



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS FAKULTETAS  
MECHATRONIKOS, ROBOTIKOS IR SKAITMENINĖS GAMYBOS KATEDRA

Šarūnas Paulauskas

**MENINIŲ SKULPTŪRŲ GAMYBOS PRIDĖTINĖS GAMYBOS  
TECHNOLOGIJŲ PAGRINDU GALIMYBIŲ TYRIMAS**

**POSSIBILITIES RESEARCH ON THE PRODUCTION OF ARTISTIC  
SCULPTURES ON THE BASIS OF ADDITIVE MANUFACTURING  
TECHNOLOGIES**

Baigiamasis magistro darbas

Spaudos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H74001

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2018

Vilniaus Gedimino technikos universitetas  
Mechanikos fakultetas  
Mechatronikos, robotikos ir skaitmeninės gamybos katedra

ISBN ISSN  
Egz. sk. ....  
Data .....-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Spaudos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Meninių skulptūrų gamybos pridėtinės gamybos technologijų pagrindu galimybių tyrimas**

Autorius **Šarūnas Paulauskas**

Vadovas **Eugenijus Jurkonis**

**Kalba:** lietuvių

#### **Anotacija**

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamos meninių skulptūrų kopijų gamybos galimybės pridėtinės gamybos technologijų pagrindu, pridėtinės gamybos technologijų panaudojimo aktualumas, sukurtų kopijų tikslumas ir nuokrypių dėsninčiai. Kopijos tikslumas išanalizuotas pagal atspausdintą, 3D spausdinimo technologija, kopija, įvertinti viso paviršiaus nuokrypiai pagal originalą 3D skenavimo ir atvirkštinės inžinerijos įrankiais. Išnagrinėjus nuokrypius, atlikus užduotis ir patvirtinus ar paneigus iškeltas hipotezes, pateiktos darbo išvados ir pasiūlymai.

Darbo apimtis: 41 puslapis teksto be priedų, 18 paveikslų, 4 lentelės.

**Prasminiai žodžiai:** pridėtinė gamyba, 3D spausdinimas, meninės skulptūros kopija, tikslumas.

Vilnius Gediminas Technical University  
Faculty of Mechanics  
Department of Mechatronics, Robotics and Digital Manufacturing

ISBN ISSN  
Copies No. ....  
Date .....-.....-.....

Master Degree Studies **Printing Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Possibilities Research on the Production of Artistic Sculptures on the Basis of Additive Manufacturing Technologies**

Author **Šarūnas Paulauskas**

Academic supervisor **Eugenijus Jurkonis**

**Thesis language:** Lithuanian

**Annotation**

Master's thesis analyses possibilities to create replicas of art sculptures with additive manufacturing tools, additive manufacturing technology relevance, accuracy and deviation regularities of created replica. Accuracy of replica is analysed with 3D printed replica by comparing with original art sculpture using 3D scanning and reverse engineering tools. Conclusions and suggestions are submitted after deviation analyses, fulfillment of tasks and confirmations or denials of raised hypothesis.

Amount of work: 41 pages without additions, 18 figures, 4 tables.

**Keywords:** additive manufacturing, 3D printing, replica of art sculpture, accuracy

## TURINYS

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS .....                                | 8  |
| LENTELIŲ SĄRAŠAS .....                                 | 9  |
| SANTRUMPŲ AIŠKINAMASIS ŽODYNAS .....                   | 10 |
| ĮVADAS .....                                           | 11 |
| 1. LITERATŪRA .....                                    | 12 |
| 1. 1. Mokslinių šaltinių analizė .....                 | 12 |
| 1. 2. Mokslinių šaltinių analizės apibendrinimas ..... | 15 |
| 2. DARBO TIKSLAS .....                                 | 16 |
| 3. MENINIŲ SKULPTŪRŲ KOPIJAVIMAS .....                 | 20 |
| 3. 1. Kopijavimo būdai .....                           | 20 |
| 4. LYGINAMOJI ANALIZĖ .....                            | 21 |
| 5. GEOMETRINIŲ PAKLAIDŲ KILMĖ .....                    | 23 |
| 5. 1. Geometrinių paklaidų kilmės grupės .....         | 23 |
| 5. 2. Skaitmeninis tikslumas .....                     | 24 |
| 5. 3. Įrenginio tikslumas .....                        | 26 |
| 6. TYRIMAI .....                                       | 28 |
| 6. 1. Skulptūros gamyba .....                          | 28 |
| 6. 2. 3D skenavimas .....                              | 30 |
| 6. 3. Lyginamoji analizė .....                         | 31 |
| 7. REZULTATAI .....                                    | 33 |
| IŠVADOS .....                                          | 38 |
| LITERATŪROS ŠALTINIAI .....                            | 39 |
| PRIEDAI .....                                          | 41 |

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 pav. SLS technologija atkurtas miniatiūrinis fasadas .....                                 | 12 |
| 2 pav. „Francesco II Gonzaga“ biusto geometrinių nuokrypių palyginimai .....                 | 13 |
| 3 pav. „Gaudi’s Porta del Drac“ skulptūra. Skenuotas vaizdas ir SLS būdu pagaminta kopija... | 14 |
| 4 pav. Pagal skenavimo metu išgautą elementų reljefą atkurtas hipotetinis 3D modelis .....   | 15 |
| 5 pav. Tyrimo etapai .....                                                                   | 18 |
| 6 pav. Lyginamosios analizės įrankiu sukurta spalvinė nuokrypių diagrama .....               | 21 |
| 7 pav. Geometrinių paklaidų kilmės grupės ir priežastys.....                                 | 24 |
| 8 pav. Kompiuterinio „stl“ formato modelio paviršiaus struktūra .....                        | 25 |
| 9 pav. „Artec Eva 3D“ skeneris.....                                                          | 27 |
| 10 pav. Pradinės skulptūros dalys .....                                                      | 29 |
| 11 pav. „Z-Suite“ programinėje įrangoje suvesti nustatymai .....                             | 30 |
| 12 pav. Suklijuota ir paruošta skulptūra skenavimui.....                                     | 31 |
| 13 pav. „Artec Studio 11“ programinės įrangos vaizdas su sujungimo procedūros langu.....     | 32 |
| 14 pav. Spalvinė nuokrypų matrica .....                                                      | 34 |
| 15 pav. Nuokrypių dažnio pasiskirstymas .....                                                | 35 |
| 16 pav. Dviejų skirtingų tūrio dalių palyginimas nuokrypių pasiskirstymo dažniu.....         | 36 |
| 17 pav. Dviejų projekcijų suliginimas .....                                                  | 37 |
| 18 pav. Dviejų skirtingų kopijų palyginimas spalvine nuokrypių matrica.....                  | 38 |

## **LENTELIŲ SĄRAŠAS**

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 lentelė. Kopijavimo technikos ir bendrieji duomenys palyginimui.....      | 20 |
| 5.2 lentelė. Parinktų sluoksnio storių teoriniai nukrypimo skaičiavimai ..... | 26 |
| 5.3 lentelė. „Zortrax M200“ 3D spausdintuvo techninės specifikacijos .....    | 26 |
| 5.4 lentelė. „Artec Eva“ 3D skenerio techninės specifikacijos .....           | 27 |

## SANTRUMPŲ AIŠKINAMASIS ŽODYNAS

AM – pridėtinė gamyba ar 3D spausdinimas (angl. *additive manufacturing*);

FDM – lydyto nusėdimo modeliavimas (angl. *fused deposition modeling*). Pridėtinės gamybos technologijos rūšis;

SLA – stereolitografija (angl. *stereolithography*). Pridėtinės gamybos technologijos rūšis;

SLS – selektyvus kietinimas lazeriu (angl. *selective laser sintering*). Pridėtinės gamybos technologijos rūšis;

t. y. – tai yra.

## IVADAS

Paskutiniais metais 3D modeliavimo, spausdinimo ir skenavimo technologijos tapo daug pigesnės ir lengviau naudojamos, kur visuomenė kelia didžiulį susidomėjimą šiomis technologijomis. Stalinių 3D spausdintuvų pasirinkimai ir pardavimai yra gerokai išaugę (3D printing...2017). Šios technologijos yra atrandamos vis didesniame skaičiuje sferų – nuo plastikinių detalių gamintojų ir butelių iki liejimo įmonių ir skulptūrų gamyboje. Nepaisant žemų kaštų ir lengvo prieinamumo, technologija vis dar reikalauja investicijų ir specifinių žinių panaudojant 3D spausdinimo, skenavimo ar modeliavimo technologijas (Pizzirani, A. 2015).

3D spausdinimo technologija turi galimybę pakeisti senąsias skulptūrų gamybos ar kopijavimo tradicijas, kompiuterinių modelių manipuliavimo galimybėmis ar itin tikslių kopijų sukūrimu galimybėmis.

