]

4.3.1 Laserimpulss meetod

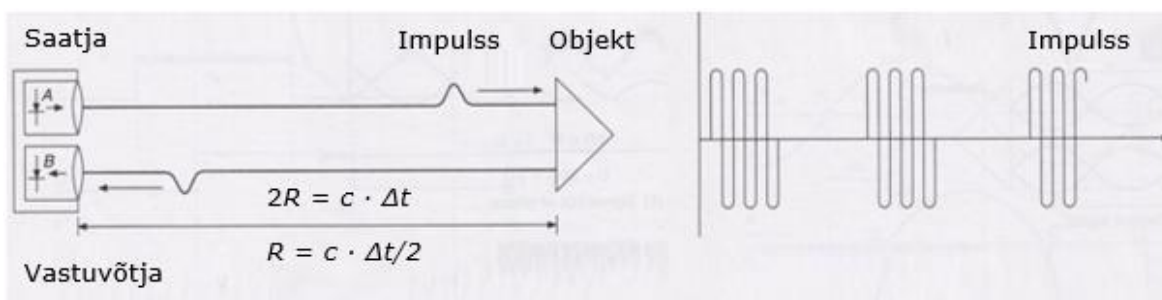
Laserimpulss meetodil saadetakse tugev kiirguse impulss objektini, kus toimub hajuv peegeldumine, ja tagasi peegeldunud osa püütakse vastuvõtjasse. Sele 4.7 on

visualiseeritud laserimpulss meetodi tööpõhimõte ja laineimpulss. Punkti edasi tagasi kaugus arvutatakse signaali kiiruse ja kulunud aja korrutisena:

$$2R = c \cdot \Delta t, \quad (4.2)$$

kus R – punkti kaugus, m;
 c – valguskiirus ($c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s);
 Δt – kulunud aeg, s.

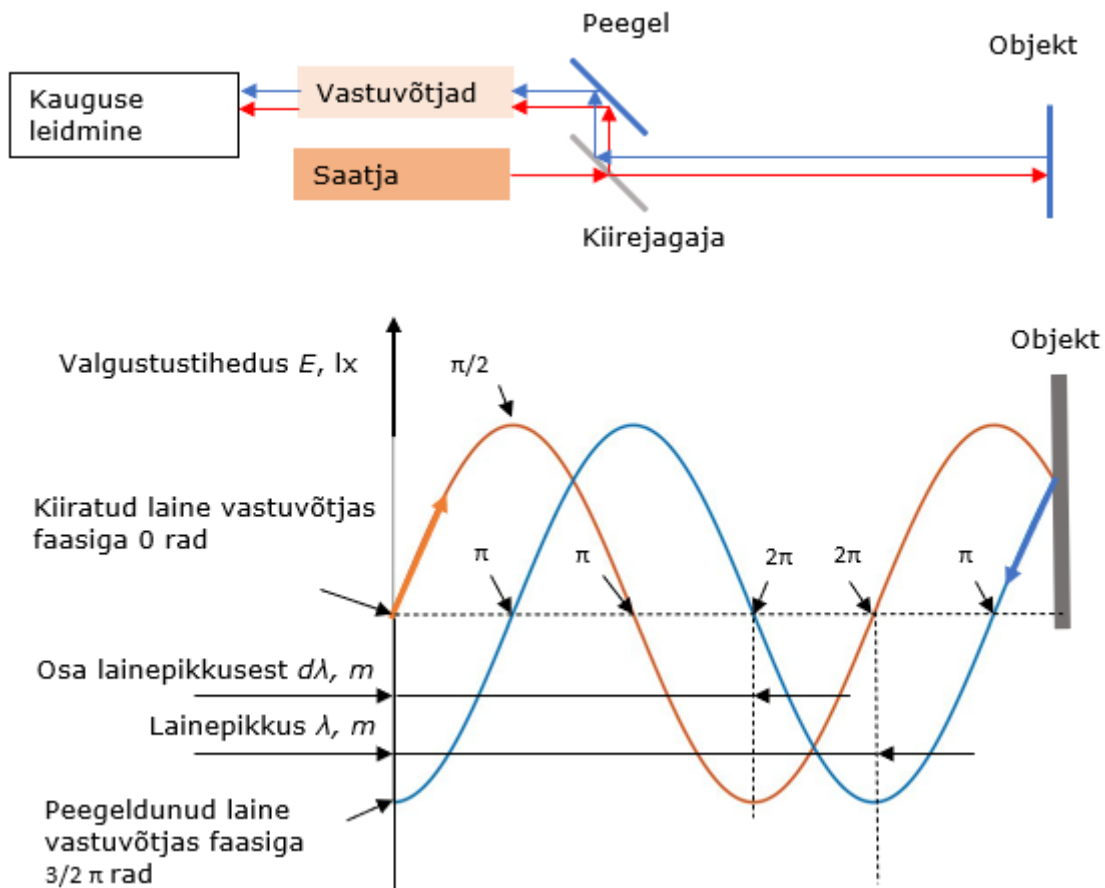
Valguse suur kiirus seab aja mõõtmisele kõrged nõuded. 100 ps jooksul läbib valgus 3 cm ehk 100 ps eraldusvõimega kella puhul on jaotise väärtus $c \cdot \Delta t/2 = 1,5$ cm. Mõõtmise täpsuse suurendamiseks kasutatakse aja mõõtmiseks mitut kella ja ühe punkti kauguse määramisel paljude impulsside kauguse statistilise keskmise leidmist. Alla 1 cm mõõtemääramatusega seadmed on erandid. Lisaks objekti kauguse suurenemisel sõltub täpsus laserkiire võimsusest. Võimsamate laserimpulsside genereerimine nõuab pikemat aega. Skaneerimise kiirus on seega piiratud ühte punkti saadetud impulsside arvust ja laserimpulsi võimsusest, tüüpilised impulss-skannerid leiavad 1 000 kuni 30 000 punkti sekundis. [28]



Sele 4.7 Impulss meetodi tööpõhimõte ja laine impulss [29]

4.3.2 Faasinihke meetod

Faasinihke meetodi puhul kasutatakse pidevat laserkiirt moduleeritud laine tekitamiseks. Kiir jaotatakse seadmes kaheks ning kaugus leitakse faasinihke mõõtmisega kiiratud ja objektilt peegeldunud laine vahel.



Sele 4.8 Faasinihke kaugusemõõtja tööõhimõtte ja faasinihe

Läbitud vahemaa saab jaotada lainepikkuse kaupa lõikudeks ja faasinihkeks, mis on osa lainepikkusest, ning leida järgmise valemiga 4.3:

$$2R = M \cdot \lambda + \delta\lambda,$$

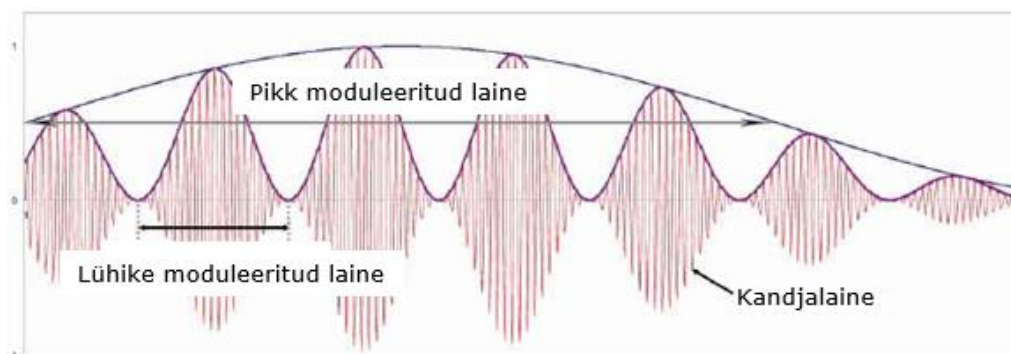
$$d\lambda = \lambda \cdot \frac{\phi}{2\pi}, \quad (4.3)$$

- kus R – leitav kaugus, m;
 M – täisarv lainepikkuseid läbitud vahemaal;
 λ – lainepikkus, m;
 $d\lambda$ – lainepikkuse osa, m;
 ϕ – faasinihe, rad.

Sele 4.8 toodud näite puhul läbib laserkiir 2 täis ja $3/4$ lainepikkust ehk kaugus objektini on 1 ja $3/8$ lainepikkust. Lainepikkuste arv M on mõõtmistel tundmatu ja eemaldatakse võrrandist kasutades lainepikkusi, mis on suuremad läbitud vahemaast. Nii toimides ja valides lainepikkuse 20 m saab mõõta maksimaalselt 10 m kaugust. Siit tuleneb faasinihkel töötavate skannerite piiratus mõõta pikki vahemaid. Teiselt poolt piirab faasinihke mõõtmisel kauguse mõõtmise määramatust faasimõõduri

eraldusvõime ehk lühemate lainepikkuste kasutamisel suureneb kauguse mõõtmise täpsus. Seadmele optimaalse kauguse ja täpsuse saamiseks kasutatakse laine amplituudi või sageduse moduleerimist. [28]

Laine amplituudi moduleerimisel antakse kandjalainele mitu moduleeritud lainepikkust. Sele 4.9 on toodud kandja laine, millele on 2 moduleeritud lainet, ja Tabel 4.2 kirjeldatud kauguse leidmise arvutuskäiku, kus faasivahe mõõtmise eraldusvõime on suurusjärgus $3 \cdot 10^{-4}$ ehk 10 m lainepikkuse puhul 3 mm. [28]



Sele 4.9 Laine moduleerimine [30]

Tabel 4.2 Näide amplituudi moduleerimisel kauguse leidmisest [29]

	Sagedus, f	λ , m	$\lambda/2$, m	Täpsus, mm	$d\lambda$, m
Jäme lugem 1	15 MHz	20	10	3	6,327
Täpne lugem	150 MHz	2	1	0,3	0,3245
				Kaugus	6,3245

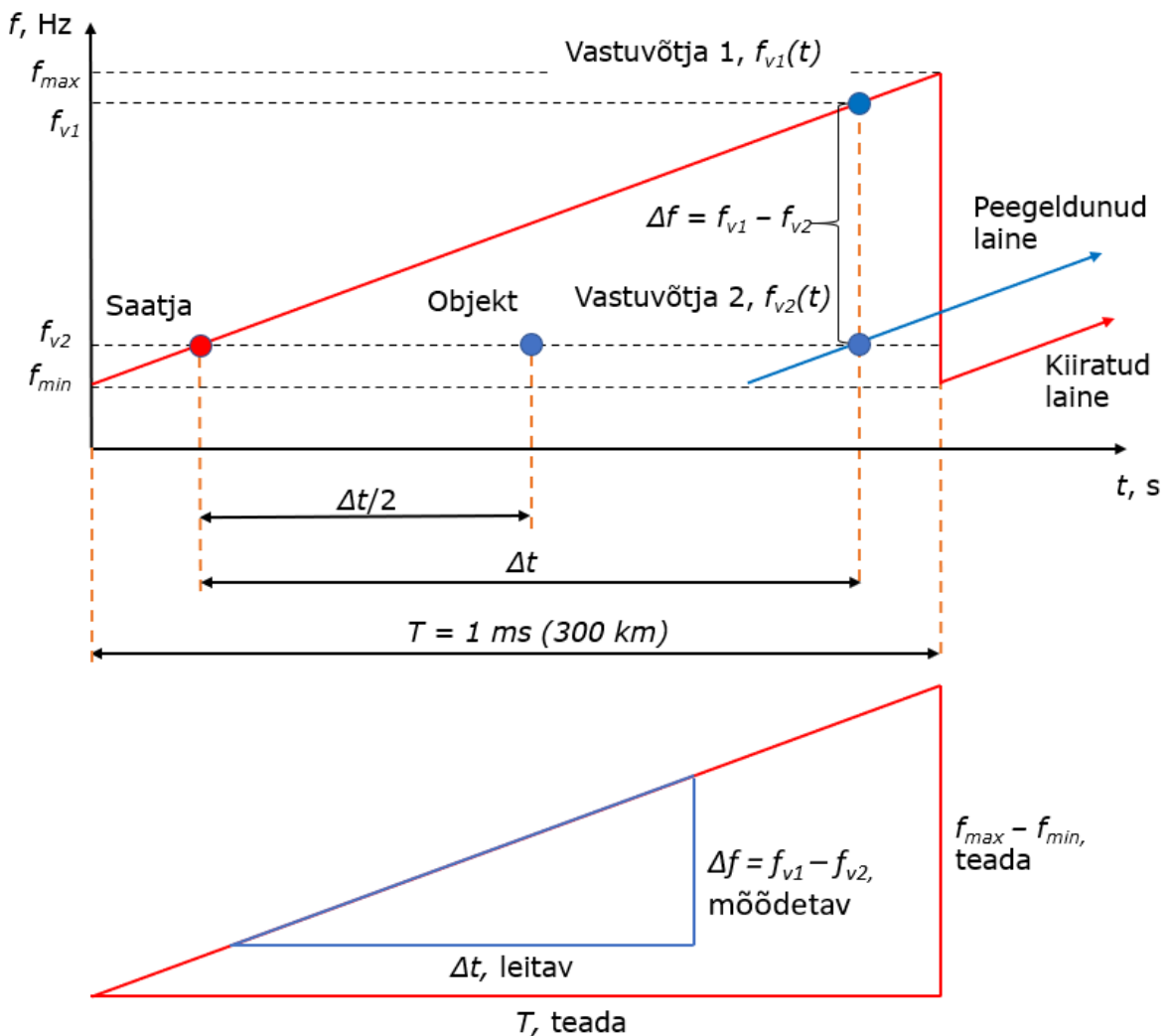
Laine sageduse moduleerimisel määratakse kaugus kiiratud ja peegeldunud laine sageduse võrdlemisel. Sageduse moduleerimiseks kasutatakse järgmiseid laine mustreid: sinusoid, nelinurk, kolmnurk, saehammas ja astmeline. Sarnaselt amplituudi moduleerimisega peab moduleeritud laine periood olema vähemalt kaks korda suurem, kui kiire jõudmise aeg objektini. Näiteks lineaarsel sageduse suurenemisel perioodiga 1 ms on mõõtmiskaugus piiratud 150 km-ga. Objekti kaugus leitakse kasutades teepikkuse valemit 4.4. Faasivahe saehammas laine puhul leitakse kaudselt sageduse muutuse ja moduleeritud laine sageduse kasvamise kiiruse järgi. [28] [31]

$$2R = c \cdot \Delta t = \frac{c \cdot \Delta f}{\left(\frac{d(f)}{dt}\right)} = \frac{c \cdot \Delta f}{\left(\frac{f_{max} - f_{min}}{T}\right)}, \quad (4.4)$$

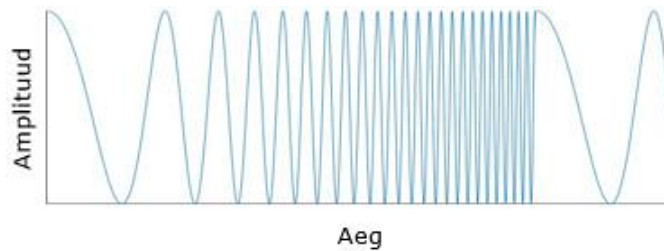
kus R – leitav kaugus, m;
 c – valguskiirus, m/s;
 T – moduleeritud laine periood, s;
 Δf – sageduse muutus, Hz;

f_{max} – moduleeritud laine maksimaalne sagedus, Hz;
 f_{min} – moduleeritud laine minimaalne sagedus, Hz;
 Δt – kulunud aeg, s.

