



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**REAALAJAS MASINNÄGEMISEL TOIMIVA
TAGASISIDEGA 3D PRINTERI JUHTIMINE
TÖÖKINDLUSE JA KVALITEEDI PARANDAMISEKS**

**REAL-TIME
MACHINE VISION FEEDBACK CONTROL FOR
ENHANCED RELIABILITY AND QUALITY IN 3D
PRINTING**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Theodor Paal Pölluste

Üliõpilaskood: 193665EAAB

Juhendaja: Viktor Rjabtšikov, nooremteadur

Tallinn 2023

(Tiitellehe pöördel)

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.

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20.....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Theodor Paal Põlluste,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Reaalajas masinnägemisel toimiva tagasisidega 3D printeri juhtimine töökindluse ja kvaliteedi parandamiseks mille juhendaja on Viktor Rjabtšikov,

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.

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

2. 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 loomingulise 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.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Theodor Paal Põlluste

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö/Magistritöö

Töö pealkiri: Reaalajas masinnägemisel toimiva tagasisidega 3d printeri juhtimine töökindluse ja kvaliteedi parandamiseks

Kuupäev:
18.05.2023

47 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Nooremteadur Viktor Rjabtšikov

Sisu kirjeldus:

Töö eesmärk on välja arendada visuaalse tagasisidega tagasisideahel FDM 3D printerite jaoks.

Teoreetilises osas antakse üldine ülevaade 3D printimise tehnoloogiast ning keskendutakse FFF/FDM tehnoloogiale. Tuuakse välja FDM tehnoloogial toimivate printerite valukohad ning parameetrid või nähtused, mis neid probleeme tekitavad. Arvutuste ja modelleerimise osas seletatakse ära, kuidas autor plaanis visuaalse tagasisidega tagasisideahelat kasutada ning selgitas valemitega sellise süsteemi tööpõhimõtet. Praktilises osas valmistati klamber, mille abil fikseeriti kaamera moodulid printeripea külge. Valmistati masinnägemise algoritmi, mida kasutati kahes katses. Esimeses katses katsetati loodud algoritmi stabiilsust ja mõõtmise täpsust.

Märksõnad: 3D printer, 3D printimine, kihtlisandustehnoloogia, masinnägemine, kvaliteet, töökindlus, *Solidworks*, modelleerimine, tagasiside.

ABSTRACT

<i>Author:</i> Theodor Paal Põlluste	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Real-time machine vision feedback control for enhanced reliability and quality in 3D printing	
<i>Date:</i> 18.05.2023	47 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Junior researcher Viktor Rjabtšikov	
<i>Abstract:</i> <p>The main objective of this work is to develop a visual feedback-based feedback loop for FDM 3D printers.</p> <p>In the theoretical part, a general overview of 3D printing technology is provided, with a focus on FFF/FDM technology. The weaknesses of FDM-based printers are highlighted, along with the parameters or phenomena that cause these issues. Regarding calculations and modeling, the author explains how they planned to use a feedback loop with visual feedback and describes the principles of operation of such a system using formulas. In the practical part, a clamp was fabricated to secure camera modules to the printer head. A computer vision algorithm was developed and tested in two experiments. The first experiment aimed to assess the stability and measurement accuracy of the created algorithm.</p>	
<i>Keywords:</i> 3D printer, 3D printing, additive manufacturing, machine vision, quality, reliability, Solidworks, CAD, feedback controll system.	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Reaalajas masinnägemisel toimiva tagasisidega 3D printeri juhtimine töökindluse ja kvaliteedi parandamiseks**

Lõputöö teema inglise keeles: **Real-time machine vision feedback control for enhanced reliability and quality in 3D printing**

Üliõpilane: **Theodor Paal Põlluste 193665EAAB**

Eriala: **Mehhatroonika (EAAB)**

Lõputöö liik: **bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **Viktor Rjabtšikov, nooremteadur**

Lõputöö kaasjuhendaja:
(ettevõtte, amet ja kontakt)

Lõputöö ülesande
kehtivusaeg: **Veebruar 2023**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2023**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

3D printimine ehk kihtlisandustehnoloogia on kogunud hoogu aastaid ning vaikselt hakkab see tehnoloogia jõudma tasemele, kus tavainimene saab seda tehnoloogiat kasutada. Peamine valukoht praegustel FDM ehk Fused Deposition Modelling 3D printeritel on töökindlus, mis on ka üks peamistest hinna määrajatest ning skeptilise seisukoha põhjustajatest. 3D printerite töökindluse probleemid tulenevad sellest, et väga paljud erinevad parameetrid peavad olema väga kitsastes vahemikes, et protsess toimiks. Parameetrite sisse timmimine võib olla tülikas töö, aga seda kõike on võimalik automatiseerida tagasisideahelatega.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärk on välja arendada visuaalse tagasisidega tagasisideahel FDM 3D printerite jaoks.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Mis on 3D printer?

Mis on visuaalne tagasisideahel?

Mis on peamised parameetrid, mis mõjutavad 3D printeri töökindlust?

Kas visuaalse tagasisidega tagasisideahel parandaks 3D printeri töökindlust?

4. Lähteandmed

Lähteandmed leiab autor andmelehtedelt, uurimistöödelt, teadusartiklitest ja internetis leiduvatest materjalidest.

5. Uurimismeetodid

Teadusmaterjalide läbitöötamine.

Modelleerida tagasisideahel.

Modelleerida ja valmistada visuaalse tagasiside jaoks vajalikud mehhanismid.

Katsed.

Andmete analüüs Excelis.

6. Graafiline osa

Töö sisaldab skeeme, graafikuid ja tabelleid. Graafiline osa leidub töö põhiosas kui ka lisades.

7. Töö struktuur

1. Teoreetiline osa
 - a. Sissejuhatus teemasse
 - b. FDM 3D printeri tööpõhimõte
 - c. Visuaalse tagasiside tööpõhimõte
2. Arvutused ja modelleerimine
 - a. Arvutuslik mudel
 - b. Geomeetiline mudel
 - c. Juhtimissüsteem
3. Praktiline osa
 - a. Katse mudeli arendamine
 - b. Katsetulemused
 - c. Katsetulemuste analüüs

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Internetis saadaolevad teadusartiklid ja raamatukogus olev teemakohane kirjandus.

9. Lõputöö konsultandid

10. Töö etapid ja ajakava

Nr.	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1	Kirjanduse läbitöötamine	31.12.2022
2	Teoreetilise osa kirjutamine	10.02.2023
3	Modelleerimise teostamine	28.02.2023
4	Maketi valmistamine	14.03.2023
5	Katsete teostamine	01.04.2023
6	Tulemuste ja järelduste kirjutamine	20.04.2023
7	Lõputöö vormistamine	04.05.2023
8	Juhendajale lõpliku lõputöö versiooni saatmine	04.05.2023

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	10
Lühendite ja tähiste loetelu	11
SISSEJUHATUS	12
1. 3D PRINTIMISE TEHNOLOOGIA	14
1.1 3D printimine ehk kihtlisandustehnoloogia	14
1.2 FFF/FDM tehnoloogia.....	16
1.3 FDM protsessi valukohad	18
2. VISUAALNE TAGASISIDE	20
2.1 Masinnägemine	20
2.2 Tagasisideahel.....	21
2.3 Juhtsüsteemid FDM 3D printerites.....	23
2.4 Visuaalse tagasisidega tagasisideahel FDM 3D printerile	24
3. ARVUTUSED JA MODELLEERIMINE	27
3.1 Tagasisideahela tööpõhimõte	27
3.2 Kaamera valik	29
3.3 Mudeli valmistamine	29
3.4 Tagasisideahela ülesehitus.....	31
4. Praktiline osa	33
4.1 Klambri valmistamine.....	33
4.2 Masinnägemise algoritmi valmistamine.....	34
4.3 Katsed.....	36
4.3.1 Masinnägemise algoritmi stabiilsuse katse	36
4.3.2 Tagasisideahela testimine.....	37
5.1 Analüüs	39
5.1.1 Kaamerate süsteem.....	39
5.1.2 Algoritmi optimeerimine	39
5.1.3 Visuaalse tagasisidega tagasisideahela väärtus	40
KOKKUVÕTE	41
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	42
LISAD	45
LISA 1.....	46
LISA 2.....	47

EESSÕNA

Lõputöö autor soovib avaldada tänu oma juhendajale Viktor Rjabtšikovile, kes aitas antud teema leidmisega ning oli suureks abiks lõputöö valmimise protsessis. Samuti soovib autor avaldada tänu perele ning sõpradele, kes motiveerisid ning toetasid autorit.

Lühendite ja tähiste loetelu

3D – Kolmemõõtmeline

CAD – Raalprojekteerimine (ingl k *Computer-aided design*)

FFF – Niidi sulatamisel valmistamine(ingl k *Fused Filament Fabrication*)

FDM – Sulatatud sadestumise vormimine (ingl k *fused deposition modelling*)

DLP – 3D printimise tehnoloogia (ingl k *Digital Light Processing*)

SLA - Stereolitograafia

ISO – Rahvusvaheline Standardiorganisatsioon (ingl k *International Organization for Standardization*)

ASTM – Ameerika Testimise ja Materjalide Ühing (ingl k *American Society for Testing and Materials*)

STL – Faili formaat

USB – Universaalne jadasiin (ingl k *Universal Serial Bus*)

PVA – Polüvinüülalkohol

ABS – Akrüülnitriilbutadienüstüreen

PID – Proportsionaal-integraal-diferentsiaal

PETG – Polüetüleentereftalaat-glükool

PLA – Polüpiimhape polümeer

SISSEJUHATUS

Viimasel aastakümnel on väga populaarseks muutunud termin „3D printimine“. Tehnoloogia, millel 3D printimine põhineb, ei ole tegelikult uus. Üks esimestest 3D printeritest ehitati kaheksakümnendate alguses. Teadlikus sellest tehnoloogiast oli madal ja info liikumist massideni piirasid erinevad patendid ning seadmete kõrged hinnad. Nullindate keskpaigas valmisid esimesed projektid, kus toodeti 3D printeriga detaile uute 3D printerite jaoks. Need projektid olid avatud lähtekoodiga (edasid *open-source*), mis võimaldas huvilistel tehtud tööd kopeerida ja arendada. Nendest projektidest sai alguses tõsine arengulaine, mis tõi selle tehnoloogia ka massideni. Tänapäeval on see üks perspektiivikamatest tehnoloogiatest, kus iga aastaga viiakse 3D printerid uuele tasemele kvaliteedis, kiiruses ja töökindluses. Kõige suuremad arengud on toimunud just *open-source* projektides, mida firmad pärast oma toodetes ära kasutavad.

Viimastel aastatel on 3D printimises uuritud palju kõrgtehnoloogiliste lahenduste kasutamist. Näiteks masinõppe kasutust mudelite töötlemises ja seadme ajamite juhtimises. On leitud viise, kuidas ennustada detailide tugevus- ja kulumiskarakteristike ning lahendusi nende automaatseks parandamiseks. On loodud algoritme, mis võrdlevad reaalarajas reaalselt mudelit ning arvuti simuleeritud mudelit, et vähendada praagile kuluvat materjali. Paljud neist lahendustest pole aga massideni jõudnud. Üheks põhjuseks võib olla lahenduste liigne spetsiifilisus või komplekssus.

Hetkel kasutatakse müügil olevates 3D printerites erinevaid andureid ja lahendusi, et tagada võimalikult hea töökindlus. Tihti saavutatakse töökindlus mitmete erinevate andurite koostöös. Peamiselt kasutatakse sonde, et tagada düüsi korrektne kaugus aluspinnast. Filamendi (edaspidi niidi) tuvastamisandureid, et tagada materjali olemasolu. Üldiselt kasutuses olevad 3D printerid on rumalad. See tähendab, et masin ei oska tuvastada, kui detaili või masina endaga midagi printimise ajal juhtub. Tihti on paljud neist probleemidest tuvastatavad ka silmaga. Näiteks, kui detail on aluspinnalt lahti tulnud või kui prinditud kihid omavahel ei ühendu, sest sulatuskamber on ummistunud. Lisades printeri süsteemi kaamerad, oleks õige tarkvaralahendusega võimalik masinal neid vigu ise tuvastada.