Magistro darbe tikimasi išsiaiškinti ir išanalizuoti, kaip tiksliai yra atkuriamos skulptūrų kopijos taikant 3D skenavimo ir lyginamųjų analizių įrankius.

# 1. LITERATŪROS APŽVALGA

## 1.1. Mokslinių šaltinių analizė

Remiantis faktu, kad šiame darbe tikimasi išanalizuoti AM būdu pagamintų skulptūrų tikslumą, yra peržvelgti pasaulinėje rinkoje esantys atlikti tyrimai. Panašaus pobūdžio atliktų tyrimų skaičius yra itin mažas ir iš to galima daryti prielaidą, kad AM gamybos būdas gaminti skulptūrų kopijas dar nėra visiškai išbandytas ir ištirtas.

Šiomis dienomis daug dėmesio skiriama kultūrinių ar istorinių relikvijų atkūrimui taikant pridėtinės gamybos technologijas, kadangi ši priemonė puikiai geba atkartoti skenavimo metu sukurtą geometrinį objektą. Italų mokslininkai yra išanalizavę trijų skirtingų spausdinimo technologijų atkuriamą tikslumą gaminant istorinių relikvijų kopijas (Balletti, C., *et al.* 2017):

- FDM;
- SLA;
- SLS.

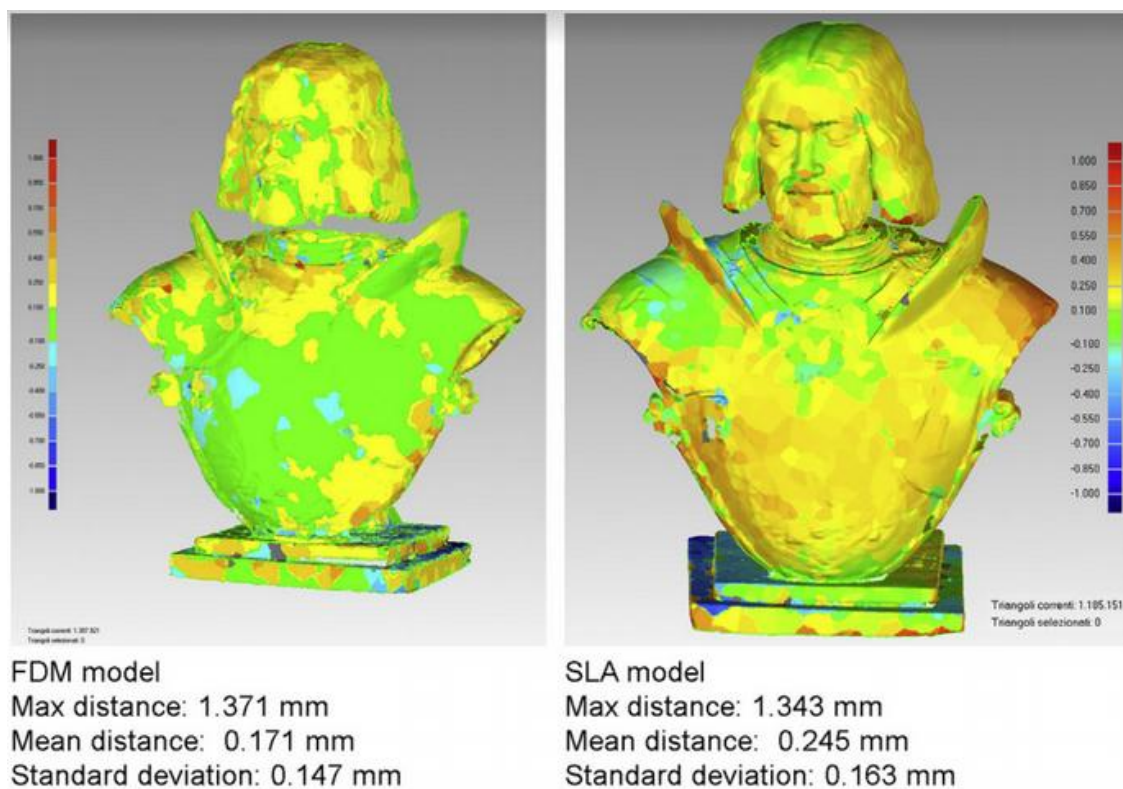
SLS 3D spausdinimo technologija panaudota atkuriant miniatiūrinį kultūrinio pastato fasadą ir išplėtojant panaudojimo sritį – kaip taktilinį maketą neregiamas, kartu pridėdant ir garso įrangą. Taip pat padarytos prielaidos, jog technologija geba sukurti itin sudėtingus elementus dėl palaikančiųjų struktūrų nereikalingumo, kadangi spausdinimo metu darbo dėžė yra visiškai užpildoma milteliais nustatytais sluoksnio storiais. Tie patys nesulipę ir nesukietėję milteliai atlieka prilaikymo funkciją, kurie baigus spausdinti yra paprasčiausiai nuvalomi. Taip pat SLS technologija pasižymi aukštu tikslumu, tačiau tolesnės lyginamosios analizės nebuvo atliktos.



1 pav. SLS technologija atkurtas miniatiūrinis fasadas

Atliekant lyginamąją analizę tarp FDM ir SLA sukurtų kopijų ir originalų („Francesco II Gonzaga“ biustas. 2 pav.), tyrimo metu prieita prie išvados, jog FDM technologija geba atkurti objektus tiksliau, tai itin nustebino, kadangi visuotinai priimtos išvados (remiantis tuo, kad technologija yra itin paplitusi odontologijos sferose dėl aukšto sukuriama tikslumo) rodo, jog SLA technologijos

sukuriamas tikslumas yra ženkliai aukštesnis (Patel, N. 2017). Lyginamosios geometrinės analizės parodė, jog FDM technologijos sukurto objekto nuokrypiai vidutiniškai siekia 0,171 mm nuo originalo, o SLA – 0,245 mm. Atlikta prielaida, jog SLA technologijos įrenginio mechaninės detalės yra deformavusios arba geometrinį tikslumą paveikė procesai po spausdinimo: valymo ir ultravioletinės šviesos kietinimo procesai.



2 pav. „Francesco II Gonzaga“ biusto geometrinių nuokrypių palyginimai tarp FDM ir SLA technologijų

Panašaus pobūdžio tyrimai, apžvelgiantys meninių skulptūrų kopijų atkūrimo galimybes, remiasi vieno pasirinkto objekto atkūrimu, antai Ispanijos laboratorija atlikto skenavimą lazeriniu 3D skeneriu skulptūros („Gaudi’s Porta del Drac“ 3 pav.) ir atliko atkūrimą AM gamybos būdu taikant SLS spausdinimo technologiją. Daugiausia dėmesio sutelkta skenavimo procesui – skulptūros perkėlimui į kompiuterinę sistemą, kadangi yra dideli 3D skenavimo procesų apribojimai dėl siaurų, gilių ir kitų sunkiai pasiekiamų vietų, kur įrenginio sukuriamas lazeris ar šviesos tinklas negali pasiekti grįžtamajam ryšiui sukurti – atstumams ir kampams apskaičiuoti. Tokiu atveju istorinis paveldas atkuriamas netiksliai remiantis programinės įrangos apytiksliai trūkstamų geometrinių elementų atkūrimu, kadangi procesas vykdomas spėjimo principu pagal šalia esančias geometrijas.



3 pav. „Gaudi’s Porta del Drac“ skulptūra. Skenuotas vaizdas ir SLS būdu pagaminta kopija

Laikantis fakto, jog sudėtingesnių konstrukcijų objektai atkuriami daug sudėtingiau, AM būdu pagaminta kopija negali būti laikoma tikslu gaminiu, tačiau, pasak straipsnio autorių, yra puiki priemonė kurti sumažinto mastelio objektus, kur smulkūs elementai savaime išnyksta dėl 3D spausdinimo apribojimų (Corso, J., *et al.* 2017).

Fotogrametrija, kaip 3D skenavimo technologija, panaudota atkuriant ganėtinai tikslius fasadinius 3D modelius, kurie yra sunkiau pasiekiami ir vienintelė išeitis išgauti geometrinę informaciją yra pozicionuoti skenavimo įrenginį 1,8 m atstumu iki objekto. Iš daugybės nuotraukų visumos programinė įranga atkūrė reikalingus 3D modelius, tuo pačiu ir prarasto veido (4 pav.) reljefinius kontūrus, kuris buvo rekonstruotas sumodeliuojant trūkstamą elementą remiantis kitų fasadinių elementų išsidėstymais ir formomis. Rekonstrukcija atlikta remiantis hipotezėmis ir negali būti atestuotas kaip tiksli kopija.