Sele 4.10 on kirjeldatud sageduse moduleerimisel kauguse leidmise põhimõtet. Saatja kiirgab pidevat muutuva sagedusega lainet, mis jaotatakse kaheks ja saadetakse vastuvõtjasse 1 ja objektile. Vastuvõtjasse 1 jõuab signaal sagedusega $f_{v1}(t)$. Peegeldunud laine sagedusega $f_{v2}(t)$ jõudmisel vastuvõtjasse 2 on vastuvõtjas 1 signaal muutunud sageduste vahe Δf võrra. Valemi 4.4 parameeter Δt leitakse sarnaste kolmnurkadel põhineva seose abil. Sele 4.11 on kujutatud siinus kandjalaine saehammas laine modulatsiooni kaks perioodi.



Sele 4.10 Üleval on moduleeritud sagedusega laine parameetrid ja all aja leidmise põhimõte



Sele 4.11 Moduleeritud sagedusega laine

4.3.3 Kauguse mooduli kokkuvõte

Tabel 4.3 Kauguse mõõtmise põhimõtete kokkuvõte [28]

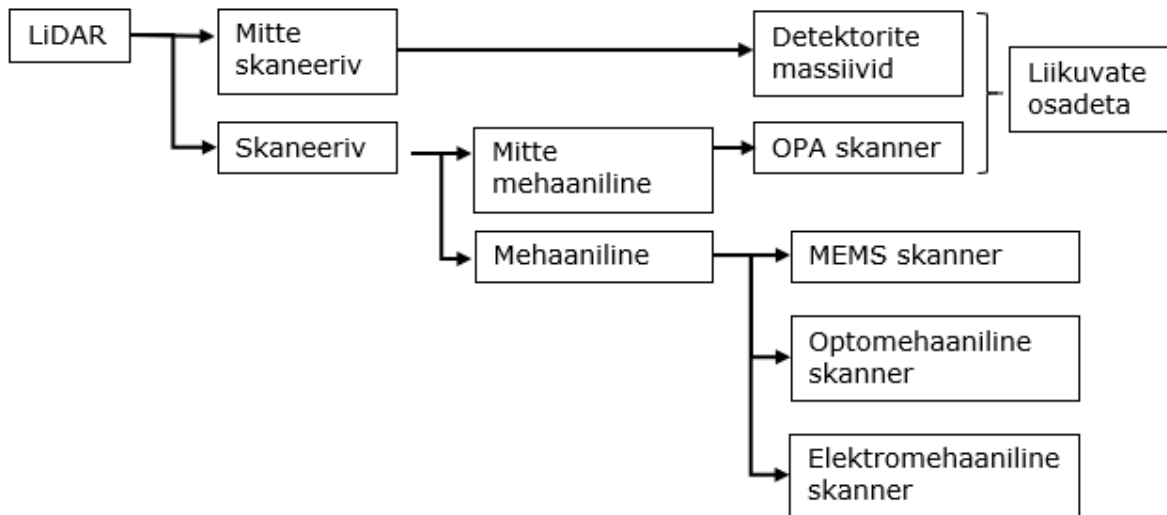
	Impulss [32]	Amplituudi moduleerimine [13]	Sageduse moduleerimine
Mõõtmise parameeter	valguse intensiivsus ja aeg	moduleeritud amplituudi faasinihe	moduleeritud sageduse faasinihe
Aja mõõtmine	otsene	kaudne	kaudne
Tingimused	sise- ja välis	sise	sise- ja välis
Valguse koherentsus	mitte koherentne	koherentne/mitte koherentne	koherentne
Peamised eelised	lihtne/otsene mõõtmise põhimõte, suur mõõtekaugus	sisetingimustes laialdaselt levinud, suur mõõtmise sagedus(kuni 700 kHz)	suurem saavutatav täpsus, samaaegne kauguse ja kiiruse mõõtmine
Peamised puudused	madal intensiivsus peegeldunud lainetel, sagedus on piiratud (kuni 50 kHz), täpne elektroonika	tundlikkus objekti liikumisele, mõõtekaugus on piiratud (kuni 100 m)	valguse koherentsuse kadumine, tundlikkus keskkonnamuutusele, elektroonika ja laser komponendid on arengu järgus
Saavutatav täpsus, mm	5	0,5	0,1

Lähtuvalt süsteemile seatud nõuetest (Tabel 4.1) saab täpsuse alusel välistada impulss meetodil toimivad seadmed. Kumbagi valguse moduleerimise meetodit ei saa antud uuringu põhjal välistada. Parema valiku leidmiseks on tarvis uurida laserite ja sensorite valikut, signaali töötlust ja digitaliseerimist, laseri ohutust ning mõõtmisvigade tekkepõhjuseid.

4.4 Baasmoodul ja nurkade leidmine

Kauguse moodul leiab punkti kauguse ühes punktis, punktipilve tekitamiseks on vajalik laserkiir suunata igasse ruumipunkti. Ruumipunkti suunamise järgi jaotatakse LiDAR skannerid skaneerivaks ja mitte skaneerivaks. (Sele 4.12). Mitte skaneerivad seadmed kasutavad detektorite massiivi. Skaneerivad seadmed jagunevad mehaaniliste komponentide olemasolu alusel: optilised faasimassiivid (OPA) juhivad

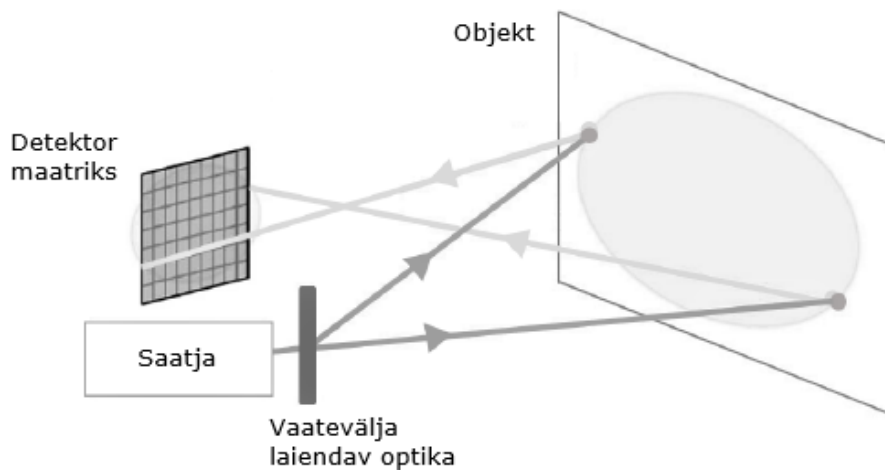
laserkiirt ilma mehaanikata, mikroelektromehaanilised (MEMS), optomehaanilised ning elektromehaanilised juhvivad laserkiirt mehhaaniliste komponentide abil. Skannerites kasutatakse ka kombineeritud lahendusi. [33,34] Lisaks kirjeldatud seadmetele on varases arengufaasis seadmeid, mis põhinevad järgmistel meetoditel: vedelkristall lainejuht [35], elektrimärgamine [36], mikroläätsede massiiv [37] ja holograafiline difraktsioonivõre. [38]



Sele 4.12 Baasmooduli lahendused [34]

4.4.1 Detektorite massiivid

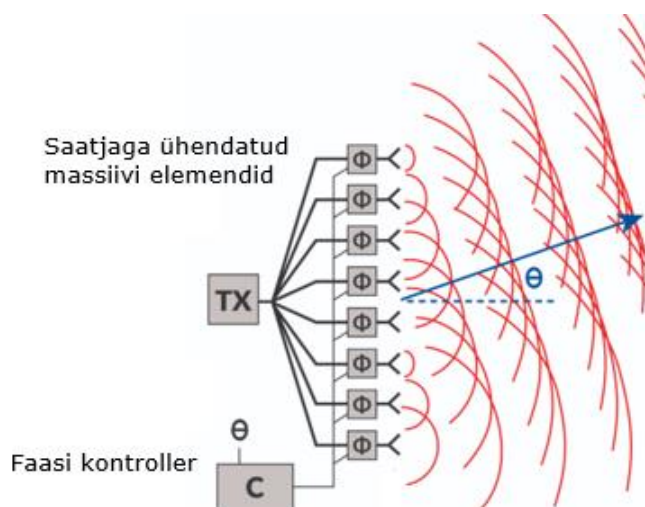
Detektorite massiivi põhimõttel töötav LiDAR skanner valgustab kogu mõõteala lühikeste impulssidega ja tekitab tasapinnale paigutatud detektorite abil punktipilve. Kauguse leidmine toimub laserimpulss või laine amplituudi moduleerimise meetodil. Horisontaalne ja vertikaalne nurk leitakse detektorite massiivis üksiku vastuvõtja paiknemise kaudu (Sele 4.13). Meetodi eeliseks on liikuvate osade puudumine ja kogu vaatevälja mõõtmine ühe ülesvõttega. Kogu vaatepildi ülesvõttega on võimalik saavutada suur andmete hõivamise kiirus, millest tuleneb seadme vastupidavus vibratsiooni ja mõõtealas juhuslike liikuvate objektide suhtes, mis muidu võivad mõõtetulemust oluliselt moonutada. Peamiseks puuduseks on piiratud kaugus, kuna valgustatakse kogu vaateväli, mis oluliselt vähendab üksikpunkti signaali valgustustugevust ja signaali-müra suhet. [33]



Sele 4.13 Detektorite massiivil põhinev süsteem [33]

4.4.2 Otilised faasimassiivid

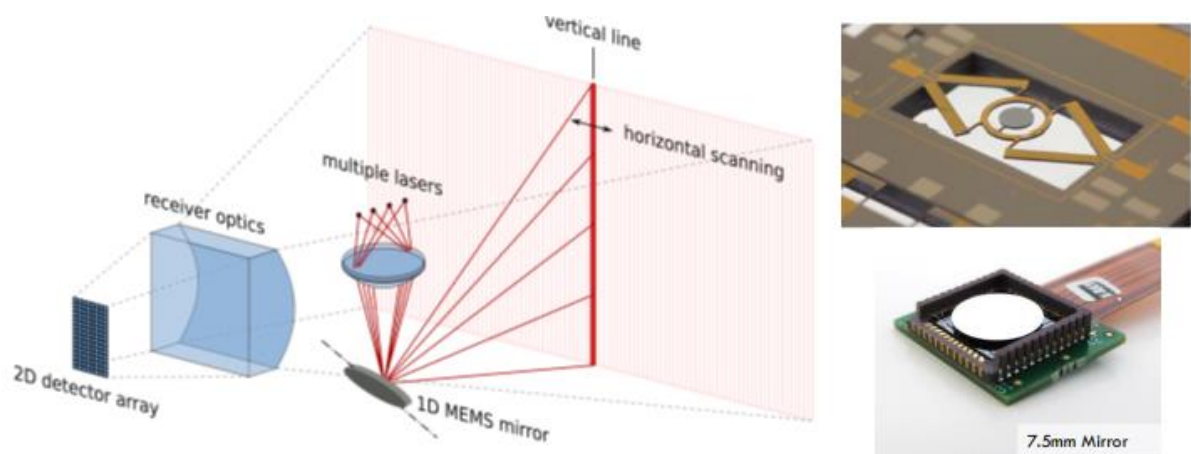
Massachusettsi Tehnoloogiainstituudi Photonic Microsystems Groupi uurimisrühm töötas välja liikuvate osadeta kiip lahenduse laserkiire juhtimiseks eesmärgiga muuta LiDAR seadmed väiksemaks, odavamaks ja kiiremaks [39]. Otilised faasimassiivid (OPA) on valmistatud valgust kiirgavate elementide kogumist, mille faasid on muudetavad. Kiirgavale elemendile jõuab signaal saatjast, läbides jagajat ja arvuti poolt kontrollitud faasimuutjat. Iga elemendi faasi muudetakse, et suurendada kiirgust soovitud ja tühistada soovimatus suunas. (Sele 4.14) OPA-d võimaldavad saavutada stabiilset, kiiret ja täpset valgusvihu juhtimist ning mehaaniliselt liikuvate osade puudumine muudab seadmed vastupidavaks kiirendustele ja vibratsioonile. Lisaks on OPA paigutatud kiibile, mis muudab nende masstootmise odavaks ja tagab kompaktsuse. Peamiseks puuduseks on tänastel seadmetel laserkiire võimsuse tagamine, mis peamiselt piirab seadme mõõteulatust. [34, 40]



Sele 4.14 Otilise faasimassiivi põhimõte [34]