Antud bakalaureusetöö eesmärk on parandada müügil olevate 3D printerite töökindlust kasutades masinnägemist. Kõrval-eesmärgiks on *open-source* projektile aluse panemine, et huvilised saaksid kasutada ja arendada selles töös tehtud lahendusi. Parandades massides kasutuses olevate 3D printerite töökindlust, vähendaks see

praakdetailide hulka ja ühtlustaks printimise kvaliteeti. Töökindluse paranemine julgustaks inimesi 3D printimist tootmistehnoloogiana kasutama, mis omakorda kõrgendaks teadlikkust selle tehnoloogia osas.

Käesoleva lõputöö teooriaosa annab ülevaate 3D printimise tehnoloogiast, selgitab lähemalt FDM tootmistehnoloogiat ja visuaalse tagasisideahela tööpõhimõtet. Praktiline osa sisaldab katse mudeli valmistamise protsessi, tagasisideahela valmistamist ja katsete analüüsi.

1. 3D PRINTIMISE TEHNOLOOGIA

1.1 3D printimine ehk kihtlisandustehnoloogia

Kihtlisandustehnoloogiaga seotud sõnavara standard ISO/ASTM 52900:2021 defineerib 3D printeri definitsiooni järgmiselt: 3D printer on masin, mida kasutatakse 3D printimiseks. 3D printimine on objekti valmistamine kasutades materjali ladustamist prindipea, düüsi või muu printimistehnoloogia abil. [6]

Täpsemalt öeldes kihtlisandustehnoloogia töötab õhukeste materjalikihtide omavahel liitmisel, kus iga kiht on toodetava detaili CAD-mudelst tuletatud ristlõige. Iga kiht peab olema kindla paksusega, mis tähendab, et toodetud detail on kõigest üldistus algsest mudelist. Detaili vastavust mudelile on võimalik parandada vähendades kihi paksust. Kõik hetkel müügil olevad kihtlisandustehnoloogial põhinevad masinad toimivad samal põhimõttel. Masinad erinevad ainult kasutava materjali, kihi tekitamise ja kihtide liitmise tehnoloogia osas. Nendest erinevustest sõltuvad peamiselt detaili täpsus, materjali omadused ja mehaanilised omadused. Samuti mõjutavad need erinevused järgmisi tegureid: tootmiskiirus, järeltötluse vajadus, masina mõõtmed, masina hind. [1]

3D printimine on hetkel parim kasutusel olev tootmistehnoloogia, et toota väikeses koguses toodangut või kompleksse disainiga detaile. Samuti on 3D printimine äärmiselt kasulik tootmises, kus toimuvad sagedased disainimuudatused. Läbi aastate on see tehnoloogia arenenud ja 3D printerid on muutunud kasulikumaks tulenevalt nende odavamaks muutumisest. Seadmete hinna langus on toonud endaga suure nõudluse ja huviliste hulga. Oma uudse lähenemise tõttu on see tehnoloogia kiirelt kasutust leidnud järgmistest valdkondades: inseneeria, ehitus, meditsiin, militaartööstus, lennundus, mood, arhitektuur, arvutitööstus. [2]

Algselt kasutati 3D printimise asemel terminit kiirendatud prototüüpimine. Kihtlisandustehnoloogia sobis ideaalselt prototüüpimiseks, kiirendades uudsete lahenduste ja toodete turule jõudmist. 3D printimine võimaldas väga kiirelt liikuda toote prototüübi faasist valmis tooteni ning sellepärast hakatigi antud tehnoloogiat kiirendatud prototüüpimiseks nimetama. Tänapäeval on leida kihtlisandustehnoloogiat ka masstootmises. Nimelt on hakatud tavapäraseid tootmisvõtteid asendada 3D printimisega, sest antud tehnoloogial on teatud eelised (vt Lisa 1 tabel 4). [3]

Kihtlisandustehnoloogia üks suurimatest trumpidest on kirjutatud juba ka selle tehnoloogia nimetusse. Nimelt see tehnoloogia töötab materjali lisamise teel. Teised, rohkem tuntud, materjalitöötlemise viisid toimivad peamiselt toormaterjalist ebavajaliku materjali eemaldamise teel. See tähendab, et alati peab toorik olema suurem kui soovitud detail ning tekib suures koguses jääke. Materjali lisades kulub detaili tootmiseks ainult selleks vajalik materjal. [10]

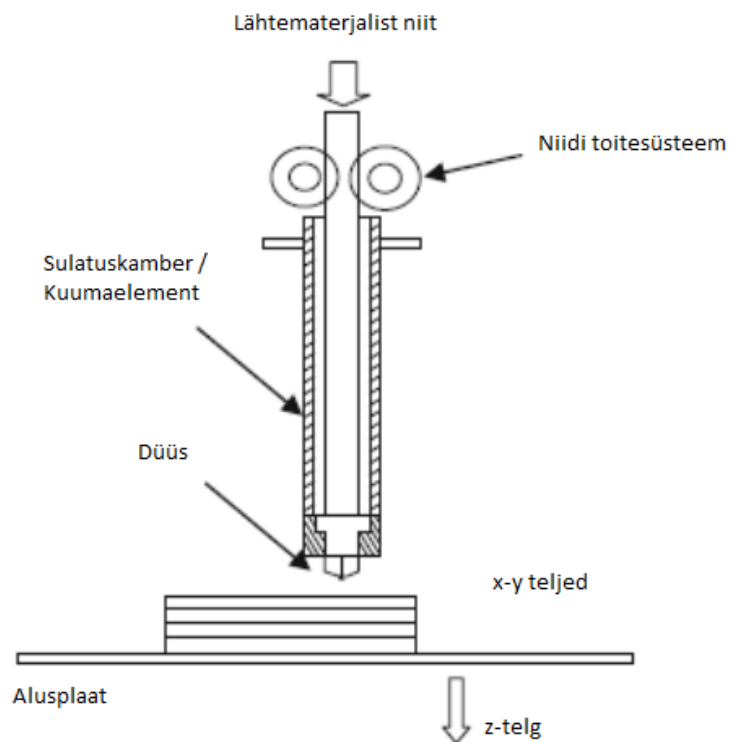
2015 aastal loodud ISO/ASTM 52900 standardiga klassifitseeriti seitse erinevat 3D printimise protsessi (vt Joonis 1). Nendest protsessidest on tavatarbija poolt kõige rohkem kasutuses materjali ekstrudeerimise ja vaadis polümerisatsiooni protsessid. Materjali ekstrudeerimise protsess hõlmab enda alla kõiki tehnoloogiaid, kus ladestatakse termoplasti läbi düüsi või ava. Peamisteks tehnoloogiateks on FFF (ingl k *Fused Filament Fabrication*) ja FDM (ingl k *Fused Deposition Modeling*). Vaadis polümerisatsiooni protsess hõlmab kõiki tehnoloogiaid, kus kasutatakse vaadis vedelal kujul fotopolümeersele vaadile lokaalset kõvendamist laseri abil. Kasutuses olevad tehnoloogiad on SLA ehk stereolitograafia ja DLP (ingl k *Direct Light Processing*). Stereolitograafiaga on kõige esimene 3D printimise tehnoloogia. See patenteeriti 1986. aastal Charles W. Hulli poolt. SLA kasutab mootoriga juhitud peeglit, et juhtida laserkiire langemise asukohta. Kiire laius on 130 – 140 mikronit ning kõvendatud kihi paksus jääb 25 – 100 mikroni vahele. Nõnda väikse kihipaksuse tõttu on võimalik saavutada mõõtudelt väga täpseid detaile. SLA on väga töökindel protsess ning on laialdast kasutust leidnud hambaravis. SLA peamiseks probleemiks on pikk järeltötluse protsess, mis muudab ta lihtkasutajale ebaatraktiivseks. [10]



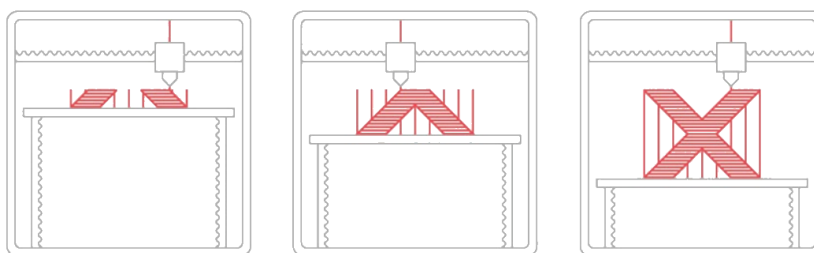
Joonis 1. ISO/ASTM 52900 standardis klassifitseeritud 3D printimise protsessid [10]

1.2 FFF/FDM tehnoloogia

Kõige laialdasemalt kasutuses olev kihtlisanustehnoloogia protsess on FFF. Rohkemalt kasutatakse aga terminit FDM, mis on firma Stratasys loodud kaubamärk [10]. Antud protsess valmistab termoplastist detaile kiht-kihi haaval, ladestades sulanud materjali peenikeste radadena [9]. FDM printerid koosnevad peamiselt neljast osast: materjali toitesüsteem, printeripea, alusplaat ja täiturmehhanismid (vt Joonis 2). Materjali toitesüsteemi ülesanneteks on lähtematerjalist niidi siirdamine rullilt printeripeasse kui ka ladestatava materjali koguse juhtimine [10]. Printeripea koosneb sulatuskambrist ja düüsiist. Printeripeas sulatatakse materjal ning ekstrudeeritakse läbi düüsi materjal alusplaadile [9]. Printer liigutab täiturmehhanismide abil printeripead täpsetesse asukohtadesse ladestades pidevalt materjali. Tehniliselt toimib 3D printer kui väga täpne kuumaliimipüstol. Kihi valmides laseb printer alusplaadi kihipaksuse võrra allapoole ning alustab uue kihi loomisega. Osades printerites tõstetakse aga printeripead ülespoole (vt Joonis 3) [10]. Protsess kordub seni, kuni kõik kihid on prinditud ehk valmib mudelis kujutatud detail [1].