Rekonstruotas trūkstamas veido elementas atspausdintas naudojantis FDM technologijos 3D spausdintuvu įvertinti suderinamumą ir atliktos rekonstrukcijos patvirtinimą (Tucci, G., *et al.* 2017).



4 pav. Pagal skenavimo metu išgautą elementų reljefą atkurtas hipotetinis 3D modelis

### **1.2. Mokslinių šaltinių analizės apibendrinimas**

Peržvelgus panašaus pobūdžio atliktus tyrimus, matyti viena tendencija – mažų gabaritų meninių skulptūrų ar istorinių relikvijų replikavimo galimybės ir trumpos apimties tyrimai. Teoriškai, AM gamybos galimybės yra neribotos ne tik dizaino ar medžiagų prasme, bet ir matmenų dydžiuose, todėl itin pravartu ištirti replikavimo galimybes kuriant didesnių matmenų objektus, šiuo atveju, meninę skulptūrą.

Atliktos lyginamosios analizės rėmėsi tik spalvinėmis diagramomis ir vidutinėmis reikšmėmis, tačiau nėra aišku, kaip keičiasi nuokrypiai spausdinant gaminius iš daug daugiau dalių ir įvedant žmogiškąjį faktorių – klijavimo ir apdirbimo procesus. Taip pat tyrimai rėmėsi tik tinkamumu iš vizualinės pusės ar apibendrinant atkūrimo galimybes plačiąja prasme.

## 2. DARBO TIKSLAS

Remiantis pasauline tyrimo ir pramonės patirtimi, naujos technologijos panaudojimo aktualumu bei neištirtų galimybių gaminant didesnių matmenų meninės paskirties objektus, tikslas yra ištirti meninių skulptūrų, gamintų 3D spausdinimo technologija, tikslumą lyginant su „originalu“.

### Uždaviniai

Tam, kad būtų sėkmingai ištirti skulptūros kopijavimo galimybė pridėtinės gamybos būdu, yra išskirti keli pagrindiniai uždaviniai tyrimui atlikti:

- Suformuoti „originalo“ skaitmeninį modelį. Tyrime „originalas“ laikomas kompiuterinis Ogiusto Rodeno „Mąstytojo“ (1902 m.) skulptūros „stl“ formato 3D modelis.
- Pridėtinės gamybos būdu naudojantis stalinio tipo įrenginiais sukurti 60 cm aukščio skulptūros kopiją.
- „Originalo“ ir kopijos nuokrypių analizė. Pridėtinės gamybos būdu sukurtos ir nuskenuotos, 3D skenavimo technologija, kopijos palyginimas su „originalu“.

### Geometrinių nuokrypių analizė ir hipotezės

Tyrimui realizuoti ir rezultatams apibendrinti, pagrindinis įrankis yra programinės įrangos sukuriamą geometrinių nuokrypių analizę, priklausanti atvirkštinės inžinerijos programinės įrangos visumai. Nuokrypių analizė gali būti apdorota statistine analize ir įvertintos iškeltos hipotezės. Skulptūros tikslumo įvertinimams turi būti realizuoti šie rezultatai:

- Absoliučią geometrinių nuokrypių matrica 3D skenavimo būdu. Pirminis nuokrypių analizės etapas. Nuokrypių įvertinimas pagal sugeneruotos spalvinės diagramos matricą.
- Erdvinė nuokrypių diagrama. Statistinė analize apdorotos informacijos suglaudimas į bendrą pasiskirstymą, kur įvertinamas nuokrypių pasiskirstymo dažnis ir apskaičiuotas santykis, patenkantis į išreikštą nuokrypių intervalą.

Taip pat magistro darbui yra iškeltos trys pagrindinės hipotezės:

- 1 hipotezė. Mažesnės skulptūros sudedamosios tūrio dalys yra tikslesnės nei didesnės. Pagal bendrą praktinį suvokimą, mažesnės tūrio dalys turi mažesnes deformacijas ir susitraukimus dėl temperatūros pokyčių nei didesnės tūrio dalys. Pasiskirstymo dažnių palyginimas tarp dviejų skirtingo tūrio dalių.

- 2 hipotezė. Vidutinė absoliučių nuokrypių reikšmės didėja didėjant sluoksnių skaičiui. Deformacijos ir matmenų susitraukimai dėl vėsinimosi poveikių bei susispaudimas didėjant sluoksnių skaičiui – svariui turi parodyti bendrą poslinkį.
- 3 hipotezė. Stabilumo patvirtinimas – vieno objekto dvigubas skenavimas. 3D skenavimo įrenginio patikimumo pagrindimas antrą kartą atlikus kopijos 3D skenavimą atkuriant baigtinį „stl“ formato 3D modelį, kaip ir pirmos kopijos atveju. Dviejų kopijų palyginimas spalvinei diagramai ir absoliutinei paklaidai gauti.

### **Temos aktualumas**

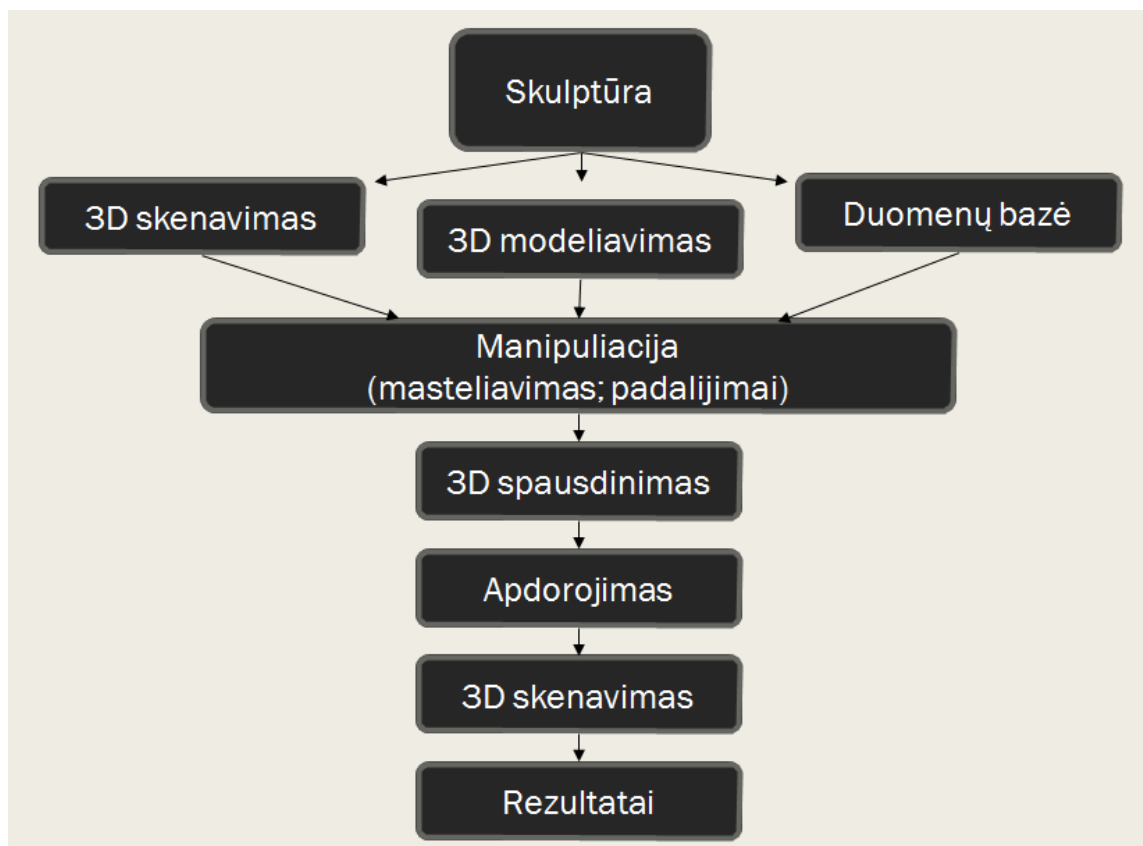
Iš publikuotų mokslinių straipsnių apžvalgos, matyti, jog tyrimai atlikti išnaudojant turimų įrenginių galimybes, t. y. atkurtos kopijos yra sumažinto mastelio siekiant sutalpinti į 3D spausdintuvo darbo dėžę, kurių dydžiai vidutiniškai siekia 200 x 200 x 200 mm. Iš to kyla natūralus klausimas, kaip stalinio tipo 3D spausdintuvai, veikiant FDM technologijai (dėl žemų kaštų), gali būti panaudoti atkuriant didesnių matmenų menines skulptūras ir kiek atlikta procesų visuma yra tiksli lyginant su meninės skulptūros originalu.