4.4.3 Mikroelektromehaaniline süsteem

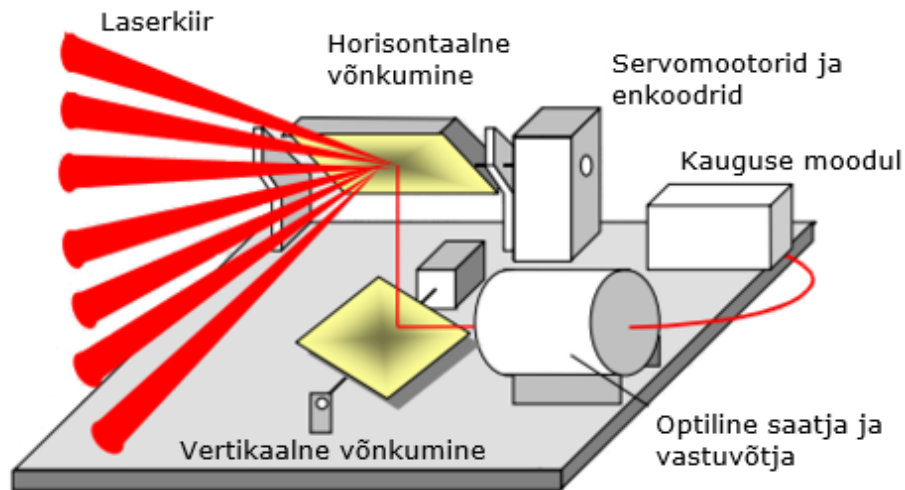
Mikroelektromehaanilisel süsteemil põhinevad seadmed võimaldavad mikropeegli programmeeritava juhtimise abil laserkiire suunamist mõõtealale. Peeglid on diameetritelt 1-7 mm ja pööratakse ümber ühe või kahe telje. Pööramist teostatakse elektromagnetilisel, elektrotermilisel, elektrostaatilisel või piesoelektrilisel meetodil. Sele 4.15 kirjeldab ühe pöörlemisteljega peegli ribalaseri juhtimise tööpõhimõtet. MEMS süsteemi peamiseks eeliseks on kerge kaal, kompaktsus ja madal energiatarve. [34]



Sele 4.15 MEMS 1-D süsteem [41], MEMS peegel piesoelektrilise ajamiga [34] ja 7,5 mm läbimõõduga peegel [42]

4.4.4 Optomehaaniline süsteem

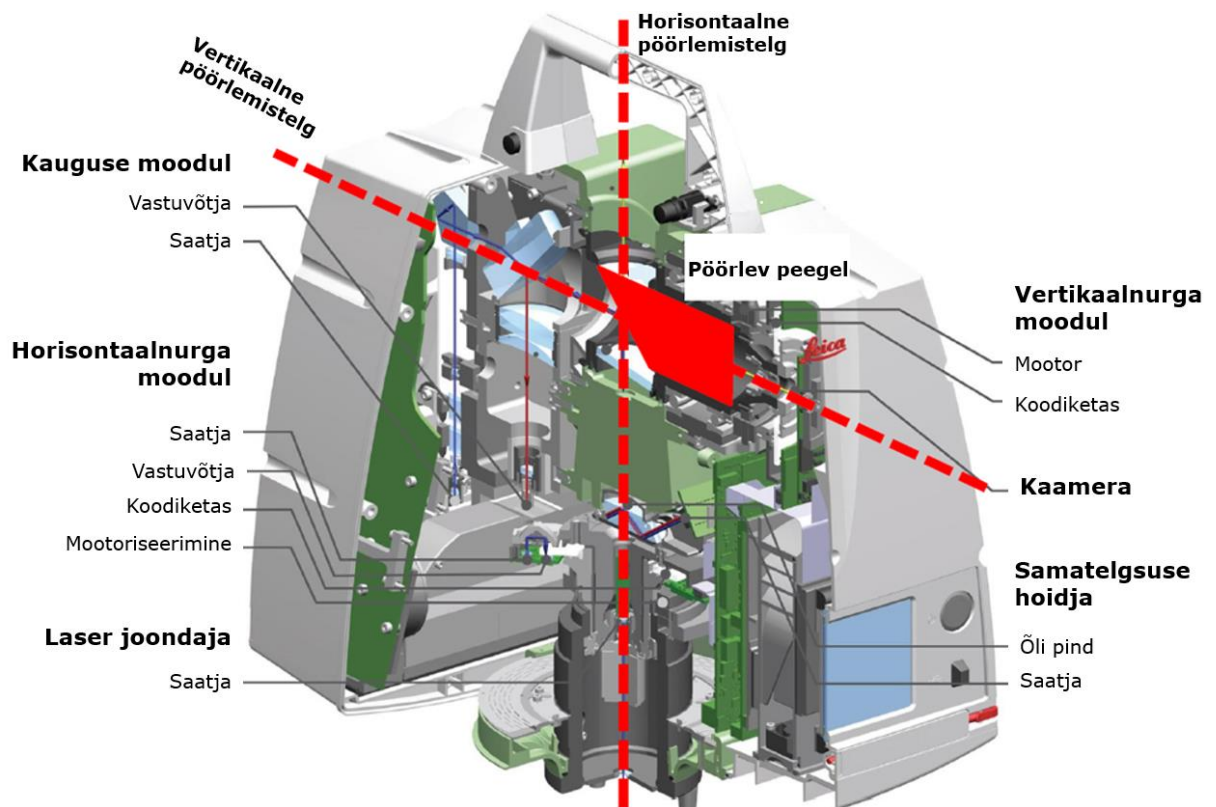
Optomehaanilise skanneri puhul kasutatakse optilisi komponente nagu peeglid ja prismad valgusvihu juhtimiseks. Peeglite kasutamine leidis rakendust, kuna algsed kauguse mooduli seadmed olid mahukad ja rasked. Nende füüsiline liigutamine tekitas soovimatuid mõjusid nagu vibratsioon. Sele 4.16 on kahe võnkuva peegli süsteem, kus esimene peegel annab horisontaal ja teine peegel vertikaal suunalise liikumise. Võnkuvate peeglite puuduseks on piiratud vaateväli, tüüpilisel 10 mm küljepikkusega peeglil on saavutatav vaateväli $\pm 20^\circ$. Lisaks nõuab peeglite juhtimine keerukat mehhanismi, mille mootorid on enamasti eritööna valmistatud. Keerukust lisab ka valgusvihu juhtimiseks ja fokuseerimiseks mitme optilise elemendi kasutamine. Optomehaaniliste seadmete väljatöötamist peetakse kulukaks ja aeganõudvaks. Vaatamata puudustele pakub optomehaaniline süsteem lihtsalt jälgitavat ja paindlikku lahendust, eriti prototüübi varases staadiumis. Peale optilise süsteemi seadistamist muutub süsteem eraldiseisvaks, mis võimaldab hõlpsasti arendada kaugusemõõtmise moodulit. LISA 1 on toodud teavet optomehaanilistes süsteemides kasutatavate peeglite kohta. [28, 40]



Sele 4.16 Optomehaanilise seadme baasmooduli ehitus [43]

4.4.5 Elektromehaaniline süsteem

Elektromehaaniliste LiDAR-ite puhul suunatakse valgusvihku ümber kahe telje, nii saavutatakse peaaegu kogu ruumi vaateväli. Levinud on kogu seadme pööramine ümber horisontaaltelje ja teljevälise parabolpeegli pööramine ümber vertikaaltelje (Sele 4.17). Mõlemat liikumist teostatakse enamasti servomootoritega. LISA 1 on toodud teljevälise parabolpeegli toode.



Sele 4.17 Elektromehaanilise LiDARi Laserskanneri ehitus ja pöörlemisteljed [44]

Horisontaalteljel toimub pöörlemine samm haaval ja vertikaalteljel pöörleb peegel pideva kiirusega, enamasti 20-30 pööret sekundis. Punkt pilve tiheduse määrab kauguste tuvastamise sagedus ja pöörlemise positsioonianduri eraldusvõime. Elektromehaaniliste skannerite puudused on seotud peamiselt liikuvate osade, keeruka kalibreerimise ja pikaajalise töökindluse tagamisega. Eelisteks on suur mõõteala (kuni 360°x270°) ja olemasolevate seadmete võrdluses suurim täpsus. [28]

4.4.6 Baasmooduli kokkuvõte

Tööstusele sobiliku seadme seisukohast saab välistada optomehaanikal ja detektorite massiivil põhinevad süsteemid. Optomehaaniliste süsteemide puhul on peamiseks kitsaskohtadeks väljaarendamise mahukus ja tehase keskkonnas vastupidavuse tagamine. Detektor massiivid on küll ilma liikuvate osadeta, kuid täpsus on piiratud madala valgusvihi energiaga. Parimaks lahenduseks on OPA või MEMS, nende eelised on praktiliselt puuduvad mehaanilised osad, kompaktne disain, kiip ja trükkplaat lahendus ning odavad komponendid. Puuduseks on piiratud mõõteala, mille saab lahendada mitme seadmega. Samuti seadmete mittepiisav täpsus, mis võib lähiaastatel tehnoloogia arenedes muutuda kättesaadavaks. Tänapäevane võimalik lahendus on elektromehaaniline süsteem, kuna olemasolevad seadmed on saavutanud vajaliku täpsuse. Nende seadmete puuduseks on kõrge hind, massiivsus ja liikuvad osad. Tabel 4.4 koondab erinevate mehhanismide andmed.

Tabel 4.4 Baasmoodulite võrdlus [13, 33, 45-47]

	Mehaaniline (IR_100)	OPA (Quanergy S3-3)	MEMS (Intel L515)	Detektorite massiivid (Leddar Pixell)
Tööpõhimõte	opto- või elektromehaanika	antennide massiiv	mikropeeglid	pulseeriv valgustus
FOV, h x v	360° x 270°	100° x 4°	70° x 55°	180° x 16°
Nurga lahutusvõime	0,004°	0,1°	0,07°	2°
Kaugus, m	1 - 7	0,1 - 10	0,25 - 9	0,1 - 20
Täpsus, mm	0,3	50	15	30
Eelise	FOV, täpsus	puuduvad liikuvad osad	kompaktsed ja kerged	kiire ülesvõte, puuduvad liikuvad osad
Puudus	liikuvad osad, massiivne	kiire võimsus	laseri võimsuse reguleerimine	kiire võimsus

4.5 Andmetöötlus

Alapeatükk käsitleb punkt pilve töötlemist ja võrdlemist mõõdetava detaili mudeliga. Seadmete kalibreerimine ja vastuvõtja signaali teisendamine punkt pilveks antud töös kajastust ei leia, teema on kirjeldatud [28].

LiDAR-i tarkvaramooduli arvuti saab kauguse ja baasmoodulilt sisendiks punktide kauguse mõõtmel, sensori vertikaal- ja horisontaalnurga ning valgustustugevuse, nende alusel genereerib mõõtmistulemuste punktipilve kolmemõõtmelises ruumis. Punktipilve puhastamise, sidumise detaili mudeliga ja operaatori kasutajaliidesele sisendi andmise teeb andmetöötluse tarkvara. Andmetöötluse probleemseks kohaks on punktipilve sidumine mudeliga, kuna punktipilvel on skanneri põhine ja mudelil CAD põhine koordinaadistik. Sidumiseks on vajalik leida sarnasusi kahe andmehulga vahel. Peale punktipilve ühildamist toimub kindlate kriteeriumite alusel punktipilve puhastamine mittesobivatest punktidest. Järgnevalt on kirjeldatud 3 mõttekäiku punktipilve andmetöötluseks:

- mõttekäik 1, pind tuvastus;
 - punktipilves teatud kujundite tuvastamine (sarnasuse leidmine);
 - punktipilves leitud kujundite sidumine mudeli kujunditega parima sobivuse meetodil; [48]
 - punktipilve puhastamine;
 - punktipilve täpsem sidumine mudeliga parima sobivuse meetodil;
 - tulemuse kuvamine kasutajaliidises;
- mõttekäik 2, piirajad;
 - piirajad määravad jämedalt detaili asendi punktipilve koordinaadistikus;
 - punktipilve transformatsioon mudeli koordinaadistikku piirajate asendi kaudu;
 - punktipilve puhastamine;
 - punktipilve täpsem sidumine mudeliga parima sobivuse meetodil;
 - tulemuse kuvamine kasutajaliidises;
- mõttekäik 3, kodeeritud markerid;
 - kodeeritud markerid määravad detaili asendi punktipilve koordinaadistikus (nt 4 märklauda nurkades); [49]
 - punktipilve markeeritud ja vastavate mudeli punktide sidumine parima sobivuse meetodil;
 - punktipilve puhastamine;
 - punktipilve täpsem sidumine mudeliga parima sobivuse meetodil;
 - tulemuse kuvamine kasutajaliidises.

Järgnevalt vajaliku andmetöötluse funktsionaalsuse kirjeldus.

4.5.1 Tarkvara peamised tööriistad

Andmetöötluse tarkvaral peab olema võimekus toetada kolmemõõtmelise punktipilve analüüsi, mudeliga sidumist ja visualiseerimist. Parema tulemuse saamiseks on

kasutusel mitmeid võtteid näiteks valgustustugevuse alusel on võimalik punkte klassifitseerida tekstuuri alusel ja lisaseadmena kasutatakse pildiandurit, mis võimaldab paremini visualiseerida punktipilve. Järgnevalt on kirjeldatud peamised tarkvaras kasutatavad funktsionaalsused: [50]

- visualiseerimine: graafiline liides punktipilve vaatamiseks;
 - liiguta, pööra ja suurenda;
 - üksiku punkti valimine ja parameetrite kuvamine;
 - punktide vahelise kauguse mõõtmine;
 - lihtsate kujundite (joon, ring, pind, kera, silinder...) sidumine;
 - läbilõigete kuvamine;
- punktide filtreerimine ehk teatud tunnuse abil punktipilves punktide valimine. Filtreerimist kasutatakse punktipilve puhastamiseks, näiteks eemaldatakse madala valgustustugevusega või mõõtepiirkonnast väljas olevad punktid;
- punktipilve transformatsioonid ehk koordinaatsüsteemi muutmine;
 - rotatsioon ja translatsioon;
 - kärpimine, mittevajalike punktide eemaldamine;
- kujundite tuvastus;
- mudeli sidumine ja parima sobivuse meetodid.

4.5.2 Sidumise meetodid

Mõttekäikudes on kasutatud kolme sidumise meetodit: kodeeritud markerid, pind tuvastus ja piirajad.

Kodeeritud marker on punktipilves tuvastatav ainulaadne objekt, mis defineerib ruumis üheselt punkti asukoha markeri keskmes. Laserskannerite markerid on enamasti must-valge mustri tahvlid küljepikkusega 20-40 sentimeetrit. Markereid on võimalik siduda punktiga, mis lisatakse punktipilvele leitud markeri keskmes suhtes. Selline mehhanism võimaldab luua mõõterakiseid nurgapunktide tuvastamiseks (Sele 4.18). Teades nurgapunkte on võimalik punktipilv ja mudel vähimruutude meetodil siduda. Peatükis 6 on pakutud kodeeritud markerite põhine arvutuskäik detaili pinna mõõdistamisel ja detailile kinnitamise lahendus.



