



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Kreivalinijinės adityvios gamybos sistemos, naudojant
pramoninę roboto ranką, projektavimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Liudvikas Milkintas

Projekto autorius

Dr. Valdas Grigaliūnas

Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Kreivalinijinės adityvios gamybos sistemos, naudojant pramoninę roboto ranką, projektavimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos 6211EX014

Liudvikas Milkintas

Projekto autorius

Dr. Valdas Grigaliūnas

Vadovas

lekt. Gintautas Narvydas

Konsultantas

Doc. dr. Gintaras Dervinis

Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Liudvikas Milkintas

Kreivalinijinės adityvios gamybos sistemos, naudojant pramoninę roboto ranką, projektavimas ir tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Liudvikas Milkintas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Milkintas, Liudvikas. Kreivalinijinės adityvios gamybos sistemos, naudojant pramoninę roboto ranką, projektavimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas dr. Valdas Grigaliūnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Elektronikos inžinerija, Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: 3D spausdintuvas, adityvi gamyba, robotinė ranka, daugiaplokštumis spausdinimas, kreivalinijinis spausdinimas.

Kaunas, 2022. 56 p.

Santrauka

Baigiamajame magistro projekte suprojektuota ir tirta adityvi gamybos sistema, naudojant pramoninę roboto ranką ir galinti spausdinti ne tik horizontalioje plokštumoje, kaip įprastiniai rinkoje esantys spausdintuvai, tačiau ir tam tikru kampu pasuktoje plokštumoje, o taip pat ir ant kreivalinijinių paviršių.

Darbo metu apžvelgtos adityvios gamybos technologijos, pramoniniai manipulatoriai, bei naujausios panaudojimo sritys pritaikant robotines rankas 3D spausdinime.

Praktinėje dalyje pagal sudaryta sistemos koncepciją parinkti mechanikos ir elektronikos komponentai, atsižvelgiant į juos suprojektuota adityvios gamybos sistema. Sistema realizuota taikant pramoninę roboto ranką ABB IRB 120 ir kitus 3D spausdintuvo komponentus.

Sistemos tyrimas pradėtas nuo spausdinimo vienoje plokštumoje, parinkus tinkamus spausdinimo parametrus pereita prie daugiaplokštuminio ir galiausiai prie kreivalinijinio spausdinimo. Visi atspausdinti bandiniai palyginti su komercinio 3D spausdintuvo PRUSA MK3S bandiniais, ištirti jų geometriniai parametrai ir paviršiaus kokybė.

Milkintas, Liudvikas. The design and investigation of a curvilinear additive production system based on industrial robot arm. Master's Final Degree Project / supervisor dr. Valdas Grigaliūnas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering, Engineering Sciences.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, robotic arm, multi-plane printing, curvilinear printing.

Kaunas, 2022. 56 p.

Summary

In the final master's project, an additive production system is designed and researched using an industrial robot arm and capable of printing not only in a horizontal plane like conventional printers on the market, but also in a plane rotated at an angle, as well as on curvilinear surfaces.

During the work, additive production technologies, industrial manipulators, and the latest areas of application in the application of robotic hands in 3D printing are reviewed.

In the practical part, the mechanical and electronic components are selected according to the system concept, and the additive production system is designed according to them. The system was implemented using the industrial robot arm ABB IRB 120 and other 3D printer components.

The study of the system started with printing in a single plane, moving to multi-plane printing and finally to curvilinear printing after selecting the appropriate printing settings. All printed samples were compared with the commercial 3D printer PRUSA MK3S samples, their geometrical parameters and surface quality were examined.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Literatūros apžvalga ir analizė.....	12
1.1. Adityvios gamybos technologijos	12
1.2. Pramoninių robotinių rankų apžvalga	17
1.3. Robotinių rankų pritaikymo 3D spausdinimui, technologijų apžvalga	19
1.4. Mokslinės literatūros analizė	21
2. Praktinė dalis	28
2.1. Sistemos koncepcija	28
2.2. Elektronikos komponentų parinkimas	28
2.3. Mechaninės dalies projektavimas	32
2.4. Realizuotos sistemos valdymas	34
2.5. Realizuota 3d spausdinimo sistema.....	37
3. Tyrimas ir tyrimo metodika	38
3.1. Tyrimo objektas.....	38
3.2. Tyrimo metu naudojama įranga.....	38
3.2.1. Programinė įranga	38
3.2.2. Tiriamoji įranga	41
3.3. Spausdinimo programos paruošimas	43
3.4. Tyrimu eiga	44
4. Eksperimentinių tyrimų rezultatai	47
4.1. Ekstruderio ir spausdinimo pagrindo temperatūros valdymo rezultatai.....	47
4.2. Suprojektuotos sistemos ir 3D spausdintuvo, atspausdintų bandinių palyginimas	49
4.3. Atspausdintų bandinių sluoksnių aukščio palyginimas.....	49
4.4. Tiesaus paviršiaus nelygumų, susidariusių dėl laiptelių, išlyginimas	50
4.5. Išlenkto paviršiaus nelygumų, susidariusių dėl laiptelių, išlyginimas	51
4.6. 3D spausdinimas ant išlenktų paviršių	53
Išvados	54
Literatūros sąrašas	55
Priedai.....	57
1 priedas. Sistemai naudojamos maisto 3D spausdintuvo elektrinė schema.....	57
2 priedas. Valdymo programa	59

Lentelių sąrašas

1 lentelė. 3D spausdinimo technologijų palyginimas.....	16
2 lentelė. Pramoninių robotinių rankų parametrų palyginimas	18
3 lentelė. Žingsninių variklių valdiklių parametrai	29
4 lentelė. Temperatūros jutiklių parametrų palyginimas	30
5 lentelė. 3D spausdintuvų valdymo plokščių parametrų palyginimas	31
6 lentelė. Optinio mikroskopo techninės charakteristikos.....	42
7 lentelė. Kameros Nikon DS-Ri2 techninės charakteristikos	42
8 lentelė. 3D spausdintuvo Prusa MK3S 3D techninės charakteristikos.....	43
9 lentelė. „3D benchy“ bandinių geometrinių matmenų palyginimas.....	49
10 lentelė. Kubo 10x10x10 mm bandinių geometrinių matmenų palyginimas.....	50
11 lentelė. Trapecijos bandinių geometrinių matmenų palyginimas.....	51
12 lentelė. Objekto su išlenktu paviršiumi bandinių geometrinių matmenų palyginimas.....	52

Paveikslų sąrašas

1 pav. Adityvios gamybos proceso etapai [2].....	12
2 pav. Ekstruzinio lydytojo nusodinimo modeliavimo principinė schema [3].....	13
3 pav. Laminuotų objektų gamybos principinė schema [3].....	13
4 pav. Stereolitografijos principinė schema [4].....	14
5 pav. „Polyjet“ principinė schema [7].....	15
6 pav. Selektivaus kietinimo lazeriu principinė schema [3].....	15
7 pav. Tinklelio formavimo lazeriu principinė schema [8].....	16
8 pav. Pramoniniai robotai: a) Mecademic500 R3 [11]; b) ABB IRB 120-3/0.6 [12].....	17
9 pav. Pramoniniai robotai: a) Fanuc M-20iD-25 [13]; b) ABB IRB1600ID-4/1.5 [14]; ABB IRB 6640-185/2.8 [15].....	18
10 pav. Korinė gamyba, Branch Technology: a) gamybos sistema Branch Technology kompanijos laboratorijoje [18]; b) korys iš arti [18]; c) pastato fasado segmento sandaros schema: (1) korys; (2) korio užpildas; (3) tinkas arba betonas su stiklo pluoštu; (4) tvirtinimo elementai [16].....	19
11 pav. MX3D: a) 3D atspausdintas tiltas Amsterdame [20]; b) 8 ašių adityvios gamybos sistema M1 [19].	20
12 pav. Aectual: a) gamybos sistema [21]; b) atspausdintų grindų segmentas [22]; c) atspausdintos akustinės sienelės [22].....	20
13 pav. Arevo: a) AQUA adityvios gamybos sistema [23]; b) gaminami dviračių korpusai [23]; c) dronų korpusai [23].	21
14 pav. Relativity space: a) Stargate sistema [25]; b) atspausdinta raketa „terran 1“ [26].	21
15 pav. Daugiafunkcinės gamybos sistemos: a) aparatinės įrangos išdėstymas; b) ekstruderis; c) Freza; d) integruota gamybos platforma [27].....	22
16 pav. Bandinių paviršius: a) atspausdinto bandinio paviršius; b) mechaniškai apdirbtas, atspausdinto bandinio, paviršius; c) ekstruzijos būdu pagaminto strypo paviršius [27].....	23
17 pav. Tyrimo metu atliktų atvejų studijų rezultatai: 1) daugiafunkcinė gamyba su 6 laisvės laipsniais; 2) daugiafunkcinė gamyba su 3 laisvės laipsniais; 3) adityvi gamyba su 3 laisvės laipsniais [27].	23
18 pav. Daugiafunkcinės gamybos sistemos bandinys iš polorono prieš mechaninį apdirbimą (kairėje) ir po [28].....	24
19 pav. Sistemos sąrankos blokinė schema [29].	25
20 pav. Daugiaplokštuminis 3D spausdinimas [29].....	25
21 pav. „RoboFDM“ sistemos: a) spausdinimo seka; b) objekto padalinimo į atskirus segmentus seka; c) atspausdintas objektas pasukant spausdinimo platformą (kairėje) ir įprastu būdu su pagalbinėmis struktūromis (dešinėje) [30].....	26
22 pav. a) defekto užpildymas rato trajektorija; b) defekto užpildymas lygiagrečia trajektorija; c) pelės modelis be užpildyto defekto; d) pelės modelis su užpildytu defektu [31].....	27
23 pav. Projektuojamos adityvios gamybos sistemos esminiai komponentai.....	28
24 pav. Komunikacijos principinė schema.....	30
25 pav. Projektuojamos sistemos su parinktais komponentais principinė schema.....	32
26 pav. Adityvios gamybos įrankio: a) vaizdas iš šono; b) izometrinis vaizdas.....	33
27 pav. Roboto darbo zona be įrankių.....	33
28 pav. Įrankių keitimo įtaiso skersinis vaizdas a) iš priekio, b) izometrinis vaizdas.....	34
29 pav. a) Roboto darbo aplinka; b) Roboto darbo zona; c) Robotas su adityvios gamybos įrankiu ir atspausdintu bandiniu.....	34

30 pav. Valdymo algoritmas.....	36
31 pav. Plastiko padavimo greičio nuo CREVIS analoginio signalo priklausomybė	37
32 pav. Realizuotos sistemos: a) vaizdas iš priekio; b) vaizdas iš šono; c) elektronika.....	37
33 pav. <i>Solidworks 2021</i> programos langas	38
34 pav. <i>RobotStudio 2021.3</i> programos langas	39
35 pav. <i>RoboDK v5.2.2</i> programos langas	40
36 pav. <i>Slic3r</i> programos langas.....	40
37 pav. <i>Prusa Slic3r</i> programos langas	41
38 pav. Optinis mikroskopas Nikon LV100ND [32].	41
39 pav. Kamera Nikon DS-Ri2 [33].	42
40 pav. Prusa MK3S 3D spausdintuvas	43
41 pav. Tyrimų eiga.....	45
42 pav. a) „3D benchy“; b) kubas; c) trapecija; d) bandinys su išlenktu paviršiumi; e) KTU logotipas ant išlenkto paviršiaus	46
43 pav. Ekstruderio temperatūros išėjimo signalai.....	48
44 pav. spausdinimo pagrindo temperatūros išėjimo signalas a) nuo pradinės būsenos; b) svyravimai	48
45 pav. Atspausdinti „3D benchy“ bandiniai <i>Prusa MK3S</i> (kairėje) ir realizuota sistema (dešinėje)	49
46 pav. Atspausdinti kubo 10x10x10 mm bandiniai <i>Prusa MK3S</i> (kairėje) ir realizuota sistema (dešinėje)	50
47 pav. Atspausdintų kubo 10x10x10 mm bandinių vaizdas pro optinį mikroskopą <i>Prusa MK3S</i> (kairėje) ir realizuota sistema (dešinėje).....	50
48 pav. Atspausdintos trapecijos bandiniai <i>Prusa MK3S</i> (kairėje) ir realizuota sistema (dešinėje) .	51
49 pav. Atspausdintų trapecijų bandinių vaizdas pro optinį mikroskopą <i>Prusa MK3S</i> (kairėje) ir realizuota sistema (dešinėje).....	51
50 pav. Atspausdinto objekto su išlenktu paviršiumi bandiniai <i>Prusa MK3S</i> (kairėje) ir realizuota sistema (dešinėje)	52
51 pav. Atspausdintų objektų su išlenktu paviršiumi bandinių vaizdas pro optinį mikroskopą <i>Prusa MK3S</i> (kairėje) ir realizuota sistema (dešinėje).....	52
52 pav. 3D spausdinimo ant išlenktų paviršiu bandinys	53

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

Vdc - (angl. *Volts direct current*) nuolatinės srovės įtampa

AG – (angl. additive manufacturing) adityvi gamyba

CAD – (angl. computer aided-design) kompiuterizuota projektavimo sistema

FDM – (angl. fused deposition modeling) ydžios masės formavimas

LOM – (angl. *Laminated object manufacturing*) laminuotų objektų gamyba

SLA - (angl. *Stereolithography*, SLA) stereolitografija

SLS - (angl. *Selective laser sintering*) selektyvus kietinimas lazeriu

LENS - (angl. *Laser engineered net shaping*) tinklelio formavimo lazeriu

ŽV – (angl. *Stepper motor*) žingsninis variklis

Įvadas

Pramonėje įvyko keletas revoliucijų, pirmoji sukelta išradus garo mašiną, antroji surinkimo linijas ir taikant elektros energiją, o trečioji prasidėjo nuo kompiuterių ir interneto. XXI amžiaus pradžioje prasidėjo ketvirtoji pramonės revoliucija, dar kitaip žinoma „pramonė 4.0“. Ketvirtoji revoliucija nuo pirmųjų trijų skiriasi, pirmiausia, savo greičiu, eksponentiniu plėtojimu, taip pat savo plačia įvairove, apimančia tiek ekonomikos, tiek verslo ir visuomenės pokyčius. Šiai revoliucijai priskiriamos tokios technologijos kaip: dirbtinis intelektas, adityvi gamyba, daiktų internetas, robotika, mechatronika ir pan. [1]. Pagal „Lietuvos pramonės skaitmeninimo kelrodį 2020-2030“ adityvi gamyba, robotika ir mechatronika yra vienos iš technologijų, ateityje darysiančios didžiausią įtaką Lietuvos pramonei.

Adityvi gamyba (angl. *additive manufacturing*, trumpinama AG) pagal ISO/ASTM 52900 standartą apibrėžiama kaip medžiagos sujungimo procesas, kurio metu pagaminama sumodeliuota trimatė detalė, įprastai sluoksnis po sluoksnio. Dažnu atveju AG vyksta 3D spausdinimo technologijos pagrindu, todėl įprastai šie terminai tapatinami. Pirmasis komercinis 3D spausdintuvas, paremtas stereolitografijos technologija, sukurtas 1984 m. C. Hull'o. Nuo to laiko atsirado daugybė naujų spausdinimo technologijų, spausdinamų medžiagų, pritaikymo sričių. Šiuo metu 3D spausdinimas plačiai taikomas inžinerijoje, medicinoje, odontologijoje, statybų sektoriuje ir daugybėje kitų sričių. Šios technologijos spartų paplitimą lėmė galimybė spausdinti itin sudėtingos geometrijos objektus, kurių kitais būdais pagaminti neįmanoma, taip pat 3D spausdinimas pranašesnis vienetinėje ir mažaserijinėje gamyboje. Tačiau dėl spausdinimo sluoksniais detalės gaunamos anizotropiškos, taip pat dažnai reikalinga spausdinti pagalbines struktūras, kurios ne tik pailgina gamybos laiką, bet ir padidina gamybinių atliekų kiekį, bei pakenkia paviršiaus kokybei. Nors daugumą 3D spausdintuvų įprasta laikyti 3D spausdinimo įrengimais, kadangi atspausdinami trimačiai objektai, tačiau dėl sluoksniavimo, kurio metu objektas padalinamas į lygiagrečios plokštumos, įprasti spausdintuvai iš tiesų turėtų būti vadinami 2,5D. Kreivalinijinio spausdinimo sistema galėtų išvengti pagalbinių struktūrų spausdinimo, taip pat tokia sistema būtų tikras 3D spausdintuvas. Todėl buvo išsikelta tokia sistema suprojektuoti, realizuoti ir ištirti. Tam buvo išsikeltas tikslas ir uždaviniai:

Tikslas – realizuoti ir ištirti kreivalinijinės adityvios gamybos sistemą, pritaikant pramoninę roboto ranką. **Uždaviniai:**

- Parinkti mechanikos ir elektronikos komponentus ir suprojektuoti adityvios gamybos sistemą;
- Realizuoti suprojektuotą sistemą;
- Atspausdinti bandinį vienoje plokštumoje ir palyginti su kitų 3D spausdintuvų bandiniais;
- Išbandyti sistemą spausdinant daugiaplokštuminiu ir kreivalinijiniu metodu;
- Ištirti bandinių geometrinius parametrus ir įvertinti paviršiaus kokybę.

1. Literatūros apžvalga ir analizė

1.1. Adityvios gamybos technologijos

Adityvi gamyba, taip pat žinoma kaip 3D spauda arba 3D spausdinimas, yra procesas, kurio metu naudojant kompiuterizuotos projektavimo sistemos (angl. *computer-aided design*, CAD) failą, pagaminami įvairios geometrijos trimačiai objektai. Procesą sudaro keletas etapų (žr. 1 pav.). Pirmiausia, naudojantis CAD programine įranga, suprojektuojamas trimatis objektas. Projektavimui gali būti naudojamos įvairios programos, tačiau vienos iš populiariausių, kurios naudojamos tiek inžinerinėse kompanijose, tiek mokslo įstaigose, yra *Dassault Systemes* kompanijos produktas *SolidWorks* bei *Autodesk* kompanijos produktai, tokie kaip *Inventor* ir *Fusion 360*. Suprojektuotas objektas išsaugomas STL arba 3MF formatais, nors 3MF yra pranašesnis formatas, tačiau dažniau naudojamas STL. Išsaugant objektą bet kuriuo iš šių formatų vykdoma trianguliacija, kurios metu objektas konvertuojamas į susietą trikampių tinklą. Tuomet failas įkeliamas į susluoksniavimo programinę įrangą, viena iš populiariausių programų yra *Ultimaker* kompanijai priklausanti programa *Cura*. Susluoksniavimo programoje objektas yra susluoksniuojamas į pasirinkto storio sluoksnius. Taip pat nustatomi įvairūs spausdinimo parametrai kaip: temperatūros, greičiai, pagreičiai ir daugybė kitų parametru. Kuomet visi parametrai pasirinkti programa paruošia valdymo kodą, kuris vadinamas G kodas, jį sudaro koordinatės ir valdymo funkcijos. Tuomet G kodas keliamas į 3D spausdintuvą, kuris pagamina suprojektuotą trimatį objektą.

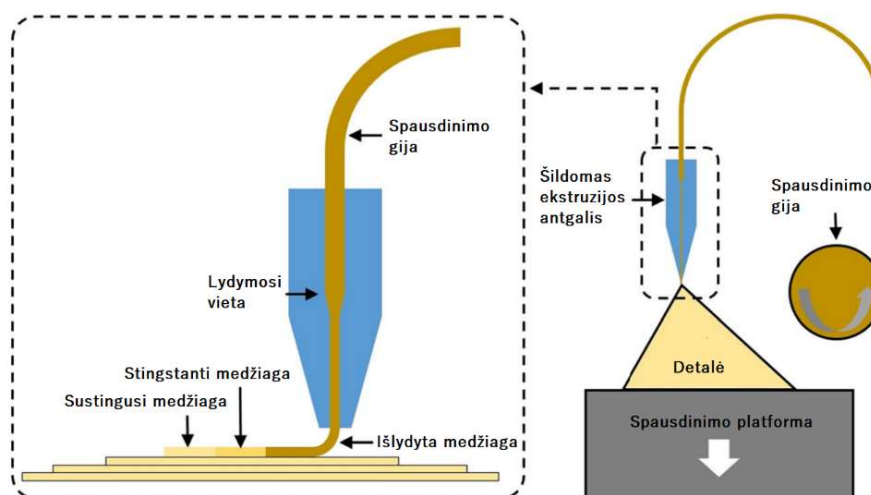


1 pav. Adityvios gamybos proceso etapai [2].

Platus AG pritaikomumas ir lankstumas lyginant su kitomis gamybos technologijomis, skatino mokslininkus ir inžinierius toliau vystyti ir plėsti šią technologiją. Nuo pirmosios SLA technologijos 1980, atsirado gausybė naujų technologijų. Kiekviena iš šių skiriasi savo galimybėmis ir pritaikymo sritimis, dažniausia AG skaidomos į kategorijas pagal naudojamos medžiagos tipą, kaip kieto, skysto, miltelių pagrindo ar hibridinio.

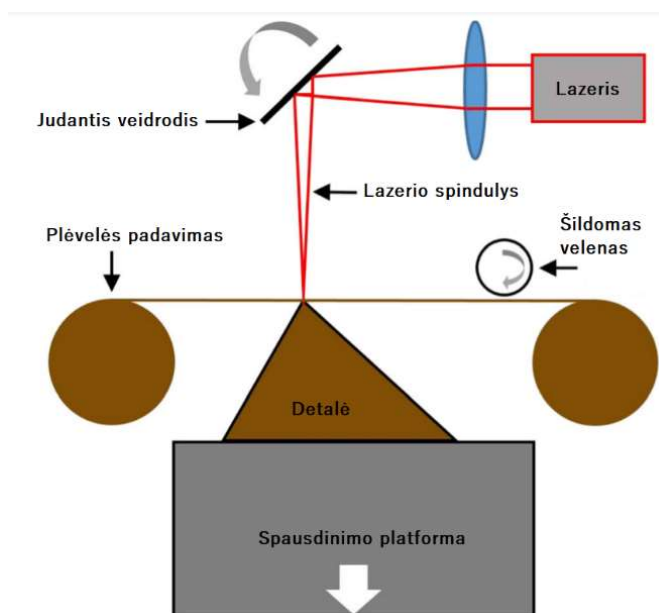
Adityvios gamybos technologijos, paremtos kieto pagrindo medžiaga

Lydžios masės formavimas (angl. *Fused deposition modelling*, FDM) viena iš populiariausių technologijų AG industrijoje. FDM gamybos metu naudojama judantis antgalis, kuris sluoksniais nusodina išlydytą termoplastiką. Plastiką antgalyje įkaitinimas iki kelių laipsnių virš plastiko lydymosi temperatūros, tam, kad kuo greičiau sukietėtų nusodinta medžiaga, tačiau taip pat susilydytų su prieš tai nusodintu plastiką. Tokios sistemos įprastai gali turėti ir kelis antgalius, kurie gali būti naudojami skirtingoms medžiagoms nusodinti. Ši technologija labai paplitusi, kadangi naudoja pigias medžiagas, taip pat dauguma jų yra nekenksmingos ir bekvapės. Didelis spalvų ir medžiagų pasirinkimas, kaip akrilnitrilo butadieno stirenas ABS, Polietileno tereftalato glikolis PETG, Polilakto rūgštis PLA, taip pat elastomerai ir kiti termoplastikai. Dėl žemų medžiagų ir įrangos kainų FDM labai paplito tarp mėgėjų. Tačiau pagamintų objektų tikslumas ir paviršiaus kokybė palyginus su miltelių pagrindo AG technologijomis yra ganėtinai prasta [2], [3].



2 pav. Ekstruzinio lydytojo nusodinimo modeliavimo principinė schema [3].

Laminuotų objektų gamyba (angl. *Laminated object manufacturing*, LOM) – gamybos metu naudojamas specialus popierius, kurio viena pusė padengta temperatūrai jautria lipnia medžiaga. Popierius tiekiamas iš rulono apkloja prieš tai buvusį sluoksnį ir sulipdomi specialiu šildomu velenu, kuris aktyvuoja ant popieriaus esančius klijus. Naudojant CO2 lazerį išpjaunami konturai, taip, kad lazeris neprisiskverbtų daugiau nei pro vieną sluoksnį, taip nepažeidžiant apatinių sluoksnių. Likusi medžiaga nepašalinama, tačiau supjaustoma į keturkiampius, kurie vėliau atlieka pagalbinių struktūrų funkciją. [3].