Taip pat tyrimo rezultatai turi parodyti poslinkių ar nuokrypių dėsningumą dėl keliolikos dalių visumos, kurie yra tarpusavyje suklijuoti, taip įvertinant žmogiškojo faktoriaus įtaką.

## Tyrimo eiga

Darbo tyrimas susideda iš kelių pagrindinių etapų (5 pav.):

1. Tyrimo subjekto – meninės skulptūros, kaip originalo, gavimas 3D skenavimo, 3D modeliavimo būdais arba tiesiogiai iš 3D modelių duomenų bazės.
2. Kopijos gamybos paruošimo darbai manipuliuojant patį 3D modelį keičiant mastelį ar atliekant plokštuminius padalijimus sutalpinimui į ribotas 3D spausdintuvo darbo dėžes.
3. Paruoštų dalių gamyba 3D spausdinimo technologija ir pagamintų dalių apdorojimas klajavimo ir apdirbimo procesais tolesniems tyrimams.
4. Paruoštos meninės skulptūros 3D skenavimas skaitmeninei informacijai paruošti palyginimui su pirminiu 3D modelio originalu.
5. Meninės skulptūros palyginimas atvirkštinės inžinerijos lyginamosios analizės įrankiu spalvinei diagramai ir statistikos duomenims gauti;
6. Rezultatų apibendrinimas pagal iškeltas hipotezes.



5 pav. Tyrimo etapai

**Tyrimo įranga:**

- 3D spausdintuvas „Zortrax M200“, veikiantis pagal FDM technologiją. Kopijos dalims atspausdinti – sukurti.
- 3D skeneris „Artec Eva“, veikiantis struktūrinės šviesos srauto technologijos pagrindu. Sukurtai kopijai perkelti į kompiuterinę sistemą „stl“ formato pavidalu.
- Programinė įranga „VGStudio MAX 3.0“. Originalo ir kopijos suliginimo ir nuokrypių analizės bei statistikos duomenų išgavimo įrankis.

### 3. MENINIŲ SKULPTŪRŲ KOPIJAVIMAS

#### 3.1. Kopijavimo būdai

Nuo senų laikų egzistuoja įvairūs skulptūrų gamybos ir jų kopijavimo procesai. Kiekvienas būdas yra apibrėžiamas pagal techniką ir medžiagas. 3.1 lentelėje yra išdėstyti penki skulptūrų gamybos būdai kartu su pridėtine gamyba. Apibendrinta informacija leidžia matyti aiškius skirtumus tarp ilgą laiką naudojamų technologijų ir AM. Lentelėje prie skilties „Medžiaga“ yra įrašyti populiariausios atitinkamai technologijai naudotos ar naudojamos medžiagos (Sculpture. 2018).

3.1 lentelė. Kopijavimo technikos ir bendrieji duomenys palyginimui

| Technologija              | Kalimas (angl. <i>sculpting</i> ) | Liejimas           | Lipdymas                   | Drožimas     | Pridėtinė gamyba (AM)          |
|---------------------------|-----------------------------------|--------------------|----------------------------|--------------|--------------------------------|
| <b>Medžiaga</b>           | Marmuras                          | Bronza             | Molis                      | Mediena      | ABS plastikas                  |
| <b>Matmenų perkėlimas</b> | Fiksuota adata; „iš akies“        | Originalo įspaudas | Fiksuota adata; „iš akies“ | „Iš akies“   | Programinė įranga; 3D skeneris |
| <b>Tikslumas</b>          | Aukštas                           | Labai aukštas      | Aukštas                    | Vidutiniškas | Labai aukštas                  |
| <b>Trukmė</b>             | Labai ilgas                       | Ilgas              | Greitas                    | Greitas      | Labai greitas                  |
| <b>Kaštai</b>             | Labai brangus                     | Brangus            | Labai pigus                | Labai pigus  | Pigus                          |
| <b>Pagr. privalumas</b>   | Ilgaamžiškumas                    | Tvirtumas          | Patogumas                  | Pigumas      | Įvairiapusis                   |

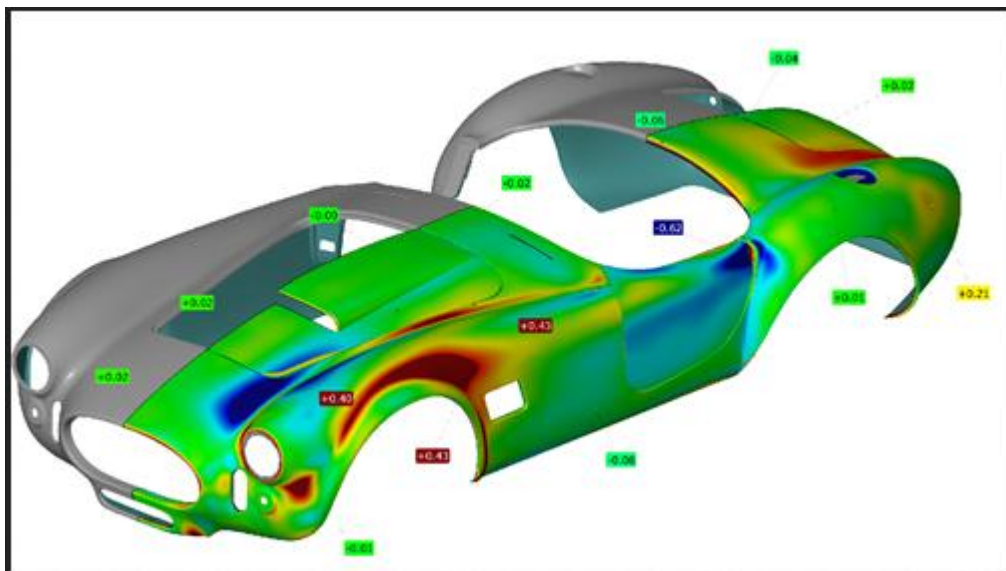
Remiantis lentele, galima apibendrinti, jog kopijavimo būdai keturiais pirmais būdais remiasi žmogaus sugebėjimu baziniais įrankiais atkurti tų pačių proporcijų ir matmenų skulptūras. Kitaip tariant, kūrybiniai procesai nėra automatizuoti ir bendrą tikslumą bei kokybę lemia žmogiškieji faktoriai ir klaidos. Taip pat, lyginant su AM, tiek viena, tiek kita technologija turi savo apribojimų pagal medžiagų panaudojimo galimybes, pagal greitumą ir savikainą, tai leidžia spręsti, jog AM gamybos būdas gali būti patrauklus kurti skulptūrų kopijas.

## 4. LYGINAMOJI ANALIZĖ

Lyginamoji analizė yra labai svarbi atvirkštinės inžinerijos (angl. *reverse engineering*) įrankių visumos dalis. Terminas apibrėžia procesų visumą, kuris taikomas jau egzistuojantiems objektams rekonstruoti. Kitaip nei įprastas objekto kūrybos procesas, kuris remiasi brėžiniais ir specifikacijomis, atvirkštinėje inžinerijoje objekto kūryba prasideda jau nuo egzistuojančio daikto siekiant atkurti visus reikiamus parametrus (dydžius) ir dokumentuoti (What... 2016).

Dažniausiai atvirkštinė inžinerija prasideda nuo kompiuterinio 3D objekto (mechaninė detalė, gaminys ar istorinis atrefakas), kuris yra išgautas dažniausiai 3D skenavimo technologijomis pagalba.

Vienas svarbiausių atvirkštinės inžinerijos procesų įrankių yra lyginamosios analizės (angl. *deviation analysis*) algoritmas, skirtas patikrinti, kaip kuriamo ar visiškai atkurto objekto dydžiai sutampa su originalu (nuskenuotu). Lyginamoji analizė atvaizduoja spalvinę nuokrypių matricą (6 pav.), kuri atvaizduoja tūkstančių taškų padėčių atstumus nuo originalo pagal XYZ koordinačių sistemą. Tai itin plačiai paplitusi priemonė pramonės ir kitose gamybos šakose, kai pagaminti gaminiai turi būti patikrinti, ar matmenys yra išsilaikę savo normos ribose lyginant su originalu (brėžiniais ar kompiuteriniu 3D modeliu).



Nuokrypio dydis išreikštas šia formule:

$$\Delta xyz = xyz - kx_n y_n z_n \quad (1)$$

Čia:  $\Delta xyz$  – taško padėties skirtumas (nuokrypis);  $xyz$  – originalaus objekto taško padėtis;  $x_n y_n z_n$  – kopijos taško padėtis.;  $k$  masteliavimo koeficientų stulpelis, jei modelio matmenys nesikeičia –  $k = 1$ .