Sele 4.18 Kodeeritud nurga markerid

LiDAR-ite puhul kasutatakse valguse intensiivsuse pildi ja keskmiste intensiivsuste meetodit kodeeritud markerite tuvastamiseks [49]. Järgnevalt on kirjeldatud kodeeritud markerite tuvastamise protsessi intensiivsuse pildi meetodil:

- **pinna leidmine.** Punkt pilvest leitakse RANSAC [51] algoritmi abil markeri tasapinna moodustavad punktid. Leitud punktide abil moodustatakse vähimruutude meetodil tasapind ja punktid projekteeritakse koos valgustugevuse väärtusega tasapinnale;
- **valgustugevuse pildi koostamine.** Projekteeritud punktidega tasapinnast moodustatakse 2D pilt, kus iga punkt seotakse piksliga ja valgustugevuse väärtusega antakse pikslile halltoonide väärtus;
- **ääretuvastus.** Valgustugevuse ehk teisendatud halltoonide gradientide abil leitakse musta ja valge alad Canny [52] algoritmi kasutades;
- **joone sobitamine.** RANSAC ja vähimruutude meetodil leitakse 2D pildil musta ja valge ala vahelised sirged;
- **lõikepunkti leidmine.** Sirgete lõikepunkt teisendatakse 3D koordinaatsüsteemi, kus see määrab markeri asukoha.

Punktipilves teatud kujundite tuvastuse puhul on kasutatud sarnast meetodit nagu kodeeritud markerite pinna leidmisel. Üheks võimaluseks on tuvastada objekti ääred. Äärejoon võimaldab punktipilve siduda mudeliga.

Piirajate kasutamisel paigutatakse detail teadaolevasse positsiooni, mis on kindlale transformatsioonile kalibreeritud ehk enam mõõtmisi on teada seadme ja mudeli koordinaadistiku sõltuvus. Meetod eeldab, et seadme koordinaadistik kordusmõõtmistel ei muutu.

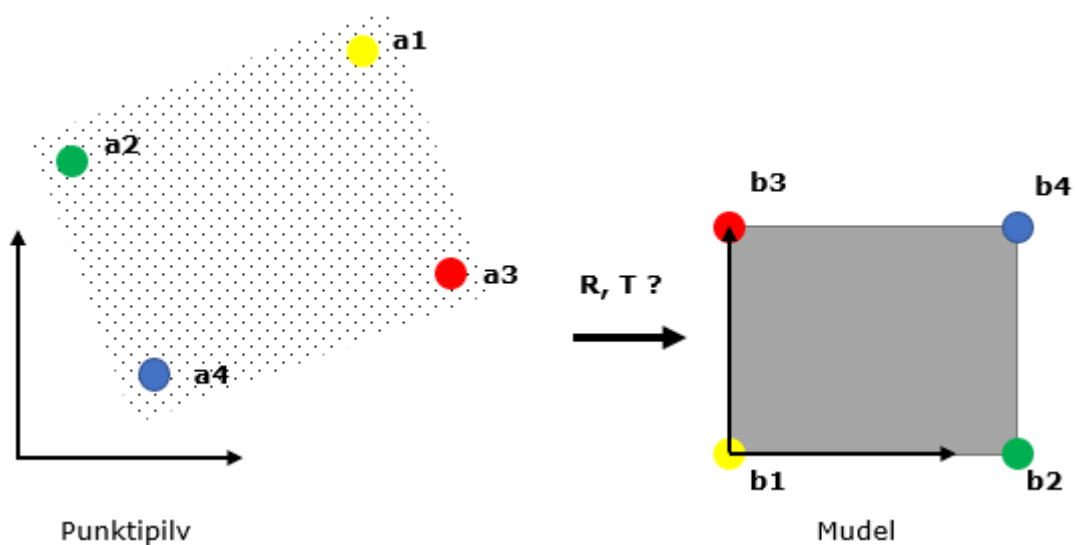
Meetodite eelised ja puudused on toodud on kokkuvõtvalt Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Sidumise meetodite eelised ja puudused

	Kodeeritud markerid	Pindtuvastus	Piirajad
Eelised	markerite tuvastuse suur täpsus	lisaseadmete puudumine	lihtne seadistus ja andmetöötlus
Puudused	lisaseadmete kasutamine ja kalibreerimine	madal ääretuvastuse täpsus ja lisa andmetöötlus	tundlik objekti seadistusele

4.5.3 Parima sobivuse meetod

Parima sobivuse meetodi eesmärgiks on leida optimaalne translatsioon ja rotatsioon punktipilvele nii, et mudel ja punktipilv asuksid koordinaatsüsteemis kohakuti. Mõttekäikudes rakendatakse parima sobivuse meetodit kaks korda. Esmalt toimub punktipilve sidumine mudeliga tuvastatud sarnasuste alusel ja seejärel täpsem punktipilve kõikide punktide põhine sidumine. Täpsema sidumise üheks võimaluseks on projekteerida punktipilve punktid mudeli pinnale ja optimeerida projekteeritud ja punktipilve punkti vahelisi kaugusi või vektoreid. Meetod on rakendatav kui mudel ja punktipilv asetsevad koordinaatsüsteemis lähestikku kuna nii paikneb projekteeritud punkt lähedal punktipilve punkti täpsele asukohale mudeli pinnal. Järgnevalt on täpsemalt kirjeldatud kodeeritud markeritega sidumise ülesannet (Sele 4.19). [48, 53, 54]



Sele 4.19 Punktipilve transformatsioon, kus R väljendab rotatsioone ja T translatsiooni, $a_1 - a_4$ nurgapunktide koordinaadid punktipilves ja $b_1 - b_4$ nurgapunktidele vastavad koordinaadid mudeli koordinaatsüsteemis

Punktipilve ja mudeli koordinaadistiku nurgapunktid moodustavad kaks punktihulka a_i ja b_i , kus $i = 1 \dots N$ olenevalt nurgapunktide arvust. Transformatsiooni teostamiseks kasutatakse valemit 4.5.

$$\mathbf{R} \cdot \mathbf{a}_i + \mathbf{T} = \mathbf{b}_i, \quad (4.5)$$

kus \mathbf{a} on punktipilves nurgapunktide koordinaatide maatriks ($3 \times N$),
 \mathbf{b} on mudeli koordinaadistikus nurgapunktide koordinaatide maatriks ($3 \times N$),
 \mathbf{R} on rotatsioonimaatriks (3×3),
 \mathbf{T} on translatsioonivektor (3×1).

Soovime leida rotatsiooni ja translatsiooni nii, et punktid \mathbf{a}_i kattuksid punktidega \mathbf{b}_i parimal viisil. Ülesandes parimat kattuvuse saavutamiseks minimeeritakse vähimruutude meetodi vea kriteeriumi (valem 4.6).

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^N \|\mathbf{b}_i - \mathbf{R} \cdot \mathbf{a}_i - \mathbf{T}\|^2, \quad (4.6)$$

kus ε väljendab viga nurgapunktide kattuvuses.

Parima sobivuse leidmise saab jaotada järgmisteks sammudeks:

- mõlema punktihulga keskme leidmine;
- mõlema punktihulga koordinaattelgede nihutamine keskmesse ja optimaalse rotatsioonimaatriksi leidmine;
- translatsioonivektori leidmine.

Punktihulga keskmel \mathbf{a}_{kesk} ja \mathbf{b}_{kesk} leitakse järgmise valemitega 4.7:

$$\mathbf{a}_{kesk} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{a}_i, \quad (4.7)$$

$$\mathbf{b}_{kesk} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{b}_i,$$

Rotatsioonimaatriksi leidmiseks kasutatakse *singular value decomposition* (SVD) meetodit. Meetodi kasutamiseks tuleb leida korrelatsioonimaatriks H , mis on defineeritud valemiga 4.8, ja rakendada *svd* faktoriseerimist, mis jaotab H maatriksi kolmeks maatriksiks (U , S ja V) kindlal moel. Leitud maatriksite abil on võimalik leida rotatsioonimaatriks \mathbf{R} . Arvutuskäik on kirjeldatud valemitega 4.9. [54]

$$H = (\mathbf{a}_i - \mathbf{a}_{kesk}) \cdot (\mathbf{b}_i - \mathbf{b}_{kesk})^T \quad (4.8)$$

$$[U, S, V] = svd(H) \quad (4.9)$$

$$\mathbf{R} = V \cdot U^T$$

Leitud rotatsioonimaatriksi abil saab leida translatsioonivektori järgmise arvutuse abil.

$$\begin{aligned} \mathbf{R} \cdot \mathbf{a}_{kesk} + \mathbf{T} &= \mathbf{b}_{kesk} \\ \mathbf{T} &= \mathbf{b}_{kesk} - \mathbf{R} \cdot \mathbf{a}_{kesk} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Parima sobivuse meetodit on kasutatud peatükis 6 nurgapunktide sidumisel kodeeritud markerite abil. Kasutatud meetodit saab rakendada ka punktipilve kõikide punktide põhisel sidumisel.

4.5.4 Olemasolevate LiDAR skannerite tarkvara tööriistad

Järgnevalt on toodud Surphaser LiDAR skannerite tarkvara tööriistad [13]:

- LiDAR skanneri operatsioonide kontrollimine;
- automaatne kodeeritud markerite ja markeripõhise skaneeringu tuvastus;
- skanneri riistvara enesediagnostika ja -kalibreerimine;
- reaalajas andmete edastus ja skaneeringu kvaliteedi kontroll;
- kiire eelvaate skaneerimine ja ekraanil huvipakkuvate alade valimine suure tihedusega skaneerimiseks;
- töötlemata punktipilve tööriistad;
 - punktipilve või interpoleeritud pinna tekitamine;
 - lai valik filtreid huvipakkuvate alade eraldamiseks ja ebausaldusväärsete andmete kõrvaldamiseks;
 - graafiline kasutajaliides punktipilve vaatamiseks;
 - andmete eksport standardsetes tööstuse formaatides;
- mitme ülesvõtte ühendamise võimalus.

Loetelust järeldub, et seadmete tarkvarad võimaldavad andmete analüüsi kuni punktipilve puhastamiseni. Punktipilve sidumiseks mudeliga, parima sobivuse meetodi ja pinna mõõtmiste teostamiseks on vajalik lisatarkvara. Lisatarkvaraks sobivad enamuse CAD tarkvarad näiteks Simense NX, Solidworks, Autodesk või matemaatikapaketid näiteks Matlab. Võimalus on kasutada ka vabavarasid nagu Open3D [55] punktipilve analüüsimisel.

4.6 Operaatori tagasisidestuse lahendus

Suuremõõtmeliste detailide töötlemisel kasutatakse operaatorile täpsuse tagasisidestamisel enamasti rakiseid, šabloone ja käsimõõteseadmeid. Detailile tehakse märkmeid värvi või kriiti kasutades. Peale töötlemist teostab mõõtja täpsema mõõteseadmega mõõtmised ja koostab mõõteprotokolli. Mõõteprotokolli alusel

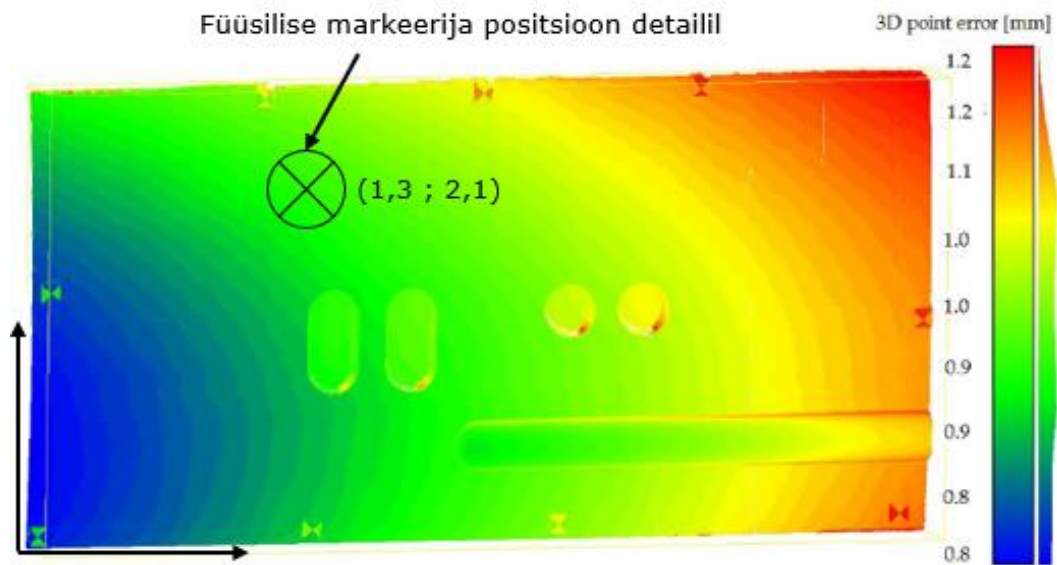
sooritab töötlemise operaator parandused. Mõõtmiste ja töötlemise vaheldumine toimub seni, kuni detail saavutab soovitud täpsuse ning seejärel vormistatakse lõplik mõõteprotokoll. Töötlemise protsessis LiDAR skanneri kasutamine võimaldab eraldi seisvad mõõtmised tööprotsessist osaks siduda. Lisaks võimaldavad tööalale integreeritud seadmed kuvada digitaalset mõõtetulemust operaatorile ülevaatlikumal moel. Järgnevalt on kirjeldatud operaatorile tagasisidestuse võimalusi:

- lahendus 1: mõõtmistulemus kuvatakse reaajas detaili video peale, töötaja näeb kriidiga märgistust videol ja detailil. Video edastamiseks on võimalik kasutada liitreaalsuse prille, monitori või tahvelarvutit;



Sele 4.20 Liitreaalsuse kasutamine koostamisel [56]

- lahendus 2: reaajas jälgitav markeerija, operaator näeb monitoril markeerija asukohta mõõdetud detaili graafilisel liidesel;



Sele 4.21 Reaalajas jälgitav markeerija detaili graafilisel liidesel [7]

- lahendus 3: pressi templi kuvamine mõõdetud detaili graafilisel liidesel, vajab detaili juhtimissüsteemi sisendit või masinnägemise süsteemi detaili positsioneerimiseks.

Integreeritud mõõtmised ja kasutajaliides võimaldavad salvestada töötlemise andmeid ehk seada mõõtetulemus vastavusse pressimise seeriaga. Suure hulga töödeldud andmete põhjal on tulevikus võimalus luua tehisnärvivõrgul põhinevaid mudeleid ja anda operaatorile soovitusi pressimise seeriade teostamiseks.