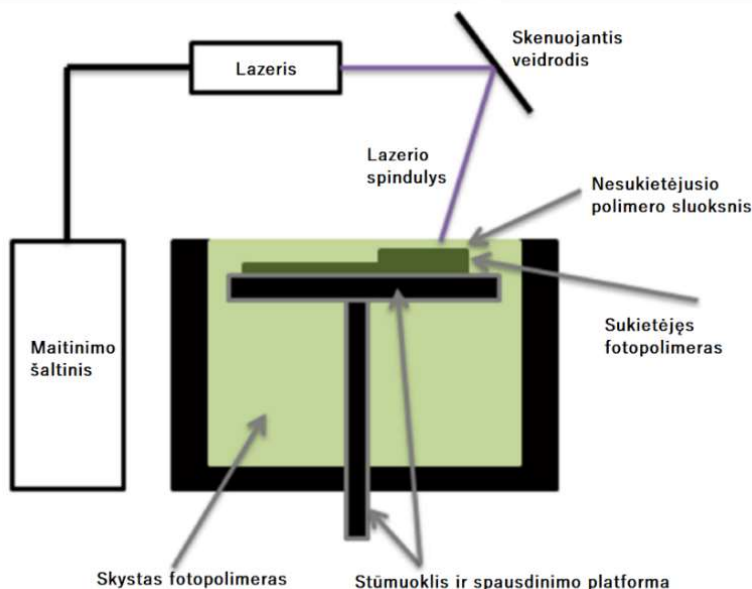


3 pav. Laminuotų objektų gamybos principinė schema [3].

Adityvios gamybos technologijos, paremtos skysto pagrindo medžiaga

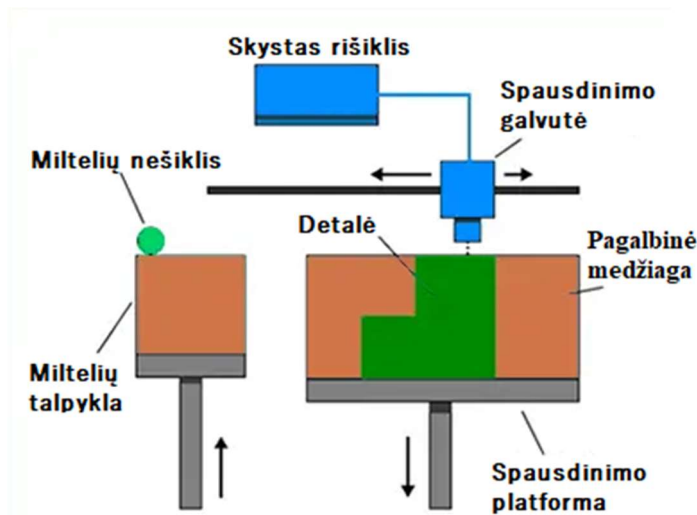
Stereolitografija (angl. *Stereolithography*, SLA) – procesas, kurio metu foto polimerizacijos principu UV spinduliais sukietinamos šviesiai jautrios monomerų pagrindo dervos. SLA sistemą pagrindė sudaro lazeris ir platforma, kuri yra panardinta dervoje. Pagal CAD modelį, dervos sluoksnio paviršius sukietinamas lazeriu. Po nuskenavimo derva sukietėja ir tai kartojama kiekviename sluoksnyje, kol gaunamas norimas objektas. Platforma ant kurios gaminamas objektas gali būti

panardinta visa arba panardinamas tik spausdinamas sluoksnis, tokio atveju spausdinamas objektas būna apverstas aukštyn kojomis. Nuo SLA technologijos sukūrimo atsirado ir naujų šios technologijos variacijų, kurios dar vadinamos kaip DLP ar MSLA. Ši technologija pasižymi labai aukštu detalių gamybos tikslumu ir geru paviršiaus apdirbimu. Tačiau spausdinimo procesas yra toksiškas, kiekvienai atspausdintai detalei reikalingi papildomi apdorojimo procesai, kurie reikalauja daug laiko ir galimas gaminio pažeidimas. [2], [3].



4 pav. Stereolitografijos principinė schema [4]

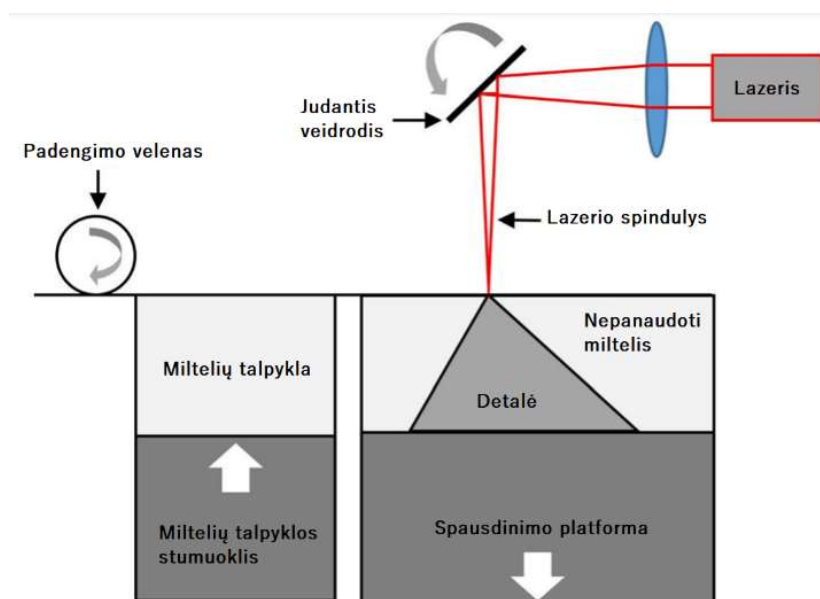
„Polyjet“ – procesas panašus į rašalinio spausdintuvo, tačiau čia, kaip ir SLA procese naudojamas foto polimeras, kuris sukietinamas UV spinduliais [5]. Pirmoji sistema buvo išleista „Objet Geometries“ kompanijos 2000 metais. Spausdinimo procesas prasideda nuo foto polimero nusodinimo pagal CAD modulį ant spausdinamo paviršiaus arba pagalbinių struktūrų (spausdinamo objekto ir pagalbinių struktūrų medžiagos skiriasi). Sistemą įprastai sudaro kelios nusodinimo galvutės, kurios foto polimerą gali nusodinti didele rezoliucija iki 16 μm . Kuomet foto polimeras nusodinamas, sluoksnis UV spinduliais sukietinamas ir procesas kartojamas kol gaunamas spausdinamas objektas. Pagaminta detalė taip pat reikalauja papildomo apdorojimo, kuomet su vandens srove pašalinamos pagalbinės struktūros. „Polyjet“ technologijos spausdinimo tikslumas gali siekti iki 0,1 mm [6].



5 pav. „Polyjet“ principinė schema [7]

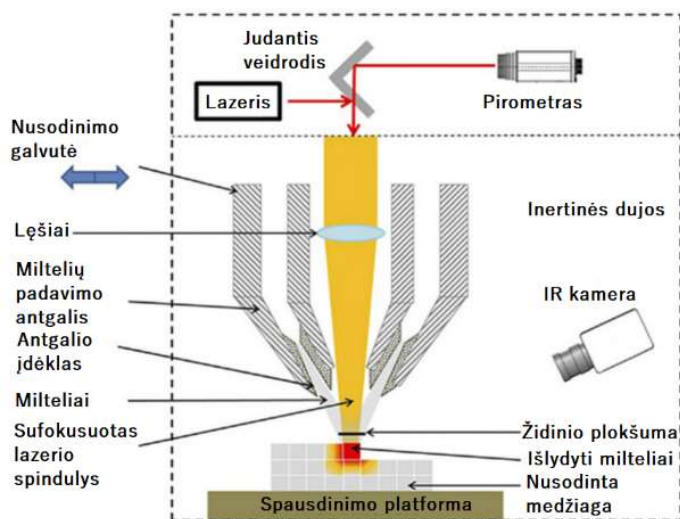
Adityvios gamybos technologijos, paremtos miltelių pagrindo medžiaga

Selektyvus kietinimas lazeriu (angl. *Selective laser sintering*, SLS) naudoja labai smulkius miltelius, kurie įkaitinami lazerio spinduliu (lazerio galia siekia nuo 7W plastikui iki 200W metalui) išlydo miltelius tiek, kad jie tarpusavyje susilydytu. Milteliai, prieš sulydant lazerio spinduliu, pašildomi iki temperatūros artimos miltelių lydymosi taškui tam, kad išvengti temperatūrinių deformacijų ir palengvinti miltelių sulydymą su žemiau esančiu sluoksniu. Kuomet milteliai sulydomi spausdinimo platforma nuleidžiama vienu sluoksniu žemiau ir ant viršaus užnešamas naujas miltelių sluoksnis. Lygiam miltelių užnešimui naudojamas besisukantis velenas arba mentelės. Iš išsilydžiusių miltelių susiformuoja detalė, o neišlydyti milteliai atlieka pagalbinių struktūrų funkciją. Neišsilydę milteliai išvalomi ir gali būti pakartotinai naudojami. Gali būti naudojamos tokios medžiagos kaip metalas, nailonas, nailono kompozitai, smėlis, vaškas. Spausdinimo procesas yra ganėtinai lėtas, tačiau pasižymi dideliu geometrijos tikslumu ir aukšta paviršiaus kokybe. SLS technologija viena iš daugiausiai naudojamų technologijų metalo spausdinime.



6 pav. Selektivaus kietinimo lazeriu principinė schema [3].

Tinklelio formavimo lazeriu (angl. *Laser engineered net shaping*, LENS) veikimo principas panašus į SLS, tačiau čia vietoje vonelės užpildytos milteliais, milteliai išpurškiami tiesiai į sufokusuotą lazerio spindulį. Lazerio spindulys substrate arba prieš tai spausdintame sluoksnyje išlydo mažą „baseiną“ (angl. *pool*), o išpurkšti milteliai sulimpa su išlydytais. Priešingai negu SLS atveju LENS gali spausdinti žymiai didesnes detales, kadangi nereikia užpildyti viso spausdintuvo tūrio milteliais. Tačiau detalių tikslumas ir paviršiaus kokybė yra žymiai mažesnė.



7 pav. Tinklelio formavimo lazeriu principinė schema [8].

1 lentelė. 3D spausdinimo technologijų palyginimas

	Kieto pagrindo		Skysto pagrindo		Miltelių pagrindo	
Technologija	FDM	LOM	SLA	Polyjet	SLS	LENS
Veikimo principas	Lydimas	Suklijavimas	Foto-polimerizacija	Foto-polimerizacija, skysčio nusodinimas	Sukepinimas	Lydimas
Energijos šaltinis	Šiluminė energija	Lazerio spindulys	UV lazeris	UV lazeris, šiluminė energija	Lazerio spindulys ir šiluminė	Lazerio spindulys
Aukščiausia skiriamoji geba	25µm	112µm	200nm	16µm	25µm	30µm
Privalumai	Pigu, didelis medžiagų pasirinkimas, galimas kelių medžiagų spausdinimas, jokių papildomų procesų.	Didelis medžiagų pasirinkimas..	Aukšta skiriamoji geba ir paviršiaus kokybė, didelis spausdinimo našumas.	Didelis spausdinimo našumas, aukšta skiriamoji geba, galimas kelių medžiagų spausdinimas.	Didelis medžiagų pasirinkimas ir mechaninis atsparumas, nereikalingos pagalbinės struktūros.	Galimas spausdinimas in-situ metodu taisant pažeistas detales.
Trūkumai	Žema skiriamoji geba ir paviršiaus kokybė.	Žema skiriamoji geba, didelis atliekų kiekis.	Didelė kaina, prastas mechaninis atsparumas.	Didelė kaina, reikalingi papildomi procesai, prastas mechaninis atsparumas.	Spausdinamos detalės gali susitraukti.	Reikalingi papildomi procesai.

1.2. Pramoninių robotinių rankų apžvalga

Dauguma kompanijų savo gamybos veiklos našumui padidinti naudoja arba ketina naudoti robotines sistemas. Kadangi tokios sistemos yra kompleksinės, tinkamiausias robotas parenkamas projektavimo proceso pradžioje. Didelė robotų įvairovė, kurie skiriasi savo charakteristikomis, leidžia išsirinkti robotą tinkamiausią projektuojamos sistemos reikalavimams.

Mecademic Meca500 R3 – vienas iš mažiausių ir tiksliausių pramoninių robotų. Kanadoje gaminamas robotas pasižymi vienu iš geriausių pakartojamumu siekiančiu iki 0.005 mm, robotas sveria tik 4,5 kg, todėl gali būti lengvai pakeliamas žmogaus. Tačiau roboto pritaikymo galimybes apriboja maža keliamoji galia 0.5 kg, pasiekiamumas – 260 mm. Gali būti montuojamas bet kokia orientacija. Palaiko TCP/IP, EtherCAT ir Ethernet/IP komunikacijos protokolus, valdiklis įmontuotas į roboto korpusą [9]. Robotas taikomas inspekcijos darbams, automatiniame produktų dėliojime (pick and place), smulkiuose surinkimo operacijose, kaina apie 15 tūkst. eurų [10].



a)



b)

8 pav. Pramoniniai robotai: a) Meca500 R3 [11]; b) ABB IRB 120-3/0.6 [12].

ABB IRB 120-3/0.6 – kaip ir Meca500 vienas iš mažiausių ir tiksliausių pramoninių robotų. Roboto pozicijos pakartojamumas 0.01 mm, svoris – 25 kg. Pasiekiamumas dvigubai didesnis negu Meca500 robotas, siekiantis 580 mm, o keliamoji galia 3 kg. IRB 120 gali būti montuojamas bet kokia orientacija. Roboto valdiklis IRC5 neintegruotas į roboto korpusą. Palaikomi komunikacijos protokolai priklauso nuo valdiklyje įdiegtų adapterių, gali būti tokie protokolai kaip: DeviceNet, PROFIBUS, Ethernet/IP, PROFINET, RS232 [12].

Fanuc M-20iD-25 – Japonijoje įsikūrusios, vienos iš didžiausių pasaulyje, robotų kompanijos Fanuc robotas. Tai vidutinio dydžio klasės robotas, kurio pasiekiamumas 1831 mm, o pozicijos pakartojamumas 0.02 mm. Keliamoji galia 25 kg, svoris 250 kg. Roboto valdiklis R-30iB Plus palaiko DeviceNet, Profibus, Ethernet/IP, Interbus, CC-Link, Profinet ir FL-Net komunikacijos protokolus [13].

ABB IRB1600ID-4/1.5 – taip pat vidutinės klasės dydžio pramoninis robotas. Robotas pasižymi ganėtinai neblogu pozicijos pakartojamumu 0.02 mm, tačiau jo linijinio kelio tikslumas 1.98 mm, todėl tai labai apriboja jo pritaikymo sritis. Pasiekiamumas 1500 mm, o svoris 250 kg. Taip pat robotas pasižymi ganėtinai maža keliamąją galia siekiančia tik 4 kg. Taikomas elektros išlydžio lanku

ir taškiniame suvirinime, 3D spausdinime, inspekcijoje. Roboto valdiklis toks pats, kaip ir ABB IRB 120-3/0.6 roboto IRC5 [14].



9 pav. Pramoniniai robotai: a) Fanuc M-20iD-25 [13]; b) ABB IRB1600ID-4/1.5 [14]; ABB IRB 6640-185/2.8 [15].

ABB IRB 6640-185/2.8 – vienas iš didžiausių pramoninių robotų, kurio pasiekiamumas siekia net 2800 mm, pozicijos pakartojamumas 0.05 mm. Keliamoji galia 185 kg, sveria 1320 kg. Robotas gali būti taikomas labai plačiai, tiek mechaniniame apdirbime, tiek paletizavime ir kitose srityse.

2 lentelė. Pramoninių robotinių rankų parametų palyginimas

	Meca500 R3	ABB IRB 120-3/0.6	M-20iD-25	IRB1600ID-4/1.5	ABB IRB 6640-185/2.8
Pasiekiamumas, mm	260	580	1831	150	2800
Keliamoji galia, kg	0.5	3	25	4	185
Pozicijos pakartojamumas, mm	0.005	0.01	0.02	0.02	0.05
Svoris, kg	4.5	25	250	250	1320
Komunikacijos	TCP/IP, EtherCAT, Ethernet/IP	DeviceNet, PROFIBUS, Ethernet/IP, PROFINET, RS232	DeviceNet, Profibus, Ethernet/IP, Interbus, CC-Link, Profinet ir FL-Net	DeviceNet, PROFIBUS, Ethernet/IP, PROFINET, RS232	DeviceNet, PROFIBUS, Ethernet/IP, PROFINET, RS232
1, 2, 3, 4, 5 ir 6 ašies pasisukimo kampai, °	-175 iki +175 -70 iki +90 -135 iki +70 -170 iki +170 -115 iki +115 -100 iki +100	-165 iki +165 -110 iki +110 -110 iki +70 -160 iki +160 -120 iki +120 -400 iki +400	-170 iki +170 -90 iki +160 -95 iki +180 -200 iki +190 -140 iki +140 -270 iki +270	-180 iki +180 -90 iki +150 -238 iki +79 -155 iki +155 -90 iki +135 -200 iki +200	-170 iki +170 -65 iki +85 -180 iki +70 -300 iki +300 -120 iki +120 -360 iki +360
1, 2, 3, 4, 5 ir 6 ašies pasisukimo greičiai, °/s	150 150 180 300 300 500	250 250 250 320 320 420	210 210 265 420 420 720	180 180 180 320 380 460	100 90 90 170 120 190

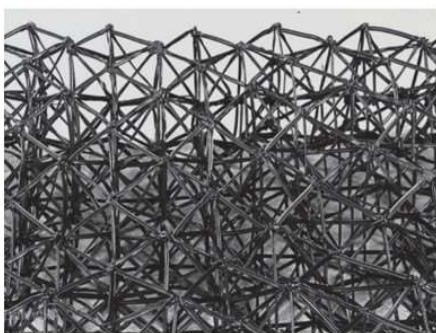
1.3. Robotinių rankų pritaikymo 3D spausdinimui, technologijų apžvalga

Nors moksliniuose straipsniuose pirmosios adityvios gamybos sistemos, taikant pramoninius robotus, pasirodė prieš maždaug 10 metų. Kompanijos iš įvairių pasaulio šalių, atrado tokių sistemų privalumus ir pritaikymo sritis tik pastaraisiais metais. Keletas tokių sistemų jau pilnai komercializuotos, kitos dar tik bandymų stadijose. Šiuo metu daugiausia tokios sistemos taikomos statybos srityje, tačiau taip pat bandoma pritaikyti ir kosmoso pramonėje.

Branch technology – 2014 metais Jungtinėse Amerikos Valstijose įsikūrusi kompanija, kuria sprendimus statybos sektoriui. Kompanija daugiausia gamina pastatų fasadų segmentus, kurie sudaryti iš 3D spausdinto korio ir užpildo. Korys spausdinamas iš ABS plastiko ir anglies pluošto, taikant kompanijos patentuotą technologiją „korinė gamyba“ (Cellular Fabrication, C-FAB) [16]. „Branch Technology“ naudojamas tetraedrų formos korio struktūros, kurios gali prisitaikyti prie įvairių geometrinių sąlygų [17]. Spausdinimui naudojami KUKA kompanijos robotai sumontuoti ant linijinių ašių.



a)



b)



c)

10 pav. Korinė gamyba, Branch Technology: a) gamybos sistema Branch Technology kompanijos laboratorijoje [18]; b) korys iš arti [18]; c) pastato fasado segmento sandaros schema: (1) korys; (2) korio užpildas; (3) tinkas arba betonas su stiklo pluoštu; (4) tvirtinimo elementai [16].

MX3D – 2015 metais Nyderlanduose įsikūrusi kompanija vysto metalo 3D spausdinimo technologiją. Adityvi gamyba elektros lanku (wire arc additive manufacturing, WAAM) yra panaši į FDM technologiją, tačiau čia vietoje plastiko gijos naudojama metalo viela. WAAM gamybos metu metalo viela išlydoma elektros lanku ir nusodinama. 2018 metais Amsterdame atspausdino tiltą, kuris iki šiol naudojamas. Tokios sistemos privalumas lyginant su SLS - žema spausdinamos medžiagos kaina, kuri gali būti iki 10 kartų mažesnė. Spausdinimo sistemą M1 sudaro ABB kompanijos 6 ašių robotinė ranka ir 2 ašių rotacinis stalas, Fronius GMAW/CMT suvirinimo aparatas [19].



a)



b)

11 pav. MX3D: a) 3D atspausdintas tiltas Amsterdame [20]; b) 8 ašių adityvios gamybos sistema M1 [19].

Aectual – 2017 metais Nyderlanduose įkurta kompanija vysto sistemą didelių gabaritų 3D spaudai. Gamybai taikoma lydėtų granulių gamybos (Fused Granular Fabrication, FGF) technologija. Metodas identiškas FDM, tačiau čia naudojamos granulės, kurios išstumiamos sraigto pagalba. Sistemoje naudojamas ABB robotas, kurio pasiekiamumas 3.2 m primontuotas ant 9 metrų ilgio bėgių, tai leidžia spausdinti iki 170 m³ tūrio objektus. Naudojamo ekstruderio našumas tarp 10 – 15 kg/val. Roboto ir ekstruderio valdymo sistemą sudaro ABB ir Siemens valdikliai. Kompanija daugiausia gamina dekoracijas, taip pat pirmoji pradėjo 3D spausdinimą taikyti grindims, kuomet atspausdinta struktūra, kurią sudaro tam tikras raštas, užpildoma mozaikiniu betonu [21].



a)



b)



c)

12 pav. Aectual: a) gamybos sistema [21]; b) atspausdintų grindų segmentas [22]; c) atspausdintos akustinės sienelės [22].

Arevo – 2013 Jungtinėse Amerikos valstijose įkurta kompanija. Kuriama AQUA sistema spausdina kompozitus iš anglies pluošto ir nailono, galimas spausdinimo tūris – 1000x1000x830 mm. Sistemoje naudojamas 6 ašių ABB robotas ir 2 ašių rotacinis stalas. Spausdinime naudojama tiesioginio energijos nukreipimo (Direct Energy Deposition, DED) technologija, nailonas išlydomas lazerio spinduliu, o anglies pluoštas nukreipiamas į išlydytą plastiką. Kompanija orientuojasi į dviračių korpusų spausdinimą, tačiau spausdina ir kitus kompozitinius gaminius, kaip dronų korpusai [23].



a)



b)



c)

13 pav. Arevo: a) AQUA adityvios gamybos sistema [23]; b) gaminami dviračių korpusai [23]; c) dronų korpusai [23].

Relativity – 2016 metais Jungtinėse Amerikos Valstijose įsikūrusi kompanija, siekianti spausdinti raketas. Pirmasis raketos „Terran 1“, galinčios iškelti 1250 kg svorio krovinį į žemąją Žemės orbitą, bandymas turėtų būti atliktas 2022 metų liepos mėnesį. Kompanijos tikslas sumažinti raketose naudojamų dalių skaičių iki 100 kartų, pagreitinti vienos raketos gamybos laiką iki 60 dienų ir atpiginti raketų gamybos procesą. Išvystyta gamybos sistema „Stargate“ laikoma didžiausiu 3D metalo spausdintuvu pasaulyje. „Stargate“ sistema naudoja nuo vieno iki trijų, 6 ašių, pramoninius robotus primontuotus ant vertikalų bėgelių ir rotacinę stalą [24].



a)



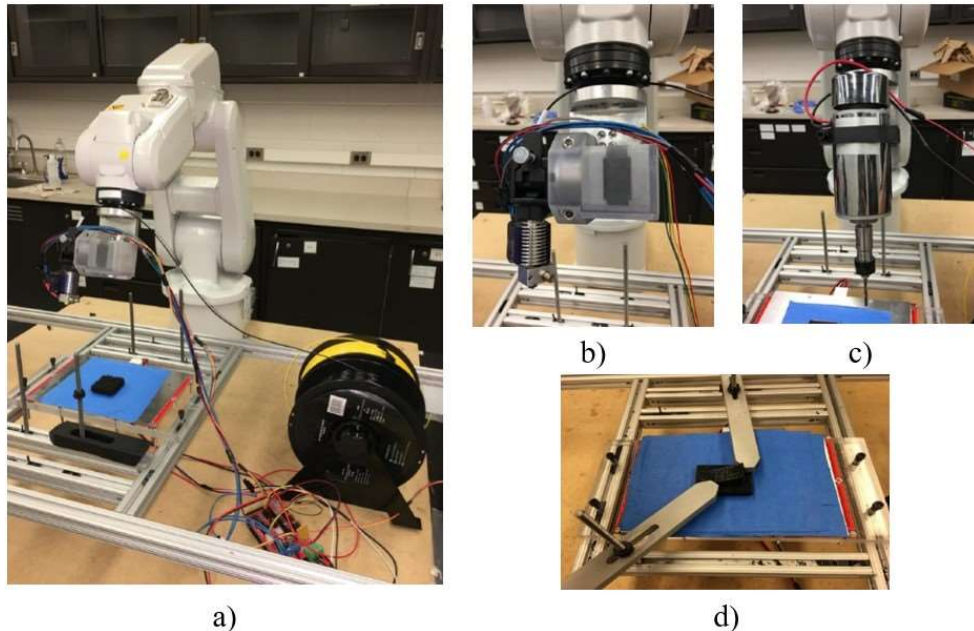
b)

14 pav. Relativity space: a) Stargate sistema [25]; b) atspausdinta raketa „terrán 1“ [26].