Joonis 2. FDM protsessi skeem [18]



Joonis 3. FFF/FDM protsessis detaili valmimise illustratsioon. [10]

Antud 3D printimise protsessi puhul tuleb enne printimist läbida mõned ettevalmistusetapid. Esmalt tuleb luua 3D CAD-mudel detailist, mida soovitakse valmistada. CAD-mudel salvestatakse spetsiaalsesse formaati (üldiselt .STL formaat), mida *licer* ehk viilutaja suudab töödelda. Selliseid mudelitöötlusprogramme kutsutakse *liceriks*, sest nende programmide töö on mudel viilutada õhukesteks kihtideks, kus kihi paksuseks on ladestatava materjalikihi paksus. *Slicer* kalkuleerib määratud sätetega kõige optimaalsemad tööriista rajad (ingl k *tool path*) igale kihile. Informatsiooni tööriista liikumisest väljastab *licer* G-koodina. G-kood edastatakse käskude haaval printeri püsivarale, kus tõlgendatakse käsud elektrisignaalideks. 3D printeri kontrollertäitur ahel juhhib nende samade elektrisignaalidega erinevaid täiturmehhanisme. [1]

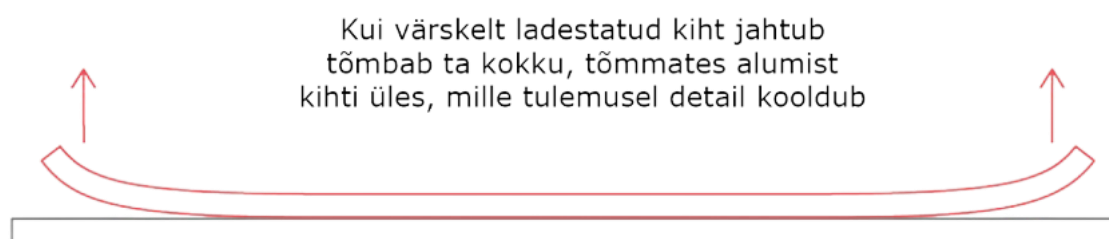
FDM masinatel täpse detaili saavutamiseks peavad olema paigas printeripea liikumiskiirus, materjali ekstrudeerimise kiirus ja sulatuskambri temperatuur. Nendest parameetritest sõltub materjali ladestumise sujuvus. Teatud termoplastidega peab olema kuumutatud ka aluspind, et plast aluspinna külge nakuks. Fundamentaalsel tasemel panevad düüsi ava läbimõõt ja kihipaksus paika prinditud detaili täpsuse. Leidub ka teisi parameetreid, mis mõjutavad detaili täpsust. Üldiselt vähendades just neid kahte parameetrit on võimalik saavutada parema viimistlusega pind ja mõõtudelt täpsemad detailid. Samuti peab arvesse võtma prinditava ruumi suurust. Üldiselt on tavakasutuses olevate printerite prinditava ruumi suurus 200 x 200 x 200 mm. Tööstuslike printerite prinditava ruumi suurus võib ulatuda 1000 x 1000 x 1000 millimeetriteni. Vajadusel tuleb toode disainida väiksemate detailide koostuna, mis järeltööna kokku monteeritakse. [10]

1.3 FDM protsessi valukohad

FDM tehnoloogial toimivate printerite üheks suureks puuduseks on kitsas materjali valik. See tähendab, et printimiseks saab kasutada ainult materjale, mida on võimalik sulatada ja läbi düüsi suruda. Enamus FDM protsessil toimivatest printeritest, kasutavad ainult kindlaid termoplasti tüüpe. Plasti negatiivsete omaduste kompenseerimiseks on leidnud kasutust komposiitmaterjalid, nagu näiteks süsinikkiuga tugevdatud nailon. Süsinikkiuga tugevdatud materjalist loodud detailid on jäigemad ja suudavad taluda suuremat koormust. [1]

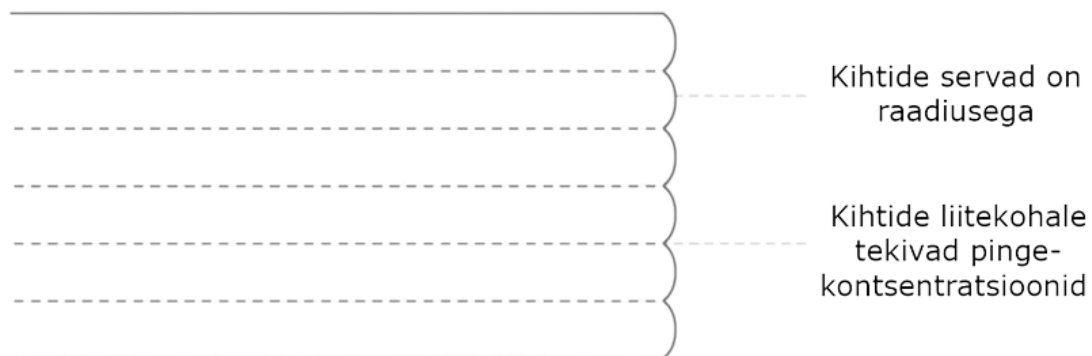
Toote kvaliteedi tagamise võimetus on üks peamistest komistuskividest, mis piirab kihtlisandustehnoloogiate adapteerimist rohkemates tootmisettevõtetes, eriti kriitilistes kohtades, kus rikkeid ei saa lubada. Veel tänapäevani on puudus tõhusast ja küpsest 3D printerite jälgimissüsteemist, mis tuvastaks defekte reaajas ja hoiaks protsessi stabiilsena. Tehniliselt on võimatu luua ühte süsteemi, mis töötaks kõigil eritüüpi printeritel, sest defektid ja kvaliteedi probleemid erinevatel protsessidel ei kattu. Näiteks pulbriga toimivad protsessid kannatavad poorsuse, kokku hakkamise ja mõranemise probleemide all. FDM protsessid aga hoopis geomeetriliste nihete, kokku tõmbumiste ja pinna defektide all. [8]

Kooldu tõmbumine (ingl k *warping*) on suureks probleemiks teatud termoplastidega, mis sulavad kõrgel temperatuuril, näiteks ABS või nailon. Detailid tõmbavad kooldu peamiselt ebaühtlase jahtumise tõttu, mis tekitab materjalis sisemisi pingeid. Need pinged üldiselt tõmbavad detaili servad alusplaadi küljest lahti (vt Joonis 4). Kuumutatud alusplaat ja hea esimese kihi nakkuvus mängivad suurt rolli selle defekti ära hoidmisel. [10]



Joonis 4. Detaili kooldu tõmbumise illustratsioon [10]

Kihtide omavaheline adhesioon on üks suurimatest kvaliteedi näitajatest, sest seda mõjutavad mitmed erinevad parameetrid. Peamised parameetrid on piisav sulatuskambri temperatuur, piisav ladestatava materjali kogus, niidi kvaliteet ja täiturmehhanismide korrektne talitus. Samuti sõltub kihtide adhesioonist ka detaili tugevus ja vastupidavus. Uute kihtide printimisel peab ladestatav materjal siduma end alumise kihi külge, et valmiks ühes tükis olev detail. See saavutatakse ladestatava materjali alumise kihi sisse surumise teel. Kuum ekstrudeeritud materjal kuumutab alumise kihi sulamistemperatuurini ning printeripea surub sulanud materjali alumise kihiga kokku, ühendades kihid. Sellisel viisil saavutatakse ovaalse ristlõikega rajad. Ovaalsete radade tõttu tekivad kihtide vahele väiksed nõgusused (vt Joonis 5). Nendes liitekohtades tekivad pingekontsentratsiooni punktid, kust koormuse all hakkavad kihid teineteisest eralduma. [10]



Joonis 5. FDM tehnoloogiaga loodud kihtide ristlõige [10]

2. VISUAALNE TAGASISIDE

2.1 Masinnägemine

Inimese viiest meelest - nägemine, kuulmine, haistmine, maitsmine ja kompimine - on nägemisest saanud peamine meel, millele inimesed elus toetuvad. Tänapäeval, kus inimesed üritavad võimalikult suurt osa oma tööst anda masinatele, on nägemine peamiseks komistuskiviks. Selle probleemiga on tegeletud üle 40 aasta. Algselt üritati masin ümbritsevast maailmast teksti lugema saada, nagu inimene seda teeb, aga see osutus oodatust tunduvalt raskemaks. Läbi evolutsiooni on inimese nägemismeel arenenud tasemele, kus hetkega võetakse vastu kümneid megabaite visuaalset infot ning soovitud väljund saavutatakse kümnendik sekundi jooksul. Inimese silmad võtavad vastu väga puhta, häirete vaba, informatsiooni ning see signaal liigub edasi umbes kümnesse miljardisse neuronisse. Kui käsitleda igat neuronit, kui mikrokontrollerit, siis muutub ilmseks aju arvutusvõime ja masinnägemise komplekssus. Masinnägemiseks vajaliku riistvara kompenseerimiseks on leiutatud erinevaid algoritme. Algoritmid vähendavad soovitud väljundi saavutamiseks vajatud informatsiooni kogust, mis kiirendab andmetöötlus protsessi. [16]

Viimase dekaadi jooksul on masinnägemise tehnoloogias toimunud eksponentsiaalne areng tänu tehisintellekti plahvatuslikule arengule. Selle arengu käigus on jäetud maha suur osa kunagiste meetodite probleemidest ning saavutatud tulemusi, millest inimesed ei osanud kunagi unistadagi. Tänu sügavõppele ja tehisnärvivõrkudele on võimalik masinale selgeks teha, mis osa informatsioonist on antud ülesandes väärtuslik. Masin on seejärel võimeline ise looma algoritmi, mis võimalikult efektiivselt eraldab informatsioonist kasuliku osa. Selline lähenemine sarnaneb inimese käitumisele, kus eelnevalt kogetud olukorrast õpitakse ülesannet paremini täitma. [17]

Masinnägemine koosneb peamiselt viiest protseduurist. Need protseduurid ja nende selgitused on väljatoodud tabelis 1. [4]

Tabel 1. Masinnägemise viis peamist protseduuri [4]

Kaadri jäädvustamine	Esimene samm protsessi käivitamiseks on kaadri jäädvustamine kasutades kaamerat, mis väljastab pildi reaalsest maailmas digitaalse signaalina.
Kaadri omandamine	Kaamerast tulev digitaalne signaal salvestatakse digitaalse pildina.
Pildi töötlus	Antud sammus toimub pikslitele väärtuste andmine ja nende organiseerimine. Toimub pildi moonutamine ja muutmine, et soovitud infot järgmistes sammudes paremini töödelda. Toimuvad järgmised operatsioonid: geomeetrilised, punkt, sektsiooni ja globaalsed moonutused.
Iseärasuste tuletus	Antud sammus eraldab masin ettekirjutatud loogika järgi pildilt objektid, et neid järgmises sammus võrrelda.
Mustrite klassifitseerimine	Mustrite klassifitseerimine on masinnägemise protsessi viimane samm. Eelnevas sammus eraldatud objekte võrreldakse tuntud objektide komplektidega. Tulemuseks leitakse sarnasused või erinevused jäädvustatud objektide ning võrreldatavate objektide vahel.

Masinnägemise süsteemi põhimõte on luua piltidest mudel reaalsest maailmast. See tähendab, et süsteem taastab kogu informatsiooni objekti kohta vaid tema kahemõõtmelistelt projektsioonidelt. Info taastamise vajadus tulenebki sellest, et pildid on ainult kahemõõtmelised projektsioonid reaalsest, kolmemõõtmelisest maailmast. Selline info kogumine nõuab mitmete kaadrite omavahelist võrdlust. Kasulikku teavet saab eraldada ainult juhul, kui on olemas eelnevalt informatsioon ja projektsioon otsitavast objektist. [7]

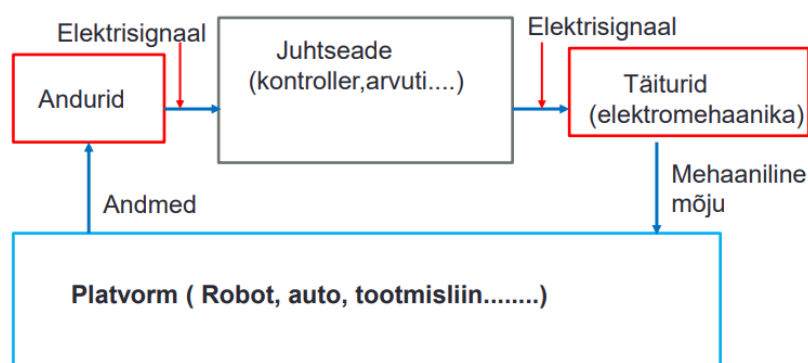
2.2 Tagasisideahel

Süsteemi teoorias on kahte sorti süsteeme: avatud ja suletud. Avatud (ingl k *open-loop*) süsteemis ei ole süsteemi sisend ja väljund omavahel seotud. See tähendab, et süsteem ise ei avalda mõju sisendsignaalile. Avatud süsteemis on väljundsignaal tugevalt mõjutatud süsteemivälistest häiretest. Suletud (ingl k *closed-loop*) süsteemis on süsteemi sisend ja väljund omavahel seotud. Sisend- ja väljundsignaalid võivad olla omavahel seotud otseselt või läbi mingi funktsiooni. See tähendab, et välised häired, mis mõjutavad süsteemi, kompenseeritakse sisendi muutusega ära. [24]