5 MÕÖTESÜSTEEMI ARENDUSPROJEKTI KONDIKAVA

Töö eelnevates peatükkides toodud kujupindade tuvastamise kontseptsioon on kirjeldatud:

- mõõtmisega seotud tööprotsessi kirjeldus,
 - mõõdetav detail,
 - tootmise seadmed,
 - asendiplaan,
- ülevaade ja võrdlustabel kaasaegsest tehnoloogiast,
- tehnilised nõuded mõõtesüsteemile,
- seadistused ja mõõtmisprotsessi kirjeldus,
- valitud mõõtesüsteemi põhjalik kirjeldus,
 - seadme mooduliteks jaotatud ehitus,
 - tööpõhimõtted,
 - ülevaade erinevatest lahendustest,
 - andmetöötluse peamised tööriistad,
 - operaatori tagasisidestuse lahendused.

Olemasoleva töö põhjal saab koostada nõuete dokumentatsiooni mõõtesüsteemi erilahenduse väljatöötamiseks. Arendusprojekti kondikava tarvis on teadmisi kogutud piisavalt, et otsustada edasine projekti suund. Siin on välja toodud kolm järgmist võimalikku suunda: oodata tehnoloogia arengut, tellida täislahendus või alustada mõõtesüsteemi projekteerimist.

Tehnoloogia arengu suund on seotud LiDAR tehnoloogia kasvava trendiga suurettevõtete maastikul. 2018 aastast Quanergy poolt pakutava toote S3-2 liikuvate osadeta LiDAR-i mõõtemääramatus on suurusjärgus 50 mm ja 2021 aastal turule toodud Intel L515 toote mõõtemääramatus on 15 mm, mõlema seadme hinnaklass on suurusjärgus 300€. Lisaks on seadmed kompaktsed ja mõeldud isesõitvatele autodele, mis on tsehi tingimustele sobiv. Täpsusnõuetele vastavad elektromehaanilised seadmed on turul olnud enam kui 10 aastat ning seadmete areng on suunatud peamiselt lisafunktsionaalsustele. Välja kujunenud on ka mõõtemääramatuse alusel hinnaklassid, alla 1 mm täpsusega seadmete hinnad on suurusjärgus 80 000€. Ilmselt lähiaastate jooksul jõuavad turule uutel tehnoloogiatel põhinevad seadmed, mis on odavamad ja elektromehaanilistele seadmetele sarnase määramatusega. [46, 47]

Täislahenduse tellimise suuna valimisel on vajalik koostada nõuete dokumentatsioon ja leida sobilik mõõtesüsteeme arendav ettevõtte töö teostamiseks.

Käesolevas töös toodud informatsioon võimaldab projekteerimise protsessis kaasa rääkida ja detailselt selgitada mõõtesüsteemile esitatavaid nõudmisi.

Mõõtesüsteemi projekteerimisel on vajalik projekt jaotada osadeks ja järk järgult arendada sobilik mõõtesüsteem. Üldine jaotus eraldiseisvate osadena on järgmine: mõõteseade, tarkvara moodul ja tagasisidestus. Mõõteseadme valiku puhul on oluline kaalutleda tehnoloogia arengu suunas toodud mõttekäiku. Tarkvara moodul ja tagasisidestuse osad ei sõltu arendamise staadiumis valitud seadmetest ja on võimalik teostada ilma seadmeid soetamata. Töö praktilise osana on toodud peatükis 6 kodeeritud markereid kasutava mõõtesüsteemi andmetöötluste probleemi matemaatiline lahendus ja projekteeritud kodeeritud markerite detailile kinnitamise alus.

6 NURGAPUNKTIDE TUVASTAMISEL PÕHINEV LAHENDUS

Peatükis on praktiline lahendus punktipilve sidumiseks mudeliga, kasutades kodeeritud markereid nurgapunktide tuvastamiseks. Alapeatükk 6.1 pakub matemaatilise lahenduse punktipilve transformatsioonile, mõõtmistulemuste visualiseerimisele ja parima siduvuse meetodi rakendamisele Matlab tarkavaras. Alapeatükis 6.2 on toodud kodeeritud markeritele projekteeritud kinnitus.

6.1 Andmetöötluse matemaatiline lahendus

Algandmed:

- punktipilve koordinaadid on *Punktid.xlsx* faili tabelis;
 - punktipilve nurgapunktide koordinaadid on teada;
 - ülesande testimiseks loodud punktipilve koordinaadid on paigutatud tasandile ja juhusliku arvu generaatori abil antud varieeruvus tasandi suhtes.
- mudeli nurgapunktide koordinaadid on teada;
- mudeli nurgapunktid on uuritaval tasapinnal;

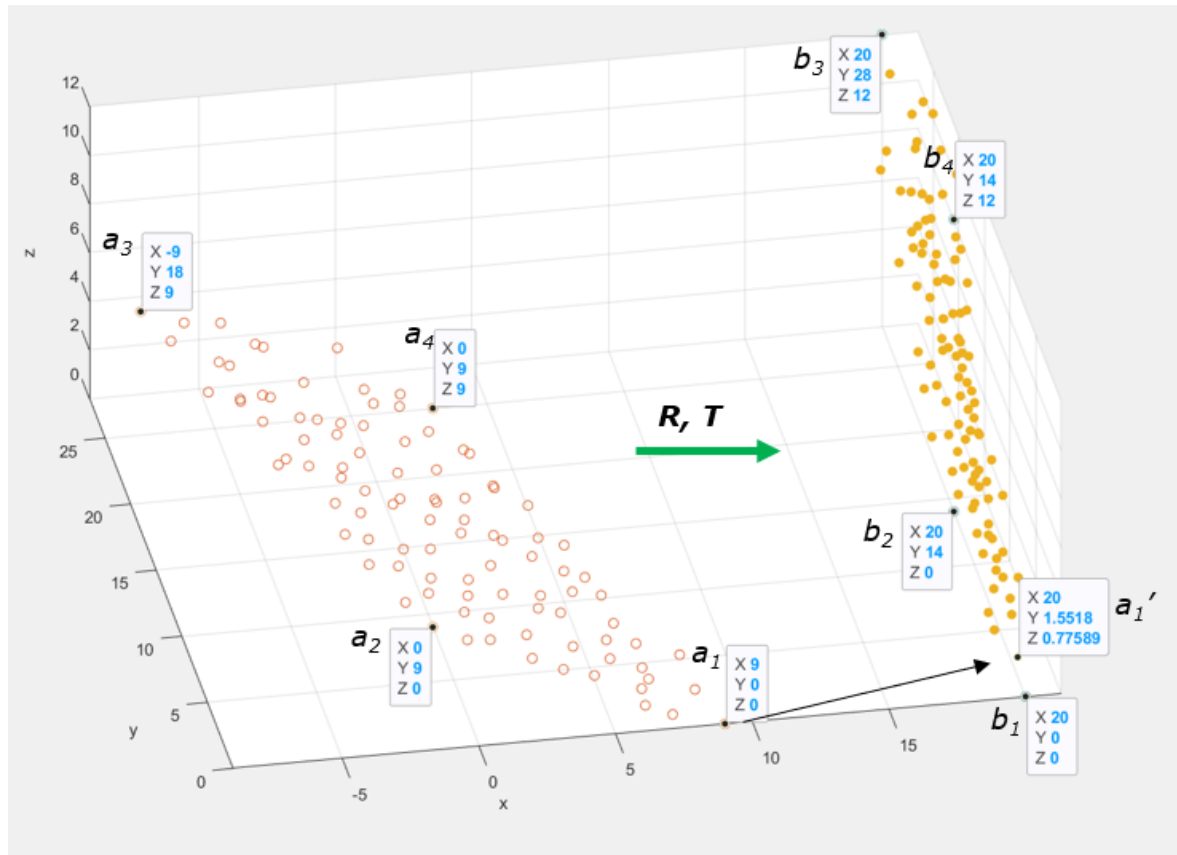
Ülesanne:

- importida punktipilve koordinaadid *Punktid.xlsx* failist;
- leida nurgapunktide parima sobivuse meetodil punktipilve rotatsiooni maatriks ja translatsiooni vektor mudeli koordinaadistikku;
- leida transformeeritud punktipilve ja mudeli nurgapunktide vaheline x , y , z koordinaatide keskmine erinevus ja standardhälve;
- leida transformeeritud punktipilve ja mudeli nurgapunktide vaheline keskmine kaugus ja standardhälve;
- transformeerida punktipilv mudeli koordinaadistikku;
- leida transformeeritud punktipilve punktide keskmine kaugus ja standardhälve mudeli tasapinnast;
- visualiseerida transformeeritud punktipilve punktide kaugus tasapinnast.

Ülesanne on lahendatud kasutades Matlab tarkvara, lahenduse kood on toodud Lisas 2 Lisa 2 ja punktipilve koordinaadid on toodud Lisas 3.

Lahendus:

Sele 6.1 illustreerib punktipilve transformatsiooni punktipilve koordinaatsüsteemist mudeli koordinaatsüsteemi. Rotatsiooni maatriks ja translatsiooni vektor on leitud parima sobivuse meetodil järgides punktis 4.5.3 toodud arvutuskäiku.



- punktipilv
- transformeeritud punktipilv

$a_1 - a_4$ punktipilve nurgapunktide koordinaadid, punktipilve koordinaatsüsteemis

$b_1 - b_4$ mudeli nurgapunktide koordinaadid, mudeli koordinaatsüsteemis

a_1' transformeeritud punktipilve nurgapunkti koordinaadid

R rotatsioonimaatriks

T translatsioonivektor

Sele 6.1 Punktipilve transformatsioon

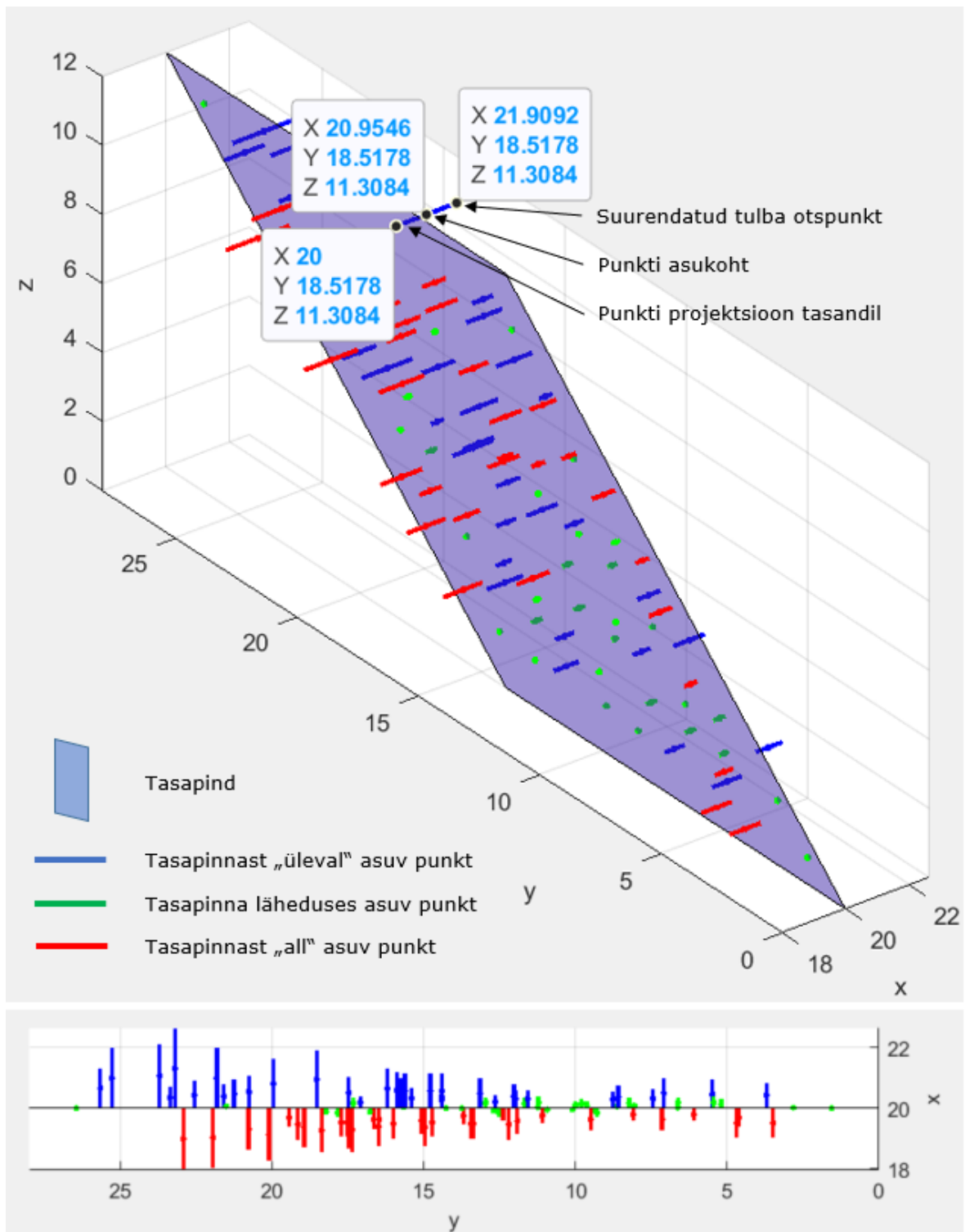
Tabel 6.1 on toodud matemaatilise lahenduse tulemused. Transformeeritud punktipilve ja mudeli nurgapunktide vaheline x, y, z koordinaatide keskmine erinevus $d_{xyz} \approx 0$ omab kontrolli võimalust parima sobivuse meetodile, kuna meetod minimeerib koordinaatide erinevusi. Nullist erinev d_{xyz} väärtus väljendab kõikine punktide ühtset translatsiooni, mis vähimruutude meetodi normaalsel rakendumisel pole võimalik. Transformeeritud punktipilve nurgapunktide sobivust väljendavad σ_{xyz} , d_{nurk} ja σ_{nurk} .

Transformeeritud punktipilve punktide keskmine kaugus mudeli tasapinnast väljendab punktipilve translatsiooni mudeli suhtes ehk punktipilv ei asetse tasapinna suhtes parimal moel. Alapeatükis 4.5 toodud mõttekäigus 3 kodeeritud markeritega sidumisel on lisatud täpsema sobivuse saavutamiseks punktipilve põhine sidumine parima sobivuse meetodil.