1.4. Mokslinės literatūros analizė

Lin Li ir kiti mokslininkai, Iliojaus universitete Čikagoje, suprojektavo daugiafunkcinę gamybos sistemą ir atliko tyrimą. Suprojektuota gamybos sistemą (žr. 15 pav.) sudaro: 6 ašių ABB kompanijos robotas IRB 120-3/0.6, 2 roboto galiniai įtaisai adityviai ir subtraktyviai gamybai (angl. *subtractive manufacturing*, trumpinama SG) ir gamybos platforma pritaikyta tiek AG, tiek SG. AG galinį įtaisą sudaro ekstruderis paremtas FDM technologija, o prie SG įtaiso primontuotas suklys. Sistemai realizuoti buvo išvystyta programinė įranga, kurios užduotys:

- Procesų planavimas;
- Roboto įtaisų ir gamybos platformos valdymas, pvz. šildomo pagrindo, ekstruderio žingsninio variklio, ventiliatoriaus.
- Roboto valdymas per roboto valdiklį.
- Komunikacija tarp roboto valdiklio ir roboto galinių įtaisų.



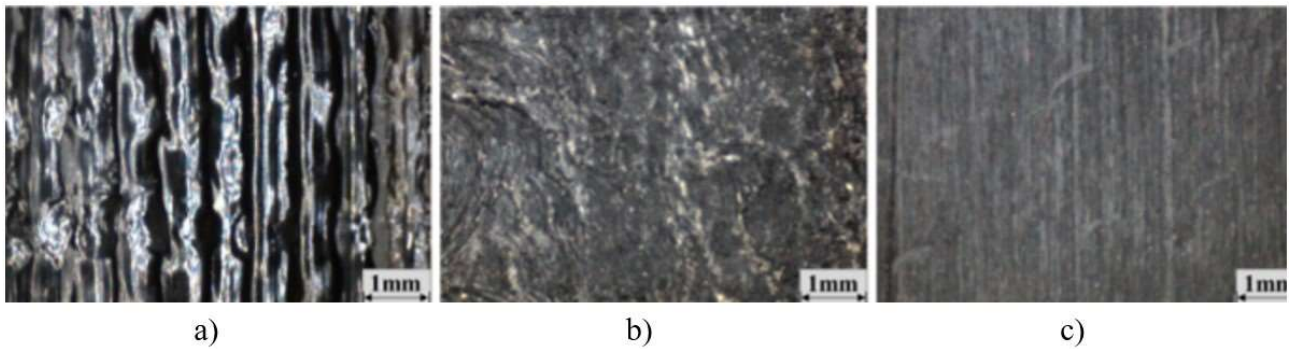
15 pav. Daugiafunkcinės gamybos sistemos: a) aparatinės įrangos išdėstymas; b) ekstruderis; c) Freza; d) integruota gamybos platforma [27].

Koordinačių sistema naudojama sluoksniavimo programinėje įrangoje nesutampa su roboto koordinacijų sistema, todėl buvo išvystytas kodas MATLAB aplinkoje, galintis transformuoti koordinacijų sistemą. Sugeneruotą kodą, kuris įkeliamas į roboto valdiklį, sudaro:

- Taškų koordinatės, kurios naudojamos judesio instrukcijoms;
- Taškų, į kuriuos judesio instrukcijos vykdo judesį, eiliškumas;
- Roboto rankos orientacija ir konfigūracija kiekviename iš taškų, į kuriuos judesio instrukcijos vykdo judesį;
- Roboto ir įrankių koordinacijų sistema;
- Įrankių svoris, gravitacijos ir geometrijos centras;
- Roboto judesio instrukcijos.

Roboto galiniai įtaisai valdomi atskiro valdiklio, todėl informacija esanti valdymo kode taip pat skiriasi. Kodą sudaro tokia informacija, kaip:

- Taškų, į kuriuos judesio instrukcijos vykdo judesį, koordinatės;
- Taškų, į kuriuos judesio instrukcijos vykdo judesį, eiliškumas;
- Roboto judėjimo greitis;
- Ekstruzijos koeficientas, suklio sukimo greitis;
- Papildoma informacija kaip ventiliatoriaus valdymas, ekstruderio ir šildomo pagrindo temperatūros valdymas.

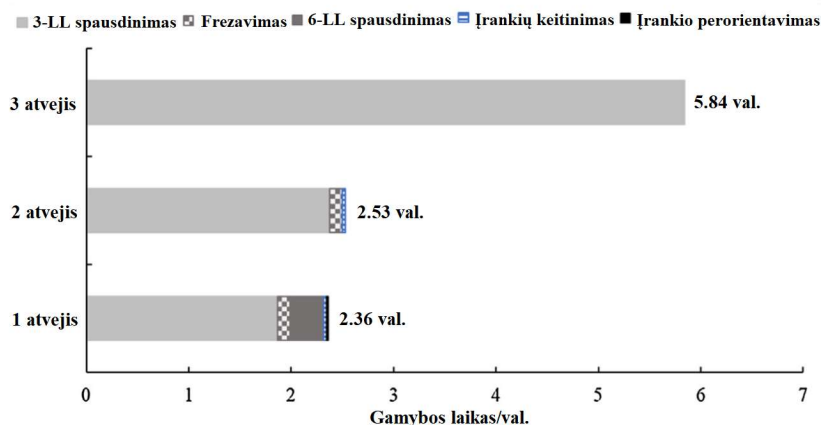


16 pav. Bandinių paviršius: a) atspausdinto bandinio paviršius; b) mechaniškai apdirbtas, atspausdinto bandinio, paviršius; c) ekstruzijos būdu pagaminto strypo paviršius [27]

Objektai pagaminti AG metu įprastai pasižymi prastu geometrijos tikslumu, mechaniniu atsparumu, prasta paviršiaus kokybe ir ilga gamybos trukme. Todėl tyrimo metu buvo atliktos kelių atvejų studijos, tokios kaip: dinamiškas įrankio orientacijos koregavimas, paviršiaus kokybės analizė, daugiaplokštuminis apdirbimas, didesnė susidūrimų išvengimo galimybė, sumažintas atliekų kiekis ir gamybos laikas.

Pirmo atvejo metu buvo išbandoma sistemos galimybės spausdinant ant kreivalinijinių paviršių. Gamybos metu įrankio orientacija prisitaikydavo prie spausdinamo paviršiaus normalės. Paviršiaus analizės metu (žr. **17 pav.**) nustatyta, kad papildomas mechaninis apdirbimas gali pagerinti paviršiaus kokybę, atsiradusią dėl laiptuotos paviršiaus struktūros (angl. *staircase error*) susidarančių FDM gamybos metu. Tačiau tokios detalės paviršiaus kokybė vis tiek neprilygsta ekstruzijos būdu pagamintam gaminiui.

Tiriant ar tokia sistema galėtų sumažinti atliekų kiekį ir gamybos laiką, buvo pasirinkti trys atvejai: daugiafunkcinė gamyba su 6 laisvės laipsniais, daugiafunkcinė gamyba su 3 laisvės laipsniais, adityvi gamyba su 3 laisvės laipsniais. Nustatyta, kad pirmu atveju gamybos laikas sumažėjo per pus lyginant su trečiu atveju, o sunaudotos medžiagos kiekis beveik 3 kartus, nuo 91 g iki 32 g. Skirtumas tarp pirmo ir antro atvejo nedidelis, tačiau 6 laisvės laipsnių daugiafunkcinė gamyba išlieka pranašesnė už 3 laisvės laipsnių.



17 pav. Tyrimo metu atliktų atvejų studijų rezultatai: 1) daugiafunkcinė gamyba su 6 laisvės laipsniais; 2) daugiafunkcinė gamyba su 3 laisvės laipsniais; 3) adityvi gamyba su 3 laisvės laipsniais [27].

Vienas iš pirmųjų daugiafunkcinės sistemos, naudojant 6 ašių robotą, tyrimas buvo atliktas 2012 metais JAV Masačusetso technologijos institute. Tyrimą atliko S. Keating ir N. Oxman [28], kurio metu buvo siekiama nustatyti tokios sistemos naudojimo galimybes adityvioje, subtraktyvioje ir formatyvioje (angl. *formative*) gamyboje. Tyrimui buvo naudojamas „KUKA KR5 sixx R850“

pramoninis 6 ašių robotas, su „KUKA KR C2 sr“ valdikliu, kurio pasiekiamumas 850 mm, pozicijos pakartojamumas ± 0.03 mm, maksimalus greitis 7.6 m/s, o svoris 29 kg. Roboto valdymo programa buvo paruošta naudojantis „KUKA robot language“ (KRL) ir „Python“ programavimo kalbomis. „Python“ naudojamas KRL failo sukūrimui, naudojantis įrankio trajektorijų koordinatėmis. Adityvios gamybos valdymo failams sukurti buvo naudojama atviro kodo programinė įranga „ReplicatorG“, kuri sugeneruoja tradicinio 3D spausdinimo įrankio (ekstruderio) judėjimo trajektorijos koordinatas. Priešingai negu Lin Li ir kitų mokslininkų tyrime, šiame tyrime 5 ašių spausdinimui ekstruderis buvo primontuotas prie korpuso, o spausdinimo pagrindas pritvirtintas kaip roboto galinis įtaisas (įrankis). Subtraktyvios gamybos valdymo failui paruošti buvo naudojama „HSMWorks“ programinė įranga. Galiausiai valdymo programa buvo patikrinama naudojant „KUKA SimPro“.

Tyrime buvo atliktos 4 galimybių studijos: adityvios, subtraktyvios, formatyvos, adityvios ir subtraktyvios gamybos. Adityvios gamybos sistemai buvo sukurti 3 skirtingi ekstruderiai. Pirmasis suprojektuojantis remiantis „MakerBot MK6“ ekstruderiu, tyrimui buvo naudojamas ABS plastikas ir 0.3 mm skersmens ekstruderio antgalis. Antrajame ekstruderyje buvo naudojama susmulkinta tara pagaminta iš didelio tankio polietileno (angl. high-density polyethylene, HDPE) siekiant nustatyti spausdinimo iš antrinių medžiagų perspektyvas. Ekstruderis sraigto pagalba paduodavo plastiką į kaitinimo bloką su termopora ir pro 5 mm skersmens antgalį nusodinamas. Norint greitai spausti didelių gabaritų struktūras buvo sukurtas ir išbandytas trečias ekstruderis, kuris spausdinimui naudojo poloroną. Ekstruderį sudarė servo variklis vožtuvams valdyti ir purkštukas, kuris skirtas tolygiam cheminių komponentų sumaišymui ir medžiagos išpurškimui. Subtraktyviai gamybai buvo naudojamos dvi skirtingo galingumo frezos „Dremel 4000“ ir „Porter-Cable 7310“, kurios išbandytos su tokiomis medžiagomis kaip: poloronas, ABS, vidutinio tankio medienos plokštė, modeliavimo vaškas.



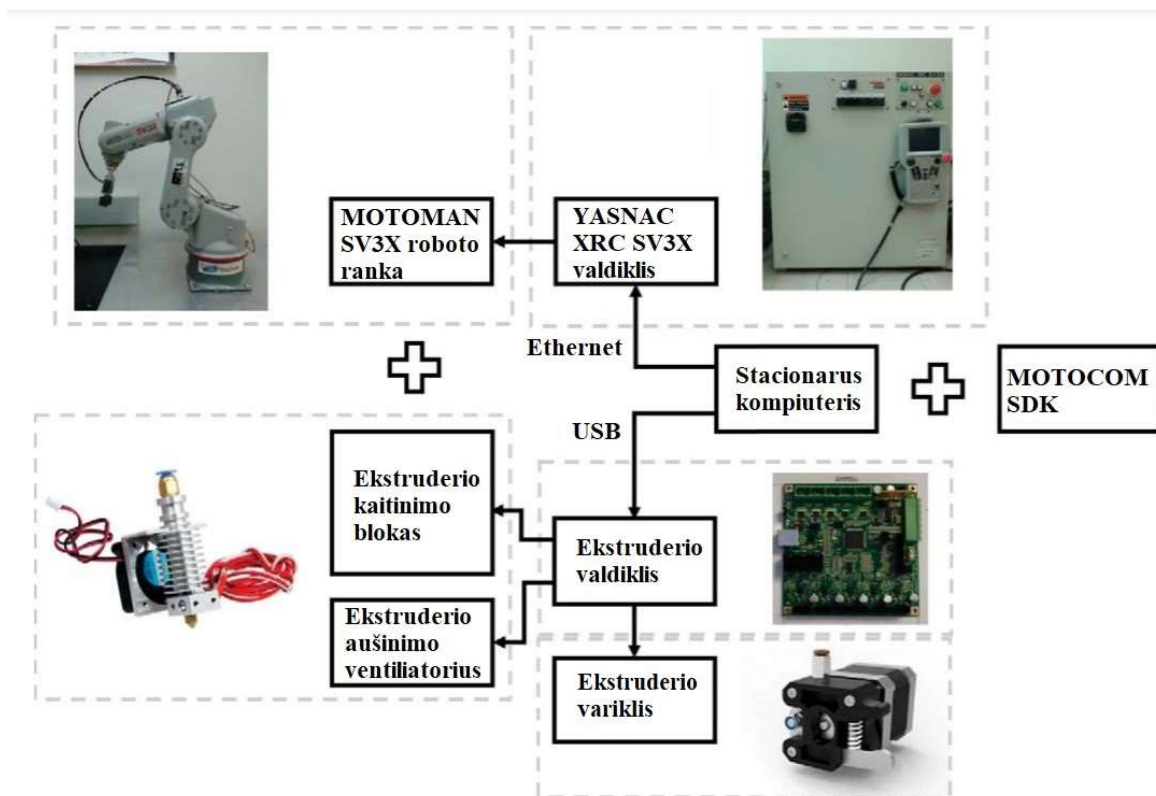
18 pav. Daugiafunkcinės gamybos sistemos bandinys iš polorono prieš mechaninį apdirbimą (kairėje) ir po [28].

Tiriant daugiafunkčę gamybos sistemą, kurią sudaro adityvi ir subtraktyvi gamyba, buvo siekiama nustatyti tokios sistemos pritaikomumą didelių struktūrų gamybai. Tyrimo metu pirmiausia buvo atspausdinta struktūra iš polorono (spausdinimo greitis 0.2 m/s, spausdinamo sluoksnio aukštis 2 cm), atspausdinta struktūra vėliau buvo mechaniškai apdirbta nufrezuojant perteklinę medžiagą, taip žymiai pagerinant struktūros paviršiaus kokybę ir geometrinius matmenis (žr. 18 pav.). Taip pat buvo atliktas bandymas su ABS plastiką, kuomet buvo atspausdintas 2 cm kubas ir mechaniškai apdirbtas 3 mm skersmens freza.

2016 metais Floridos technologijos institute I. Ishak'as ir kiti tyrime pristatė daugiaplokštuminę 3D spausdinimo sistemą, naudojant 6 ašių „MOTOMAN SV3X“ pramoninę roboto ranką. Robotas valdomas „Yasnac XRC SV3X“ valdikliu, o jos pasiekiamumas 677 mm, pozicijos pakartojamumas ± 0.03 mm, keliamoji galia 3 kg. Siekiant sumažinti įrankio inerciją, buvo pasirinkta naudoti nuotolinio padavimo sistemą, kuomet ekstruderis paduoda plastiką per plastiko gijos šarvą (angl.

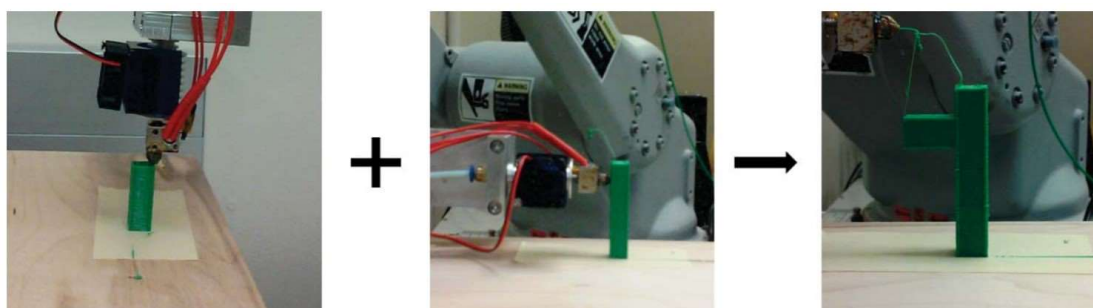
bowden tube) į kaitinimo bloką su 0,4 mm skersmens antgaliu, tyrimui buvo naudojamas PLA plastikas. Sistemos sąrankos blokinė schema pateikta (žr. 19 pav.).

Sistemai, kaip aukštesnis lygio valdiklis, pasirinkta naudoti stacionarų kompiuterį. Komunikacijai tarp roboto ir ekstruderio valdiklio buvo sukurta programinė įranga, užtikrinanti sinchronizaciją tarp roboto judesių ir plastiko ekstruzijos greičio.



19 pav. Sistemos sąrankos blokinė schema [29].

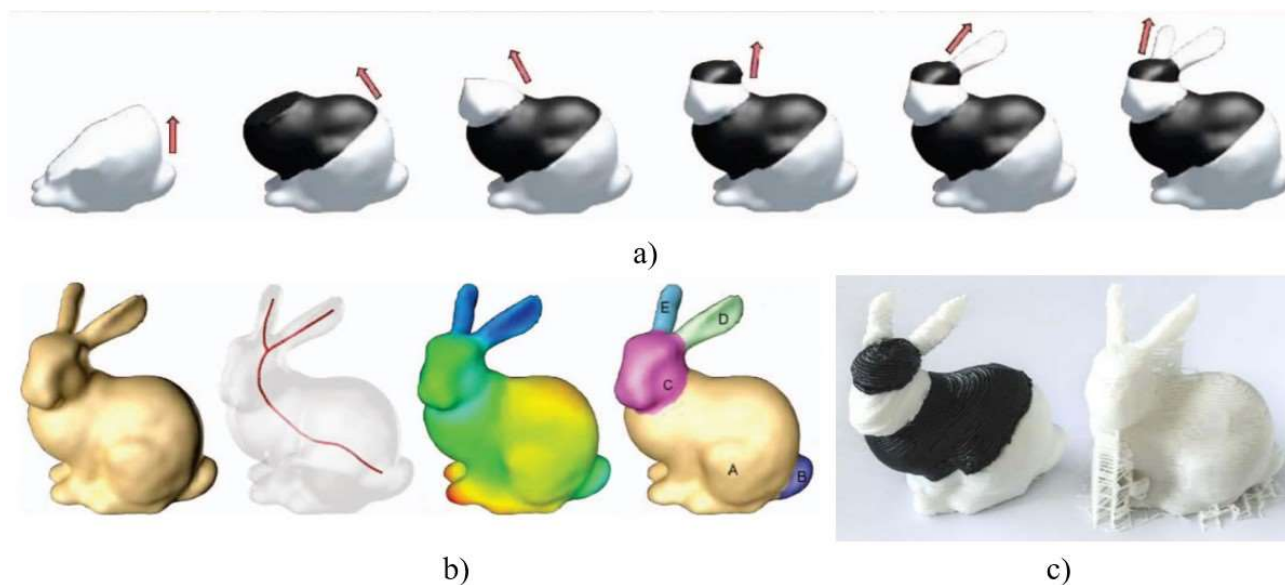
Siekiant parodyti daugiaplokštuminio 3D spausdinimo sistemos galimybes, buvo pasirinkta spausti objektą su išsikušusia struktūra. Spausdinamą objektą sudarė 10x10x60 mm pagrindas ir 10x20x10 mm išsikušusi struktūra (žr. 20 pav.) Pirmiausia x-y plokštumoje (horizontalioje) buvo atspausdintas pagrindas, vėliau išsikišusi struktūra buvo susluoksniuota y-z plokštumoje (vertikalioje).



20 pav. Daugiaplokštuminis 3D spausdinimas [29].

C. Wu ir kiti [30] 2017 metais pristatė robotinę sistemą „RoboFDM“, kurios paskirtis padidinti įprastų 3D spausdintuvų lankstumą, spausdinant objektus be pagalbinių struktūrų. „RoboFDM“ sistemą sudarė 6 ašių robotinė ranka „UR3“ prie kurios pritvirtinta spausdinimo platforma. Ekstruderis ir visi

kiti valdymo komponentai pritvirtinti prie korpuso. Tyrimo metu buvo naudojamas juodos ir baltos spalvos PLA plastikas tam, kad parodyti sistemos sluoksniavimo metodą.



21 pav. „RoboFDM“ sistemos: a) spausdinimo seka; b) objekto padalinimo į atskirus segmentus seka; c) atspausdintas objektas pasukant spausdinimo platformą (kairėje) ir įprastu būdu su pagalbinėmis struktūromis (dešinėje) [30].

Pagrindinė tyrimo idėja, naudojant robotinę ranką pasukti spausdinimo platformą taip, kad kiekvieną objekto segmentą būtų galima atspausdinti nenaudojant pagalbinių struktūrų. Tyrime buvo pristatytas algoritmas, kuris plokštumomis padalina 3D CAD modelį į mažesnius segmentus, kaip pavaizduota (21 pav. b)). Spausdinimo metu robotinė ranka pasuka spausdinimo platformą atitinkama seka pagal algoritmą (žr. 21 pav.). Tyrimo metu sukurtas algoritmas leido atspausdinti objektą be pagalbinių struktūrų [30].

2017 metais X. Li ir kiti [31] išvystė adityvios gamybos sistemą, spausdinančios in-situ metodu. Tokio metodo taikymas perspektyvus chirurginėse operacijose (žaidžų uždarymui). Autorių išvystytą sistemą sudaro mažo dydžio robotinė ranka „Dobot 1.0“, kurios pasiekiamumas 320 mm, o pozicijos pakartojamumas $\pm 0,1$ mm, „Arduino UNO R3“ mikrovaldiklis, mikro dozatorius INKX0514300A, šviesos šaltinis UVXON. Komunikacija tarp roboto ir mikrovaldiklio palaikoma per USB sąsają. Spausdinimui buvo naudojamas poli(etilenglikolio) diakrilato (angl. poly(ethylene glycol) diacrylate, trumpinama PEGDA) hidrogelis. Pirmieji sistemos bandymai buvo atlikti spausdinant 2D objektus vienoje plokštumoje, sekanti tyrimo dalis spausdinimas in-situ metodu, ant jau atspausdinto 3D objekto su defektu. Defekto zona buvo sėkmingai užpildyti hidrogeliu tiek lygiagrečia įrankio judėjimo trajektorija, tiek rato (žr. 22 pav.)

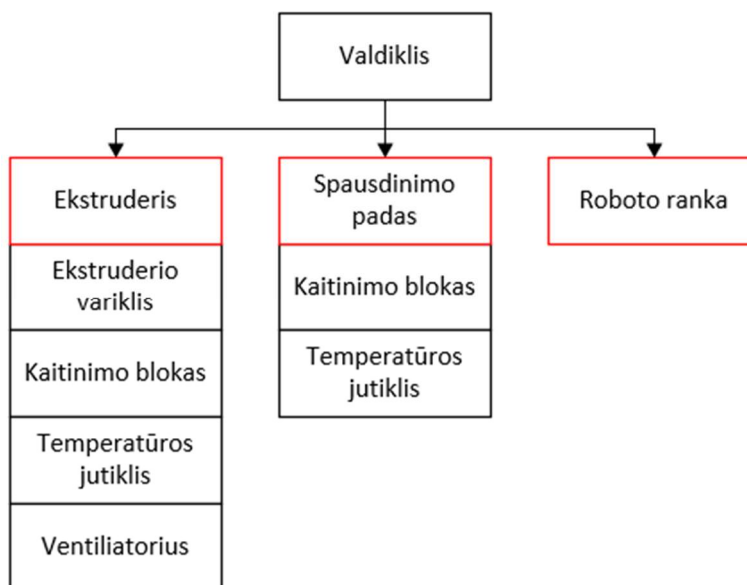


22 pav. a) defekto užpildymas rato trajektorija; b) defekto užpildymas lygiagrečia trajektorija; c) pelės modelis be užpildyto defekto; d) pelės modelis su užpildytu defektu [31].