Suletud süsteemis kontrollib juhtseade sisendsignaali ja juhtsignaalivahelist hälvet. Kontroller reageerib hälbele ning juhib süsteemi nõnda, et see hälve väheneks ja väljund oleks võrdeline soovitud seadesuurusega. Suletud süsteem tähendab alati seda, et süsteem kasutab tagasisidet mingi vea või hälbe vähendamiseks. [8]

Tagasisideahel on süsteem, mis seob omavahel süsteemi väljundi ja seatud sisendi väärtused. Tagasisideahel võrdleb omavahel sisend- ja väljundsuurusi ning kasutab nende erinevusi süsteemi juhtimiseks. Näiteks võib tuua termostaadi, mis mõõdab reaalselt toatemperatuuri ning võrdleb seda kasutaja poolt seatud seadesuurusega. Nende väärtuste järgi otsustab termostaat küttekeha sisse või välja lülitamise, et säilitada toas soovitud temperatuuri vaatamata väli tingimustest. Tagasisidestatud süsteemid ei ole ainult inseneeria valdkonnas leitav nähtus, vaid neid esineb ka muudes mitte-inseneeria valdkondades. Näiteks inimkeha on väga kompleksne tagasisidestatud süsteem. Nii kehatemperatuur kui ka vererõhk hoitakse konstantsena füsioloogilise tagasiside näol. [8]

Joonisel 6 on illustreeritud mehhatroonilise süsteemi, nagu robot või auto, tagasisideahela ülesehitust. Süsteem kontrollib anduritega hetkeolukorda, muutes füüsilised suurused, nagu temperatuur, pinge, vool, jõud, rõhk, distants, kiirus ja kiirendus, elektrisignaalideks. Elektrisignaal on sisendiks juhtseadmele, milleks võivad olla erinevad mikrokontrollerid või arvutid. Juhtseade võrdleb sisendit soovitud väärtustega ning genereerib vastava elektrisignaali. Uued elektrisignaalid liiguvad edasi täituritele, kus kasutatakse neid elektrisignaale füüsilise maailma mõjutamiseks. Näiteks temperatuuri tõstmine küttekehaga või jõu avaldamine elektrimootori abil.

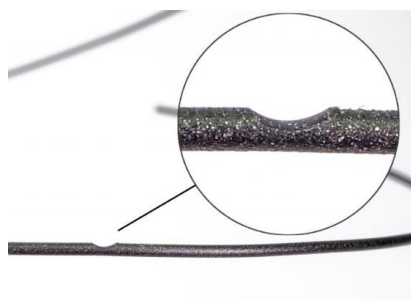


Joonis 6. Tagasisideahel mehhatroonilises süsteemis. [5]

2.3 Juhtsüsteemid FDM 3D printerites

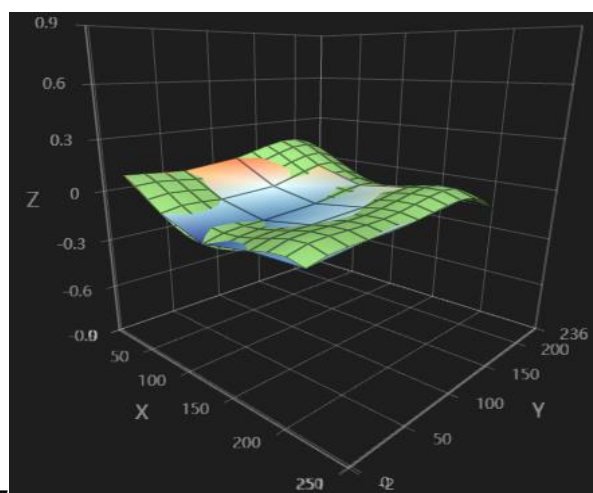
Hetkel kasutatakse turul olevates FDM 3D printerites suhteliselt vähe suletud süsteemidega protsesse. Kõikides printerites olemasolevad tagasisideahelad on sulatuskambril ja alusplaadi temperatuuri juhtimisahelad, ilma milleta ei saaks FDM tehnoloogia toimida. Paljudel printeritel kasutatakse lihtsat sisse-välja juhtimise loogikat, kus küttekeha lülitatakse sisse täisvõimsusele ning soovitud temperatuuri saavutamisel lülitatakse küttekeha välja. Uuematel ja kallimatel printeritel on olemas PID kontrollid temperatuuri ühtlasemaks juhtimiseks. Harva võib näha printeritel ka kaameraid, mis kõrvalt prindiala jälgivad. Nende peamiseks otstarbeks on printimise protsessi eemalt jälgimise võimaldamine. Leidub üksikuid printereid, kus kasutatakse neid kaameraid automaatseks protsessi kontrollimiseks. Näiteks Mantis 3D printer, mis on Ameerikas entusiastide poolt loodud FDM 3D printer. Mantis 3D tuleb sisseehitatud Raspberry Pi mikrokontrolleriga, mis suudab tuvastada kaamera abil läbikukkunud printimise protsessi kasutades Octoprint tarkvaras *Spaghetti detection ehk spageti tuvastus* funktsiooni. Läbikukkunud detaili tuvastamisel peatab kontrollid automaatselt printimise protsessi ilma operatori kohalolekuta. 2022 aasta lõpus tuli turule Bambu Lab X1 seeria printerid, mis kasutavad Bambulabsi enda versiooni spageti tuvastusest. [21, 22]

Kasutust on leidnud ka niidituvastussüsteem (ingl k *filament runout sensor*). Lihtsamad süsteemid koosnevad vaid mikrolülitist, mis niidi olemasolul edastab signaali kontrollisse. Niidi lõppemisel signaal katkeb ning printimise protsess peatatakse. Peale niidi probleemi lahendamist jätkab printer kohast, kust pooleli jäi. Paremad ja kallimad andurid tuvastavad ka niidi liikumist, et tuvastada ummistusi printeripeas. Ummistuste tekkimise sagedus sõltub sulatuskambril ülesehitusest ning niidi materjali tüübist. Niidi liikumise kontrollimisel on võimalik tuvastada ka toitemehhanismi rikkeid nagu niidi viilimine (ingl k *filament grinding*). Niidi toitesüsteemis olevad rullikud, mis niiti edasi lükkavad, võivad niiti viilima hakata, kui niidi liikumine on takistatud. Rulliku kontaktkohale tekib nõrgususe (vt Joonis 7), kuhu toitesüsteem kinni jääb ning materjal ei jõua sulatuskambrisse.



Joonis 7. Toitesüsteemi poolt ära viilitud niit [20]

Kasutatakse ka avatud süsteeme, kus enne printimisprotsessi algust printer tuvastab ja mõõdab mõnda füüsilist suurust, et parandada printimise protsessi kulgu. Peamiseks näiteks on automaatne aluspinna kauguse mõõtmine (ingl k *auto-bed leveling*). Viimastel aastatel on muutunud see osaks FDM printerite standard varustuses. Süsteem kasutab andurit, millega tuvastada, aluspinna ja düüsi vahelist vahemaad. Kõige populaarsem anduritüüp on sond, aga kasutatakse ka mahtuvusandureid kui ka mikrolüliteid. Antud süsteem kaardistab XY-tasandil määratud punktides Z-telje kõrguse väärtused ning kujundab üldistatud kõrgusmudeli aluspinnast (vt Joonis 7). Kõrgusmudel on üheks sisendiks printerimise protsessis, kus vastavalt XY koordinaatidele 3D printer tõstab või langetab printeri Z-telge, tagades ühtlase kihipaksuse kogul alusplaadi alal. Vajadus sellisele süsteemile tuleneb FDM tehnoloogia tundlikkusest düüsi ja aluspinna vahelisest kaugusest.



Joonis 8. Creality Ender-3 Klaasist alusplaadi üldistatud kõrgusmudel

2.4 Visuaalse tagasisidega tagasisideahel FDM 3D printerile

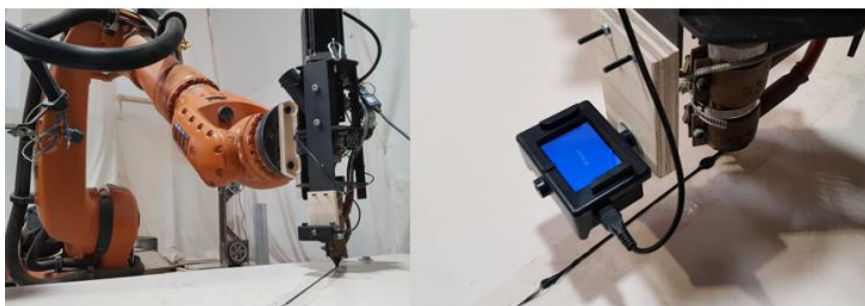
Visuaalse tagasisidega tagasisideahel on suletud süsteem, kus mõne füüsilise suuruse mõõtmiseks kasutatakse andurina kaamerat. Süsteem saab kaamerast sisendisignaali ning juhtseade reguleerib väljundsignaali vastavalt vajadusele.

FDM 3D printerite töökindluse parandamiseks on loodud palju erinevaid andureid ja süsteeme. Kõik need süsteemid kontrollivad mõnda nähtust, mida tihti on võimalik visuaalselt tuvastada. Näiteks ummistuste ja toitesüsteemide rikete puhul ei ladestata piisavalt materjali alusplaadile. Düüsi ja alusplaadi ebakorrekse vahemaa puhul jäävad ladestatud rajad liiga kitsaks või surutakse rajad liiga laiaks. Teadlik inimene oskab

printimise protsessi vaadates tuvastada neid probleeme. Sellel põhinedes peaks masinnägemise algoritm olema võimeline nende samade vigade tuvastamiseks.

Eelnevalt mainitud Bambulab X1 seeria printerid kasutavad väga efektiivselt oma töös kaameraid. Printeripea külge on ühendatud kaks kaamerat, kaks omavahel risti olevat laserit ning LiDAR andur. Laserid kasutatakse ainult filamendi kontuuridele kontrasti loomiseks. LiDAR anduriga mõõdetakse kalibreerimise käigus loodud radade kõrguseid. Samuti kasutab printer tehisintellekti, et kontrollida esimese kihi kvaliteeti [22]. Tegemist on kindlasti sammuga õiges suunas, sest Bambulab X1 seeria printerid on korralikult turgu raputanud oma uudsete lahendustega. Bambulab on sundinud teisi 3D printerite tootjaid arendama oma printereid, et olla konkurentsivõimelised. Esimesed konkurendid Bambulab X1 seeria printeritele hakkavad turule jõudma 2023 aasta keskpaigaks. Bambulabi peamine probleem on nende otsus oma tehnoloogiat mitte jagada. See otsus häirib paljusid 3D printimise entusiaste, sest 3D printimine on suuresti jõudnud praegusele tasemele tänu oma *open-source* lähenemisele.

Bambulab 3D printerid kasutavad printeripea küljes olevaid kaameraid järjekordse avatud süsteemina. See tähendab, et puudub pidev süsteemi jälgimine. Kaameraid kasutatakse ainult printimise algusefaasis. Sellisel kasutusviisil ei kasutata ära kaamera täielikku potentsiaali ning eelnevalt väljatoodud rikete tuvastamiseks kasutatakse teisi andureid. 2019 aasta keskpaigas avaldati Kataloonia kõrgema arhitektuuriinstituudi (ingl k Institute for Advanced Architecture of Catalonia, IAAC) poolt projekt, kus arendati robotikäega 3D printimisele kaameraga tagasisideahelat. Projekti käigus loodi suletud süsteem, mis juhtis roboti materjali ekstrudeerimise kiirust. Kaameraga jäädvustati ladestatud materjali paksus ning tagasisideahel muutis materjali ekstrudeerimise kiirust vastavalt. IAAC projekti käigus loodud süsteem on näidatud joonisel 9. [23]



Joonis 9. „FEEDBACK FOR 3D-PRINTING“ projekti käigus loodud süsteem [23]

Antud töös luuakse tagasisideahel, mille tööpõhimõtte sarnaneb mõlemale eelnevalt nimetatud projektile. Nimelt luuakse suletud süsteem, mis mõõdan kaamera abil FDM printeri poolt ladestatud materjali paksust. Kaaluti ka erinevaid anduri variante nagu FLIR ehk infrapunakaamera ja LiDAR andur. Andurite positiivsed ja negatiivsed aspektid

on toodud välja tabelis 2. Süsteem juhib printeri Z-telje kõrgust jättes muud parameetrid muutmata. 3D printerile sellise süsteemi loomise peamiseks probleemideks on limiteeritud ruum ning printeripea fikseeritud olek XY-telgede suunas. Robot käel on võimalik kaamera paigaldada tööriista ühele küljele ning tööriista keeramisel hoida kaamera vaatevälja keskpunkt alati ladestatud materjaliga samal joonel. FDM printeril tuleb luua kaamerate süsteem, mis kataks kogu düüsi ümbritseva ala.