Tabel 6.1 Andmetöötluse tulemused, kus erinevused, kaugused ja standardhälve on antud transformeeritud punktipilve ja mudeli suhtes

Rotatsiooni maatriks	$\begin{pmatrix} 0,707 & 0,707 & 0,000 \\ -0,706 & 0,706 & -0,058 \\ -0,041 & 0,041 & 0,998 \end{pmatrix}$
Translatsiooni vektor	(13,64 7,91 1,14)
Nurgapunktide vaheline x, y, z koordinaatide keskmine erinevus d_{xyz} ja standardhälve σ_{xyz}	$d_{xyz} = -3,7 \cdot 10^{-16}$ $\sigma_{xyz} = 0,986$
Nurgapunktide vaheline keskmine kaugus d_{nurk} ja standardhälve σ_{nurk}	$d_{nurk} = 1,632$ $\sigma_{nurk} = 0,119$
Punktipilve punktide keskmine kaugus d_{pilv} ja standardhälve mudeli tasapinnast σ_{pilv}	$d_{pilv} = 0,032$ $\sigma_{pilv} = 0,472$

Transformeeritud punktipilve punktide kaugus tasapinnast on visualiseeritud tulpadena (Sele 6.2), kus punased tulbad viitavad punkti paiknemisele pinna „all“, rohelised pinna läheduses ja sinised pinna „kohal“. Tulbad on moodustatud mõõtepunkti tasandi ristprojektsiooni ja normaali suunas antud kauguse suurendusega loodud punkti vahele.



Sele 6.2 Punktipilve punktide kaugus tasapinnast: isomeetiline üleva ja tasapinnaga risti olev vaade all

6.2 Kodeeritud nurga markeri kinnituse lahendus

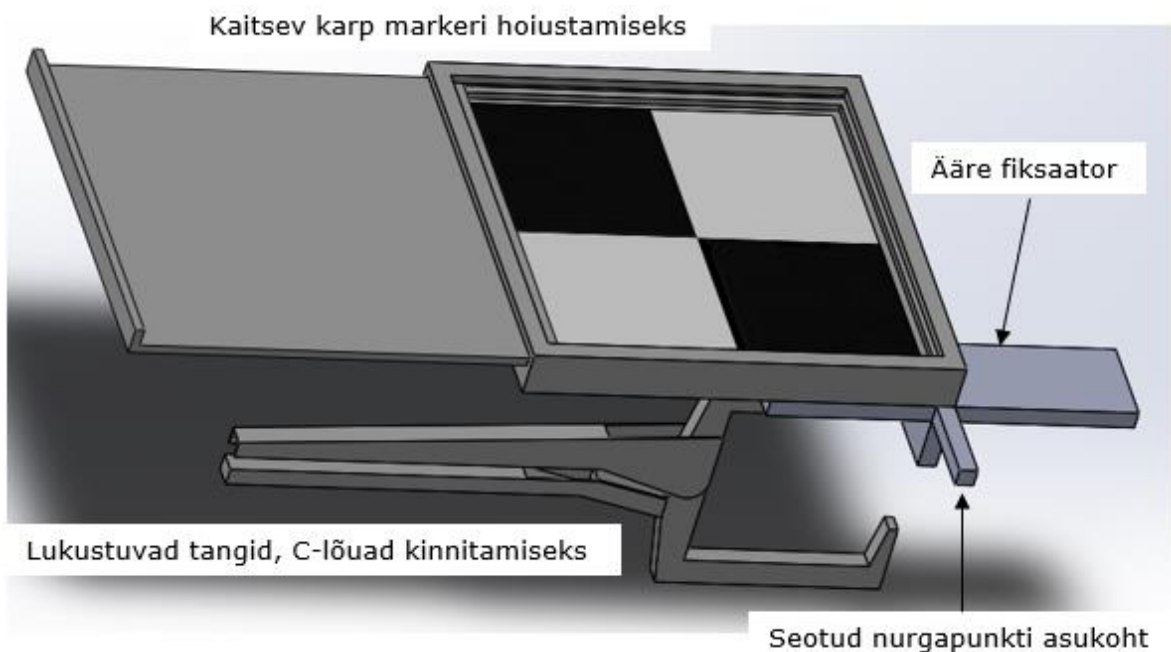
Ülesanne:

- projekteerida Sele 4.18 toodud kodeeritud nurga markeri (edaspidi marker) kinnitus;
- arvestada järgmiste nõuetega;
 - markeri suurus 20 x 20 cm;
 - marker ja kinnitus katavad detaili pinda minimaalselt;
 - marker on jäigal alusplaadil ja suunatud võimalikult risti langeva laserkiirega;
 - markeriga seotud nurgapunkt on väljaulatuv ja lihtsasti suunatav detaili nurgale;
 - marker kinnitub detailile jäigalt ning kinnitamine on lihtne ja minimaalse ajakuluga;
 - markeri hoiustamisega on arvestatud.

Lahendus:

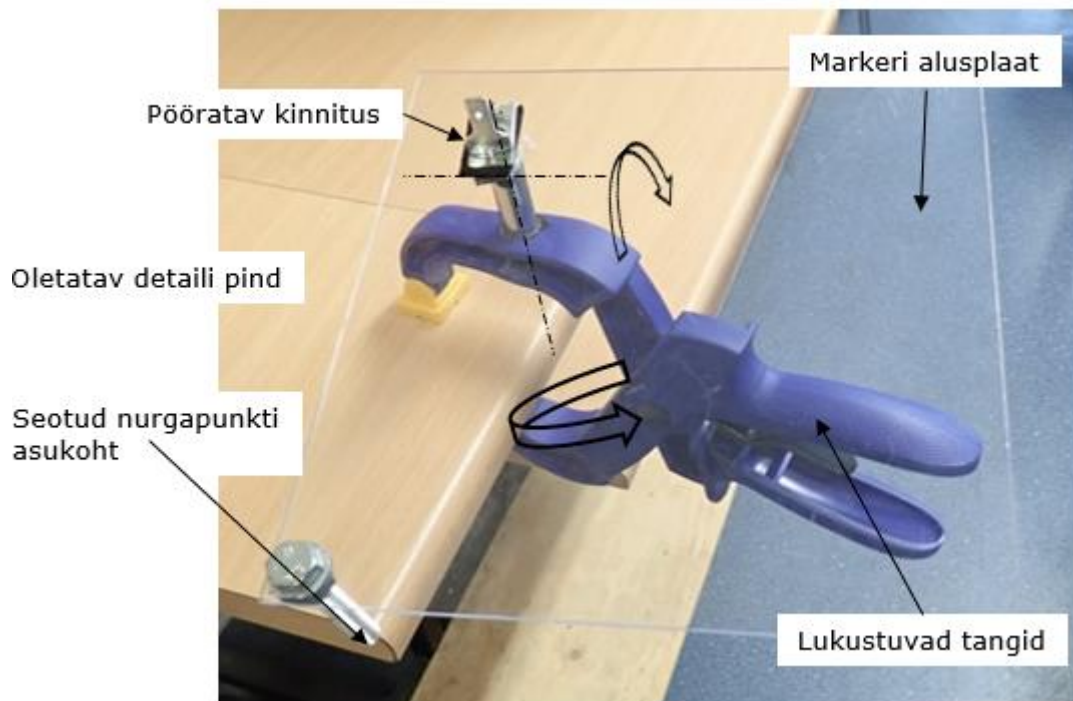
Projekteerimine läbis järgmised etapid:

- lukustuvate tangide põhise idee, modifitseeritud lõuad, eskiisi loomine (Sele 6.3);



Sele 6.3 Modifitseeritud lõuad

- lahenduse täiustamine ja prototüübi loomine. Ideele lisati liigend markeri paremaks positsioneerimiseks ja kompaktsema hoiustamise asendi saavutamiseks (Sele 6.4 ja Sele 6.5);



Sele 6.4 Prototüüp lahendus



Sele 6.5 Prototüüp lahenduse hoiustamise asend

- lahenduse vormistamine. Joonised on toodud graafilises osas.

KOKKUVÕTE

Magistritöö on oma püstitatud eesmärgid saavutanud: on uuritud erinevaid võimalikke lahendusvariante ja välja töötatud kujupindade tuvastamise kontseptsioon ning pakutud praktiline lahendus edasise arendusprojekti pindade sidumise ja visualiseerimise probleemile. Järgnevalt tulemustest detailsemalt.

Töö on jaotatud viide ossa:

- mõõtmine tööprotsessis kirjeldab Heavy Industry Estonia OÜ võimalikku kujupindade töötlemise tööprotsessi ja sellega seonduvat, mis annab selge ülevaate kuidas hakatakse mõõtesüsteemi kasutama;
- mõõtesüsteemide uuringus on toodud olemasolevate mõõtesüsteemide meetodite võrdlus ja selgitus ning valitud LiDAR meetod kujupindade tuvastamiseks;
- mõõtesüsteemi kirjeldus määrab kujupindade tuvastamise tehnoloogilise kontseptsiooni. Toodud on nõuded mõõtesüsteemile, selgitatud LiDAR skanneri tööpõhimõtet ja ehitust. Tööpõhimõte on jaotatud kauguse, baas- ja tarkvara mooduliks ning kirjeldatud iga osa võimalikke lahendusi eraldi;
- mõõtesüsteemi arendusprojekti kondikava pakub projektile edasised suunad: oodata sobivamate seadmete/meetodite arendusi; osta täislahendus; projekteerida ja arendada ise.
- praktiline lahendus on toodud arendusprojekti projekteerimise suuna LiDAR-i tarkvara mooduli punktipilve ja CAD mudeli sidumise ülesandele. Matlab tarkvaras on loodud programm nurgapunktide sidumiseks parima sobivuse meetodil, transformeeritud punktipilve võrdlemiseks tasapinnaga ja võrdluse visualiseerimiseks. Mõõtmisel nurgapunktide tuvastamiseks on Solidworks tarkvaras projekteeritud kodeeritud markeri kinnitus, joonised on toodud graafilises osas.

Kokkuvõttes on uuritud ja väljatöötatud kontseptsioon kasutatav ka üldisemalt kujupindade tuvastamiseks. Võimalikke edasisi arenguid on mitmeid: uutel tehnoloogiatel põhinevad LiDAR seadmete rakendamine, kogu tööprotsessile ühise kasutajaliidese loomine, liitreaalsuse kasutamine operaatori tagasisidestamisel, mõõtetulemuste andmetel treenitud tehisnärvivõrgu mudeli loomine töötlemise protsessi juhtimiseks.

SUMMARY

The master's thesis has achieved its set goals: various possible solutions have been studied and the concept of surface geometric inspection has been developed. In addition a practical solution to the problem of linking and visualizing the surfaces of a further development project has been offered. The following are the results in more detail.

The work is divided into five sections:

- measurement in the work process describes the possible work process of shape surface processing in Heavy Industry Estonia OÜ, which gives a clear overview of how the measurement system will be used;
- the study of measuring systems provides a comparison and explanation of the methods of existing measuring systems. LiDAR method was chosen for the detection of shaped surfaces;
- the description of the measuring system determines the technological concept for the detection of shaped surfaces. The requirements for the measuring system are presented, the working principle and construction of the LiDAR scanner are explained. The working principle is divided into distance, basic and software modules and the possible solutions for each part are described separately;
- the general plan of the measurement system development project offers further directions to the project: expect the development of more suitable equipment / methods; buy a complete solution; design and develop a suitable measuring system;
- a practical solution is given for the task of connecting the point cloud and CAD model in the design direction of the development project. In Matlab software a program has created for: linking corner points using the best fit method, comparing the transformed point cloud to a plane, and visualizing the comparison. A coded marker attachment has been designed in Solidworks software to measure the corner points during the measurement, the drawings are shown in the graphical part.

In summary, the researched and developed concept can also be used for the geometric inspection of shaped surfaces more generally. There are several possible further developments: the implementation of LiDAR devices based on new technologies, the creation of a common user interface for the entire work process, the use of augmented reality in operator feedback, the creation of an artificial neural network model to control the processing process.

KIRJANDUS

1. CVKeskus.ee, *Heavy Industry Estonia OÜ*. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.cvkeskus.ee/heavy-industry-estonia-ou-toopakumised-196809>
Kasutatud: 19.05.21.
2. Cruisemapper, *Cruise Ship Engine Power, Propulsion, Fuel*. 2015. [Online].
Loetud aadressil: <https://www.cruisemapper.com/wiki/752-cruise-ship-engine-propulsion-fuel>
Kasutatud: 19.05.21.
3. Heavy Industry Estonia OÜ, *ABB Azipod 3D-kit tootearenduse projekt*. Tallinn, 2020.
4. ABB, ABB Marine. [Online] Loetud aadressil: <https://new.abb.com/marine>
Kasutatud: 10.04.21.
5. Paul Reese, „Calibration in Regulated Industries: Federal Agency Use of ISO 17025 and ANSI Z540.3”, Conference: *NCSL International*, St. Paul MN, 2016.
Loetud aadressil:
https://www.researchgate.net/publication/305767261_Calibration_in_Regulated_Industries_Federal_Agency_Use_of_ISO_17025_and_ANSI_Z5403
Kasutatud: 10.05.21.
6. Nieland Shipbuilding Presses, *Production of a saddle shaped panel*, 2013.
[Online]. Loetud aadressil:
https://www.youtube.com/watch?v=Xuo2XwfqV0o&ab_channel=NielandShipbuildingPresses
Kasutatud: 1.04.21.
7. Ulrich Stenz, Jens Hartmann, Jens-André Paffenholz and Ingo Neumann, „High-Precision 3D Object Capturing with Static and Kinematic Terrestrial Laser Scanning in Industrial Applications—Approaches of Quality Assessment”, *Remote Sensing*, vol.12, no. 2, pp. 290, 2020, doi:
<https://doi.org/10.3390/rs12020290>
8. Fabio Remondino, Sabry El-Hakim, „Image-based 3D Modelling: A Review”, *The Photogrammetric Record*, vol.21, no. 115, pp. 269-291, 2006, doi:
<https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>
9. Celestino Ordóñez, Belén Riveiro, Pedro Arias and Julia Armesto, „Application of Close Range Photogrammetry to Deck Measurement in Recreational Ships”, *Sensors*, vol.9, no. 9, pp. 6991-7002, 2009, doi:
<https://doi.org/10.3390/s90906991>
10. MetraSCAN BLACK, *scanner*, Technical Specifications, Creaform. [Online].
Loetud aadressil: <https://www.creaform3d.com/en/optical-3d-scanner-metrascan/technical-specifications>
Kasutatud: 12.04.2021.