2. Praktinė dalis

2.1. Sistemos koncepcija

Tyrimui atlikti buvo pasirinkta suprojektuoti sistemą paremta FDM technologija. Pirmiausia buvo nustatyti tokių sistemų pagrindiniai komponentai. Svarbiausia tokios sistemos dalis yra ekstruderis, kritiniai ekstruderio komponentai yra variklis, kaitinimo blokas (su temperatūros jutikliu) ir ventiliatorius. Taip pat gali būti ir papildomi komponentai kaip atstumo jutiklis (spausdinimo pagrindo aukščio nustatymui), papildomi ventiliatoriai (nusodinto plastiko aušinimui), plastiko gijos jutiklis (gijos pabaigos aptikimui arba skersmens nustatymui), apšvietimas. FDM 3D spausdinimo sistemai taip pat yra svarbus spausdinimo pagrindas, kuris įprastai būna šildomas, o temperatūros valdymui naudojamas temperatūros jutiklis, plastiko gija ir įrengimas judinantis ekstruderį X, Y ir Z ašimis, šiuo atveju tam naudojama roboto ranka.



23 pav. Projektuojamos adityvios gamybos sistemos esminiai komponentai

2.2. Elektronikos komponentų parinkimas

Žingsninio variklio parinkimas

Parentant ekstruderio variklį svarbiausi kriterijai yra sukimo momentas, galia ir tikslumas. Nors ekstruderui galima taikyti bešepetelinius variklius, servo pavaras, tačiau patys populiariausi yra žingsniniai varikliai. Žingsniai varikliai leidžia be papildomų jutiklių, tiksliai pasukti variklį norimu kampu (labiausiai paplitusių, be perdavos, pasukimo diskretiškumas $1,8^\circ$), taip pat jie yra santykinai pigūs ir pasižymi ekstruderui pakankamu sukimo momentu (NEMA 17 klasės variklių sukimo momentas 11-79 Ncm), nors dažnu atveju taikomi papildomu reduktoriai. Šiam projektui parinktas „PRUSA MK3S“ ekstruderio bipolinio ŽV analogas „17HS19-2004S1“, kurio sukimo momentas 59 Ncm, pasukimo diskretiškumas $1,8^\circ$, svoris 0,39 kg, apvijos varža $1,4 \Omega$, o induktyvumas $3.0\text{mH} \pm 20\%$ (1 KHz).

Žingsninio variklio valdiklio parinkimas

Parinktam ŽV reikalingas papildomas valdiklis, kuris trimis signalais: įgalinimo (angl. enable) įjungiamas arba išjungiamas valdiklis, krypties (angl. direction) valdoma sukimosi kryptis, žingsnių

(angl. step) kiekvieno krentančio signalo fronto metu pasuka variklį per vieną žingsnį (1,8 °). Taip pat yra valdiklių, kurie gali būti valdomi UART (angl. Universal asynchronous receiver-transmitter), SPI (angl. Serial Peripheral Interface) protokolais. Per pastarąjį dešimtmetį labai išaugęs mėgėjiškų 3D spausdintuvų kiekis pasaulyje lėmė tai, kad atsirado didelė ŽV valdiklių įvairovė. Vieni populiariausiu šiuo metu yra TMC2208, TMC2209, TMC2130 A4988, DM542T. Tačiau šiame projekte pasirinktas TMC2209, kuris turi tokias pats funkcijas kaip ir kiti TMC valdikliai, tačiau gali palaikyti didesnę srovę. TMC2209 pranašesnis negu A4988 ir DM542T, kadangi turi interpoliacijos funkciją (kuris sušvelnina sukimaši iki 51200 žingsnių per apsisukimą vietoje 200).

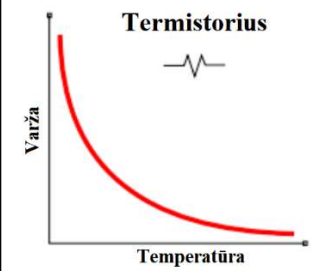
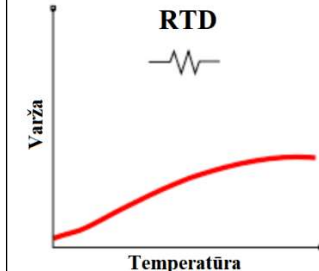
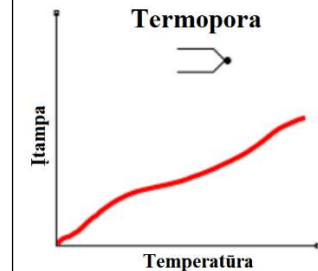
3 lentelė. Žingsninių variklių valdiklių parametrai

	TMC2208	TMC2209	TMC2130	A4988	DM542
Sąsaja	STEP/DIR	STEP/DIR	STEP/DIR arba SPI	STEP/DIR	STEP/DIR
Konfigūracija	Konfigūravimo kontaktai arba UART	Konfigūravimo kontaktai arba UART	Konfigūravimo kontaktai arba SPI	Konfigūravimo kontaktai	Konfigūravimo kontaktai
Mikro-žingsniavimas	Konfigūravimo kontaktais iki 1/16, UART – 1/256	Konfigūravimo kontaktais iki 1/64, UART – 1/256	Konfigūravimo kontaktais iki 1/16, SPI – 1/256	Konfigūravimo kontaktais iki 1/16	Konfigūravimo kontaktais iki 1/128
Interpoliacija	Taip	Taip	Taip	Taip	Taip
Maitinimo šaltinis	5,5-35 V	5,5-28 V	5,5-46 V	8-35 V	20-50 V
Reguliuojama srovė	Taip	Taip	Taip	Taip	Taip
Darbinė srovė	1.2 A	1.7 A	1.2 A	1 A	3 A
Maksimali srovė	2 A	2,8 A	2,5 A	2 A	4,3 A
Kaina	~4 Eur	~6 Eur	~8 Eur	~2 Eur	~20 Eur

Temperatūros jutiklių parinkimas

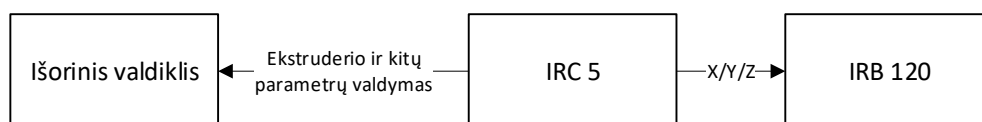
Temperatūra 3D spausdinimo sistemose gali būti matuojama termistoriais, varžiniais temperatūros jutikliais (angl. resistance temperature detector, trumpinama RTD) arba termoporomis. Dažniausiai taikomi 3D spausdintuvuose termistoriai „NTC 3950 100K“ arba „NTC 3950 10K“. Termistorių matavimo diapazonas šiek tiek viršija daugumos plastikų lydymosi temperatūrą, matavimo reakcijos greitis pakankamas ir yra labai pigus. Todėl didelė dalis ekstruderio kaitinimo blokų būna pritaikyti būtent šiems jutikliams. Dėl šios priežasties šiam projektui taip pat buvo parinktas šis termistorius. Be ekstruderio kaitinimo bloko, temperatūros jutiklis taip pat naudojamas ir spausdinimo padui. Kadangi termistoriaus, kaip ir kitų jutiklių, charakteristika yra netiesiška, buvo reikalinga atlikti kalibravimą. Kalibravimo metu kalibruojamas jutiklis buvo prijungtas prie valdiklio analogas-kodas keitiklio, kuriame buvo fiksuojamos reikšmės prie skirtingų temperatūrų. Temperatūra, pagal kurią fiksuojamos varžos reikšmės, buvo matuojama temperatūros matuokliu „TM902C“, kurio tikslumas 0,75 %, matavimo diapazonas -50-300 °C. Tam, kad išvengtų papildomų kalibravimų, spausdinimo padui buvo nuspręsta taip pat naudoti „NTC 3950 100K“ termistorių.

4 lentelė. Temperatūros jutiklių parametrų palyginimas

Charakteristika			
Privalumai	Didelis varžos pokytis Maža kaina Nedidelis Didelis matavimo reakcijos greitis	Labai tikslus Stabilus Didelis matavimo diapazonas	Didelis įvairovė Nereikalingas maitinimas Didelis matavimo diapazonas Nedidelis Didelis matavimo reakcijos greitis
Trūkumai	Nedidelis matavimo diapazonas Reikalingas maitinimo šaltinis Netiesiška charakteristika Trapus Savaime įkaistantis	Reikalingas maitinimo šaltinis Nedidelis varžos pokytis Vidutinė kaina Savaime įkaistantis	Mažas stabilumas Reikalingas stiprintuvas Netiesiška charakteristika Reikalingas temperatūros etalonas Mažas jautrumas
Matavimo diapazonas	-80 iki 300°C	-260 iki 850°C	-200 iki 1800°C

Komunikacija tarp valdiklių

Projekte naudojamas IRB 120 robotas. Valdymo spintoje įdiegtas DSQC 1000 kompiuteris su RW5.61 roboto programinės įrangos versija. Kadangi adityvios gamybos metu temperatūros valdomas PID reguliatoriumi, kuriam reikalingas pastovus valdymas. Nenorint apkrauti roboto kompiuterio papildomais skaičiavimais ir naudoti pertraukčių funkcijų, tam buvo rasti 2 sprendimo būdai. Sistemoje naudoti papildomą Mitsubishi kompanijos programinį loginį valdiklį FX5U-32MT-ESS kartu su komunikacijos moduliu FX5U-ENET-IP, kuris leidžia valdikliui komunikuoti Ethernet/IP protokolu. Antras sprendimo būdas naudoti Arduino MEGA mikrovaldiklį ir komunikuoti tarp valdiklių per roboto įvesčių ir išvesčių modulius. Tokios komunikacijos principinė schema pateikta žemiau.



24 pav. Komunikacijos principinė schema

Pagrindinis kompiuteris palaiko kelis pramoninius komunikacijos protokolus, vieni iš jų DeviceNet ir Ethernet/IP. Nors duomenų perdavimo spartos skirtumas tarp šių protokolų siekia 2000 kartų, tačiau projekte naudojame roboto valdiklyje nėra aktyvuotas EtherNet/IP, todėl nuspręsta naudoti DeviceNet kartu su CREVIS kompanijos tinklo adapterio moduliu „NA-9112“. Kartu su adapteriu naudojami „ST-1218“, „ST-2328“ moduliai skaitmeniniai įvesčiai ir išvesčiai palaikyti, o analoginiam įvesties signalui parinktas „ST-4424“ modulis.

Modulių parametrai:

- NA-9112 – nominali maitinimo šaltinio įtampa 24 Vdc, veikimo diapazonas 11-28.8 Vdc, vidinė loginė grandinė izoliuota nuo lauko maitinimo (angl. Field power), maksimali lauko maitinimo srovė 10 A.
- ST-1218 – 8 kanalų NPN tipo įvesties modulis, nominali maitinimo šaltinio įtampa 24 Vdc, veikimo diapazonas 11-28.8 Vdc. Signalo uždelsimas 3 ms, loginė grandinė nuo įvesties ir išvesties kanalų izoliuota optopora.
- ST-2328 – 8 kanalų PNP tipo išvesties modulis, nominali maitinimo šaltinio įtampa 24 Vdc, veikimo diapazonas 11-28.8 Vdc. Maksimali vieno kanalo srovė 0,5 A.
- ST – 4424 – 12 bitų 4 kanalų analoginio signalo išvesties modulis. Signalo įtampos diapazonas 0-10 Vdc, rezoliucija 0.24 mV/Bit. Minimali kanalo apkrovos varža 2 kΩ, uždelsimas 4 ms. nominali maitinimo šaltinio įtampa 24 Vdc, veikimo diapazonas 18-28.8 Vdc.

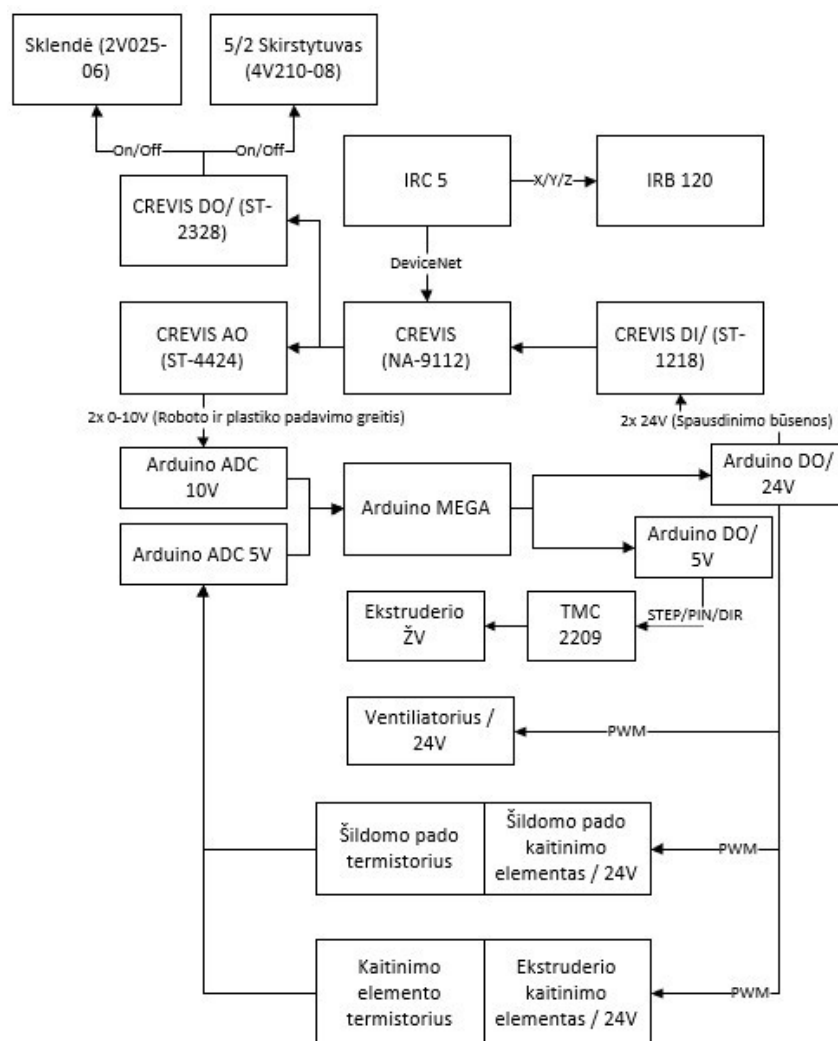
Šiuo metu rinkoje labai platus 3D spausdintuvų valdymo plokščių su integruotais mikrovaldikliais pasirinkimas, dauguma jų atviro kodo, todėl patogų pritaikyti šias plokštes ir kituose projektuose. Vienos populiariausių valdymo plokščių yra „Smoothieboard v1“, „SKR mini E3“, „Duet 2 Wifi“, MKS Gen L v2.1. Valdymo plokštės atlieka tokias funkcijas kaip: *G kodo* analizavimas, temperatūros reguliavimas, variklių valdymas ir kita. Nors visos šios plokštės pritaikytos 3D spausdintuvams, tačiau nei viena iš jų neatitiko projektuojamos sistemos poreikių. Tam buvo rasti 2 sprendimo būdai, vienas jų visos valdymo plokštės projektavimas, antras jau suprojektuotos plokštės modifikavimas. Kadangi projektavimas nuo pat pradžių reikalauja daug laiko išteklių, taupant laiką nuspręsta pritaikyta jau suprojektuotą valdymo plokštę. Tam pritaikyta maisto 3D spausdintuvo valdymo elektroninė plokštė, kadangi jos funkcijos buvo labai panašios į reikalingas projektuojamai sistemai. Šios plokštės elektrinė schema pateikta 1 PRIEDE.

5 lentelė. 3D spausdintuvų valdymo plokščių parametrų palyginimas

Pavadinimas	Smoothieboard v1	SKR mini E3	Duet 2 Wifi	MKS Gen L v2.1
Procesorius	LPC 1769 32 bitų, 120 MHz	STM32F103RCT6 32 bitų, 72 MHz	Atmel SAM4E8E 32 bitų, 120 MHz	ATmega2560 8 bitų, 16 MHz
Jungtys	USB, RJ45, microSD	MicroUSB, MicroSD	Wi-Fi, MicroSD, MicroUSB	USB
Maitinimo šaltinio įtampa	12 arba 24 V	12 arba 24 V	12 arba 24 V	12 arba 24 V
Integruoti ŽV valdikliai	Priklausomai nuo versijos nuo 3 iki 5 (A5984)	Taip, 4xTMC2209	Taip, TMC2660	Neintegruoti
Kaina	Virš 100 Eur.	~45 Eur.	~140 Eur	~25 Eur

Apžvelgus panašių 3D spausdintuvų komponentus, pagal reikalingas projektuojamos sistemos funkcijas buvo parinkti tokie elektronikos komponentai: ekstruderio varikliui ŽV „17HS19-2004S1“, „TMC2209“ ŽV valdikliai, „NTC 3950 10K“ ekstruderio ir spausdinimo pagrindo temperatūrai matuoti, 24 V ventiliatorius, 170 W 24 V spausdinimo pagrindo ir 40 W ekstruderio kaitinimo elementai, tinklo adapterio modulis „NA-9112“, ST-1218“ ir „ST-2328“ moduliai skaitmeniniai įvesčiai ir išvesčiai palaikyti, o kodas-analogas keitiklio įvesčiai „ST-4424“. Pagal parinktus sistemos

komponentus sukurta blokinė schema, pateikta žemiau. Taip pat blokinėje schemoje pavaizduota elektromagnetinė sklendė ir vožtuvas, jos skirtos įrankio keitimo įtaisui valdyti.

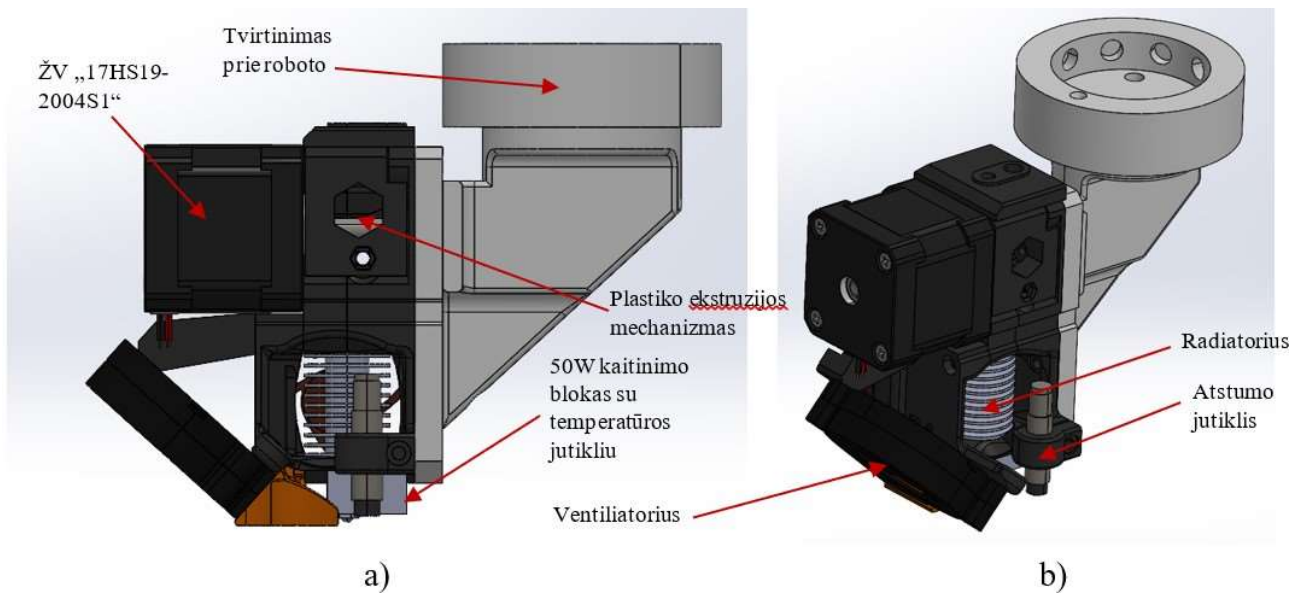


25 pav. Projektuojamos sistemos su parinktais komponentais principinė schema

2.3. Mechaninės dalies projektavimas

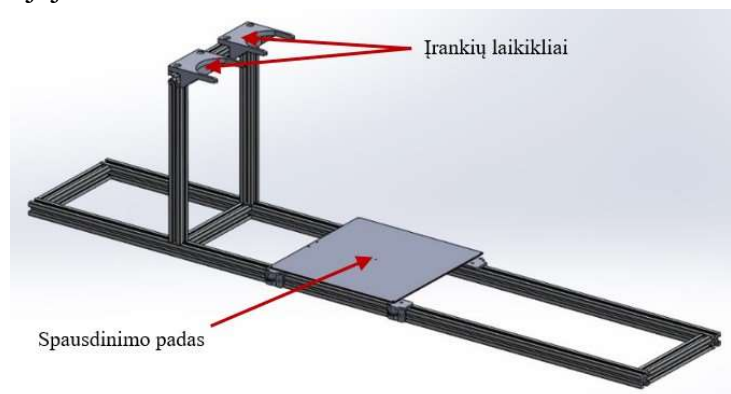
Parinkus elektronikos komponentus buvo suprojektuotas roboto galinio vykdymo įtaisas, naudojant *SolidWorks* programinę įrangą. Įtaisą sudaro tokios dalys kaip:

- Įrankių adapteris;
- ŽV „17HS19-2004S1“
- Ventiliatorius;
- Atstumo jutiklis;
- Plastiko ekstruzijos mechanizmas;
- 50 W kaitinimo blokas su temperatūros jutikliu;
- Radiatorius.



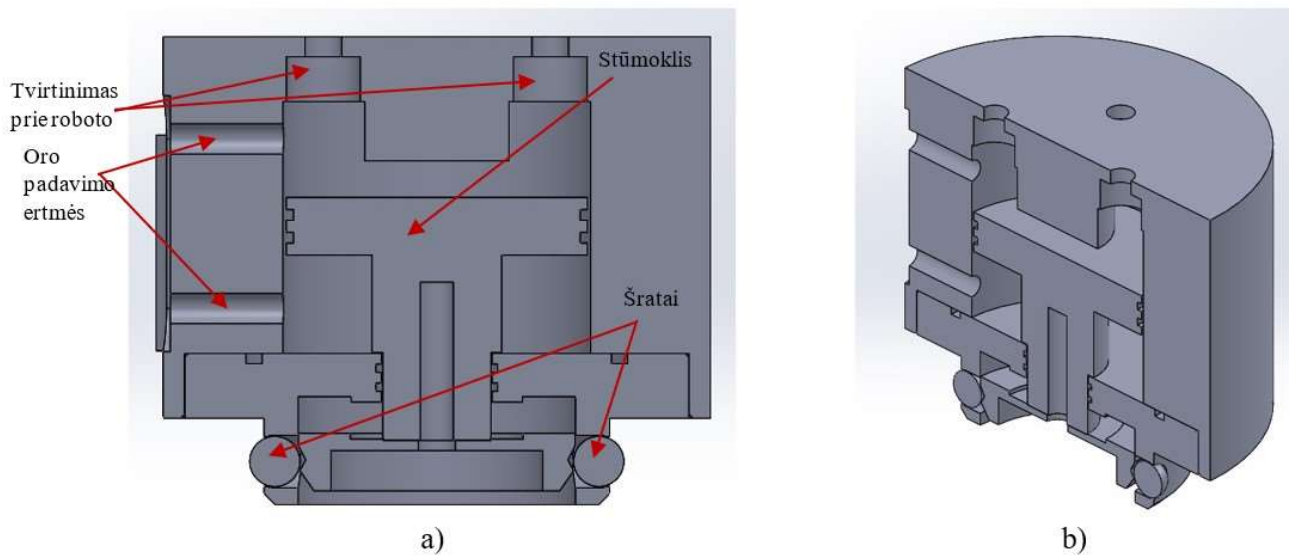
26 pav. Adityvios gamybos įrankio: a) vaizdas iš šono; b) izometrinis vaizdas

Projektuojant darbo zoną buvo atsižvelgta į roboto pasiekiamumą, taip pat atsižvelgta į įrankių laikiklius, kadangi gamybos metu robotas negali kliudyti nenaudojamų įrankių. Darbo zonos paskirtis išlaikyti spausdinimo pagrindo poziciją darbo zonoje (keičiant tik aukštį, kiekviename spausdinimo pagrindo kampe, esančiomis rankenomis), tokiu būdu išvengiama korekcijų roboto valdymo programos konfigūracijoje.