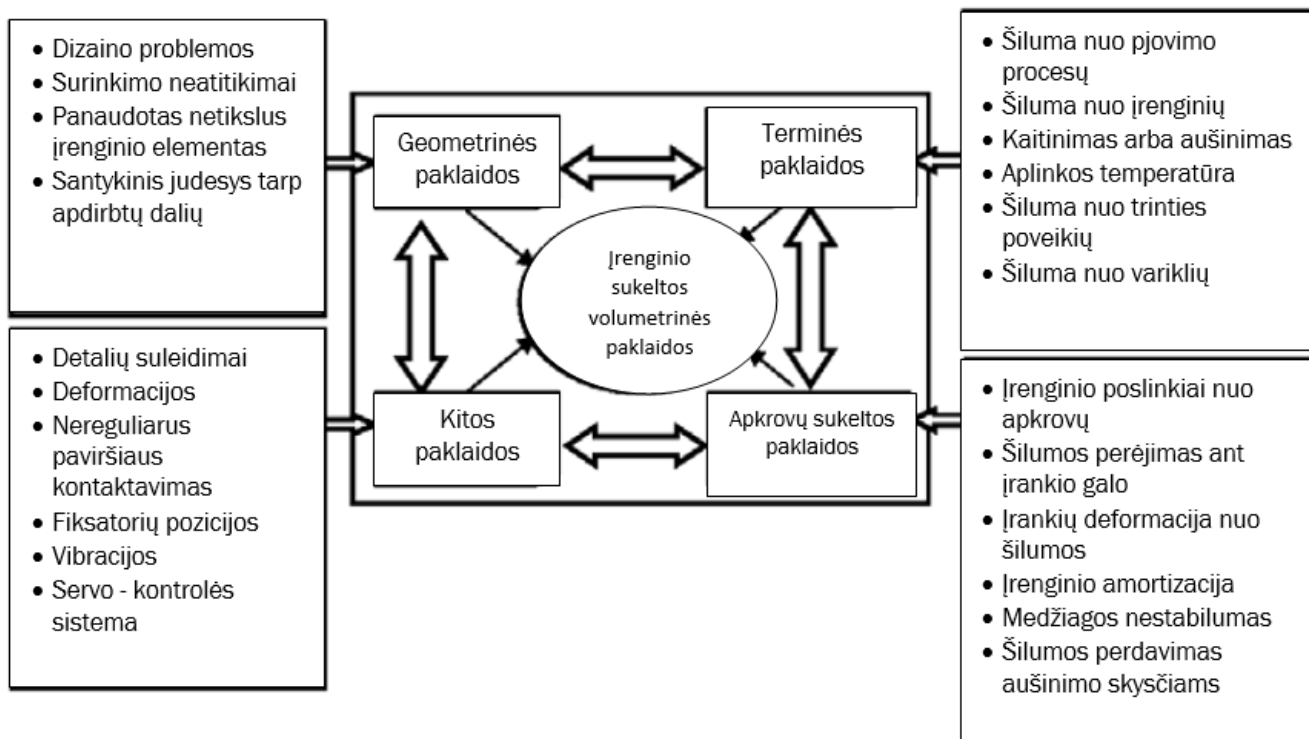
Be spalvinės nuokrypių diagramos, įrankis leidžia išgauti kiekvieno taško dydžius statistikos analizės tikslams išsaiškinant poslinkių ir kitų dėsnų tendencijas.

## 5. GEOMETRINIŲ PAKLAIDŲ KILMĖ

### 5.1. Geometrinių paklaidų kilmės grupės

Pridėtinėje gamyboje objekto sukūrimas vykdomas per kelis etapus, kaip matyti 5 paveiksle. Todėl atkreiptinas dėmesys yra į paklaidų kilmes kiekvienai grupei, kurie gali vienaip ar kitaip paveikti bendrus rezultatus. 7 paveiksle matyti keturios pagrindinės geometrinių paklaidų kilmės grupės (Ramesh, R., *et al.* 2000):

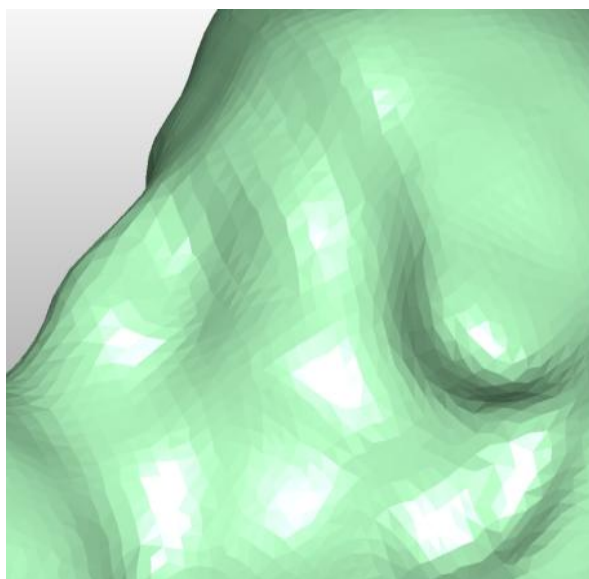
- Geometrinės paklaidos. Galimos paklaidos atsiranda dar pirmame projektavimo etape, kuomet gali nesutapti tolerancijos, netinkamai suprojektuotas gaminys gali būti technologiškai sunkiai įgyvendinamas, netinkamai paruošti surinkimai. Iš pridėtinės gamybos pusės, ypač FDM technologijos, reikia įvertinti šias pagrindines rekomendacijas:
  - Objekto sienelė  $x > 1$  mm. Gaminant gaminius su sienelėmis, plonesnėmis nei 1 mm, yra spausdinimo nepasisekimų rizika, taip pat lūžimo rizika atliekant procesus po spausdinimo.
  - Atsižvelgimas į palaikančiųjų struktūrų generacijų tankumą – kuo didesnis kiekis ir tankumas palaikančiųjų struktūrų susidarys, kurios turi prilaikyti „kabančius“ elementus, tuo didesni poslinkiai atsiras nuo terminių poveikių. Taip pat dėl terminių poveikių, kuomet vyksta geometriniai susitraukimai, gali įvykti atsikabinimas nuo tų pačių struktūrų. Taip pat dėl struktūrų tankumo pašalinimas nuo gaminių sąlyginai pažeidžia paviršiaus lygumą.
- Terminės paklaidos. Šis poveikis itin svarbus ne tik FDM technologijos, bet ir kitų technologijų 3D spausdintuvams, kur yra vykdomas sulipdymas, sulydymas ir kiti procesai, reikalingi sujungti sluoksnius tarpusavyje. Iš (2) matematinės formulės matyti, jog šiluminis plėtimosi koeficientas priklauso nuo tūrio, jos pokyčio ir temperatūros.
$$\alpha V = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (2)$$
Čia:  $\alpha V$  – tūrinis plėtimosi koeficientas;  $dV$  – pakitęs tūris;  $dT$  – temperatūra (K).
- Apkrovų sukeltos paklaidos. Kilmė: judančiųjų dalių vibracijos, deformacijos dėl svorio ir taip toliau.



7 pav. Geometrinų paklaidų kilmės grupės ir priežastys

## 5.2. Skaitmeninis tikslumas

Skaitmeninis tikslumas apibrėžiamas kaip kompiuterinėje sistemoje esantys veiksmai ar reiškiniai, lemiantys bendrą tikslumą realizuojant objektus. Kaip minėta, tyrimo objekto originalas laikomas „stl“ formato 3D modelis. Pats modelis yra sudarytas iš daugybės daugiakampių (angl. *polygon*), kuris apibrėžiamas, kaip „plokštumos geometrinė figūra, sukuriamą plokštumą apribojant baigtiniu tiesių skaičiumi, taip suformuojant uždarą laužtę“ (Polygon. 2018).



8 pav. Kompiuterinio „stl“ formato modelio paviršiaus struktūra

Kitaip, nei parametriniai CAD modeliai, „stl“ formatai nėra parametriškai aprašyti, kad būtų patogi manipuliacija pagal parametrus (ilgis, skersmuo, kampai ir taip toliau). Nepaisant to, manipuliacija gali būti vykdoma bendrai modelio visumai pagal mastelį, išsidėstymą ar paprasčiausiai dalinant į atskiras dalis. Kaip 8 paveiksle matyti, objektas yra stipriai kampuotas, dėl ko gali paveikti itin minimalius dydžių pakitimus.