11. DPI-8, *Handheld Scanner*, Technical Specifications, Trimble MEP. [Online].
Loetud addressil: <https://mepsupport.trimble.com/products/scanning/dpi-8-handheld-3d-scanner> Kasutatud: 12.04.2021.
12. V-STARS N, *Measurement System*, Technical Specifications, Geodetic Systems. [Online]. Loetud addressil: <https://www.geodetic.com/products/systems/v-stars-n/> Kasutatud: 12.04.2021.
13. 100HSX, *3D Scanner*, Spec Sheet, Surphaser. [Online]. Loetud addressil: <http://www.surphaser.com/100hsx-scanner.html> Kasutatud: 12.04.2021.
14. Z+F Imager 5016, *3D Laser scanners*, Datasheet, Zoller + Fröhlich GmbH. [Online]. Loetud addressil: <https://www.zf-laser.com/Data-sheets.74.0.html?&L=1> Kasutatud: 12.04.2021.
15. AT960, *Absolute Tracker*, Technical Specifications, Hexagon MI. [Online]. Loetud addressil: <https://www.hexagonmi.com/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-at960> Kasutatud: 12.04.2021.
16. T-Scan 5, *Laser scanner*, Technical Specifications, Hexagon MI. [Online]. Loetud addressil: <https://www.hexagonmi.com/products/3d-laser-scanners/leica-tscan-5> Kasutatud: 12.04.2021.
17. CE30-D, *Solid State Array LiDAR*, Specification, Benewake. [Online]. Loetud addressil: <https://acroname.com/sites/default/files/assets/solid-state-tof-infrared-lidar-ce30-d-datasheet.pdf> Kasutatud: 12.04.2021.
18. Ivan Brusak, „Geometric inspection of 3D production parts in shipbuilding - comparison and assessment of current optical measuring methods“, [Master thesis], Hochschule Neubrandenburg University of Applied Sciences, 2018. [Online], doi: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.12809.06244>
19. Artec Ray, *High accuracy long-range laser 3D scanner*, Specification, Artec3D. [Online]. Loetud addressil: <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/laser-ray-v2> Kasutatud: 15.04.2021.
20. Artec LEO, *3D scanner*, Specification, Artec3D. [Online]. Loetud addressil: <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-leo-v2> Kasutatud: 15.04.2021.
21. LM5xx, *2D LiDAR sensors*, Technical details, Sick. [Online]. Loetud addressil: <https://www.sick.com/fi/en/detection-and-ranging-solutions/2d-lidar-sensors/lms5xx/c/g179651> Kasutatud: 15.04.2021.
22. HandySCAN 3D, *Portable 3D measurement technology*, Technical Specifications, Creaform. [Online]. Loetud addressil: <https://www.creaform3d.com/en/portable-3d-scanner-handyscan-3d/technical-specifications> Kasutatud: 15.04.2021.

23. Sol 3D, *3D scanner*, Technical Specifications, Scan Dimension. [Online].
Loetud aadressil: <https://scandimension.com/pages/technical-specifications>
Kasutatud: 15.04.2021.
24. KODA, *Leica T-Scan 5*. [Online]. Loetud aadressil:
<http://www.koda.ua/eng/products/desc.html?id=1167> Kasutatud: 1.04.21.
25. Sanna Kaasalainen, Anttoni Jaakkola, Mikko Kaasalainen, Anssi Krooks and Antero Kukko, „Analysis of Incidence Angle and Distance Effects on Terrestrial Laser Scanner Intensity: Search for Correction Methods“, *Remote Sensing*, vol.3, no. 10, pp. 2207-2221, 2011, doi: <https://doi.org/10.3390/rs3102207>
26. Kalev Julge, „Laserskaneerimine ehitiste ja looduslike pinnavormide mõõdistamisel ning tulemuste modelleerimine“, [Doktoritöö],
Inseneriteaduskond, TalTech, Tallinn, Eesti, 2018. [Online]. Loetud aadressil:
<https://digikogu.taltech.ee/et/Item/0407cf35-5af9-4323-9731-86b12b84166d>
27. Czesław Suchocki, „Comparison of Time-of-Flight and Phase-Shift TLS Intensity Data for the Diagnostics Measurements of Buildings“, *Materials*, vol.13, no. 2, pp. 353, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/ma13020353>
28. Thorsten Schulz, „Calibration of a terrestrial laser scanner for engineering geodesy“, [Doctoral thesis], ETH ZURICH, 2007. [Online], doi:
<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005368245>
29. W. Schofield, M. Breach, *Engineering Surveying*, Sixth Edition, UK: Elsevier, 2007.
30. Norbert Pfeifer, Christian Briese, „Laser scanning – principles and applications“, Conference: GeoSiberia 2007 - International Exhibition and Scientific Congress, 2007., doi: <http://dx.doi.org/10.3997/2214-4609.201403279>
31. Radartutorial, *Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar*. [Online]. Loetud aadressil:
<https://www.radartutorial.eu/02.basics/Frequency%20Modulated%20Continuous%20Wave%20Radar.en.html#:~:text=This%20includes%20frequencies%20only%20up,to%20360%20kilometers%20per%20hour>. Kasutatud: 17.04.21.
32. C10, *ScanStation*, Datasheet, Leica. [Online]. Loetud aadressil: https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica_scanstation_c10_ds.aspx?la=fr-fr Kasutatud: 15.04.2021
33. Santiago Royo, Maria Ballesta-Garcia, „An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles“, *Appl. Sci.*, vol.9, no. 19, pp. 4093, 2019, doi:
<https://doi.org/10.3390/app9194093>

34. Dingkang Wang, Connor Watkins and Huikai Xie, „MEMS Mirrors for LiDAR: A Review“, *Micromachines*, vol.11, no. 5, pp. 456, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/mi11050456>
35. Scott Davis, George Farca, Scott D. Rommel and Seth Johnson, „Liquid Crystal Waveguides: New Devices Enabled by > 1000 Waves of Optical Phase Control“, *In Proceedings of the Emerging Liquid Crystal Technologies V San Francisco, CA, USA, 23–28 January 2010; SPIE: Bellingham, WA, USA, 2010; Volume 7618, p. 76180E.*, doi: <http://dx.doi.org/10.1117/12.851788>
36. Wei Han, Joseph W Haus, Paul F. Mcmanamon, Jason Heikenfeld, „Transmissive beam steering through electrowetting microprism arrays“, *Optics Communications*, vol.283, no. 6, pp. 1174-1181, 2010, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2009.11.013>
37. Ata Akatay, Caglar Ataman, and Hakan Urey, „High-resolution beam steering using microlens arrays“, *Optics Letters*, vol.31, no. 19, pp. 2861-2863, 2006, doi: <https://doi.org/10.1364/OL.31.002861>
38. Jeffrey M. Roth; Gabriel J. Ayers; Nicholas A. Vranos; Michael A. Ciampa, „Holographic optical beamsteering demonstration“, *IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting*, Arlington, VA, USA, 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/PHO.2011.6110577>
39. T. Kim, T. Ngai, Y. Timalisina, M.R. Watts, V. Stojanovic, P. Bhargava, C.V. Poulton, J. Notaros, A. Yaacobi, E. Timurdogan, „A Single-Chip Optical Phased Array in a Wafer-Scale Silicon Photonics/CMOS 3D-Integration Platform“, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol.54, no. 11, pp. 3061-3074, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/JSSC.2019.2934601>
40. Thinal Raj, Fazida Hanim Hashim, Aqilah Baseri Huddin, Mohd Faisal Ibrahim and Aini Hussain, „A Survey on LiDAR Scanning Mechanisms“, *Electronics*, vol.9, no. 5, pp. 741, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics9050741>
41. Ievgeniia Maksymova, Philipp Greiner, Leonhard Christian Niedermueller, Norbert Druml, „Detection and Compensation of Periodic Jitters of Oscillating MEMS Mirrors used in Automotive Driving Assistance Systems“, *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, Sophia Antipolis, France, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/SAS.2019.8706008>
42. Mirrorcle Technologies, *Mirrorcle Technologies MEMS Mirrors*, 2019. [Online]. Loetud adressil: <https://www.semanticscholar.org/paper/Mirrorcle-Technologies-MEMS-Mirrors-%E2%80%93-Technical/d131a1576787ffa47fbd035881ec3780cf1a09b4> Kasutatud: 1.04.21.
43. H. Schlemmer, „Einführung in die Technologie des Laserscannings“, *14th International Conference on Engineering Surveying*, Zürich, Germany, 2004.


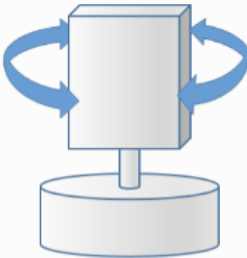
- [Online]. Loetud adressil:
http://webarchiv.ethz.ch/iv2004/programm/Tutorial3/Schlemmer_Laserscanning.pdf Kasutatud: 1.04.21.
44. Christoph Holst, „Radio Telescope Inspection by Terrestrial Laser Scanner“, *3D Metrology Conference*, 2017. [Online]. Loetud adressil:
https://www.researchgate.net/publication/322519174_Radio_Telescope_Inspection_by_Terrestrial_Laser_Scanner Kasutatud:3.04.21.
 45. Leddar Pixell, *3D LiDAR for Mobility Applications*, Spec sheet, LeddarTech, 2020. [Online]. Loetud adressil: <https://leddartech.com/solutions/leddar-pixell/> Kasutatud: 15.04.2021.
 46. L515, *LiDAR Camera*, Datasheet, Intel RealSense, 2020. [Online]. Loetud adressil: <https://www.intelrealsense.com/lidar-camera-l515/> Kasutatud: 15.04.2021.
 47. S3-2, *Solid state lidar sensor*, Datasheet, Quanergy, 2018. [Online]. Loetud adressil: <https://sitekcaspien.com/static/documents/S3-2NSI-H60%20DataSheet.pdf> Kasutatud: 15.04.2021.
 48. Jia Pengcheng, „Fitting a Parametric Model to a Cloud of Points Via Optimization Methods“, [Doktoridissertatsioon], Mechanical and Aerospace Engineering, Syracuse University, 2017. [Online]. Loetud adressil:
<https://surface.syr.edu/etd/673>
 49. Jannik Janßen, Tomislav Medic, Heiner Kuhlmann and Christoph Holst, „Decreasing the Uncertainty of the Target Center Estimation at Terrestrial Laser Scanning by Choosing the Best Algorithm and by Improving the Target Design“, *Remote Sens.*, vol. 11, no. 7, pp. 845, 2019, doi:
<https://doi.org/10.3390/rs11070845>
 50. C. Fernandez, A. Singhanian, J. Caceres, K.C. Slatton, M Starek, R.Kumar, „An Overview of Lidar Point Cloud Processing Software“, *GEM Center Report*, University of Florida, 2007. [Online]. Loetud adressil:
https://www.researchgate.net/publication/229037800_An_overview_of_lidar_point_cloud_processing_software Kasutatud: 15.04.2021.
 51. Eggert, D., Lorusso, A. and Fisher, R., „Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms“, *Machine Vision and Applications*, vol. 9, pp. 272–290, 1997, doi:
<https://doi.org/10.1007/s001380050048>
 52. J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-8, no. 6, pp. 679-698, Nov. 1986, doi: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851>

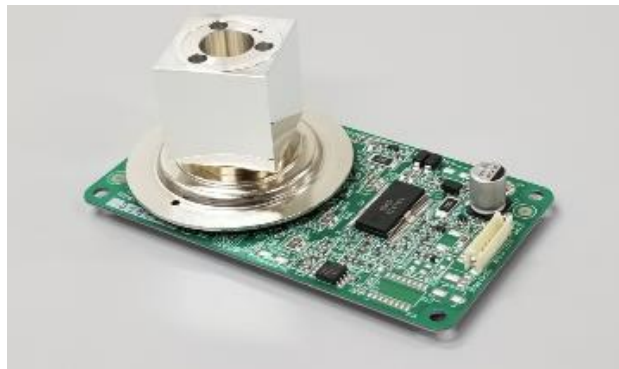
53. Nghia Ho, *Finding optimal rotation and translation between corresponding 3d points*, 2011. [Online]. Loetud adressil: http://nghiaho.com/?page_id=671
Kasutatud: 15.04.2021.
54. Eggert, D., Lorusso, A. & Fisher, R., „Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms“ . *Machine Vision and Applications* vol. 9, pp. 272–290, 1997, doi:
<https://doi.org/10.1007/s001380050048>
55. Qian-Yi Zhou, Jaesik Park, Vladlen Koltun, „Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing“, *Intel Labs*, 2018, [Online]. Loetud adressil:
<https://arxiv.org/abs/1801.09847> Kasutatud: 15.04.2021.
56. BMW Group, *Absolutely real: Virtual and augmented reality open new avenues in the BMW Group Production System*, 2019. [Online]. Loetud adressil:
<https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0294345EN/absolutely-real:-virtual-and-augmented-reality-open-new-avenues-in-the-bmw-group-production-system?language=en> Kasutatud: 19.04.2021.
57. Nidec Copal Electronics, inc., *Polygon vs. Galvanometer*. [Online]. Loetud adressil: https://www.nidec-copal-electronics.com/us/featuring/lidar-polygon/vs_galvo/# Kasutatud: 19.04.2021.
58. Thorlabs, *Off-Axis Parabolic Mirrors With Through Holes, Protected Silver*, [Online]. Loetud adressil:
https://www.thorlabs.de/NewGroupPage9_PF.cfm?ObjectGroup_ID=7197
Kasutatud: 19.04.2021.

LISAD

Lisa 1 Peeglid

Lisas 1 on toodud teavet baasmooduli opto- ja elektromehaanilistes süsteemides kasutatavate peeglite kohta.