27 pav. Roboto darbo zona be įrankių

Tam, kad projektuojama kreivalininė adityvios gamybos sistema būtų kuo lankstesnė, nuspręsta suprojektuoti roboto galinį įtaisą, taip kad juo būtų galima keisti įrankius. Taip pat buvo galima ant vieno įtaiso montuoti keletą įrankių ir pasukant roboto 6-tą ašį pakeisti įrankį. Tačiau tokiu atveju padidėtų įtaiso inercija, taip pat tai apribotų įrankių skaičių. Todėl nuspręsta, kad suprojektuotas įtaisas sugebėtų fiziškai atsiskirti nuo įrankių, tokiu būdu įrankių skaičius galėtų būti didesnis.

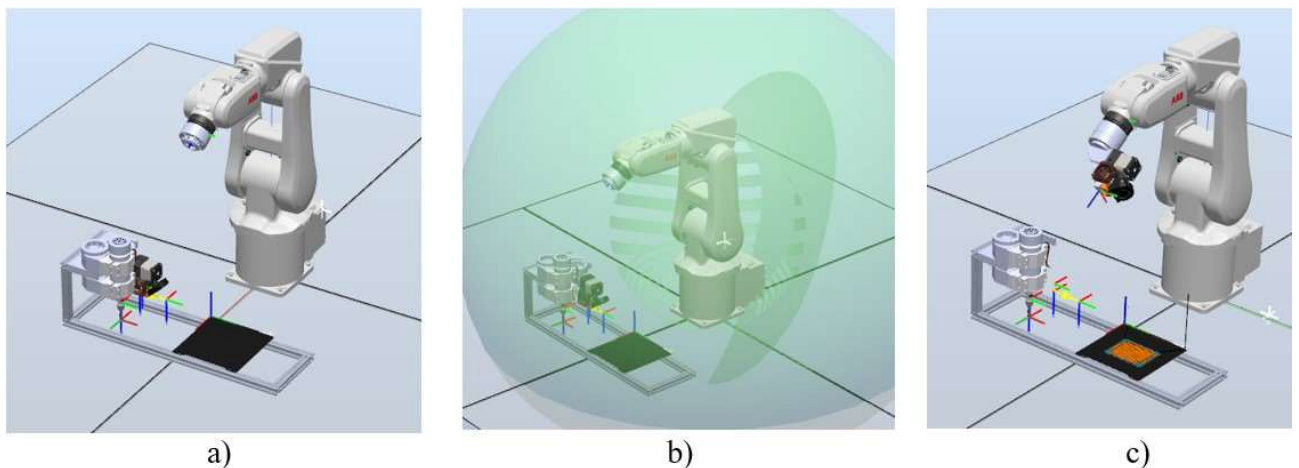


28 pav. Įrankių keitimo įtaiso skersinis vaizdas a) iš priekio, b) izometrinis vaizdas

Atlikta simuliacija naudojant Robot Studio programinę įrangą. Adityviai gamybai naudotas programos papildinys „3D Printing PowerPac“, kuris yra nemokamas. Roboto darbinę aplinką sudaro:

- Darbo stalas;
- Subtraktyvios gamybos įrankis;
- Adityvios gamybos įrankis;

Darbo stalo pozicija buvo parinkta pagal roboto darbo zoną (žr. 29 pav.).



29 pav. a) Roboto darbo aplinka; b) Roboto darbo zona; c) Robotas su adityvios gamybos įrankiu ir atspausdintu bandiniu

2.4. Realizuotos sistemos valdymas

Valdymas projektavimo metu nuspręsta skaidyti, padalinant į dvi dalis: roboto ir kitų komponentų valdymui, bei išorinis PV ir jo valdomus komponentus. Pagrindinis PV parinktas roboto valdiklis „IRC5“, kuris sistemoje naudojamas [32]:

- Pagrindinio valdymo kodo nuskaitymui;
- Roboto darbo judesių valdymui;
- Komunikacijai su išoriniu PV (Arduino MEGA);

- Atstumo jutiklio vertės nuskaitymui;
- Komunikacijai su PC (valdymo kodui įkelti);
- Aušinimo ventiliatoriaus valdymui.

Papildomas loginis valdiklis naudojamas:

- Komunikacijai su roboto valdikliu;
- Temperatūros jutiklių nuskaitymui;
- Ekstruderio ir spausdinimo pagrindo kaitinimo elementų valdymui
- Ekstruderio ŽV valdymui.

Papildomo PV valdymo programai parašyti buvo naudojamas *Arduino IDE* atviro kodo programinis paketas. Ekstruderio ŽV greitis reguliuojamas keičiant paduodamų signalų dažnį į ŽV valdiklį, šiuo atveju „TMC2209“. Kadangi projektuojant nebuvo rastas būdas, kaip robotas galėtų išduoti pakankamai aukšto dažnio signalus ir keisti jų dažnį, buvo nuspręsta perkelti ŽV valdymą į PV. Tačiau pagrindinė spausdinimo programa saugoma roboto valdiklyje, tam pasitelktas „ST-4424“ analoginės išvesties modulis, kuris pagal reikalingą ekstruzijos debitą, tiesine priklausomybe nuo roboto greičio, išduoda atitinkamos reikšmės signalą. PV išduoda impulsus naudojant pirmąjį laikmatį, kuris išduoda periodiškus impulsus, priklausomai nuo nustatyto periodo. Ekstruderio ir spausdinimo pagrindo temperatūra valdoma PID reguliatoriais. Rašant valdymo programą atsižvelgta į tai, kad iš roboto gaunamas analoginis signalas, o naudojamas PV nepalaiko analoginio signalo pertraukčių. Todėl nuspręsta rašyti programą taip, kad vienas visos programos ciklas truktų kuo trumpesnę laiką. Eksperimentu metu nustatyti, kad vienas ciklas trunka apie 2-3 ms. Valdymo programa pateikta 2 PRIEDE, algoritmas (žr. **30 pav.**).

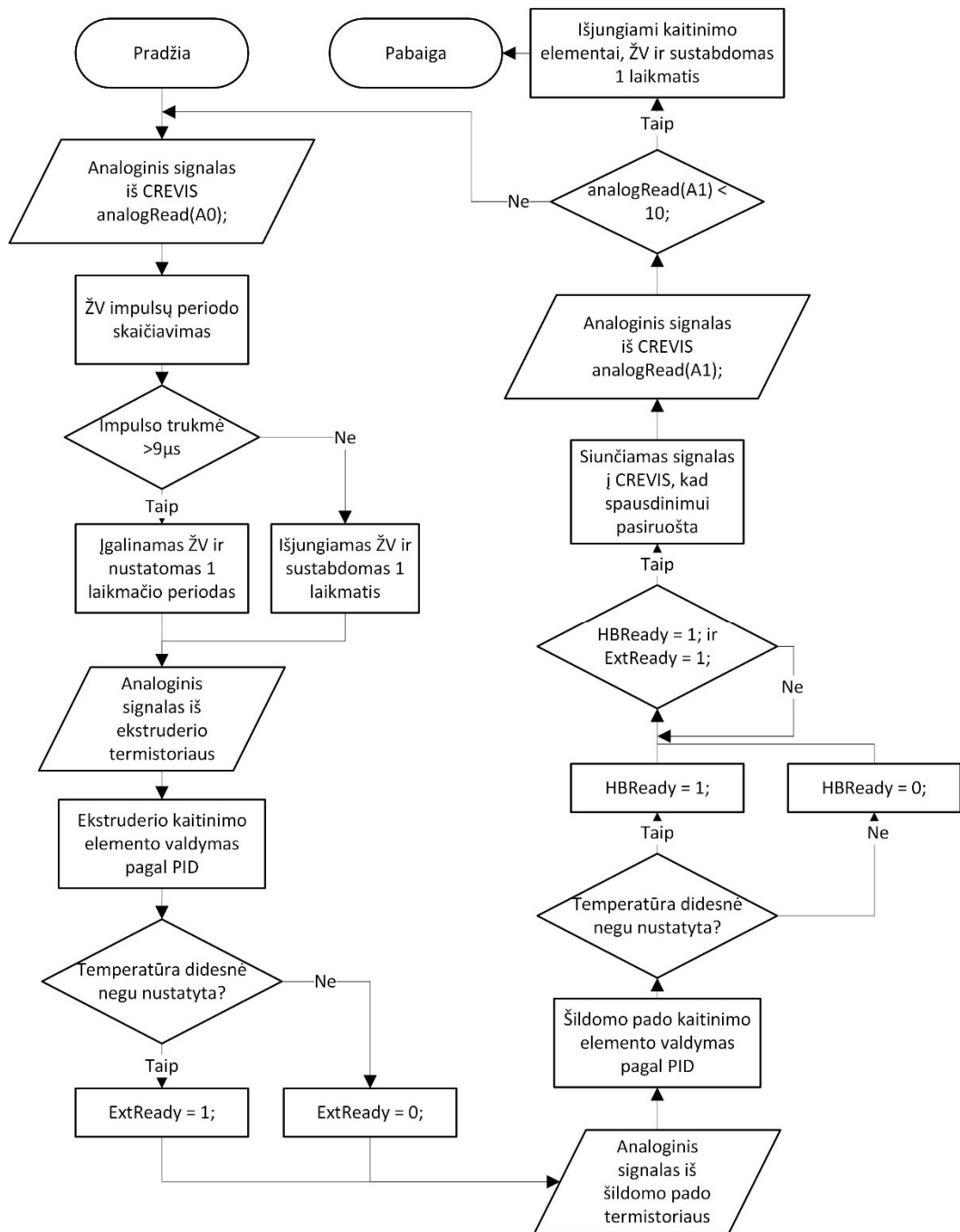
Variklio greičio konversija

Plastiko padavimo greičio signalas iš roboto valdiklio per „ST-4424“ modulį paduodamas į Arduino MEGA valdiklį. Išduodamo signalo reikšmė tiesiškai priklauso nuo roboto greičio, pavyzdžiui, jeigu greitis nustatytas v_5 (5 mm/s), tai analoginio signalo modulis išduos 0,5 V įtampos signalą, atitinkamai jeigu v_{40} , tai 4 V. Kadangi ekstruderio ŽV valdomas keičiant impulso periodo trukmę, o sukimosi greitis nuo periodo tiesiškai nepriklauso, buvo reikalinga įvesti konversiją.

Pirmiausia apskaičiuojamas reikalingas plastiko padavimo greitis, kuris priklauso nuo sluoksnio aukščio, pločio, roboto judėjimo greičio ir plastiko gijos skersmens (1,75 mm).

$$v_g = \frac{whv_r}{\left(\frac{d_p}{2}\right)^2\pi}$$

Čia w – sluoksnio plotis, h – sluoksnio aukštis, v_r – roboto judėjimo greitis, d_p – plastiko gijos skersmuo.



30 pav. Valdymo algoritmas

Ekstruderio krumpliaračio skersmuo 8 mm, ŽV be mikro žingsniavimo (angl. *microstepping*) funkcijos vieną ratą apsuksa per 200 žingsnių (impulsų), tačiau ŽV valdiklis nustatytas ties 16 mikro žingsnių, todėl vienam apsisukimui reikalingi 3200 impulsai. Tad žinant ekstruderio krumpliaračio skersmenį ir impulsų skaičių vienam apsisukimui galima apskaičiuoti ekstruderio ŽV vieno žingsnio pastumą:

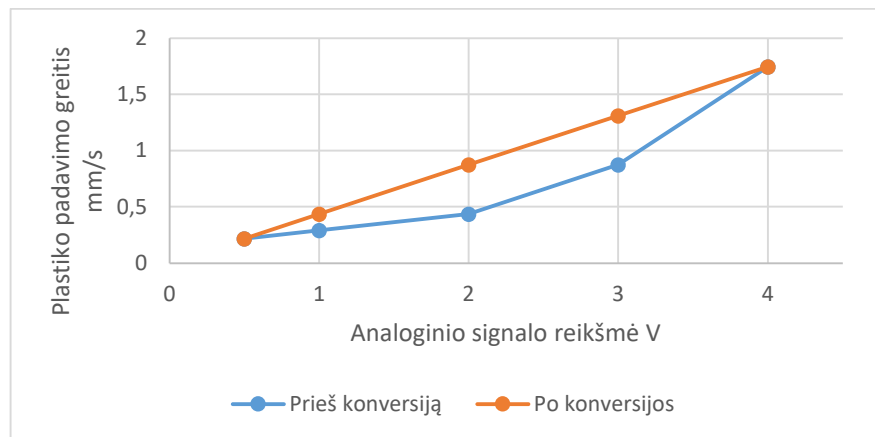
$$s_{zv} = \frac{d_e \pi}{y}$$

Čia s_{zv} – vieno žingsnio pastūma, d_e – ekstruderio krumpliaračio skersmuo, y – impulsų skaičius vienam apsisukimui.

Žinant plastiko padavimo greitį ir vieno žingsnio pastumą, apskaičiuojama vieno žingsnio trukmė. Sakykime, kad sluoksnio aukštis 0,3 mm, plotis 0,35 mm. Kaip pavyzdžiui paimami 3 roboto greičiai: 5, 20 ir 40 mm/s.

$$t_{z5} = \frac{s_{zv}}{v_g} = \frac{d_e \left(\frac{d_p}{2}\right)^2 \pi^2}{whv_{ry}} = \frac{8 * \left(\frac{1,75}{2}\right)^2 * 3,14^2}{0,35 * 0,3 * 5 * 3200} = 3,6 * 10^{-2} s$$

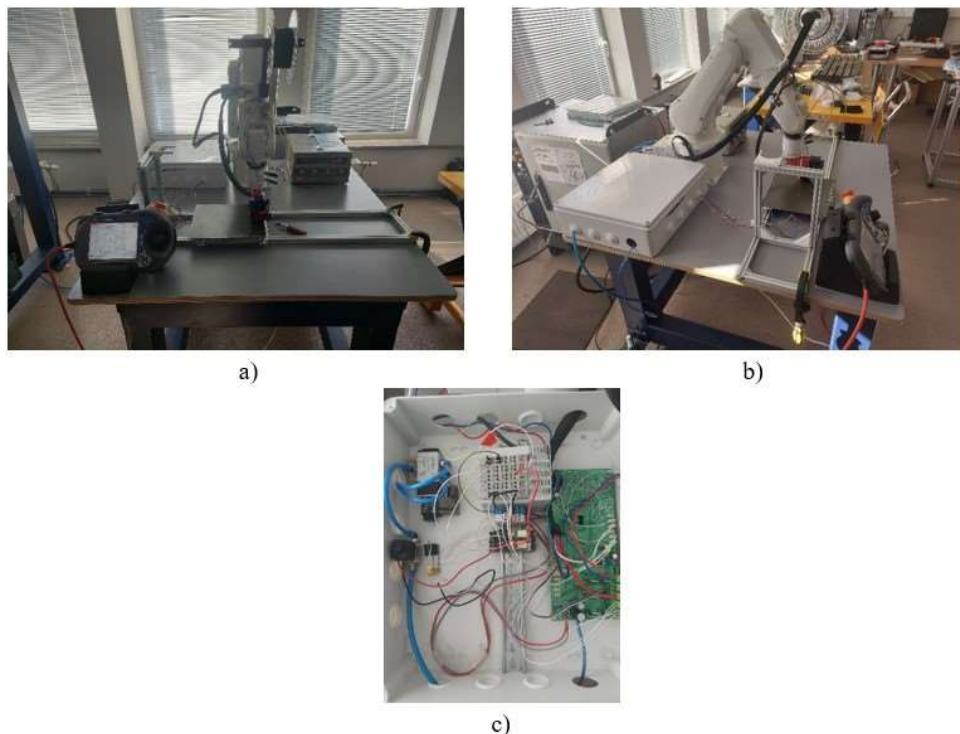
Atitinkamai, kuomet greitis 20 mm/s – $1,8 * 10^{-2}$ s, 40 mm/s – $4,5 * 10^{-3}$ s, žinant vieno žingsnio pastumą, gauta priklausomybė, kuri pateikta žemiau.



31 pav. Plastiko padavimo greičio nuo CREVIS analoginio signalo priklausomybė

Kaip matyti iš grafiko (žr. **31 pav.**), po konversijos išduodamas signalas tampa tiesiškai priklausomas nuo roboto greičio, priešingai negu prieš konversiją, kai greitis eksponentiškai auga. Kuomet roboto greitis 5 arba 40 mms/s, plastiko padavimo greitis sutampa, tačiau prie 20 mm/s padavimo greitis 2 kartus mažesnis, prieš konversija negu po.

2.5. Realizuota 3d spausdinimo sistema



32 pav. Realizuotos sistemos: a) vaizdas iš priekio; b) vaizdas iš šono; c) elektronika

3. Tyrimas ir tyrimo metodika

3.1. Tyrimo objektas

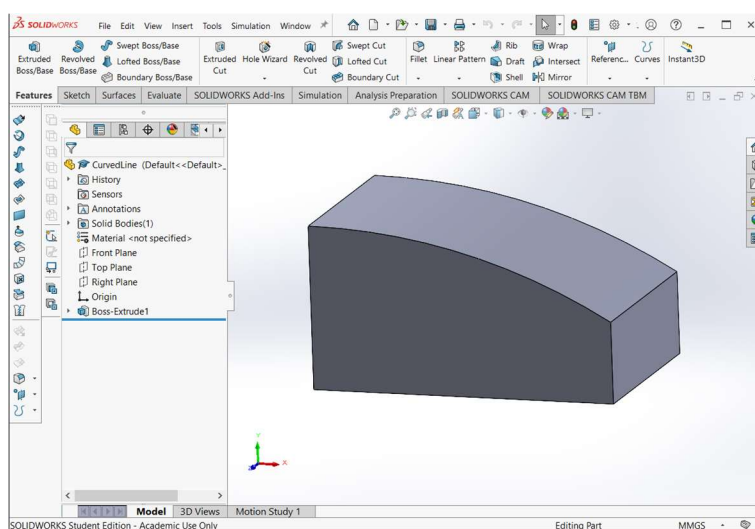
Šiame projekte tyrimo objektas yra suprojektuota adityvios gamybos sistema, galinti spausdinti ant kreivalinijinių paviršių, naudojant pramoninę roboto ranką. Tyrimo metu siekta iširti jos daugiaplokštuminio ir kreivalinijinio 3D spausdinimo galimybes. Tyrimo objekto bendras vaizdas pateiktas (žr. 32 pav.).

3.2. Tyrimo metu naudojama įranga

3.2.1. Programinė įranga

Inžinerinė kompiuterinio projektavimo programinė įranga *SolidWorks2021*

Solidworks - viena populiariausių pasaulyje projektavimui ir inžinerijai skirta programinė įranga. Naudojama įvairiose profesijose ir pramonės šakose visame pasaulyje, dėl savo didelio funkcionalumo. *Solidworks* programinė įranga paremta parametriniu dizainu, tokiu būdu projektuotojas gali matyti, kaip vieno komponento pokytis įtakoja kitus, todėl problemos sprendimų būdai randami lengvai ir greitai. Taip pat turi daugybę papildinių, tokių kaip judesių ir mechaninių apkrovų simuliacijos, suteikiančios galimybę inžinieriams virtualioje erdvėje išbandyti jų kuriamus mechanizmus, tokiu būdu sutaupomas projektavimo laikas, išvengiamos galimos klaidos, tai leidžia gamintojams greičiau ir efektyviau pasiekti norimą rezultatą. Žemiau pateiktame (žr. 33 pav.) paveiksle pateiktas programos langas su tyrimo 3D modeliu.

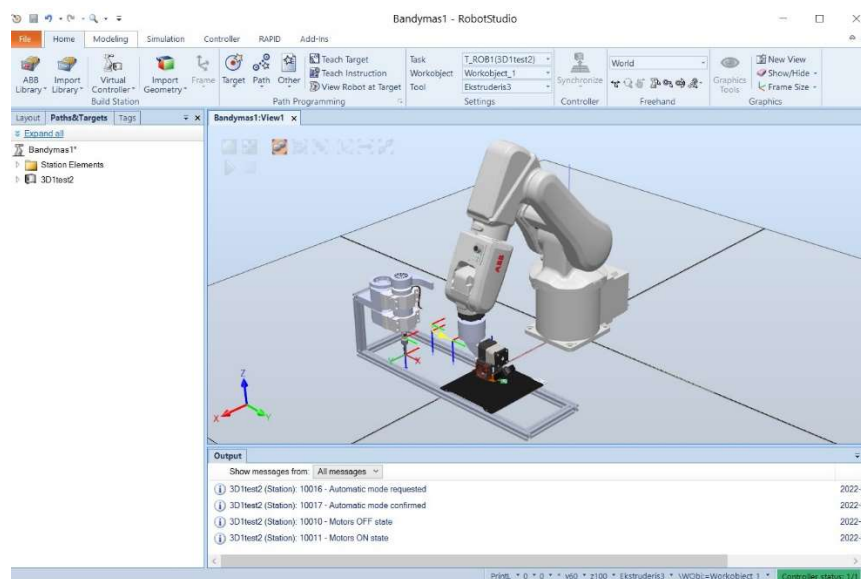


33 pav. *Solidworks 2021* programos langas

ABB kompanijos robotų programavimo programinė įranga *RobotStudio 2021.3*

RobotStudio – svarbiausia šio tyrimo programinė įranga, leidžianti programuoti robotą tiek prisijungus, tiek ir atsijungus, taip pat atlikti programų simuliacijas, tokiu būdu išvengiant gamybos stabdymo. Simuliacijos suteikia galimybę optimizuoti, programuoti ir mokytis kurti programas, nenaudojant realaus roboto. Taip pat galimas elementarių 3D objektų ir roboto darbo zonos modeliavimas, kuri vėliau naudojama roboto judesių simuliacijai atlikti. Programos lange galimas tiesioginis roboto valdymas. *RobotStudio* turi gausybę papildinių, tokių kaip paletizavimo, mechaninio apdirbimo, dažymo ir net 3D spausdinimo. Papildiniai palengvina programos paruošimą

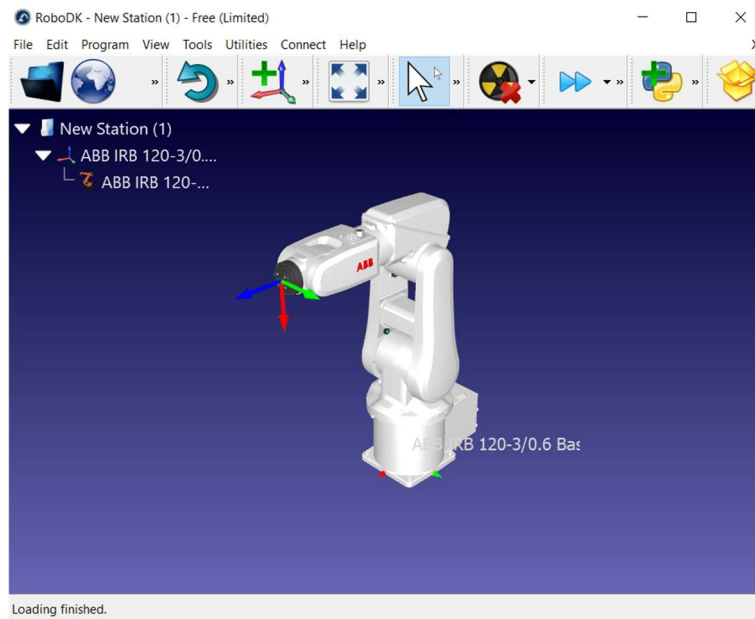
tam tikrai operacijai, taip sutaupant programuotojų darbo laiką. Tačiau kiekvieno papildinio kaina prasideda nuo ~1500 eurų. **34 pav.** pateiktas *RobotStudio* programos langas. Tyrime programa naudojama valdymo programos įkėlimui į roboto valdiklį.