Kaip ir kiekvieną 3D kompiuterinį modelį, taip ir šią „Mąstytojo“ skulptūrą reikia paruošti 3D spausdinimui – sukurti g.kodą. Trumpai suprantama kaip instrukcija spausdintuvui pagal kurią judėjimo komponentai juda atitinkamomis ašimis, vykdomi atitinkami kaitinimai ir vėsinimai bei kitos svarbios valdymo komandos nulemiančios 3D objekto pagaminimą. Skaitmeninio tikslumo prasmėje galima išskirti du atvejus:

1. Bendras aukštis. Į parametrus įvestas sluoksnio storis, kurių bendra suma gali nesutapti su pateikto objekto aukščiu. Jeigu bendra suma nėra lygi objekto aukščiui, programa visada apvalins į žemesnį skaičių.

$$H \geq LH \cdot n \quad (3)$$

Čia: H – modelio aukštis; LH – sluoksnio storis; n – sluoksnių skaičius.

2. Žingsnių skaičius per atitinkamą pavarų sistemą (srieginiai strypai). Žingsninis variklis turi savo pilną pasisukimo laipsnį ( $0,9^\circ$  arba  $1,8^\circ$ ), dėl to įvestas netinkamas sluoksnio aukštis gali paveikti bendrą rezultatą. 5.2 lentelėje galime matyti kelis skirtingus sluoksnio storių reikšmes ir bendrą rezultatą. Pagal ją matome, kad pagal parinktą 0,22 mm dydžio sluoksnio

storį variklis neturi galimybės atlikti pusę žingsnio, o tik pilną pasisukimą, dėl ko atlieka persisukimą ir bendram rezultate atsiranda nemažas nukrypimas.

**5.2 lentelė.** Parinktų sluoksnio storių teoriniai nukrypimo skaičiavimai

| <b>Parinktas sluoksnio storis, mm</b> | <b>Paklaida per 100 mm aukštį, mm</b> | <b>Žingsnių sk.</b> | <b>Žingsnio ilgis per vieną pasisukimą</b> |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------|
| 0,2188                                | 0                                     | 35                  | 0,00625                                    |
| 0,22                                  | -0,568181818                          | 35,2                | 0,00625                                    |
| 0,225                                 | 0                                     | 36                  | 0,00625                                    |

### 5.3. Įrenginio tikslumas

Įrenginio tikslumas yra apibrėžiamas kaip įrenginio geba atkartoti labai artimus dydžius vienas kitam. Taip pat gaminant seriją gaminių, jų dydžiai turi atitikti leistinas tolerancijas (Accuracy... 2018). 3D spausdintuvas turi gebėti atkartoti tikslius matmenis, kurie yra nurodyti kompiuterinėje sistemoje, o 3D skeneris turi gebėti atkurti tikslius matmenis į kompiuterinę sistemą.

Tyrimė panaudoti „Zortrax M200“ 3D spausdintuvai veikiantys FDM spausdinimo technologija. 5.3 lentelėje yra pateiktos specifikacijos, iš kurių du dydžiai yra svarbūs tyrimui apibendrinti: terminis tikslumas, kuris siekia +/-0,2 % ir pozicionavimo (rezoliucija) tikslumai (Zortrax. 2018).

**5.3 lentelė.** „Zortrax M200“ 3D spausdintuvo techninės specifikacijos

| <b>Modelis</b>                     | <b>„M200“</b>   |
|------------------------------------|-----------------|
| Gamintojas                         | „Zortrax“       |
| <b>Tech. specifikacijos</b>        |                 |
| Darbo dėžės matmenys, mm           | 200 x 200 x 180 |
| Darbo dėžės tūris, cm <sup>3</sup> | 7000            |
| Spausdintuvo matmenys, mm          | 345 x 430 x 430 |
| Rezoliucija x/y, μm                | 1,5             |
| Rezoliucija z, μm                  | 2,5             |
| Matmenų tikslumas, %               | +/-0,2 %        |
| Sluoksnio storis, μm               | 90              |
| Antgalio skersmuo, mm              | 0,4             |

Atspausdintai ir paruoštai „Mąstytojo“ skulptūrai perkelti į kompiuterinę sistemą panaudotas pramoninis rankinis „Artec Eva“ 3D skeneris, kurio specifikacijos pateiktos 5.4 lentelėje (Artec. 2018).

#### 5.4 lentelė. „Artec Eva“ 3D skenerio techninės specifikacijos

| Modelis                         | Eva                       |
|---------------------------------|---------------------------|
| Gamintojas                      | Artec                     |
| Tech. specifikacijos            |                           |
| Rezoliucija, mm                 | 0,5                       |
| Tikslumas, mm                   | iki 0,1                   |
| Matymo gylis, mm                | 170                       |
| Darbinis skenavimo atstumas, mm | 400–1000                  |
| Šviesos šaltinis                | Bulb                      |
| Skenavimo laukas, mm            | 214 x 148 / 536 x 371     |
| Spalvos                         | 24 bpp                    |
| 3D formatai                     | OBJ, STL, PLY, WRL ir kt. |

„Artec“ gamintojo 3D skeneriai veikia struktūrinės šviesos srauto (angl. *structured light*) principu. Jis veikia apšviečiant aukštu dažniu skenuojamo objekto paviršių lygiagrečiomis linijomis ar tinklu, kurie išsikraipo priklausomai nuo skenuojamo objekto geometriškumo ar reljefuotumo. Kameros, esančios 3D skeneryje, užfiksuoja iš kelių padėčių („Eva“ atveju – 2 padėčių) visus iškreipimus ir apskaičiuoja atstumus tarp fiksuotų taškų, pagal kuriuos kompiuterinėje trijų dimensijų koordinatų sistemoje yra užrašomos taškų padėties. Dar kitaip yra vadinamas taškų debesys (3D scanning... 2014).



9 pav. „Artec Eva 3D“ skeneris

Reglamentuotas skenavimo tikslumas yra apibrėžiamas iki 0,1 mm, tai reiškia, kad pagal atitinkamą pasiruošimą ar paviršiaus pobūdį įmanoma nuskenuoti aukštesniais rodikliais. Priežastys, lemiančios mažesnę tikslumą:

- paviršiaus blizgumas.
- geometrijos sudėtingumas.
- paviršiaus skaidrumas.

- paviršiaus šviesumo ar tamsumo laipsnis.
- Gautos informacijos trianguliacijos parametrai sukuriant išbaigtą geometrinį objektą tolesniam naudojimui.

Preliminarūs nuokrypiai ir klaidos yra nuorodomos licencijuotoje programinėje įrangoje, pagal kuriuos yra taikomi atitinkami veiksmai: įvedami parametrai, paruošiamas skenavimo objektas arba atliekamas pakartotinis skenavimas.

## 6. TYRIMAI

### 6.1. Skulptūros gamyba

Skulptūros gamybos tikslas – realizuoti objektą 3D spausdintuvais ir apdoroti spaudinius 3D skenavimo tinkamumui tolesniems tyrimo procesams.

Ogiusto Rodeno „Mąstytojo“ skulptūros „stl“ formato modelis yra gautas iš Masačusetso technologijos instituto duomenų bazės, kuris šiame tyrime yra laikomas kaip originalas. Kompiuterinis failas padidintas iki 600 mm aukščio ir padalintas į 24 dalis atsižvelgiant į tyrimo metu panaudotų 3D spausdintuvų („Zortrax M200“) darbo dėžės matmenų galimybes ir spausdinimo rekomendacijas (pagal praktinę darbo patirtį) atsižvelgiant į XY ir Z ašies dydžius:

- jeigu  $XY < 100$  mm, tai  $Z$  gali būti iki 180 mm.
- jeigu  $XY > 100$  mm, tai  $Z \leq 120$  mm.

Priežastis – spausdinimo medžiaga panaudota ABS, kuri turi tam tikrų spausdinimo apribojimų su staliniais 3D spausdintuvais. Kuo objektas yra aukštesnis ir aplinkos temperatūra žemesnė, tuo ryškesnės yra tarpusavio sluoksnių atskyrimo problemos, kurių galima išvengti spausdinant pagal išreikštas rekomendacijas su turimomis priemonėmis. Ši medžiaga parinkta dėl specifinių savybių – yra lengvai apdirbama šlifavimo ar pjaustymo įrankiais bei gali būti klijuojama su acetonu.



10 pav. Pradinės skulptūros dalys

Skulptūros gamybai yra sunaudota 2679 gramai ABS plastiko ir spausdinimo trukmė siekė 345,3 valandas arba 14,4 dienų. 8 paveiksle nurodyti panaudoti spausdinimo parametrai „Z-Suite“ programinėje įrangoje.

Meninės paskirties skulptūra pagaminta naudojantis Estijos gamintojo „Kumer“ ABS plastiku, kurio kaina yra 20 eurų už 750 gramų plastiko ritę. Žinant kainą, yra apskaičiuota, jog skulptūrai panaudotų medžiagų išlaidos siekė 71 eurą ir 44 centus.