Tabel 2. Tagasisideahela kaalutud andurite positiivsed ja negatiivsed aspektid

Anduri nimetus	Positiivsed aspektid	Negatiivsed aspektid
Kaamera	<ul style="list-style-type: none"> • Odav • Hea ligipääsetavus • Mõõtmelalt väike • Kõrge resolutsioon 	<ul style="list-style-type: none"> • Tundlik värvidest tekkivatele häiretele • Ala katmiseks vajab üle kolme anduri • Vajavad rohkelt valgust
Infrapunakaamera	<ul style="list-style-type: none"> • Suudab lihtsalt tuvastada värskelt ladestatud materjali • Ei ole tundlik värvidest tekkivatele häiretele • Ei vaja tööks valgust 	<ul style="list-style-type: none"> • Kõrge hind • Halb kättesaadavus • Mõõtmelalt suuremad, kui lihtsad kaamerad • Madal resolutsioon • Ala katmiseks vajab üle kolme anduri
LiDAR	<ul style="list-style-type: none"> • Võimaldab mõõta ladestatud materjali kõrgust ja laiust korruga • Ei ole tundlik värvidest tekkivatele häiretele • Võimaldab kogu ala katta kahe anduriga • Ei vaja tööks valgust 	<ul style="list-style-type: none"> • Peab olema alusplaadist kaugemal kui kaamerad • Väga kõrge hind • Halb kättesaadavus

3.ARVUTUSED JA MODELLEERIMINE

3.1 Tagasisideahela tööpõhimõte

Tagasisideahel töötab ladestatud materjali laiuse mõõtmise põhimõttel. FDM printimise protsessis on ladestatud materjali laius konstantne, kui printimise protsessis on kolm kindlat parameetrit konstantsed. Nendeks parameetriteks on ladestatava materjali kogus, printimise kiirus ning alusplaadi ja düüsi vaheline kaugus. See tähendab, et soovitud raja laiuse ning reaalse raja laiuse võrdlemisel on võimalik mõõta aluspinna ning düüsi vahelist kaugust. Nähtus toimib, kui printer töötab oma tavatalituses ehk printeripead liigutavad täiturmehhanismid ning toitesüsteem toimivad riketeta.

Seos ladestatud materjali laiuse ja teiste parameetrite vahel tuletatakse valemist:

$$V_{sisse} = V_{välja}$$

kus V_{sisse} - printeripeasse sisenev materjali kogus, m³

$V_{välja}$ - ladestatava materjali kogus, m³

Siseneva materjali kogus on leitav valemiga:

$$V_{sisse} = \frac{1}{4} \cdot E \cdot \pi \cdot D^2$$

D – niidi läbimõõt, m

Printeripeasse siseneva niidijupi pikkus on leitav valemiga:

$$E = v_{niit} \cdot t$$

kus v_{niit} – niidi ettenihkekiirus, m/s

t – printimise protsessi kestus, s

Ladestatava materjali kogus on leitav valemiga:

$$V_{välja} = w \cdot h \cdot L$$

kus w – ladestatud materjali laius, m

h – ladestatud materjali kõrgus ehk düüsi ja alusplaadi vaheline kaugus, m

L – ladestatud materjali pikkus, m

Ladestatud materjali pikkus sõltub printimise kiirusest ja printimis protsessi kestusest ning on tuletatav järgmise valemiga:

$$L = v_{pea} \cdot t$$

kus v_{pea} – printeripea liikumiskiirus, m/s

t – printimise protsessi kestus, s

Asendades algses võrrandis muutujad eelnevate valemitega saame järgmise võrrandi:

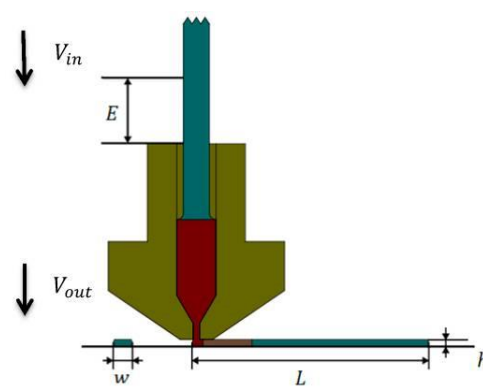
$$\frac{1}{4} \cdot v_{niit} \cdot t \cdot \pi \cdot D^2 = w \cdot h \cdot v_{pea} \cdot t$$

Saadud võrrandist tuletatakse materjali laiuse valem:

$$w = \frac{\pi \cdot v_{niit} \cdot D^2}{4 \cdot h \cdot v_{pea}}$$

Tuletatud valemist on näha ladestatava materjali sõltuvust toitesüsteemi ettenihke kiirusest, niidi läbimõõdust, printeripea liikumiskiirusest ning düüsi ja alusplaadi vahelisest kaugusest. Kõik need parameetrid on ka peamised 3D printeri töökindluse määrajatest. See selgub sellest, et nende suuruste kontrollimiseks on leiutatud kõige rohkem erinevaid süsteeme. Ainukene suurus, mis puudub sellest valemist, aga mõjutab tohutult 3D printeri töökindlust on sulatuskambri temperatuur.

Tänapäeval on müügil olevate niitide kvaliteet piisavalt kõrge, et võime niidi läbimõõdu lugeda konstantseks. Printeri tavatalituse juures, võime lugeda ka toitesüsteemi ettenihke kui ka printeripea liikumiskiirused konstantseteks suurusteks. Sellisel juhul muutub ilmseks ladestatava materjali laiuse otsene seos alusplaadi ja düüsi vahelisest kaugusest. Ladestatud materjali kõrgus ja laius on esindatud pöördfunktsioonina. See tähendab, mida suurem on kaugus düüsi ja alusplaadi vahel, seda kitsam on ladestatud materjali laius. Valemites kasutatud suurused on illustreeritud joonisel 10.



Joonis 10. Ladestatava materjali laiuse sõltuvus erinevatest parameetritest. [25]

3.2 Kaamera valik

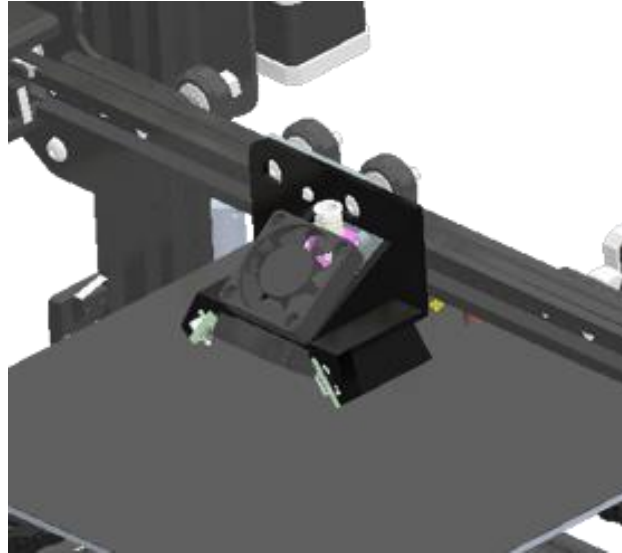
Käesolevas töös valiti tagasisideahel anduriteks kaamera moodulid. Peamiseks põhjuseks oli mooduli omadus pilti edastada läbi kohalikuvõrgu iseseisva üksusena. See lihtsustas tagasisideahela prototüübi valmistamist. Kaamerateks valiti ESP32 PSRAM Timer Camera (OV3660) moodulid [12]. Valik langetati lähtudes kasutatava kaamera resolutsioonist ja moodulite kättesaadavusest. Kaamerad kinnitatakse 3D printitud klambriga printeripea külge nõnda, et kaks kaamerat on teineteisega 180° nurgal all. Kaamerale on kinnitatud 66,5° kraadine objektiiv. Sellisel juhul saab fototöötluste abil katta teoreetiliselt kogu düüsi ümber olevast alast kaamera vaateväljaga. Kaamerad on ühendatud oma trükkplaatide külge, mis jagavad kaadreid läbi kohaliku võrgu.



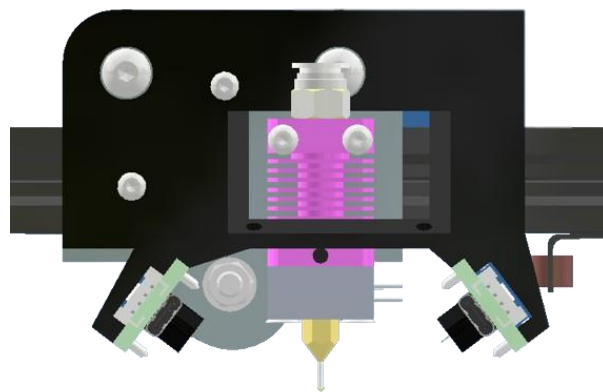
Joonis 11. ESP32 PSRAM Timer Camera (OV3660) [12]

3.3 Mudeli valmistamine

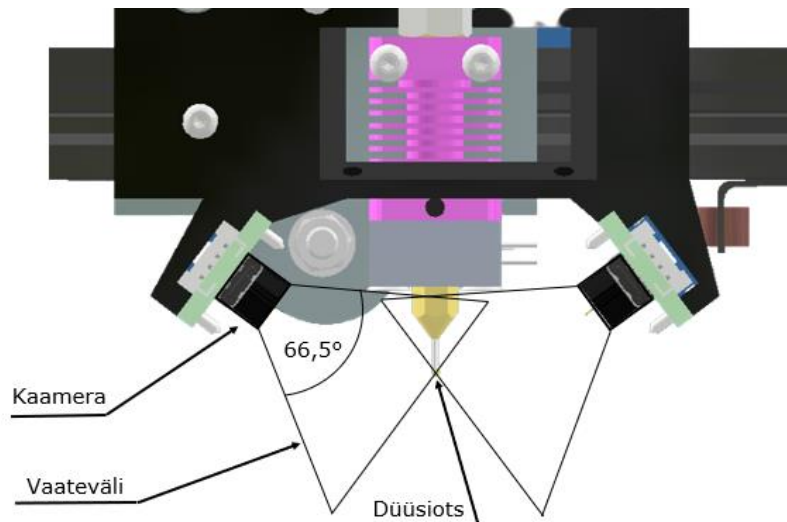
Antud töös luuakse tagasisideahel 3D printerile Creality Ender 3. Kaamerate õigetes asendites hoidmiseks disainiti klamber, mis ühendab omavahel Creality Ender 3 printeripea, kaamerad, valgustid ja jahutid. Klamber disainiti CAD-tarkvaras Autodesk Inventor. Klambri modelleerimiseks kasutati juba valmis olevat printeri mudelit, mis on saadaval *open-source* projektina GitHubis printeri tootja kontol. Tootja poolt pakutud mudeli olemasolu kiirendas tohutult disainimise protsessi. Valmis mudel samuti kaotas printeripea geometria manuaalse mõõtmise vajaduse. Mudeli disainimisel võeti arvesse kaamerate vaatevälja suurus, mis saadi kaamera mooduli andmelehel. Kaamerad paigaldati nõnda, et moodulid ei takistaks printeripea tavalist liikumist. Arvesse võeti kaamerate vaatevälja laius ning vertikaalsus ja kaamera fookuskaugus.