34 pav. *RobotStudio* 2021.3 programos langas

Universali robotų programavimo programinė įranga *RoboDK* v5.2.2

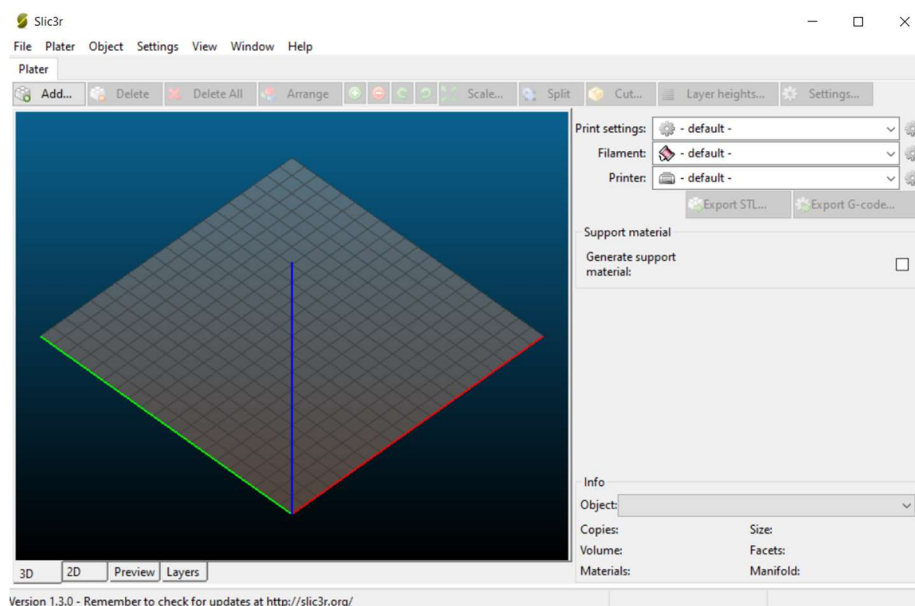
RoboDK – programinė įranga skirta robotų valdymo programoms ir simuliacijoms kurti. Taip pat turi gausybę papildinių leidžiančių paprasčiau kurti valdymo programas mechaniniam apdirbimui, suvirinimui, paletizavimui etc. Priešingai negu *RobotStudio* *RoboDK* negali įkelti (tik sugeneruoti) valdymo programų į roboto valdiklį, tam reikalinga specifinė programa, šio tyrimo atveju *RobotStudio*. Tačiau *RoboDK* yra universalus įrankis, kadangi biblioteką sudaro daugiau negu 500 robotų iš daugiau negu 50 robotų gamintojų, tokių kaip ABB, Fanuc, Kuka, Motoman, Universal Robots. O kadangi skirtingų gamintojų robotai palaiko skirtingų formatų valdymo programas, *RoboDK* geba konvertuoti valdymo programą į visų bibliotekoje esančių robotų palaikomus formatus.



35 pav. *RoboDK* v5.2.2 programos langas

Trimačių objektų sluoksniavimo ir failų paruošimo spausdinimui programinė įranga *Slic3r*

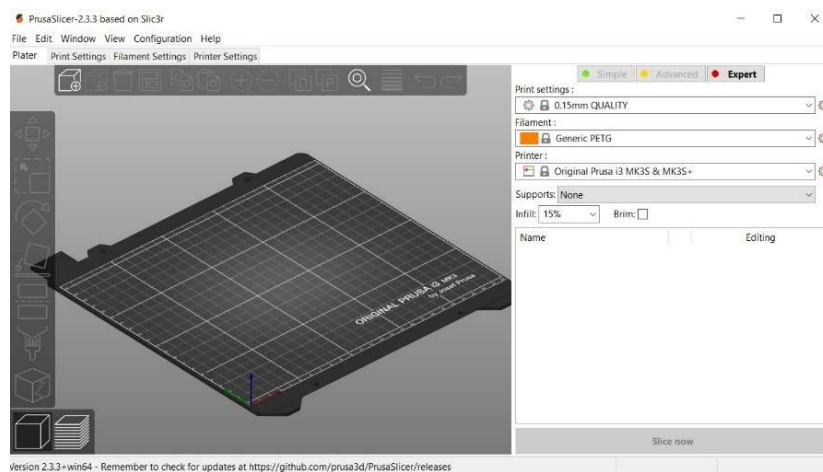
Slic3r – atviro kodo programinė įranga, skirta trimačio objekto susluoksniavimui ir G kodo generavimui. Programoje trimatis objektas supjaustomas horizontaliais pasirinkto aukščio sluoksniais, tuomet sugeneruojama įrankio judėjimo trajektorija taip, kad užpildytų kiekvieną sluoksnį ir apskaičiuojamas reikalingas medžiagos ekstruzijos kiekis. Visa tai užkoduojama komandinėse eilutėse, kurias įprastai sudaro tokios komandos kaip G1 reiškianti įrankio judėjimą linijiškai interpoliuojant X, Y ir Z - įrankio koordinates, E – plastiko gijos padavimą į kaitinimo bloką. *Slic3r* programinė įranga yra nemokama, suderinama su įvairių spausdintuvų ir CNC staklių programine aparatine įranga, tokia kaip Marlin, Repetier, Mach3 etc. Programoje galima keisti gausybę įvairių spausdinimo parametrų, siekiant norimas spausdinimo kokybės. Tyrime *Slic3r* buvo naudojamas kaip *RoboDK* papildinys, *Slic3r* sugeneruodavo G kodą, o *RoboDK* konvertuodavo į roboto valdymo kodą.



36 pav. *Slic3r* programos langas

Trimačių objektų sluoksniavimo ir failų paruošimo spausdinimui programinė įranga *Prusa slic3r*

Prusa slic3r – atviro kodo programinė įranga, kaip ir *Slic3r* skirta trimačių objektų susluoksniavimui ir G kodo generavimui. Tai patobulinta *Slic3r* versija pritaikyta Prusa kompanijos 3D spausdintuvams, tačiau suderinama ir su kitais. Tyrime ši programinė įranga buvo skirta G kodo generavimui 3D spausdintuvui „Prusa MK3S“.



37 pav. *Prusa Slic3r* programos langas

3.2.2. Tiriamoji įranga

Optinis mikroskopas Nikon LV100ND

Mikroskopas su episkopiniu / -diaskopiniu apšvietimu, modulinis mikroskopo korpusas, pritaikytas įvairiems stebėjimams ir užduotims atlikti. Galimi stebėjimo režimai: šviesiame ir tamsiame lauke (angl. brightfield, darkfield), poliarizuojant šviesą, diferencinės interferencijos kontrasto (angl. Differential interference contrast, trumpinama DIC), epi-fluorescencijos, dviejų spindulių interferometrijos, fazių kontrasto ir DIC diaskopiniame apšvietime. Taikomas įvairiuose pažangiuose tyrimuose, analizėse ir inspekcijose. Mikroskopas pavaizduotas (žr. **38 pav.****Klaida! Nerastas nuorodos šaltinis.**), o jo parametrai pateikti 6 lentelėje. Optinio mikroskopo vaizdo fiksavimui naudota kamera Nikon DS-Ri2. Kamera pateikta (žr. 39 pav.), parametrai 7 lentelėje.



38 pav. Optinis mikroskopas Nikon LV100ND [33].

6 lentelė. Optinio mikroskopo techninės charakteristikos

Techninės charakteristikos	
Lęšiai	1x, 2,5x, 5x, 10x, 20x, 50x ir 100x artinimas
Maksimalūs tiriamo objekto matmenys	150x150x38 mm
Maitinimas	1,2 A / 75 W



39 pav. Kamera Nikon DS-Ri2 [34].

7 lentelė. Kameros Nikon DS-Ri2 techninės charakteristikos

Techninės charakteristikos	
Rezoliucija	4908x3264 (16 MP)
Sąsaja	USB 3.0
Jutiklis	CMOS
Išlaikymas	Nuo 0.1 iki 120000 ms
Jautrumas	ISO200-12800
Išmatavimai	105x134x153 mm
Artinimas	Iki 100 kartų

Elektroninis slankmatis *Limit 144550100*

Slankmatis tyrime naudojamas bandinių geometriniams parametrams nustatyti. Jo matavimo ilgis 150 mm, rezoliucija 0,01 mm.

3D spausdintuvas *Prusa MK3S*

Tyrime šis įrankis naudotas paviršiaus kokybės palyginimui, atspausdintas bandinys šiuo spausdintuvu palygintas su sukurtos sistemos atspausdintu bandiniu. Spausdintuvas (žr. 40 pav.40 pav.) paremtas FDM technologija, jo parametrai pateikti 8 lentelėje.



40 pav. Prusa MK3S 3D spausdintuvas

8 lentelė. 3D spausdintuvo Prusa MK3S 3D techninės charakteristikos

Techninės charakteristikos	
Spausdinimo erdvės matmenys	250 mm x 210 mm x 210 mm
Sluoksnio aukštis	0,05-0,03 mm
Antgalio skersmuo	Numatytas 0,4 mm, galimas platus pasirinkimas
Plastiko gijos skersmuo	1,75 mm
Spausdinamos medžiagos	PLA, PETG, ASA, ABS, PC, CPE, PVA/BVOH, HIPS, PP, Flex, nGen, Nailonas, anglies pluošto užpildo ir kitos
Maksimalus greitis	200 mm/s
Maksimali antgalio temperatūra	300 °C
Maksimali spausdinimo pagrindo temperatūra	120 °C
Ekstruderis	Tiesioginis padavimas, <i>Bondtech</i> krumpliaračiai, <i>E3D V6</i> kaitinimo blokas
Elektros energijos suvartojimas	PLA – 80 W, ABS – 120 W

3.3. Spausdinimo programos paruošimas

3D spausdinimo programos paruošimas pradedamas nuo trimačio objekto projektavimo, tam gali būti naudojamos įvairios programinės įrangos kaip *Solidworks*, *Inventor*, *Fusion 360*, *Blender* etc. Tyrimui 4 objektai buvo suprojektuoti, naudojantis *Solidworks* ir vienas atsisiųstas iš nemokamos duomenų bazės [35]. Dauguma sluoksniavimo programinės įrangos palaiko tokius formatus kaip .STL, .OBJ, .3MF ir .OLTP, tačiau *RoboDK* į kuri įkeliamas objektas palaiko tik .STL, .STEP ir .IGES formatus, kadangi .STEP ir .IGES formatai netinka 3D spausdinimo programų ruošimui trimatis objektas išsaugomas .STL formatu.

Antrame etape *RoboDK* programinėje aplinkoje sumodeliuojama darbinė aplinka, iš bibliotekos įkeliami tyrime naudojama robotinė ranka ABB IRB120, importuojamas suprojektuotas roboto įrankis (ekstruderis) .STEP formatu ir nustatomos įrankio koordinatės, taip pat nustatomos darbinės koordinatės, kurių pradžia sutampa su vienu iš spausdinimo pagrindo kampu ir įkeliamas spausdinamas objektas. Tuomet naudojantis 3D spausdinimo papildiniu pasirenkamas spausdinamas objektas ir parenkami spausdinimo parametrai. Atliekama simuliacija taip siekiant išvengti, roboto susidūrimo su darbo aplinka, rizikos. Galiausiai sugeneruojama valdymo programa, jeigu komandinių eilučių daugiau nei 20 tūkst., programa išskaidoma į paprogrames.

Sugeneruotos programos modifikuojamos rankiniu būdu, tam naudojamos užrašinės įrankiu „pakeisti viską“. Tai atliekama, kadangi *RoboDK* sugeneruoja komandinės eilutes valdymo programoje, kurių roboto valdiklis nepalaiko. Pirmiausia valdymo programoje (jei išskaidyta, tai visose paprogramėse) ištrinamos komandinės eilutės:

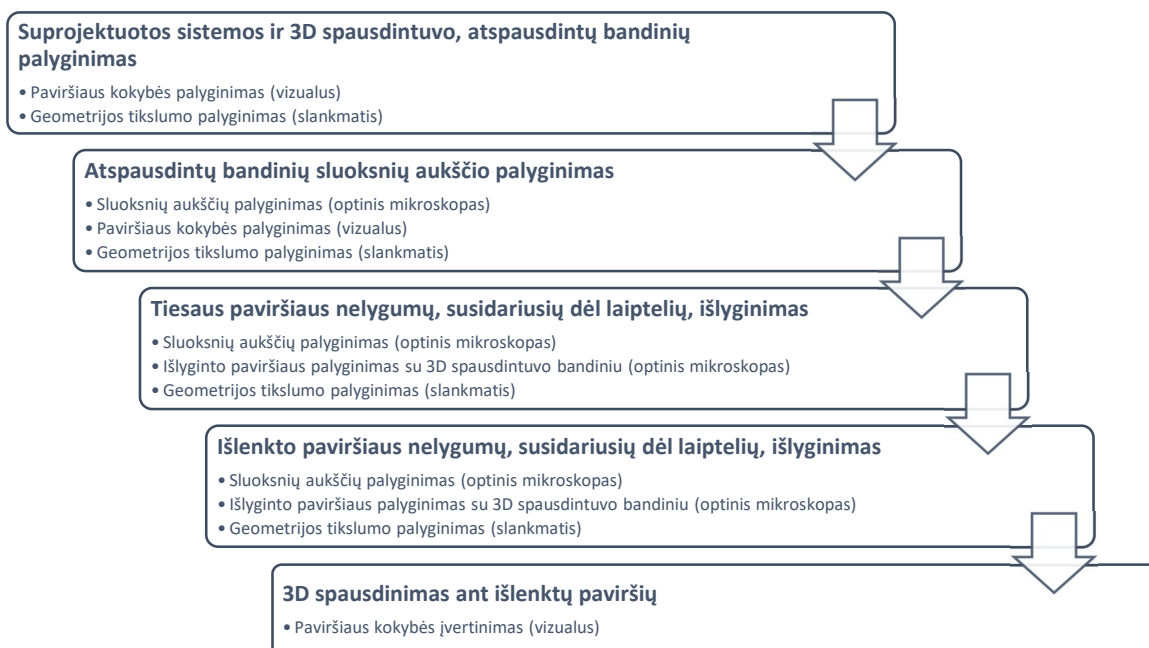
- M_RunCode(107);
- M_RunCode(190);
- M_RunCode(104);
- M_RunCode(109);
- M_RunCode(82);
- M_RunCode(106);
- M_RunCode(84);
- M_RunCode(140);

Šiomis eilutėmis turėtų būti valdoma temperatūra, ventiliatoriai, tačiau šioje sistemoje jų valdymas iškeltas į mikrovaldiklį. Eilutės, kurių pradžia „ExtruderSpeed“ pakeičiama į "WaitRob \InPos; SetAO AO_1, ", o teksto laukai „v1000“ į „v60“. „WaitRob \InPos“ - laukia kol robotas užbaigs judėjimą į poziciją prieš vykdant sekančią komandinę eilutę. „v1000“ pakeitimas į „v60“ nustato roboto greitį iš 1000 mm/s į 60 mm/s.

Jeigu programa išdalinta į paprogrames, tai pagrindinėje paprogramėje pakeičiamos teksto eilutės "Enter-Serial-Number" į roboto identifikacinį numerį, projekte naudojamo roboto numeris „120-100424“. Pagrindinės programos pradžioje prirašoma "SetAO AO_1, 0;", kuri išjungia ŽV. Prieš "%MOD_Tmp1:Prg_Tmp1%" įrašoma "WaitDI DI_VG_0, 1;" – šios eilutės pagalba robotas lauks, kol gaus signalą pradėti spausdinti.

3.4. Tyrimu eiga

Eksperimentiniai tyrimai atlikti etapais pradedant nuo objekto spausdinimo, kuris suprojektuotas specialiai 3D spausdintuvų išbandymui, pereinant prie kubo spausdinimo vienoje plokštumoje ir trapecijos spausdinimo, kuomet viršutinis sluoksnis spausdinamas paverstoje plokštumoje. Vėliau prieita prie kreivalinijinio spausdinimo, kuomet vienoje plokštumoje atspausdinamas pagrindas su išlenktu paviršiumi, o paskutinis sluoksnis kreivalinijinio spausdinimo metodu atspausdinamas ant viršaus. Galiausiai ant išlenkto paviršiaus atspausdinamas KTU logotipas. Tyrimų eiga pateikta (žr. **41 pav.**)



41 pav. Tyrimų eiga

Suprojektuotos sistemos ir 3D spausdintuvo, atspausdintų bandinių palyginimas

Šiame tyrimo etape atspausdinami bandiniai, naudojantis suprojektuota sistema ir 3D spausdintuvu *Prusa MK3S+*. Bandymams parinktas trimatis laivo modelis, vadinamas „3D benchy“ (žr. 42 pav. a), kuris suprojektuotas nustatyti 3D spausdinimo parametrų įtaką geometriniam tikslumui ir paviršiaus kokybei. Kadangi spausdinimui didelę įtaką turi gausybė įvairių parametrų, tiek 3D spausdintuvui, tiek robotui naudota spausdinimo failų paruošimo programinė įranga *Slic3r*. Tokiu būdu sumažinamas parametrų veiksnių skaičius spausdinimo procesui. Geometrijos tikslumui įvertinti naudotas elektroninis slankmatis, rezultatai palyginti su skaitmeniniu modeliu ir spausdintuvo atspausdintu modeliu. Paviršiaus kokybę įvertinta vizualiai, nustatant ar yra bandinio neatitikimų nuo skaitmeninio modelio.

Atspausdintų bandinių sluoksnių aukščio palyginimas

Kubas, kurio matmenys 10x10x10 mm kaip ir pirmojo tyrimo etapo metu, buvo atspausdintas bandinio geometriniam tikslumui įvertinti, tačiau šiame etape naudotas optinis mikroskopas ir išmatuotas sluoksnių aukštis. Rezultatai palyginti su *Prusa MK3S* atspausdintu bandiniu. Bandinio trimatis modelis pateiktas (žr. 42 pav. b)

Tiesaus paviršiaus nelygumų, susidariusių dėl laiptelių, išlyginimas

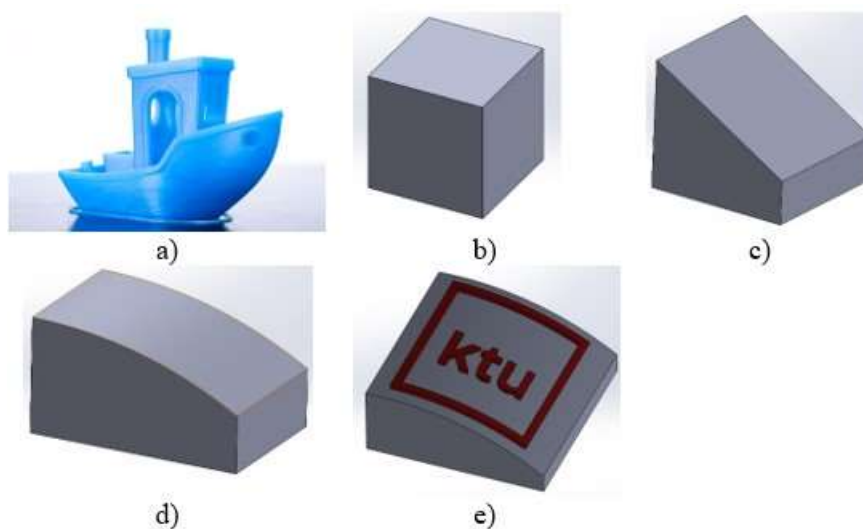
Šiame etape buvo siekiama išbandyti sistemos galimybes, spausdinant daugiaplokštuminiu metodu. Pirmiausia vienoje plokštumoje atspausdintas trapecijos pagrindas, vėliau pasukus spausdinimo plokštumą, ant viršaus užspausdinamas vienas sluoksnis. Spausdinimo kokybei įvertinti naudotas optinis mikroskopas. Trapecija pateikta (žr. 42 pav. c), jos matmenys 10x10x8,8. Atspausdintas bandinys palygintas su *Prusa MK3S* atspausdintu bandiniu.

Išlenkto paviršiaus nelygumų, susidariusių dėl spausdinamų sluoksnių aukščių skirtumo, išlyginimas

Galiausiai buvo prieita prie kreivalinijinio 3D spausdinimo. Kaip ir trapecijos atveju pirmiausia buvo atspausdintas pagrindas ant kurio viršaus užspausdintas papildomas sluoksnis, taip išlyginant nelygumus, susidariusius dėl laiptelių. Spausdinimo kokybei įvertinti naudotas optinis mikroskopas. Bandiniui suprojektuotas modelis pateiktas (žr. 42 pav. d), jo matmenys 10x10,6x15. Atspausdintas bandinys palygintas su *Prusa MK3S* atspausdintu bandiniu.

3D spausdinimas ant išlenktų paviršių

Kaip ir lenkto paviršiaus spausdinimo atveju, šiame etape spausdinama kreivalinijiniu metodu, tačiau užspausdinamas ne vienas sluoksnis, siekiant išlyginti paviršių, o ant lenkto paviršiaus atspausdinamas Kauno Technologijos Universiteto logotipas. Bandinio modelis pateiktas (žr. 42 pav. e), jo matmenys. Atspausdintas bandinys įvertintas vizualiai, tačiau nebuvo palygintas, kadangi įprasti 3D spausdintuvai neturi galimybės atspausdinti tokio bandinio.



42 pav. a) „3D benchy“; b) kubas; c) trapecija; d) bandinys su išlenktu paviršiumi; e) KTU logotipas ant išlenkto paviršiaus

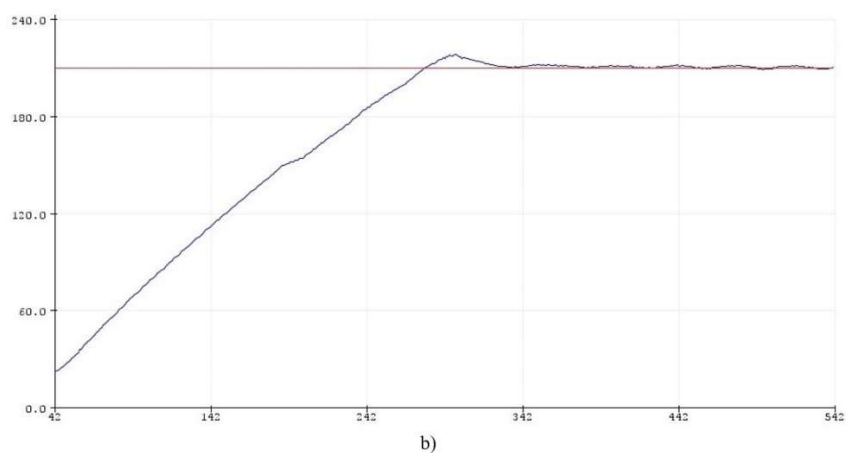
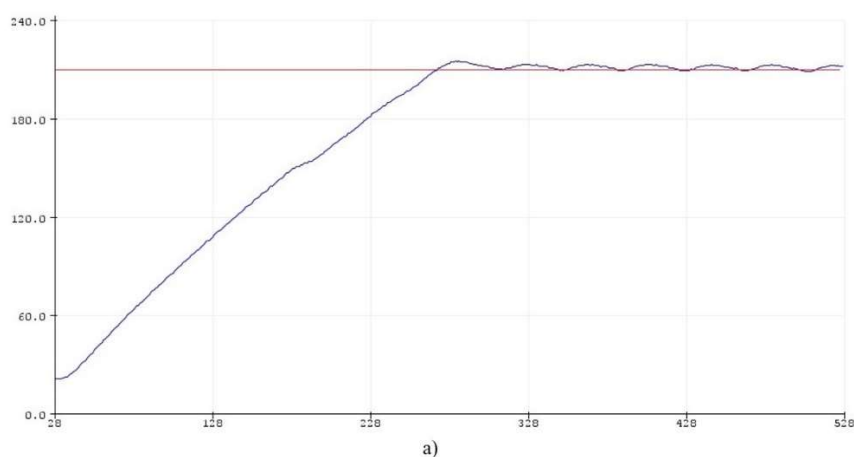
4. Eksperimentinių tyrimų rezultatai

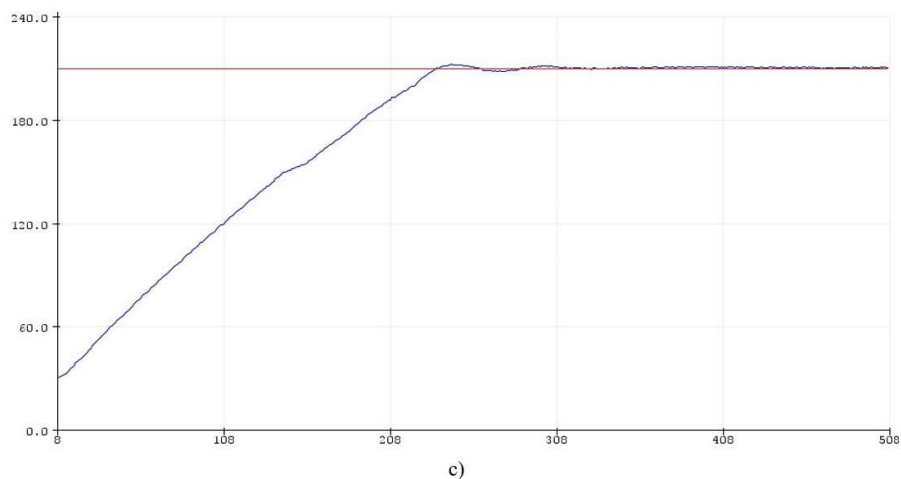
4.1. Ekstruderio ir spausdinimo pagrindo temperatūros valdymo rezultatai

Temperatūros grafikams braižyti naudotas *Arduino IDE* grafikų braižymo įrankis. Grafikuose gaunama priklausomybė nuo kintamojo išvedimo į įrankį, todėl buvo svarbu išvedimą susieti su laiku. Vienas išvedimas prilygintas 150 ciklų, o vienas ciklas trunka 2 ms, todėl vieno išvedimo trukmė 300 ms.