The screenshot displays the 'ADVANCED' settings tab in the Z-Suite software. The interface is organized into several sections with various controls:

- MATERIAL GROUP:** Set to 'EXTERNAL MATERIALS'.
- MATERIAL:** Set to 'ABS-BASED FILAMENT'.
- PROFILE:** Set to 'LAST SETTINGS \*'.
- LAYER THICKNESS:** Set to 0.14 mm.
- PRINT SPEED:** Set to 0%.
- EXTRUDER FLOW RATIO:** Set to 0%.
- TEMPERATURE:**
  - EXTRUSION TEMP.: 275 °C
  - PLATFORM TEMP.: 80 °C
- RETRACTION:**
  - SPEED: 30 mm/s
  - DISTANCE: 0.5 mm
- TYPE:** Includes icons for 'SETTING SNORMAL MESH', 'SOLID', and 'SHELL'.
- PATTERN:** Includes icons for 'PATT 0', 'PATT 1', and 'PATT 2'.
- INFILL DENSITY:** Set to 10%.
- SURFACE LAYERS:**
  - SURFACE LAYERS: 7 pcs
  - DENSITY: 100%
- SUPPORT:** Includes checkboxes for 'LITE' and 'SMART BRIDGES'.
- OFFSETS:**
  - OUTER CONTOURS: 0.00 mm
  - HOLES: 0.00 mm
- SEAM:** Includes checkboxes for 'NORMAL SEAM' and 'RANDOM'.
- FIRST LAYER GAP:** Set to 0.23 mm.
- FAN SPEED:** Set to 'AUTO'.

11 pav. „Z-Suite“ programinėje įrangoje suvesti nustatymai

Atspausdintos 24-ios dalys suklijuotos tarpusavyje acetonu ir mišiniu, gautu ištirpinus ABS plastiko atraižas acetone, suteikiant didelį tvirtumą ir užglaistant kartu su glaistymo medžiaga kljavimo siūlėse lygumui išgauti. Minimalūs šlifavimo darbai atlikti, siekiant išlaikyti originalius atspausdintų matmenų dydžius. Taip pat norint paviršių palikti matinį aukštesniems 3D skenavimo procesų rodiklių rezultatams gauti.

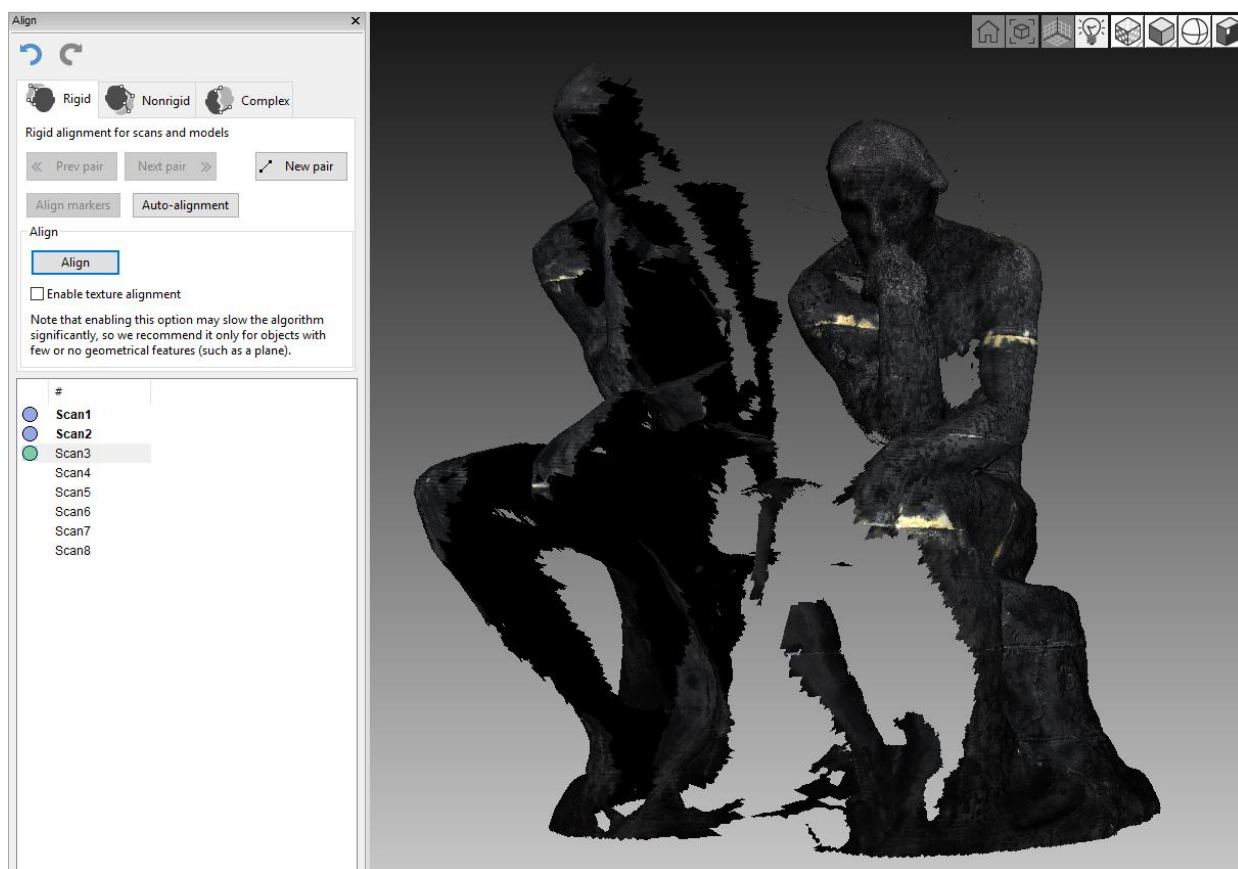


12 pav. Suklijuota ir paruošta skulptūra skenavimui

## 6.2. 3D skenavimas

3D skenavimo tikslas – perkelti fizikinį kūną į kompiuterinę sistemą tyrimams atlikti – geometrinei nuokrypių analizei išgauti lyginant su panaudotu originalu gaminant skulptūrą.

3D skenavimo procesas atliktas per aštuonias skenavimo sesijas, tam, kad skenavimas būtų atliktas iš visų reikiamų pusių, tuo pačiu išlaikant aplinkos informaciją – stalo paviršiaus – kaip papildomą atskaitos tašką skenavimo nuoseklumui išlaikyti ir sujungimo patogumui. Išgauti kadrai sesijose sujungti tarpusavyje naudojantis sulyginimo (angl. *align*) procedūra (13 paveikslas), kuomet sulyginimas vykdomas vertinant išdėstytų taškų panašumais tarpusavyje, todėl skenavimo metu išgauti kadrai turi turėti perėjimus iš vienos sesijos į kitą sujungimams atlikti.



13 pav. „Artec Studio 11“ programinės įrangos vaizdas su sujungimo procedūros langu

Atskiri kadrai tarp sesijų yra papildomai sujungiami naudojantis „Global registration“ funkcija, kuri pagal nurodytą atstumą (šiuo atveju nustatymai yra numatytieji) suranda panašiausius paviršiaus plotus ir sujungia tarpusavyje, jei skenavimo metu yra įvykę kadrų persidengimai. Galiausiai pagal surinktus ir sujungtus kadrus atliekamas 3D triukšmo išvalymas ir pabaigiamas modelio gamybos algoritmas, kurio metu yra sukuriamas išbaigtas, pilnaviduris 3D modelis.

### 6.3. Lyginamoji analizė

Turėdami paruoštą kopijos 3D modelį, jis yra palyginamas kartu su originalo 3D modeliu taikant lygiai tokį patį algoritmą, kaip ir sulyginant skenavimo metu išgautus sesijų kadrus tarpusavyje. Pagal du – originalo ir kopijos – 3D modelių identišką pozicijų koordinačių sistemos atžvilgiu yra atliekamas lyginamosios analizės algoritmas spalvinei diagramai išgauti. Svarbu pabrėžti, jog technikos ir mokslo laimėjimai leidžia sudėtingas lyginamąsias ir statistikos analizes atlikti kompiuteriu, kurių rezultatai smarkiai nulemia tyrimo išvadas.