Joonis 12. Klambri CAD-mudel Crealiti Ender 3 printeri küljes tarkvaras Autodesk Inventor



Joonis 13. Klambri CAD-mudeli eestvaade tarkvaras Autodesk Inventor



Joonis 14. Kahe kaamera vaatevälja eestvaate illustratsioon

3.4 Tagasisideahela ülesehitus

Antud töös loodud süsteemis kasutatakse Windows 10 operatsioonisüsteemil toimivat arvutit, mis jooksub virtuaalkeskonda. Virtuaalkeskonnas töötab masinõigamise algoritm. Algoritm töötab OpenCV tarkvaral, mis on üks populaarsematest masinõigamise tarkvaradest. OpenCV on avatud lähtekoodiga programm, mis tagab tema laialdase kasutuse. Pildi töötlemiseks kasutati Pillow teeki, mis võimaldab mitut kaadrit omavahel siduda üheks. Masinõigamise algoritm kirjutati python programmeerimise keeles. Algoritm kasutab sisendiks kaamerate jäädvustatud kaadreid, mis omandatakse läbi kohaliku võrgu. Väljundiks annab algoritm käsked kontrollerile, mis juhib 3D printeri Z-telje kõrgust.

Kontrolleriks on RaspberryPi 2, mis jooksub Mainsail tarkvara. Kontroller täidab antud olukorras ülema (ingl k *master*) rolli. Mainsail tarkvara suhtleb 3D printeri mikrokontrolleril toimiva Klipper püsivaraga. Mainsail tarkvara võimaldab välistel seadmetel, nagu arvuti ja nutitelefoni, juhtida 3D printerit lihtsustatud viisil. Tarkvara loob suhtluskanali, mida käesolevas töös loodud algoritm kasutab printerile juhiste saatmiseks. Kontroller ja arvuti suhtlevad omavahel läbi kohaliku võrgu.

3D printeri täitureid juhib mikrokontroller BigTechTree SKR mini E3 V2.0, mis on laialdaselt kasutusel paljudes erilahendusena loodud 3D printerite projektides. Mikrokontrolleril jookseb Klipper püsivara, mis jaotab ära printimiseks vajalikud ülesanded kontrolleri ja printeri protsessori vahel. Vähendatud koormus printeri

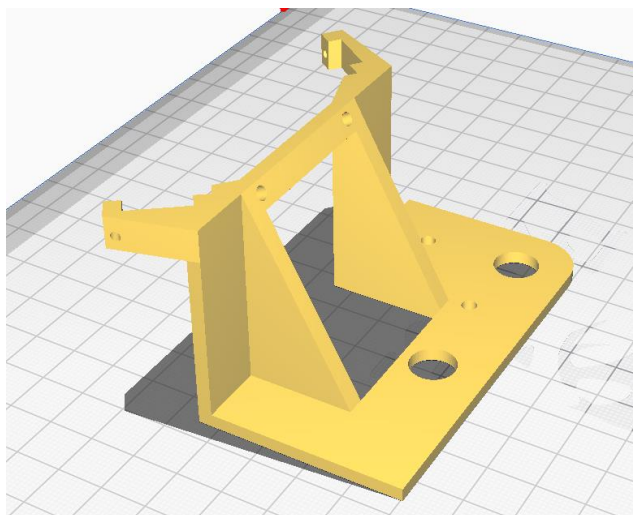
protsessoril tagab juhtahela töökindluse ning kontrolleri on võimeline kiiremateks arvutusteks. Antud olukorras täidab mikrokontroller alama (ingl k *slave*) rolli. See tähendab, et mikrokontrolleri töö on saada kontrollerielt ehk ülevalt masinkoodis käsked ja need elektrisignaalideks muuta. Elektrisignaalidega juhitakse 3D printeri täitumehhanisme. Ülem ja alam kontrolleriid suhtlevad omavahel läbi USB (ingl k *Universal Serial Bus*) protokoll.

Visuaalse tagasisidega tagasisideahel toimib järgmiselt. Juhtarvuti analüüsib jäädvustatud kaadreid, moonutab neid ning kasutab masinnägemisalgoritme, et tuvastada ladestatud materjali servad. Servade vaheline distants mõõdetakse ning seda võrreldakse soovitud ladestatud materjali laiussega. Erinevuste ilmnmisel liigutatakse Z-telge vastavalt vajadusele. Kui ladestatud materjali laius on soovitud suurem, siis tõstetakse Z-telge ülespoole. Samuti toimib vastupidine olukord, kus Z-telge lastakse allapoole, kui ladestatud materjali laius on väiksem soovitud.

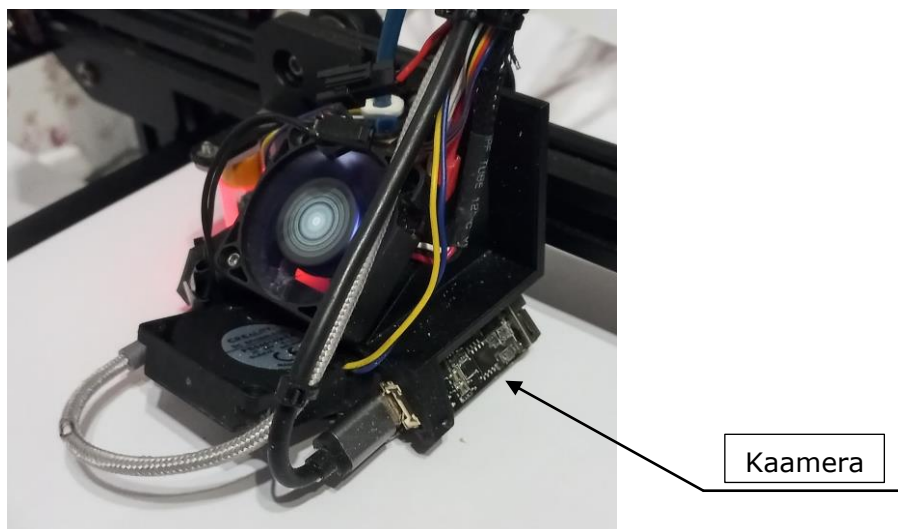
4. Praktiline osa

4.1 Klambri valmistamine

Klamber valmistati ABS termoplastist, sest ABS-i klaasistumistemperatuur on tunduvalt kõrgem kui PETG-l või PLA-l. Klaasistumistemperatuur näitab, mis temperatuuri juures kaotab detail oma kuju. ABS-i klaasistumistemperatuur on ligikaudu 105°C, aga PETG-l ligikaudu 85°C. Sulatuskamber võib teatud materjalide printimisel jõuda 300 kraadini. See tähendab, et sulatuskambril lähedal peavad detailid kuumusele vastu pidama ilma oma kuju kaotamata. Antud lahenduses kasutatakse ka jahutit, mis jahutab kuumakambri ümber olevat ala. Klambri printimiseks kasutati sama 3D printerit, millele arendatakse visuaalset tagasiside.



Joonis 15. Klambri mudel *licer* tarkvaras Cura



Joonis 16. Klamber printeripea külge ühendatuna

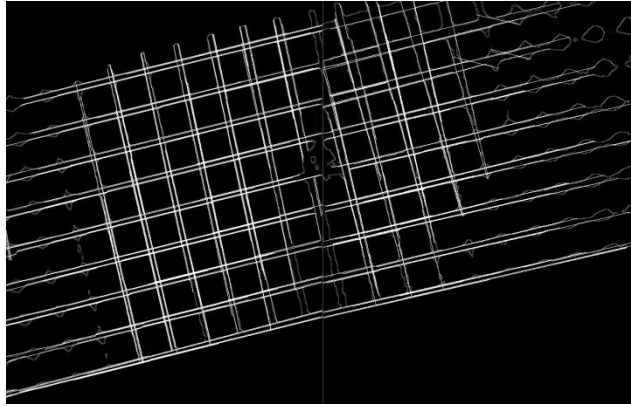
4.2 Masinnägemise algoritmi valmistamine

Enne masinägemise algoritmi loomist moonutati kaamerateest saadud sisend nõnda, et algoritm tegeleks ainult väärtusliku informatsiooniga. Esmalt kasutati ruudustiku, millega teostati geomeetrilised moonutused. Kaotati kaamera vaatenurgast tekkinud moonutused, et saavutada pealtvaadet kujutav homogeenne vaade düüsi ümbrusele (vt joonis 17). Peale geomeetrilisi moonutusi saavutati kaader, kus mööda abstsiss ja ordinaat telge liikudes pidas paika suhe 100 pikslit ühe millimeetri kohta. Teades kaadri ja reaalseste mõõtude vahelist suhet saab hiljem arvutada kujundite laiust pikslite järgi. Suhe 100 pikslit ühe millimeetri kohta annab teoreetiliseks mõõtetäpsuseks $\pm 0,01$ millimeetrit, mis on antud katseks piisav resolutsioon.

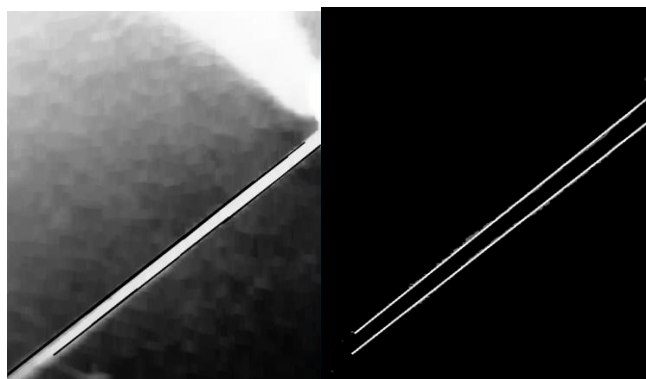


Joonis 17. Vasaku kaamera kaadri moonutamine nelja majaka abil

Järgmisena seoti kahe kaamera kaadrid kasutades Pillow teeki [26]. Vaated seoti omavahel nõnda, et ühelt kaadrilt teisele üleminek oleks võimalikult sujuv ning ilma niheteta (vt joonis 18). Kasutati ka erinevaid filtreid ja pilditöötlemise võtteid, mis võimaldasid tõsta kontrasti aluspinna ja joonte vahel. Esmalt muudeti kaader mustvalgeks, et vähendada värvidest tekkivaid häireid. Peale mida kasutati visuaalse müra vähendamise ja teravdamise võtteid. Töödeldud kaadrid sisestati Sobeli operaatori funktsiooni, mis on lihtne ääretuvastuse meetod. Sobeli operaatori funktsiooni väljund kasutati ära järgmise, täpsema ääretuvastuse meetodi sisendina. Paremaks ääretuvastuseks kasutati Canny operaatori funktsiooni. Funktsiooni käigus joonistas Hough'i teisendus algoritm kaadrile kõik sirgjooned, mis meenutasid talle mõne kujundi serva. Tekkis suvaline kogus vektoreid, mis olid väga tundlikud kaamera visuaalsele mürale. Selle kompenseerimiseks kasutati Hough'i *bundler* funktsiooni, et üldistada mitmed lähestikku olevad sama suunalised vektorid üheks suureks vektoriks (vt joonis 19). Masinnägemise algoritmi väljundiks saadi maatriks, mis sisaldas saadud vektorite algus- ja lõpp-punktide koordinaate.