Ekstruderio temperatūros valdymas

Ekstruderio antgalio temperatūrai valdyti pritaikytas PID reguliatorius. Pradinėje būsenoje ekstruderio temperatūra $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, nuostatas $210\text{ }^{\circ}\text{C}$, leistini išėjimo signalo svyravimai $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, nusistovėjimo laikas kuo mažesnis. Koeficientai buvo parinkti rankiniu būdu, kaip atskaita, paimti analogiško antgalio valdymo koeficientai: P – 159,58, I – 2,77, D – 73,38. Kaip matyti iš grafiko (žr. **43 pav. a**) išėjimo signale, naudojant atskaitinius koeficientus atsirado svyravimai ir statinė paklaida, taip pat nedidelis perreguliavimas 3,2%. Sumažinus P koeficientą iki 59, perreguliavimas išliko, tačiau sumažėjo svyravimai ir statinė paklaida (žr. **43 pav. b**). Toliau mažinant P koeficientą iki 29 perreguliavimas sumažėjo iki 1,6%, svyravimai išnyko, o statinė paklaida sumažėjo iki minimalios (žr. **43 pav. c**).

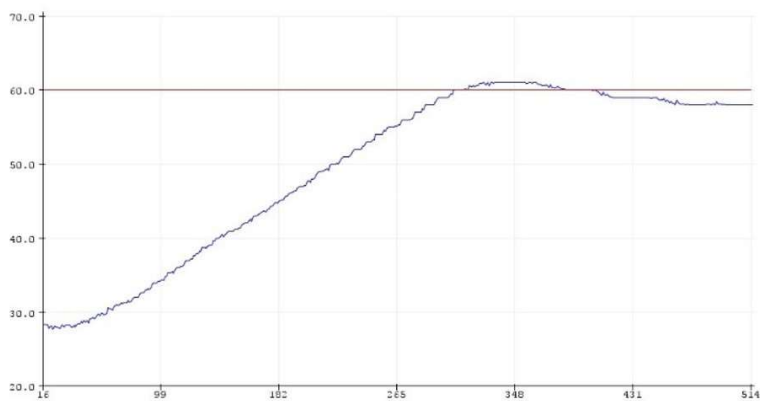




43 pav. Ekstruderio temperatūros išėjimo signalai

Spausdinimo pagrindo temperatūros valdymas

Kaip ir ekstruderio atveju valdymui pritaikytas PID reguliatorius. Pagrindo temperatūros pradinė būsena $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, nuostatas $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, leistini išėjimo signalo svyravimai $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, nusistovėjimo laikas kuo mažesnis. Kadangi pritaikius atskaitinius koeficientus perreguliuavimas viršijo nuostatą $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, valdymo koeficientų radimui nuspręsta pritaikyti Ziglerio-Nikolsono metodą. Gauti koeficientai $P - 14,63$, $I - 0,93$, $D - 3,65$, išėjimo signalo grafikas pateiktas (žr. 44 pav. a), svyravimai (žr. 44 pav. b). Gautas perreguliuavimas 1%, svyravimai patenka į leistinas $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ribas.



a)



b)

44 pav. spausdinimo pagrindo temperatūros išėjimo signalas a) nuo pradinės būsenos; b) svyravimai

4.2. Suprojektuotos sistemos ir 3D spausdintuvo, atspausdintų bandinių palyginimas

Realizuotos spausdinimo sistemos tyrimas pradėtas nuo objekto spausdinimo, kuris suprojektuotas specialiai 3D spausdintuvų išbandymui. Atspausdinti bandiniai 3D spausdintuvu *Prusa MK3S* ir realizuota sistema pateikti žemiau (žr. 45 pav.). Kaip matome iš pav. spausdintuvu atspausdintas bandinys pasižymi lygesniu paviršiumi, taip pat mažiau defektų, tokių kaip siūlų ir lašelių susidarymas prie paviršiaus.



45 pav. Atspausdinti „3D benchy“ bandiniai *Prusa MK3S* (kairėje) ir realizuota sistema (dešinėje)

Pagal pateiktas matavimų vietų rekomendacijas [36], bandiniai palyginti su skaitmeniniu modeliu. Spausdintuvu *Prusa MK3S* spausdinto bandinio didžiausias matmens nukrypimas 27%, o realizuotos sistemos 11%. Nors gamybos laikas 4,4 kartus ilgesnis, tačiau bandinio geometriniai matmenys tikslesni. Realizuotos sistemos greitį apribojo vibracijos atsiradusios dėl įrankių keitimo įtaiso laisvumo.

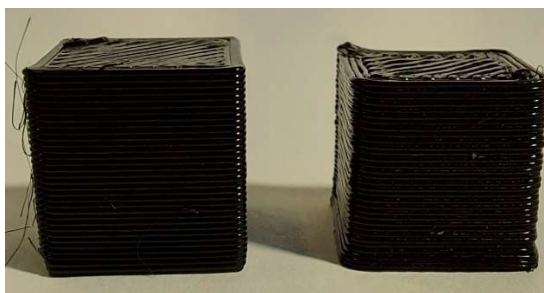
9 lentelė. „3D benchy“ bandinių geometrinių matmenų palyginimas

	Skaitmeninis modelis	Realizuotos sistemos bandinys	Prusa MK3S bandinys
Matmuo 1, mm	23	22,95	22,75
Matmuo 2, mm	7	6,68	6,34
Matmuo 3, mm	11	9,76	9,27
Matmuo 4, mm	3	2,99	2,18
Matmuo 5, mm	60	60,31	60,04
Matmuo 6, mm	31	30,49	30,36
Matmuo 7, mm	15,5	15,82	15,49
Matmuo 8, mm	48	47,87	47,81
Matmuo 9, mm	12	11,62	11,75
Matmuo 10, mm	7	6,97	6,9
Matmuo 11, mm	8	7,96	7,9
Matmuo 12, mm	9	9,33	9,05
Matmuo 13, mm	4	3,9	3,75
Matmuo 14, mm	10,5	10,58	10,38
Matmuo 15, mm	9,5	9,36	9,18
Matmuo 16, mm	9	9,11	8,96
Matmuo 17, mm	12	11,62	12,11
Gamybos laikas	-	4 val. 50 min.	1 val. 6 min.

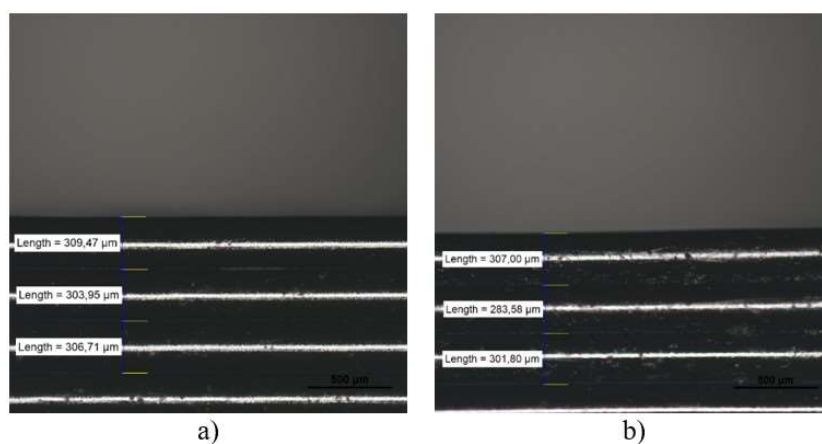
4.3. Atspausdintų bandinių sluoksnių aukščio palyginimas

Antrame tyrimo etape atspausdinti bandiniai 3D spausdintuvu ir realizuota sistema pirmiausia palyginti vizualiai. Kaip matome paveiksle (žr. 46 pav.) spausdintuvu atspausdintas bandinys

pasižymi lygesniu paviršiumi ir tikslesne geometrija, tačiau matomi susidarę siūlai ties paviršiumi. 47 pav. pateiktas bandinių optinio mikroskopo vaizdas, kuriame matyti 5 kartus priartintas vaizdas. Spausdintuvu ir realizuota sistema gauti sluoksnių aukščių paklaidos vidurkiai atitinkamai 6,71 ir 8,4 μm , didžiausios paklaidos 9,74 ir 16,4 μm . Didžiausi geometrijos nuokrypiai atitinkamai 9% ir 6%, gamybos laikas 30 ir 7 min.



46 pav. Atspausdinti kubo 10x10x10 mm bandiniai Prusa MK3S (kairėje) ir realizuota sistema (dešinėje)



47 pav. Atspausdintų kubo 10x10x10 mm bandinių vaizdas pro optinį mikroskopą Prusa MK3S (kairėje) ir realizuota sistema (dešinėje)

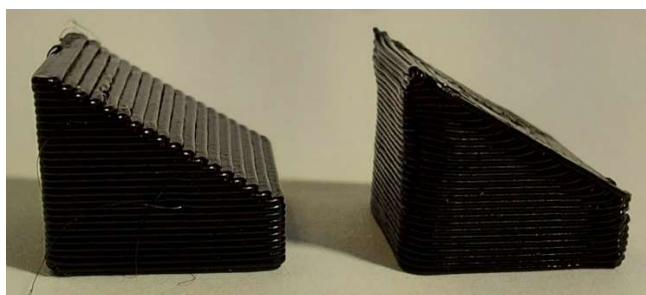
10 lentelė. Kubo 10x10x10 mm bandinių geometrinių matmenų palyginimas

	Skaitmeninis modelis	Realizuotos sistemos bandinys	Prusa MK3S bandinys
Plotis, mm	10	9,81	9,93
Ilgis, mm	10	9,95	10,9
Aukštis, mm	10	9,4	10,14
Gamybos laikas	-	30 min	7 min

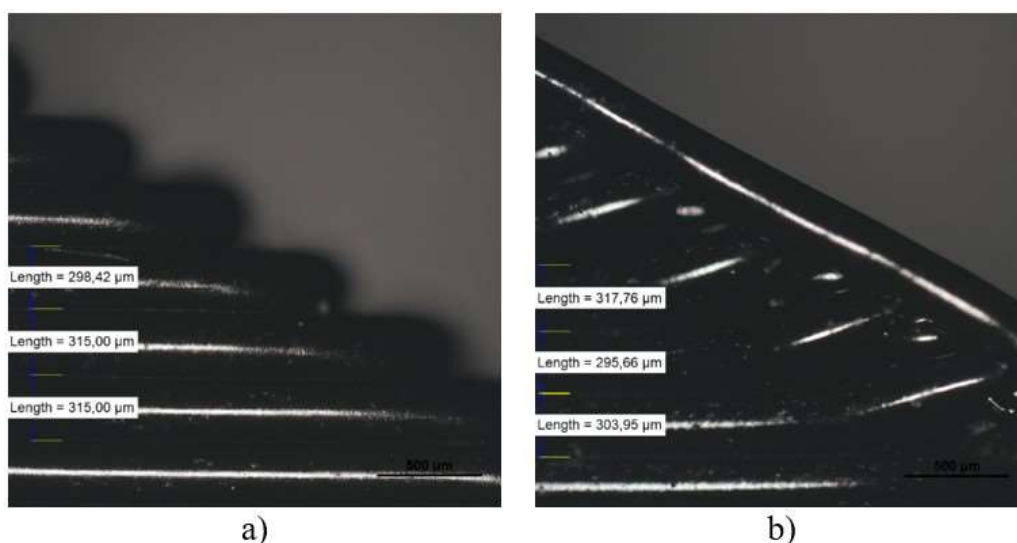
4.4. Tiesaus paviršiaus nelygumų, susidariusių dėl laiptelių, išlyginimas

Vienas ir projekto uždavinių išbandyti daugiaplokštuminį ir kreivalinijinį spausdinimą, šiame etape išbandytas daugiaplokštuminis metodas, kuomet pirmiausia atspausdintas objektas, šiuo atveju trapecija, o vėliau paverstoje plokštumoje užspausdinamas papildomas sluoksnis. Trapecijos atspausdintos 3D spausdintuvu ir realizuota sistema pateikti (žr. 48 pav.). Kaip matome iš pav. nors 3D spausdintuvu atspausdinta trapecija pasižymi lygesniu paviršiumi, tačiau viršutiniuose sluoksniuose matomi susidarę laipteliai, kurie pablogina atspausdinto objekto paviršiaus kokybę. Pav. dešinėje pateikta trapecija, atspausdinta daugiaplokštuminiu metodu, kurios viršuje matomi išlyginti laipteliai. Išlyginimo poveikis matomas (žr. 49 pav.). Sluoksnių aukščių paklaidos vidurkiai

atitinkamai 10,52 ir 8,68 μm , didžiausios paklaidos 15 ir 17,76 μm . Didžiausi geometrijos nuokrypiai atitinkamai 5% ir 4%. Gamybos laikas 6 ir 24 min.



48 pav. Atspausdintos trapecijos bandiniai *Prusa MK3S* (kairėje) ir realizuota sistema (dešinėje)



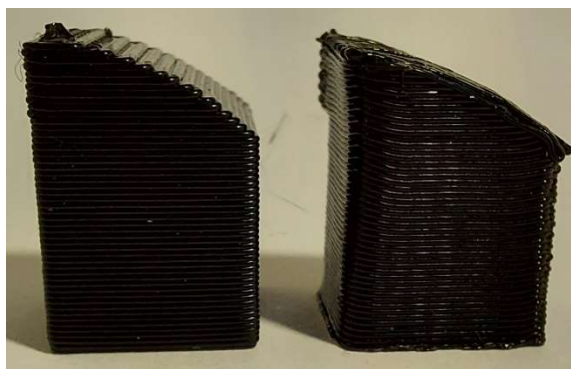
49 pav. Atspausdintų trapecijų bandinių vaizdas pro optinį mikroskopą *Prusa MK3S* (kairėje) ir realizuota sistema (dešinėje)

11 lentelė. Trapecijos bandinių geometrinių matmenų palyginimas

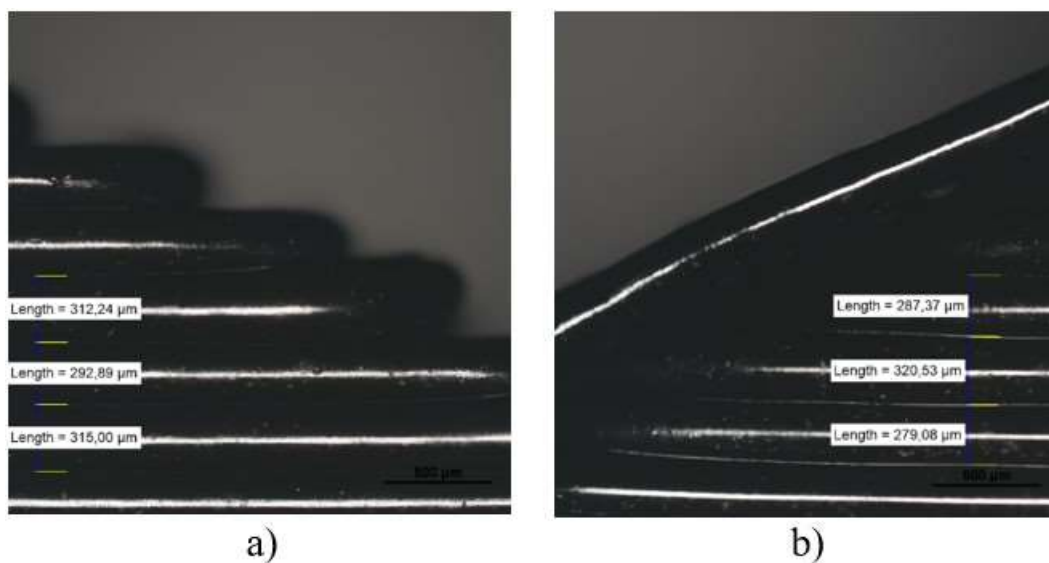
	Skaitmeninis modelis	Realizuotos sistemos bandinys	Prusa MK3S bandinys
Plotis, mm	10	9,89	10
Ilgis, mm	10	9,82	10,18
Aukštis, mm	8,8	8,45	8,37
Gamybos laikas	-	24 min	6 min

4.5. Išlenkto paviršiaus nelygumų, susidariusių dėl laiptelių, išlyginimas

Siekiant išbandyt kreivalinijinio spausdinimo metodą, kaip ir daugiaplokštuminiu atveju pirmiausia atspausdintas pagrindas ant kurio vėliau užspausdintas papildomas sluoksnis, tačiau šiuo atveju, tai atliekama ne vienoje plokštumoje, o ant išlenkto paviršiaus. Eksperimento rezultatai pateikti (žr. **50 pav.**). Kaip matoma iš 50 pav. 3D spausdintuvu atspausdinto bandinio paviršius lygesnis, tačiau dėl viršutinių sluoksnių susidarė laipteliai. Kreivalinijinio spausdinimo metodu laipteliai buvo išlyginti (žr. **51 pav.**), kadangi optinio mikroskopo matymo ruožas apie 2,5 mm, o paviršiaus išlenkimo spindulys 15 mm, optiniame vaizde išlenkimas nesimato. Sluoksnių aukščių paklaidos vidurkiai 11,45 ir 18,02 μm , didžiausios paklaidos 15 ir 20,9 μm . Didžiausi geometrijos nuokrypiai atitinkamai 1,6% ir 1,4%. Gamybos laikas 7 ir 32 min.



50 pav. Atspausdinto objekto su išlenktu paviršiumi bandiniai *Prusa MK3S* (kairėje) ir realizuota sistema (dešinėje)



51 pav. Atspausdintų objektų su išlenktu paviršiumi bandinių vaizdas pro optinį mikroskopą *Prusa MK3S* (kairėje) ir realizuota sistema (dešinėje)

12 lentelė. Objekto su išlenktu paviršiumi bandinių geometrinių matmenų palyginimas

	Skaitmeninis modelis	Realizuotos sistemos bandinys	Prusa MK3S bandinys
Plotis, mm	10	9,92	9,94
Ilgis, mm	10,6	10,58	10,77
Aukštis, mm	15	14,79	15,01
Gamybos laikas		32 min	7 min

4.6. 3D spausdinimas ant išlenktų paviršių

Galiausiai buvo išbandytas 3D spausdinimas ant išlenktų paviršių. Kadangi įprasti 3D spausdintuvai neturi tokios galimybės, buvo įvertinta tik vizualiai atspausdinto bandinio paviršiaus kokybė. Atliekant bandymą pirmiausia buvo atspausdintas objektas su išlenktu paviršiumi ant kurio viršaus atspausdintas Kauno Technologijos Universiteto logotipas, logotipą sudaro 2 sluoksniai. Atspausdintame bandinyje matomi spausdinimo defektai tokie kaip neprilipęs plastikas, susidarę lašeliai, nepakankamas ekstruzijos kiekis ir susidarę siūlai.



a)



b)

52 pav. 3D spausdinimo ant išlenktų paviršiu bandinys

Išvados

1. Suprojektuota ir realizuota adityvios gamybos sistema panaudojant ABB IRB 120 roboto ranką. Spausdinimo ekstruderui medžiagos padavimas atliekamas parinktu ŽV valdikliu TMC 2209, jo valdymą realizuojant per Arduino Mega2560. Suprojektuotas įrankių keitimo mechanizmas, kurio užrakinimo mechanizmas valdomas suspaustu oru. Sistema išbandyta spausdinant bandinius.
2. Palyginta bandinių kokybė spausdinant juos ant horizontalios plokštumos sukurta adityvios gamybos sistema bei Prusa MK3S 3D spausdintuvu. Gauti rezultatai parodė, kad suprojektuotos sistemos bandinių paviršiaus kokybė, lyginant su 3D spausdintuvu Prusa MK3S, prastesnė, gamybos laikas 4,4 ilgesnis, tačiau geometrijos tikslumas iki dviejų kartų didesnis, sluoksnių aukščių paklaidos panašios ir neviršija 21 μm .
3. Spausdinant daugiaplokštuminiu arba kreivalinijiniu metodu galima pagerinti bandinių paviršiaus kokybę, eliminuojant nelygumus susidariusius dėl laiptuotos paviršiaus struktūros.
4. Suprojektuota sistema išbandyta spausdinant ant kreivalinijinių paviršių tuo ji pranašesnė už įprastinius 3D spausdintuvus, kadangi įprasti spausdintuvai tokios galimybės neturi.

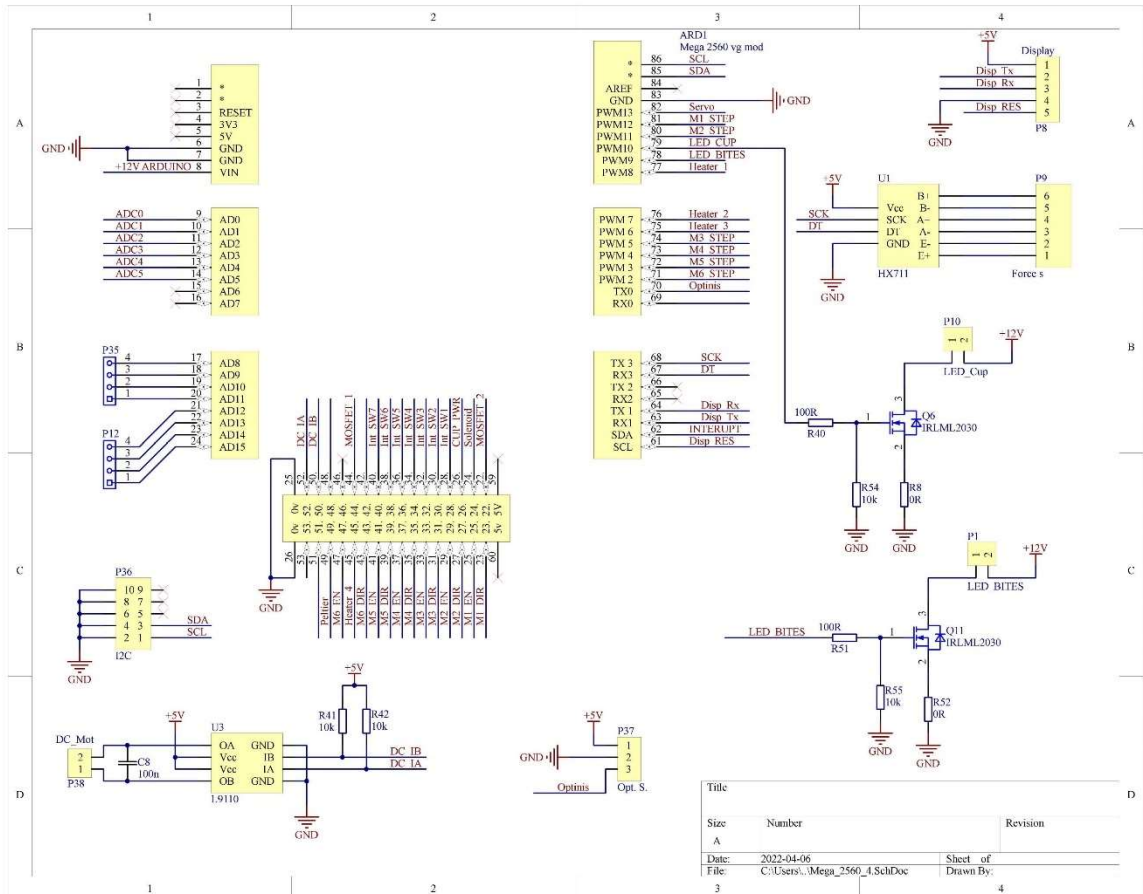
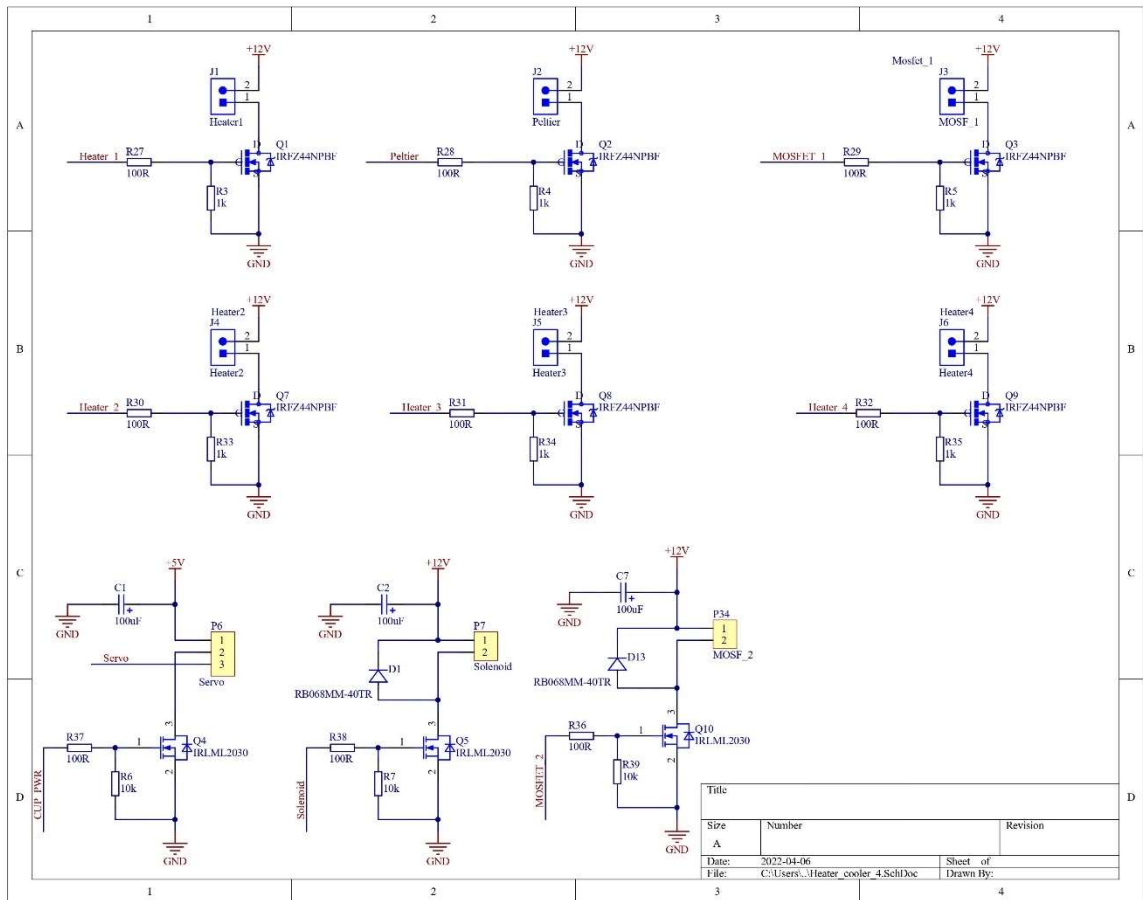
Literatūros sąrašas