POLYGON	GALVO
	
<p>Polygon scanners can operate at various speeds, ranging from a few hundred RPMs up to 50K RPM while still maintaining high speed stability. This allows LIDAR units equipped with polygons to capture high resolution images at a wide FOV (Field of View) even for long distance measurements.</p>	<p>Galvanometers have a non-linear scan rate which means that the scan speed is fastest at the center and slowest at the corners. This produces a low resolution image directly ahead of the vehicle and high resolution images as you approach the corners.</p>
Good	Bad



Sele 0.1 Üleval on ettevõtte Nidec Copal Electronics peeglite võrdlus ja all on hulknurk peeglil põhinev toode [57]



Sele 0.2 Ettevõtte Thorlabs poolt pakutav teljeväline parabolpeegel [58]

Fail 1: Pilve_kaugus_pinnast.m

```

%Teadaolevate punktide parima sobivuse meetod ja punktipilve transformatsioon
clear all %vabastab mälu ja puhastab töölauda

%Punktipilve punktid
T=readtable('Punktid.xlsx'); %Andmete lugemine xyz koordinaadid
Pilv=[T{:,1} T{:,2} T{:,3}]';

A=[Pilv(1,1:4); Pilv(2,1:4); Pilv(3,1:4)] %Punktipilve nurgapunktide koordinaadid,
%Pilv(1,1:4) Pilve maatriksist 3xN 1-4
%elementid
B=[20 20 20 20; 0 14 28 14; 0 0 12 12] %Mudeli nurgapunktide koordinaadid

%Mudeli pinna parameetrid
P21=[B(:,2)-B(:,1)]; %Punkte ühendav vektor
P41=[B(:,4)-B(:,1)];
n=cross(P21,P41)/norm(cross(P21,P41)); %Kahe pinnal oleva vektori vektorkorrutis
%ja normaliseerimine
P1=[B(:,1)]; %Pinna punkt P1

[B_num_rows, B_num_cols] = size(B); %B maatriksi ridade ja veergude arv

%Keskmete leidmine
kesk_A=mean(A,2); %Leiab iga rea keskmise
kesk_B=mean(B,2);

%Translatsioon keskmesse
repmat(kesk_A, 1, B_num_cols);
A_k = A - repmat(kesk_A, 1, B_num_cols); %Lahutab maatriksi A punktidest keskmel
B_k = B - repmat(kesk_B, 1, B_num_cols);

%Rotatsioonimaatriksi leidmine
H = A_k * B_k'; %Korrelatsioonimaatriksi H leidmine
[U,S,V] = svd(H); %svd- Singular value decomposition.
R = V*U'

%Translatsiooni vektori leidmine
t = -R*kesk_A + kesk_B

%Nurgapunktide transformatsioon
A_t=R*A+t;

%Nurgapunktide xyz koordinaadi standardhälve
xyz=B-A_t; %Transformeeritud ja mudeli nurgapunktide
%koordinaatide erinevused
nurk_xyz_kesk=mean(xyz,'all') %koordinaatide erinevuste keskmine väärtus
sigma_nurk_xyz=std2(xyz) %nurk_xyz_kesk standardhälve

%Nurgapunktide vaheliste kauguste standardhälve
D=sqrt(sum(xyz.^2));
nurk_D_kesk=mean(D)
sigma_nurk_D=std2(D)

```

```

%Punktipilve punktide transfotrmatsioon
pilv_t=R*pilv+t;

%Punktipilve punktide kaugus tasandist
[pilv_t_ridu, s] = size(pilv_t);      %Punktipilve ridade ja veergude arv

for i = 1:s
    vek=pilv_t(:,i)-P1;                %Pinna punkti P1 ja pilve punkti vahelise vektori leidmine
    d3(i)=dot(vek,n);                 %Normaali ja sihivektori skalaarkorrutis,
end                                    %punkti kauguse tasandist leidmiseks

pilv_d3_kesk=mean(d3)                 %Punktipilve punktide keskmine kaugus tasapinnast
sigma_pilv=std2(d3)                   %Standardhälve d3-le

%Parima sobivuse ja transformatsiooni visualiseerimine
scatter3(B(1,:),B(2,:),B(3,:))        %Mudeli nurgapunktid
hold on
scatter3(pilv(1,:),pilv(2,:),pilv(3,:)) %Algne punktipilv
scatter3(pilv_t(1,:),pilv_t(2,:),pilv_t(3,:), 'filled') %Transformeeritud punktipilv
xlabel('x'), ylabel('y'),zlabel('z'), axis equal
hold off

```

```

A =
    9     0    -9     0
    0     9    18     9
    0     0     9     9

B =
    20    20    20    20
     0    14    28    14
     0     0    12    12

R =
    0.7071    0.7071   -0.0000
   -0.7059    0.7059   -0.0575
   -0.0406    0.0406    0.9983

t =
    13.6360
     7.9052
     1.1417

nurk_xyz_kesk = -3.7007e-16

sigma_nurk_xyz =    0.9862

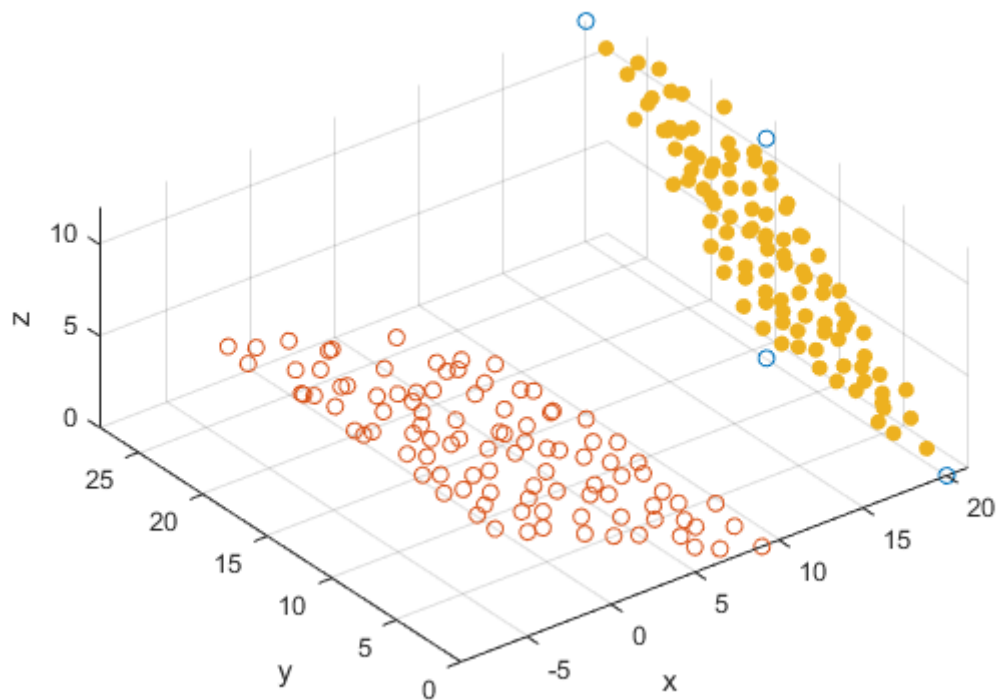
nurk_D_kesk =    1.6322

sigma_nurk_D =    0.1186

pilv_d3_kesk =    0.0318

sigma_pilv =    0.4717

```



Published with MATLAB® R2019a

Fail 2: Visualiseerimine.m

```
%Punktipilve punktide pinna suhtes paiknemise visualiseerimine
%Põhineb Pilve_kaugus_pinnast.m andmetel ja eraldiseisvalt ei toimi

x=Pilv_t(1,:);      %Transformeeritud punktipilve koordinaadid
y=Pilv_t(2,:);
z=Pilv_t(3,:);

%Punktidele värvi lisamise maatriks (igale punktile RGB rida)
for i = 1:s
    if d3(i)>0.2      %Võrdlus kaugusega pinnast
        c(i,:)= [0 0 1]; %Sinine
    elseif d3(i)<-0.2
        c(i,:)= [1 0 0]; %Punane
    else
        c(i,:)= [0 1 0]; %Roheline
    end
end

scatter3(x, y, z, 10, c, 'filled') %Punktipilve graafiline esitus
hold on

%Nurgapunktidest tasapinna moodustamine
X_p=[B(1,1) B(1,3)      %Tasapinna punktid
```

```

    B(1,2) B(1,4)];
Y_p=[B(2,1) B(2,2)
    B(2,4) B(2,3)];
Z_p=[B(3,1) B(3,3)
    B(3,2) B(3,4)];

surf(X_p,Y_p,Z_p,'FaceAlpha',0.5) %Pinna visualiseerimine

xlabel('x'), ylabel('y'),zlabel('z')
axis equal

%Kujutusjoonte tekitamine
SCALE_k=1 %Suurendus tegur
for i = 1:s
    PROJ(:,i)=PiIv_t(:,i)-d3(i)*n; %Pinnale projekteeritud punktide
    koordinaadid
    SCALE(:,i)=PiIv_t(:,i)+SCALE_k*d3(i)*n; %Suurendatud kujutusjoone otspunkti
    koordinaat
end

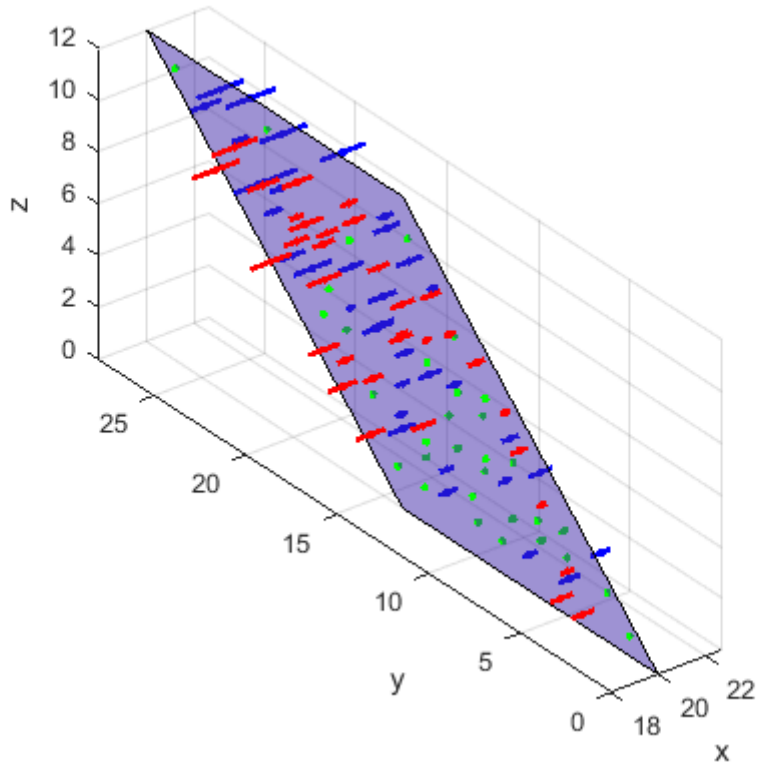
%Projekteeritud ja kujutusjoone otspunkti koordinaadid
x1=PROJ(1,:);
y1=PROJ(2,:);
z1=PROJ(3,:);
x2=SCALE(1,:);
y2=SCALE(2,:);
z2=SCALE(3,:);

%Kujutusjoone visualiseerimine
for i = 1:s
    x3=[x2(i) x1(i)];
    y3=[y2(i) y1(i)];
    z3=[z2(i) z1(i)];
    if d3(i)>0.2 %Võrdlus kaugusega pinnast
        plot3(x3,y3,z3,'color','blue','Linewidth',2) %Sinise kujutusjoone
        visualiseerimine
    elseif d3(i)<-0.2 %Punase kujutusjoone
        plot3(x3,y3,z3,'color','red','Linewidth',2)
        visualiseerimine
    else %Roheline kujutusjoone
        plot3(x3,y3,z3,'color','green','Linewidth',2)
        visualiseerimine
    end
end

hold off

```

SCALE_k = 1



Published with MATLAB® R2019a

Lisa 3 Punktiple koordinaadid

Tabel 0.1 Punktiple koordinaadid Punktid.xlsx failis

x	y	z
9	0	0
0	9	0
-9	18	9
0	9	9
1,05	7,84	0
1,86	7,7	0
3,09	6,06	0
4,04	5,05	0
5,05	4,4	0
6,54	3,12	0
6,44	1,88	0
7,28	1,03	0
-0,98	9,1	1,06
0	9,81	0,95
1,01	8,24	0,93
1,8	7,63	0,94
2,88	6,06	0,99
4,36	4,9	0,99
5,5	3,76	0,99
6,48	2,73	1,08
6,58	2	1
8,08	0,95	0,99
-2,1	10,23	2,12
-1,05	10,1	2,02
0	9,36	1,82
1,05	7,76	1,86
2,2	7,07	2,18
3,27	5,88	2,14
4	5,4	2,14
5,35	3,68	1,82
6,3	2,97	1,96
7,7	1,9	1,94
-2,85	10,92	3,06
-2,06	10,56	2,97
-1	9,4	3,09
0	9,45	2,97
0,98	7,28	2,79
1,82	7,42	3,21
3,3	5,58	2,82

x	y	z
4,32	4,8	3,3
5,3	4,4	3,27
5,52	3,18	2,76
-3,64	13,78	4,4
-3,03	11,88	3,84
-2,18	11,44	3,6
-1,08	11	4,08
0	9,54	4,12
0,98	8,72	3,92
1,94	7,49	4,4
3,09	6,12	4,16
4,12	5,4	3,84
4,6	3,88	4,36
-4,95	12,74	5,15
-4,4	14,17	4,55
-2,85	11,64	5
-2,04	11,33	4,55
-0,9	10,6	4,5
0	8,64	5,45
0,95	7,92	4,9
2,14	6,79	4,55
3,21	5,58	5,2
4	4,7	5,3
-5,64	16,5	5,88
-5,15	14,7	5,88
-4,08	12,35	6,3
-2,94	10,92	5,82
-2,14	11,88	5,82
-0,95	10,8	5,46
0	8,28	5,52
0,94	7,76	5,88
1,9	7,14	6,54
2,85	5,64	6,54
-7,14	14,72	7,28
-5,82	15,45	6,37
-4,9	14,56	6,93
-4,16	12,74	7
-3,06	11,4	6,93
-2,16	11	7,42
-0,96	9,3	7,56
0	8,28	6,86
0,99	8,32	7,56
1,8	6,86	6,79

x	y	z
-7,92	17,85	7,76
-6,51	16	7,76
-6,48	14,1	8,64
-5,4	13,44	7,68
-3,72	11,7	7,44
-2,94	11,28	7,44
-1,94	10,23	8,72
-0,9	10,7	8,24
0	9,81	7,6
1,04	7,36	7,92
-7,44	17,85	8,46
-6,3	16,8	8,91
-5,46	14,55	9,18
-5	15,4	8,55
-4,12	12,22	8,73
-2,73	13,08	9,54
-2,2	10,67	9,09
-0,93	10,4	8,91

GRAAFILINE OSA