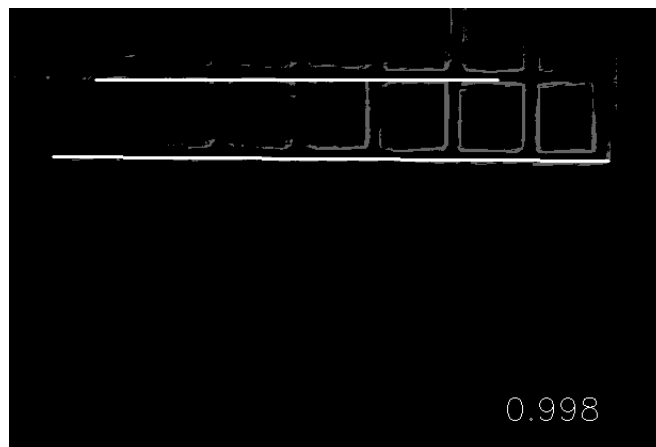


Joonis 18. Masinnägemis algoritmiga töödeldud vaade kalibreerimislehest



Joonis 19. Kaadrite progressioon läbi erinevate töötlusastmete

Algoritm see järel arvutab vektorite vahelise kauguse ning see korrutatakse 100 pikslit ühe millimeetri kohta suhtega läbi. Saadakse kujundi servade vaheline kaugus millimeetrites. Võeti kasutusele ka kaalutud keskmise funktsioon, et vähendada süsteemi tundlikust häiretele. Joonisel 16 on näha millimeeterpaberi mõõtmise tulemust valminud algoritmiga.



Joonis 20. Masinnägemise algoritmi vaade millimeeterpaberile

4.3 Katsed

Käesoleva bakalaureusetöö jooksul sooritati kaks katset. Masinnägemise algoritmi stabiilsuse katse ning tagasisideahela toimimise katse.

4.3.1 Masinnägemise algoritmi stabiilsuse katse

Antud katses asetati millimeeterpaberi tükk düüsi alla (vt joonis 16) ning jooksutati masinnägemise algoritmi 240 sekundit. Iga sekundi jooksul salvestati mõõtetulemus tekstifaili (vt lisa 3). Tekstifailis olev informatsioon sisestati Exceli tabelisse. Statistilise andmetöötlusena arvutati mõõtetulemuste aritmeetiline keskmine, hajuvus (dispersioon ja standardhälve) ning koostatakse histogramm. Mõõtetulemused

Mõõtetulemuste aritmeetilise keskmise saab leida valemiga:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n} = \frac{235.105}{240} = 0.9796 \text{ mm}$$

Mõõtetulemuste hajuvuse saab arvutada valemitega:

Dispersioon:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{0.0391}{239} = 0.00016 \text{ mm}$$

Standardhälve:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{2,9397}{239} = 0.0123 \text{ mm}$$

Mõõtetulemuste alusel koostati sagedustabel. Mõõtetulemuste hajuvusulatus jagati $k = 10$ intervalliks. Intervallid peavad olema võrdse sammuga h .

Hajuvusulatus on leitav valemiga:

$$r = x_{\max} - x_{\min} = 0,999 - 0,913 = 0,086 \text{ mm}$$

Kus x_{\max} on suurim ja x_{\min} väikseim mõõtmisel saadud väärtus

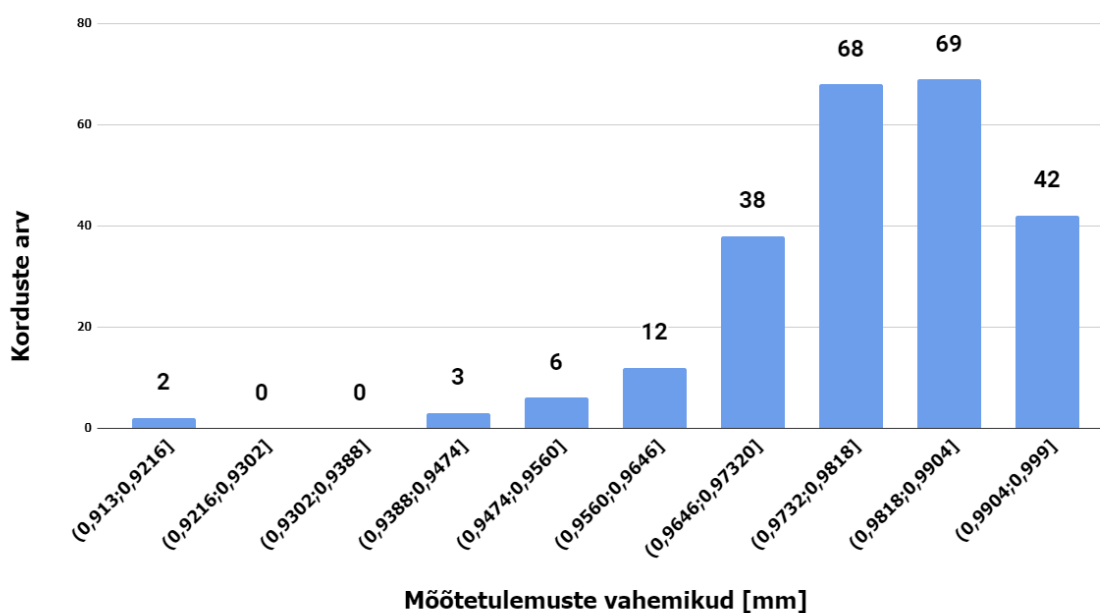
Intervalli samm leitakse valmeiga:

$$h = r / k = 0,086 / 10 = 0,0086 \text{ mm}$$

Tabel 3. Mõõtetulemustest saadud sagedusetaabel

Intervall		Esinemissagedus intervallis
Algus	Lõpp	
0,9130	0,9216	2
0,9216	0,9302	0
0,9302	0,9388	0
0,9388	0,9474	3
0,9474	0,9560	6
0,9560	0,9646	12
0,9646	0,9732	38
0,9732	0,9818	68
0,9818	0,9904	69
0,9904	0,9990	42

Mõõtetulemuste stabiilsuse histogramm

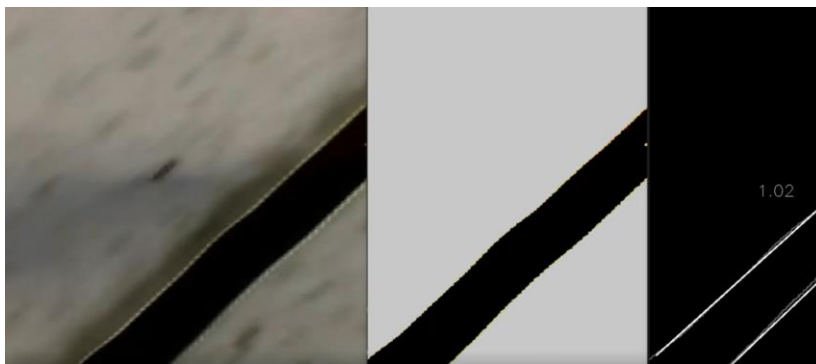


Joonis 21. Algoritmi stabiilsuse katse mõõtetulemustest tuletatud histogramm

4.3.2 Tagasisideahela testimine

Antud katsega sooviti näha, kas valminud tagasisideahelaga on võimalik kolmemõõtmelise kujundi laiust mõõta, kui uuritav objekt asub kaamera suhtes nurga all. Antud katses prinditi alusplaadile 0,8 mm paksust materjali rada. Katse eesmärgiks oli ka jälgida, kuidas printer reageerib mõõtude erinevusele.

Raja ladestamise alguses printer ei reageerinud printimise protsessile. Hetkepäras hakkas printer Z-telge ülespoole liigutama, kuniks ladestatud materjal oli täielikult alusplaadist eemal. Printimise protsess peatati, printer viidi algasendisse tagasi ning alustati uue raja printimisega. Teisel ja kolmandal katsel printer käitus sarnaselt. Hakati uurima, mis põhjustab printeri Z-telje tõusmist. Leiti, et masinnägemise algoritm mõõdab 0,8 mm laius rada ühe millimeetri laiuse rajana.



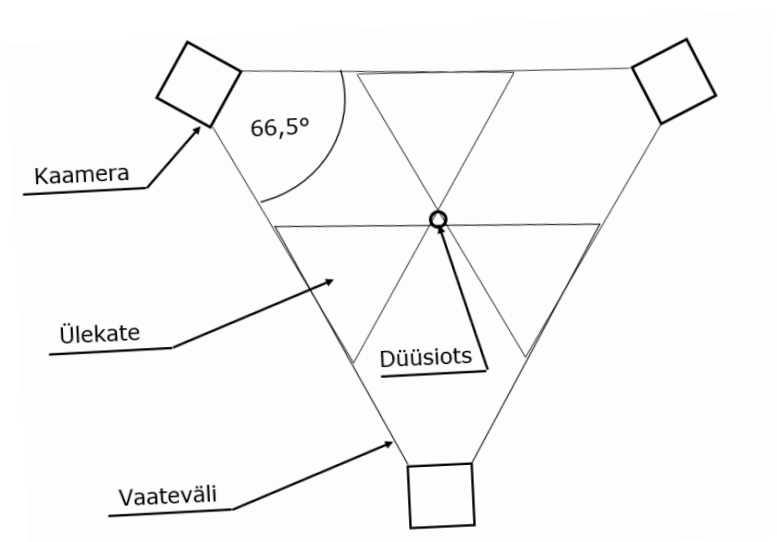
Joonis 22. Visuaalse tagasisidega tagasisideahela vaated 0,8 mm paksusele ladestatud materjali rajale

Raja laius mõõdeti kruvikuga üle ning kolme mõõtmise keskmiseks tulemuseks saadi 0,82 mm. See tähendab, et töökäigus valminud masinnägemise algoritm ei ole võimeline mõõtma kolmemõõtmelisi objekte täpselt. See võib tuleneda halvast kaamera asetusest. Kaamera vaateväli peaks olema võimalikult püstises asendis, et vähendada vaatenurgast tekkivaid moonutusi. Kõige optimaalsem vaatenurk oleks otse ülevalt-alla, aga sellise lahenduse muudab raskeks antud printeri sulatuskambri geometria. Üheks võimaluseks oleks ka proovida kolme kaameraga või enama kaameraga süsteemi. Sellisel juhul oleksid kaamerad omavahel $\leq 120^\circ$ nurga all. Kolme või enam kaameraga süsteemis tekiks kaamerate vaateväljadest ka ülekate (vt joonis 18), kus kaks kaamerat jäädvustavad ühte punkti kahest eri kohast. Sellisel juhul oleks võimalik kalibreeritud kaameratega mõõta ladestatud rada mõlemalt küljelt. Selline lähenemine vajaks peenemat masinnägemise algoritmi, aga võimaldaks mõõta materjali paksust kahelt küljelt.

5. Analüüs

5.1 Kaamerate süsteem

Antud teemat edasi uurides tuleks keskenduda kõige optimaalsema kaamerate asendi leidmisele. Võimalusel tuleks muuta ka sulatuskambri geomeetriat, et kaamerad pääseksid ligi optimaalsematele vaatekohtadele. Kasutusele tuleks võtta ka väiksemad kaamera moodulid, mis ei rööviks nõnda palju ruumi. Võimalusel tuleks disainida kaamerate erilahendus, mis sisaldab ka mikrokontrollerit, mis edastaks kõigi kolme kaamera kaadreid. Kaaluda tuleks ka infrapunakaamerate kasutust. Selline lahendus muudaks süsteemi lihtsamaks ja juhul, kui kasutada USB protokollit kaadrite edastuseks, suudetakse tagasisideahel veel kiiremaks teha.



Joonis 23. Kolme kaameraga süsteemi pealtvaate skeem.

5.2 Algoritmi optimeerimine

Valminud masinnägemise algoritm toimis suurepäraselt. Ei tekkinud probleeme erivärvi või -viimistlusega tasapindade kasutamisel. Süsteem tuli toime ka peegeldavate pindadega nagu klaas. Tasapinnalised mõõtmised olid täpsed ning mõõteviga oli sobivates piirides. Probleemiks oli algoritmi pikk arvutusaeg. Peamiselt tuleneb see python programmeerimise keele aeglasest kompileerimiskiirusest. Süsteemi edasi arendades tuleks algoritm kirjutada mõnes kiirema kompileerimiskiirusega programmeerimise keeles nagu C++, mille jaoks on OpenCV teek olemas. Algoritmi optimeerimisel oleks võimalik seda jooksutada otse kontrollerilt, kaotades arvuti

vajaduse süsteemist. Kontrollerial tagasisideahela jooksutamisel võidakas ajaliselt ka käskude andmisel, sest käsud liiguksid otse läbi USB protokollis.