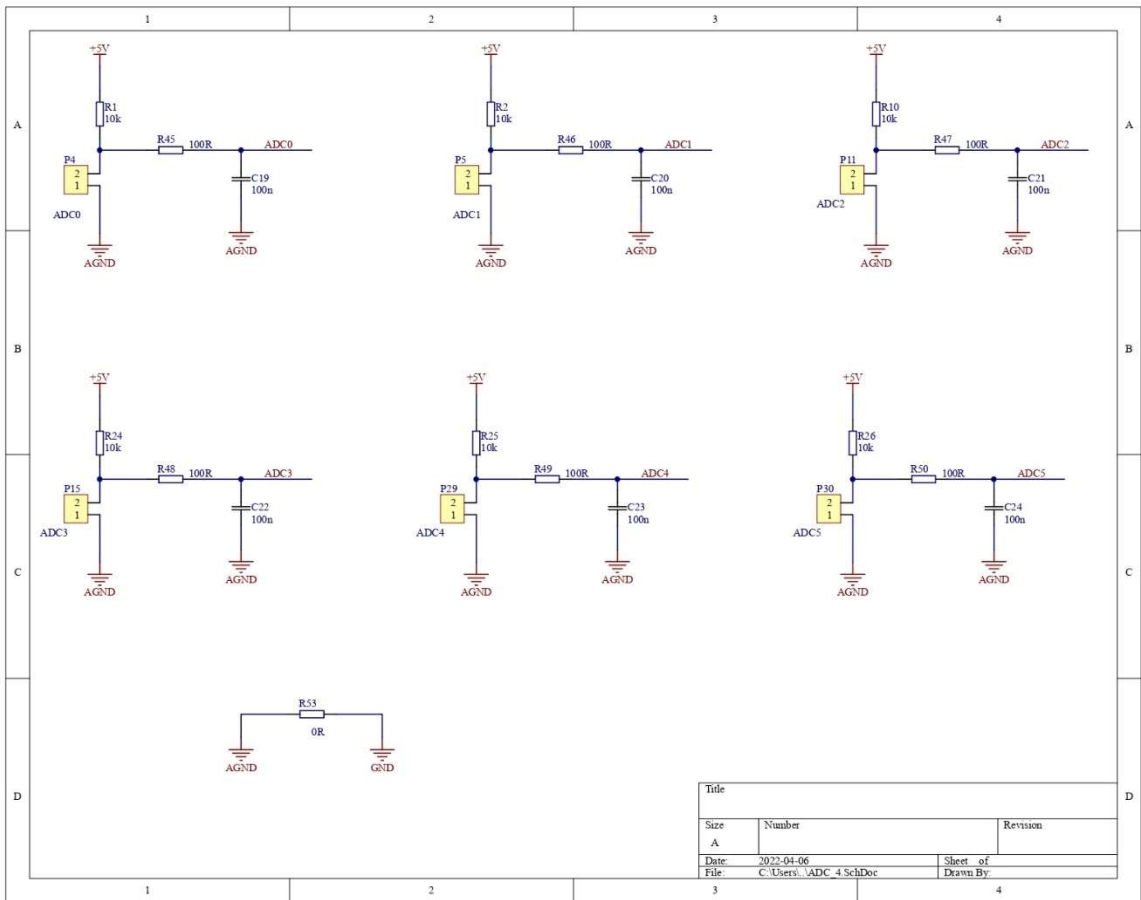
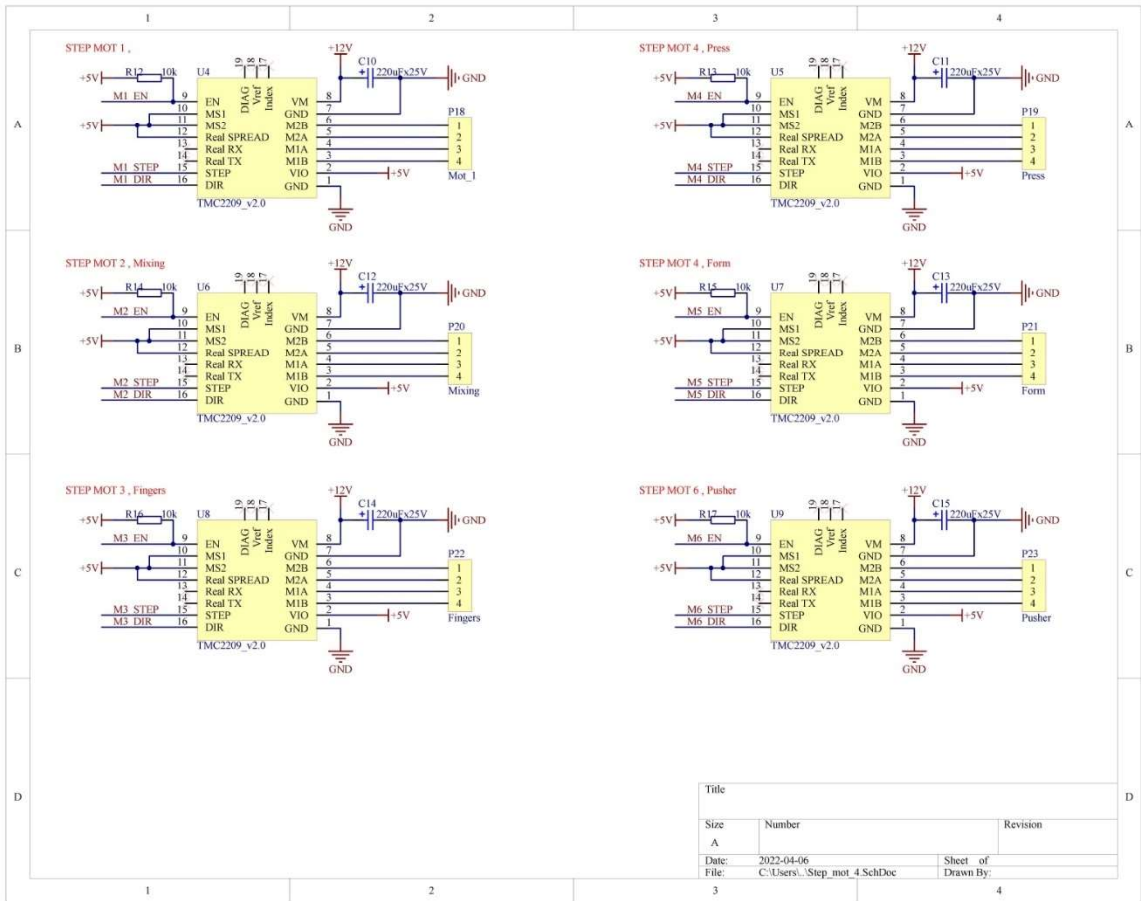
- [1] “Pramonė 4.0.” [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-04-20]. Prieiga per: <https://eimin.lrv.lt/lt/veiklosritys/pramone/pramone-4-0> (accessed Apr. 20, 2022).
- [2] Y. Wang, Y. Zhou, L. Lin, J. Corker, and M. Fan, “Overview of 3D additive manufacturing (AM) and corresponding AM composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 139, no. September, p. 106114, 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.106114.
- [3] H. Bikas, P. Stavropoulos, and G. Chryssolouris, “Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, no. 1–4, pp. 389–405, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7576-2.
- [4] B. Bhushan and M. Caspers, “An overview of additive manufacturing (3D printing) for microfabrication,” *Microsyst. Technol.*, vol. 23, no. 4, pp. 1117–1124, 2017, doi: 10.1007/s00542-017-3342-8.
- [5] C. K. Chua and K. F. Leong, *3D Printing and Additive Manufacturing*. WORLD SCIENTIFIC, 2017.
- [6] R. Udriou and I. C. Braga, “Polyjet technology applications for rapid tooling,” *MATEC Web Conf.*, vol. 112, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1051/mateconf/201711203011.
- [7] A. Nikhil, “3D Printing Processes – Binder Jetting (Part 4/8),” 2021. [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-02-23]. Prieiga per: <https://www.engineersgarage.com/3d-printing-processes-binder-jetting-part-4-8/>.
- [8] M. Izadi, A. Farzaneh, M. Mohammed, I. Gibson, and B. Rolfe, “A review of laser engineered net shaping (LENS) build and process parameters of metallic parts,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 26, no. 6, pp. 1059–1078, 2020, doi: 10.1108/RPJ-04-2018-0088.
- [9] “INDUSTRIAL ROBOTICS IN THE PALM OF YOUR HAND,” 2020. [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-02-11]. Prieiga per: <https://cdn.mecademic.com/uploads/docs/meca500-brochure.pdf>.
- [10] C. Steve, “Robot race of small industrial robots heats up at Automatica 2018,” 2018. [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-02-11]. Prieiga per: <https://www.therobotreport.com/small-industrial-robot-battle-automatica/>.
- [11] “About Mecademic.” [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-02-11]. Prieiga per: <https://www.mecademic.com/en/about-us>.
- [12] “Product specification IRB 120.” [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-02-11]. Prieiga per: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC035960-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [13] “M-20iD/25.” [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-02-12]. Prieiga per: <https://www.fanuc.eu/se/en/robots/robot-filter-page/m-20-series/m-20id-25>.
- [14] “Product specification IRB 1600.” [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-02-12]. Prieiga per: https://library.e.abb.com/public/818d1922d857a640c1257cc500449f38/Product_specifications_IRB1600_3HAC023604-001_revM_en.pdf.
- [15] “IRB 6640.” [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-02-12]. Prieiga per: <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-6640>.
- [16] “About us.” [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-02-15]. Prieiga per: <https://branchtechnology.com/about/>.
- [17] P. Norman, V. Viktor, M. Fabio, K. Matthias, and B. Norman, “Method of fabricating a 3-dimensional structure, mesh formwork element for fabricating a 3-dimensional structure and method of fabricating the same,” US10543619B2, 2013.
- [18] N. P. Hack, “Mesh Mould A robotically fabricated structural stay-in-place formwork system,” *ETH Zurich*, no. April, p. 264, 2018.
- [19] “About MX3D.” [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-02-17]. Prieiga per: <https://mx3d.com/company/about/>.
- [20] “MX3D BRIDGE.” [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-02-17]. Prieiga per: <https://mx3d.com/industries/infrastructure/>.

- [21] “About us.” [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-02-18]. Prieiga per: <https://aectual.com/about>.
- [22] A. Frearson, “Robotic 3D printers create terrazzo floors in any pattern,” 2018. [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-02-17]. Prieiga per: <https://www.dezeen.com/2018/01/02/aectual-robotic-3d-printers-terrazzo-floors-patterns/>.
- [23] “AQUA technology.” [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-02-18]. Prieiga per: <https://arevo.com/products/aqua?lang=en>.
- [24] “WORLD’S LARGEST 3D METAL PRINTERS.” [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-02-18]. Prieiga per: <https://www.relativityspace.com/stargate>.
- [25] C. Scott, “Relativity Space 3D Prints 11-Foot-Tall Fuel Tank with Stargate 3D Printer,” 2018. [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-02-18]. Prieiga per: <https://3dprint.com/231703/relativity-space-3d-prints-fuel-tank/>.
- [26] D. Wise, “Relativity Space launching Terran 1 rocket early 2022,” 2021. [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-02-18]. Prieiga per: <https://spaceexplored.com/2021/08/21/relativity-space-launching-terran-1-rocket-early-2022>.
- [27] L. Li, A. Haghghi, and Y. Yang, “A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies,” *J. Manuf. Process.*, vol. 33, no. September 2017, pp. 150–160, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.05.008.
- [28] S. Keating and N. Oxman, “Compound fabrication: A multi-functional robotic platform for digital design and fabrication,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 29, no. 6, pp. 439–448, 2013, doi: 10.1016/j.rcim.2013.05.001.
- [29] I. Bin Ishak, J. Fisher, and P. Larochelle, “Robot arm platform for additive manufacturing using multi-plane toolpaths,” *Proc. ASME Des. Eng. Tech. Conf.*, vol. 5A-2016, pp. 146–151, 2016, doi: 10.1115/DETC2016-59438.
- [30] C. Wu, C. Dai, G. Fang, Y. J. Liu, and C. C. L. Wang, “RoboFDM: A robotic system for support-free fabrication using FDM,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 1175–1180, 2017, doi: 10.1109/ICRA.2017.7989140.
- [31] X. Li, Q. Lian, D. Li, H. Xin, and S. Jia, “Development of a robotic arm based hydrogel additive manufacturing system for in-situ printing,” *Appl. Sci.*, vol. 7, no. 1, 2017, doi: 10.3390/app7010073.
- [32] L. Milkintas, “Adityviosios gamybos sistemos, taikant pramoninį robotą, projektavimas.” Kauno technologijos universitetas. Prieiga per eLABa – nacionalinę Lietuvos akademinę elektroninę biblioteką, Kaunas, p. 51, 2020.
- [33] “Eclipse LV100ND - Motorized microscope with episcopic/diascopic illumination.” [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-04-11]. Prieiga per: <https://www.nikonmetrology.com/en-us/industrial-microscopes/upright-microscopes-eclipse-lv100nd>.
- [34] “Camera DS-Ri2, Color, 16.25MP, USB3.0, CMOS, F-mount.” [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-04-11]. Prieiga per: <https://www.optics-pro.com/cmos/nikon-camera-ds-ri2-color-16-25mp-usb3-0-cmos-f-mount/p,65552>.
- [35] “3D BENCHY.” [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-04-11]. Prieiga per: <https://www.printables.com/model/3161-3d-benchy>.
- [36] “Measure and calibrate.” [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-05-05]. Prieiga per: <https://www.3dbenchy.com/dimensions/>.

Priedai

1 priedas. Sistemai naudojamos maisto 3D spausdintuvo elektrinė schema





2 priedas. Valdymo programa

```
#include "Datatables.h"
#include <AutoPID.h>
#include <TimerOne.h>
#include <TimerThree.h>

//-----Pinai-----
#define ExtTempPin A3
#define BedTempPin A4

#define ExtHeatPin 7
#define BedHeatPin 49

#define EN1 25
#define STEP1 12
#define DIR1 23

#define CAO0 A0 //Crevis Analog output AO0 -> Arduino Analog input A0
#define CAO1 A1 //Crevis Analog output AO1 -> Arduino Analog input A1

#define CDI0 45 //Crevis Digital input DI0 <- Arduino Digital Output 45 (Heater4)
#define CDI1 6 //Crevis Digital input DI1 <- Arduino Digital Output 6 (Heater3)

#define FANS 44 //Ventiliatorius

//-----Kintamieji-----

const int numReadings = 10;

int bedreadings[numReadings];
int extreadings[numReadings];
int readIndex = 0;
int bedtotal = 0;
int exttotal = 0;
int bedavarage = 0;
int extavarage = 0;

int ExtTempSens;
int BedTempSens;
int Temp;
int CrevisState;
int CAO0Val;
int ExtSpeed =0;
int NEMAPeriod =0;

boolean StateHeatE = 1;
```

```

boolean StateHeatHB = 1;
boolean StateMesE = 1;
boolean StateMesHB = 1;
boolean ExtReady = 0;
boolean HBReady = 0;
boolean TempReady = 0;
boolean CheckTempTime = 0;
boolean CiklasState = 1;
boolean NEMATimer = 0;

unsigned long PIDLaikas = 0;
long lastPIDlaikas = 0;
unsigned long PIDdelsimas = 2000;

String tekstas;

float LayerHeight = 0.3;
float LayerWidth = 0.35;
int printingspeed = 1;
float Extrusionspeed;
float ExtrusionCof = 1.07;
float OneStepFeed = 7.85; // qm/step
float StepsPerSec;
double OneStepPeriod;
float SpeedDivider = 34.1;

int ciklas=0;
unsigned long StartTime, TempDelay;

// -----PID reguliatoriai ir jų kintamieji-----
-----
int bedOUTPUT_MIN = 0;
int bedOUTPUT_MAX = 180;
double bedInput, bedOutput;
double bedSetpoint = 52;
double bedKp=66.49, bedKi=2.25, bedKd=440;
AutoPID bedPID(&bedInput, &bedSetpoint, &bedOutput, bedOUTPUT_MIN, bedOUTPUT_MAX,
bedKp, bedKi, bedKd);

int extOUTPUT_MIN = 0;
int extOUTPUT_MAX = 255;
double extInput, extOutput;
double extSetpoint = 210;
double extKp=63, extKi=2.25, extKd=440;

```

```
AutoPID extPID(&extInput, &extSetpoint, &extOutput, extOUTPUT_MIN, extOUTPUT_MAX,
extKp, extKi, extKd);
```

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(BedHeatPin, OUTPUT); //HB //peltier
  pinMode(FANS, OUTPUT); //Ventilatorius //MOSF1
  pinMode(ExtHeatPin, OUTPUT); //ExtHeat //heater2
  pinMode(CDI1, OUTPUT); //CrevisDI0 //heater3
  pinMode(CDI0, OUTPUT); //CrevisDI1 //heater4
  pinMode(STEP1, OUTPUT);
  pinMode(EN1, OUTPUT);
  pinMode(DIR1, OUTPUT);

  Timer1.initialize(500); //770
  Timer1.start();
  Timer1.stop();
  Timer1.pwm(STEP1, 512);
  digitalWrite(EN1, LOW);
  digitalWrite(DIR1, LOW); // LOW - extrude

  bedPID.setBangBang(2);
  extPID.setBangBang(2);
  bedPID.setTimeStep(1000);
  extPID.setTimeStep(1000);

  for (int i = 1; i <= numReadings; i++) {
    bedreadings[i] = 0;
    extreadings[i] = 0;
  }
  StartTime = millis();

}

void loop() {
  Serialcomms();

  analogWrite(FANS, 180);

  printingspeed = analogRead(A0);
  //printingspeed = 600;
  Extrusionspeed = (ExtrusionCof * LayerHeight * LayerWidth *
float(printingspeed))/(0.875*0.875*3.14*SpeedDivider);
```

```

StepsPerSec = (Extrusionspeed * 1000)/ OneStepFeed;
OneStepPeriod = 1000000/ double(StepsPerSec);
//OneStepPeriod = 2500;
//Serial.println(OneStepPeriod);

if(OneStepPeriod>9){
  //NEMAPeriod = map(ExtSpeed, 10, 1023, 22000, 1); //2500
  Timer1.setPeriod(OneStepPeriod);
  NEMATimer = 0;
}
else {
  NEMATimer = 1;}
if(NEMATimer == 0){ //Tikrina ŽV įgalinimo būseną ir įjungia arba išjungia taimerį
digitalWrite(EN1, LOW);
Timer1.start();}

else {
digitalWrite(EN1, HIGH);
Timer1.stop();
}
if(StateMesE == 1){ //Įgalina ekstruderio temp matavimą

//-----Termistoriaus reikšmių nuskaitymas ir slenkantis vidurkis-----

ExtTempSens = analogRead(ExtTempPin);
GetTemp(ExtTempSens);
extreadings[numReadings] = Temp;
for(int i = 1; i <= numReadings-1; i++){
  extreadings[i] =extreadings[i+1];
}
for(int i = 1; i <= numReadings; i++){
  exttotal = exttotal+extreadings[i];
}
extavarage = exttotal / numReadings;
//Serial.print("  Ext -> ");
// Serial.println(extavarage);
if(extavarage>=extSetpoint){ExtReady=1;}
else {ExtReady=0;}
exttotal = 0;

PIDLaikas = millis();
Serial.print("  PIDLaikas -> ");
Serial.print(PIDLaikas);
Serial.print("  lastPIDlaikas -> ");
Serial.println(lastPIDlaikas);

```

```

if(PIDLaikas > PIDdelsimas){
//lastPIDlaikas = 5;
}
//delay(1);

if(StateHeatE == 1){ //Įgalina ekstruderio šildymą
//Serial.print("  Ext -> ");
}

//-----Ekstruderio temperatūros reguliavimas-----

extInput = extavarage;
extPID.run();
analogWrite(ExtHeatPin, extOutput);
}
else{ //Kitu atveju išjungia šildymą
analogWrite(ExtHeatPin, 0);}
if(StateMesHB == 1){ //Įgalina HB temp matavimą

//-----Termistoriaus reikšmių nuskaitymas ir slenkantis vidurkis-----

BedTempSens = analogRead(BedTempPin);
GetTemp(BedTempSens);
bedreadings[numReadings] = Temp;
for(int i = 1; i <= numReadings-1; i++){
bedreadings[i] =bedreadings[i+1];
}
for(int i = 1; i <= numReadings; i++){
bedtotal = bedtotal+bedreadings[i];
}
bedavarage = bedtotal / numReadings;
if(bedavarage>=bedSetpoint){HBReady=1;}
else{HBReady=0;}
bedtotal = 0;
}
if(StateHeatHB == 1){ //Įgalina HB šildymą
//Serial.print("  Bed -> ");
//Serial.println(bedavarage);

//-----Pagrindo temperatūros reguliavimas-----

bedInput = bedavarage;

bedPID.run();
analogWrite(BedHeatPin, bedOutput);

```

```

}
else { //Kitu atveju išjungia šildymą
  analogWrite(BedHeatPin, 0);}
if(HBReady == 1 && ExtReady == 1){ //Išsiunčia signalą į Crevis DI0, kad temperatūra tinkama
spausdinimui
  if(CheckTempTime == 0){
    TempDelay = millis();
    CheckTempTime = 1;
    //Serial.println(TempDelay);
  }

  if(TempReady != 1){
    if(millis()-TempDelay<2000 && millis()-TempDelay>1000){
      digitalWrite(CDI0,HIGH);
      //Serial.println("HIGH");

    }
    if(millis()-TempDelay>2000){
      digitalWrite(CDI0,LOW);
      //Serial.println("LOW");
      TempReady = 1;
    }
  }
}
if(CiklasState == 1){
if(ciklas >= 1000){ //Ciklo trukmės nustatymas
  //Serial.println(millis()-StartTime);
  ciklas = 0;
  StartTime = millis();
}
ciklas = ciklas+1;}

delay(1);
//Serial.println("labas");

}

void GetTemp(float sensValue){ // jutiklio reikšmės į temperatūrą keitimo funkcija

  if(temptable_75[39][0]>sensValue){} //Kazkas negerai su jutikliu
  for(int i=39; i >=0; i--){
    if(temptable_75[i][0]<sensValue){
      Temp
      map(sensValue*100,temptable_75[i+1][0]*100,temptable_75[i][0]*100,temptable_75[i+1][1]*100,
temptable_75[i][1]*100);
    }
  }
}

```



```
    i=0;
  }
}
if(temptable_75[0][0]>sensValue){
  Temp=23000+((5400-sensValue*100)/2.5524);
}
Temp =Temp/100;
return (Temp);
}
```

```
void Serialcomms() {
  if (Serial.available() {
    tekstas = Serial.readStringUntil('/');
    if (tekstas == "Greitis") {

    }
  }
}
```