5.3 Visuaalse tagasisidega tagasisideahela väärtus

Visuaalse tagasisidega süsteem on juba kasutusel (avatud süsteemina) Bambulab X1 seerial printerites. Bambulabi printerites kasutatakse visuaalset tagasisidet, et enne printimise protsessi algust, õige toitesüsteemi ettenihkekiirus leida. See parandab otseselt 3D printimise töökindlust, tagades korrektse toitesüsteemi töö. Suletud süsteemina saaks kasutada visuaalset tagasiside, kui terve printimis protsessi vältel toimivat *auto-bed leveling* süsteemi.

KOKKUVÕTE

FDM 3D printerid on viimastel aastatel teinud tohutuid hüppeid tehnoloogia arengus. Selle lipulaevaks võib pidada hetkel Bambulab X1 seeria printereid, mis oma uudsete lahendustega teised firmad pingutama on pannud. Väga suurt rõhku pannakse Bambulabi reklaamis just printeri kaamerate ja LiDAR anduri kasutusele. Bambulab X1 seeria printerid kasutavad neid andureid avatud süsteemina. See on käesolevas töös valminud süsteemi ja Bambulabi süsteemi peamine erinevus. Nimelt kasutavad X1 seeria printerid neid andureid ainult enne printimise töö alustamist. Antud töös valminud tagasisideahel töötab terve printimise protsessi vältel.

Teoreetilises osas antakse üldine ülevaade 3D printimise tehnoloogiast ning keskendutakse FFF/FDM tehnoloogiale. Tuuakse välja FDM tehnoloogial toimivate printerite valukohad ning parameetrid või nähtused, mis neid probleeme tekitavad. Samuti antakse üldine ülevaade masinnägemise protsessist ja selgitatakse, mis see tagasisideahel on. Peale mida loetletakse erinevaid juhtsüsteeme, nii avatud kui suletud, mida võib tänapäeval leida iga uuema 3D printeri küljest. Eraldi tuuakse töös välja ka teised sarnase põhimõttega projektid ning põhjused, miks antud töö neist erineb. Lisaks analüüsiti erinevaid viise visuaalse tagasiside loomiseks nagu näiteks LiDAR andurid ja infrapunakaamerad.

Arvutuste ja modelleerimise osas seletatakse ära, kuidas autor plaanis visuaalse tagasisidega tagasisideahelat kasutada ning selgitas valemitega sellise süsteemi tööpõhimõtet. Põhjendati kaamera moodulite valikut ning nende kinnitamiseks loodud klambri disainiprotsessi. Kirjeldati lahti ka kasutatud riistavara, püsivara ja tarkvara lahendusi, et tagasisideahel toimima saada.

Praktilises osas valmistati klamber, mille abil fikseeriti kaamera moodulid printeripea külge. Valmistati masinnägemise algoritmi, mida kasutati kahes katses. Esimeses katses katsetati loodud algoritmi stabiilsust ja mõõtmise täpsust. Teises katses katsetati realselt printeri juhtimist masinnägemise algoritmi abil. Töö lõpetuseks analüüsiti saavutatud tulemusi ning pakuti välja teemad, mida tuleks edasisel uurimisel arvesse võtta.

Antud töö jooksul valminud algoritmide ja teistest tarkvara või riistvara lahendustest koostatakse *open-source* projekt autori GitHubi kontol.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, „Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing Second Edition“, 2014, 2 lk.
- [2] S. Rouf, A. Malik, N. Singh, A. Raina, N. Naveed, Md I. H. Siddiqui, Mir I. U. Haq, „Additive manufacturing technologies: Industrial and medical applications, Sustainable Operations and Computers, Volume 3“, 2022, 258 lk.
- [3] Mohsen Attaran, „The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing, Volume 60, Issue 5“, 2017, 678 lk.
- [4] A. W. Hashmi, H. S. Mali, A. Meena, I. A. Khilji, M. F. Hashmi, S. N. M. Saffe „Materials Today: Proceedings, Volume 56, Part 4“, 2022, 1940 lk.
- [5] M. Jaanus, „TAGASISIDE EHK MIDA MÕÕDAME, SEDA SAAME !“, 2020 [Võrgumaterjal]. Available: <https://isc.ttu.ee/materials/martin/ISC0100/kyberelektroonika2020-7.pdf>. [Kasutatud 16 aprill 2023].
- [6] ISO/ASTM 52900:2021, „Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary“.
- [7] K.Ogata, „Modern Control Engineering Fifth Edition“, 2010, 8 lk.
- [8] J. Qin, F. Hu, Y. Liu, P. Witherell, C. C. L. Wang, D. W. Rosen, T. W. Simpson, Y. Lu, Q. Tang, „Additive Manufacturing, Volume 52“, 2022, 2 lk.
- [9] A. Boschetto, L. Bottini, F. Veniali, „Additive Manufacturing, Volume 12, Part B“, 2016, 334 lk.
- [10] B. Redwood, F. Schöffner, B. Garret, „The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications“, 2017
- [11] C. K. Chua, K. F. Leong, „ 3D Printing and Additive Manufacturing; principles and applications“, World Scientific 2015, 518 lk.

- [12] ESP32 PSRAM Timer Camera (OV3660) andmeleht, [Võrgumaterjal]. Available: https://media.distrelec.com/Web/Downloads/_t/ds/U082_eng_tds.pdf. [Kasutatud 13. aprill 2023]
- [13] 3D printeri Ender3 GitHub, [Võrgumaterjal]. Available: <https://github.com/Creality3DPrinting/Ender-3>. [Kasutatud 2. aprill 2023].
- [14] J.Howse, J.Minichino, „Learning OpenCV 4 Computer Vision with Python 3: Get to grips with tools, techniques, and algorithms for computer vision and machine learning, 3rd Edition“, 2020
- [15] R. Jain, R. Kasturi, B. G. Schunck, „MACHINE VISION“, 1995
- [16] E. R. Davies, „Computer and Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities 4th Edition“, 2012
- [17] E. R. Davies, M. Turk, „Advanced Methods and Deep Learning in Computer Vision“, 2021
- [18] R. Mesila, MAT loengute abimaterjalid, „ Tootmistehnoloogia“, 2006
- [19] 3D Printer Layer Shifting: 6 Simple Solutions, [Võrgumaterjal]. Available: <https://all3dp.com/2/layer-shifting-3d-printing-tips-tricks-to-solve-it/>. [Kasutatud 8. mai 2023]
- [20] 7 problems affecting the quality of your 3D prints, [Võrgumaterjal]. Available: https://blog.prusa3d.com/7-problems-affecting-quality-of-3d-prints_8654/. [Kasutatud 8. mai 2023]
- [21] Mantis 3D printeri kodulehekülg, [Võrgumaterjal]. Available: <https://mantis3dprinter.com/home>. [Kasutatud 8. mai 2023]
- [22] Bambulab X1 3D printerite seeria kodulehekülg, [Võrgumaterjal]. Available: <https://bambulab.com/en/x1>. [Kasutatud 8. mai 2023]
- [23] A. Vaish, S. Voigt, S. Prajapat, O. Ansari, „FEEDBACK FOR 3D-PRINTING“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.iaacblog.com/programs/feedback-3d-printing/>. [Kasutatud 8. mai 2023]
- [24] C. Heij, A. C. M. Ran, F. van Schagen, „Introduction to Mathematical Systems Theory: Discrete Time Linear Systems, Control and Identification, Second Edition“, 2021, 11 lk

- [25] B. Akhound, M. Nabipour, F. Hajami, S. S. Band, A. Mosavi, „Calculating Filament Feed in the Fused Deposition Modeling Process to Correctly Print Continuous Fiber Composites in Curved Paths“, 2020
- [26] Pillow teegi dokumentatsioon, [Võrgumaterjal]. Available: <https://pillow.readthedocs.io/en/stable/>. [Kasutatud 8. mai 2023]

LISAD

LISA 1

Tabel 4. Kihltisandustehnoloogia eelised tavapäraste tootmisvõtete ees

Valdkond	Kihltisandustehnoloogia eelis
Prototüübi valmistamine	Vähendab toote turule jõudmise aega Vähendab toote arendamise kulutusi Parendab ettevõtete efektiivsust ja konkurentsivõimet innovatsioonis
Varuosade tootmine	Vähendab parandusele kuluvat aega Vähendab parandusele kuluvaid kulutusi Varuosi pole vaja hoiustada Võimaldab arendada parandatava detaili disaini Võimaldab toota varuosi, mida enam ei toodeta
Väikestes kogustes tootmine	Väikse partii tootmine on kuluefektiivne Ei nõua investeringut eritööriistadesse
Kliendi kohandatud detailid	Võimaldab kuluefektiivselt muuta tootmist kliendi erinõuete järgi Kiire erilahenduste tootmine Disaini muudatused ei ole kulukad
Komplekssed detailid	Võimaldab toota äärmiselt kompleksseid kujundeid kuluefektiivselt
Komponentide tootmine	Lühendab tarneahelat Vähendab kulutusi toote väljatöötamisel Võimaldab disainiga vähendada vajalike detailide hulka
Kohapeal tootmine	Detaile pole vaja hoiustada ega transportida Vähendab materjali puudusest tekkivaid seisakuid Vähendab paranduskulutusi drastiliselt

LISA 2

Masinnägemise algoritmi stabiilsuse katse käigus saadud mõõtetulemused:

0.966,0.977,0.982,0.981,0.978,0.967,0.971,0.994,0.973,0.979,0.985,0.999,0.969,0.979,0.995,0.987,0.983,0.992,0.981,0.972

0.965,0.982,0.971,0.972,0.978,0.967,0.97,0.993,0.959,0.98,0.984,0.994,0.977,0.972,0.993,0.987,0.99,0.988,0.981,0.98

0.969,0.982,0.982,0.972,0.978,0.967,0.971,0.993,0.961,0.991,0.989,0.99,0.993,0.972,0.998,0.987,0.993,0.982,0.976,0.972

0.971,0.973,0.979,0.964,0.98,0.961,0.975,0.993,0.954,0.991,0.989,0.978,0.993,0.972,0.993,0.992,0.996,0.99,0.98,0.984

0.973,0.982,0.979,0.963,0.974,0.961,0.975,0.993,0.954,0.991,0.991,0.989,0.993,0.979,0.985,0.987,0.996,0.983,0.98,0.981

0.972,0.982,0.985,0.963,0.974,0.94,0.981,0.988,0.952,0.987,0.989,0.989,0.986,0.984,0.993,0.982,0.994,0.978,0.98,0.98

0.98,0.978,0.982,0.963,0.974,0.913,0.986,0.988,0.952,0.987,0.989,0.982,0.984,0.979,0.993,0.987,0.998,0.983,0.981,0.981

0.988,0.987,0.982,0.963,0.974,0.918,0.997,0.988,0.961,0.978,0.989,0.977,0.979,0.983,0.987,0.981,0.994,0.98,0.975,0.981

0.98,0.987,0.98,0.963,0.974,0.947,0.993,0.981,0.968,0.978,0.989,0.977,0.983,0.987,0.986,0.983,0.99,0.982,0.975,0.969

0.98,0.989,0.98,0.95,0.971,0.947,0.998,0.973,0.979,0.987,0.991,0.97,0.979,0.996,0.989,0.989,0.992,0.973,0.979,0.976

0.98,0.989,0.979,0.95,0.971,0.97,0.998,0.973,0.968,0.986,0.994,0.977,0.979,0.991,0.987,0.99,0.992,0.973,0.974,0.962

0.978,0.989,0.981,0.968,0.967,0.97,0.994,0.981,0.979,0.986,0.994,0.97,0.984,0.995,0.987,0.99,0.996,0.976,0.974,0.974