Papildoma informacija yra iškelta į „Microsoft Excel“ programinę įrangą statistikos analizei atlikti, kadangi koordinačių taškų pozicijų yra daugiau nei tūkstantis, todėl informacijos apdorojimas turi būti atliekamas kaip galima patogiau ir tiksliau. Nuokrypio dažnis išreikštas paviršiaus ploto vienetu, todėl lyginant skirtingo ploto geometrijas, reikia apskaičiuoti santykį, kad pasiskirstymas būtų korektiškas.

$$A = \left(\frac{k}{S}\right) \cdot 10\,000 \quad (4)$$

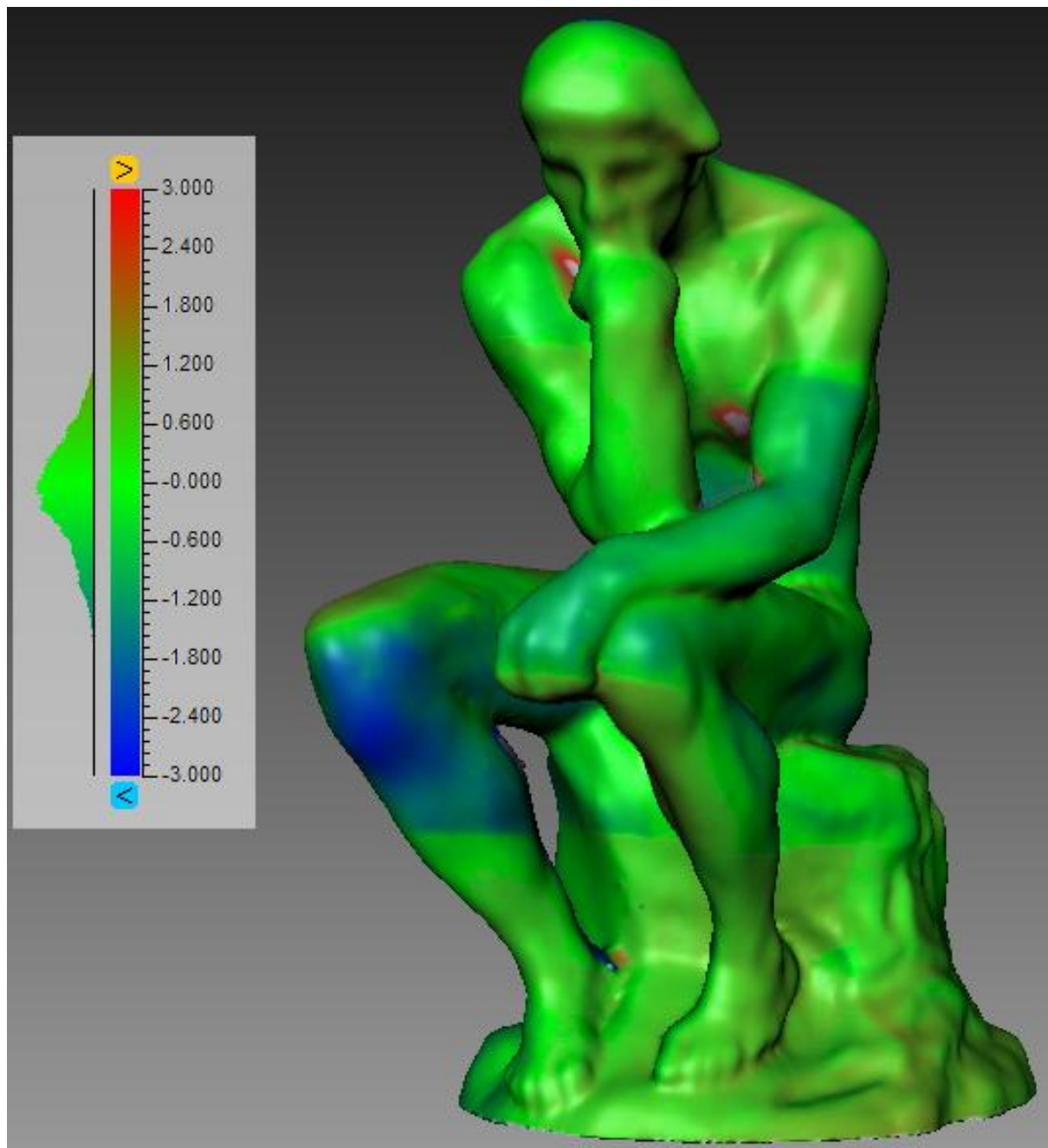
Čia: A – nuokrypio (k) ir ploto (S) dažnio santykis;

Pjūvio duomenys antrai hipotezei iškelti yra gauti pasitelkus g.kodo generavimo įrankį „Simplify3d“, kur programa suformuoja kontūrus pagal XY ašis ir, naudojantis „Microsoft Excel“, dviejų pjūvių duomenys yra sujungti į vieną XY ašies grafiką. Toks būdas leidžia aiškiai ir tiksliai matyti atitinkamų pusių poslinkius ir paneigti ar patvirtinti iškeltą hipotezę.

## 7. REZULTATAI

### Absoliučią geometrinę nuokrypių matrica

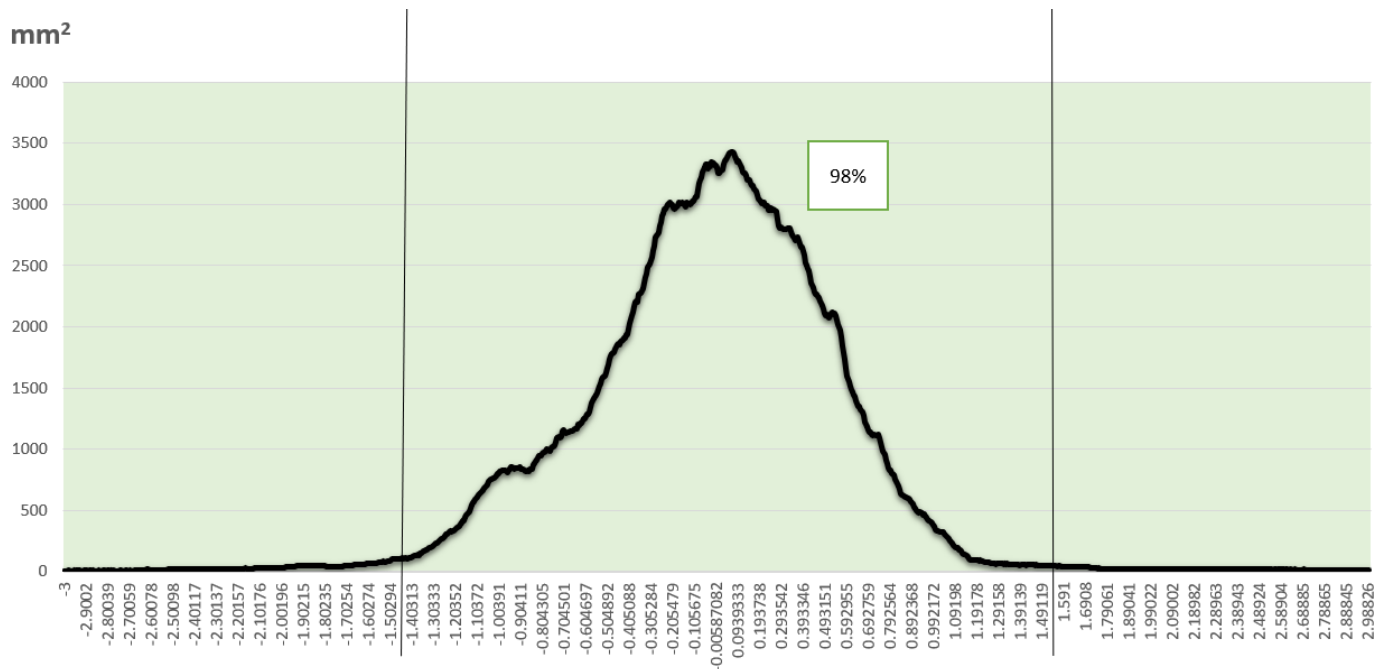
Spalvinės diagramos atvaizdavimas aiškiai parodo atskirų dalių pakrypimus ir jų dydžius (14 pav.), pagal kuriuos galima atlikti korekcijas tolesniais apdirbimo procesais. Tai yra dažnai naudojama kaip greita patikrinimo priemonė tarp gamybos ciklą ar patvirtinti technologijos tinkamumą.



14 pav. Spalvinė nuokrypų matrica

## Erdvinė nuokrypių diagrama

Palyginimas pagal nuokrypių pasikartojantį dažnį (15 pav.) parodo, kaip dažnai kiekvienas nuokrypis pasikartoja pagal paviršiaus ploto vienetą.



15 pav. Nuokrypių dažnio pasiskirstymas

Taip pat yra paskaičiuotas santykis tarp  $[-1,5;1,5]$  intervale esančių dažnio plotų sumos ir bendros skulptūros paviršiaus ploto sumos, kuris parodė, jog į intervalą patenka 98 % visų nuokrypių dažnių, tai parodo aukštą tikslumą.

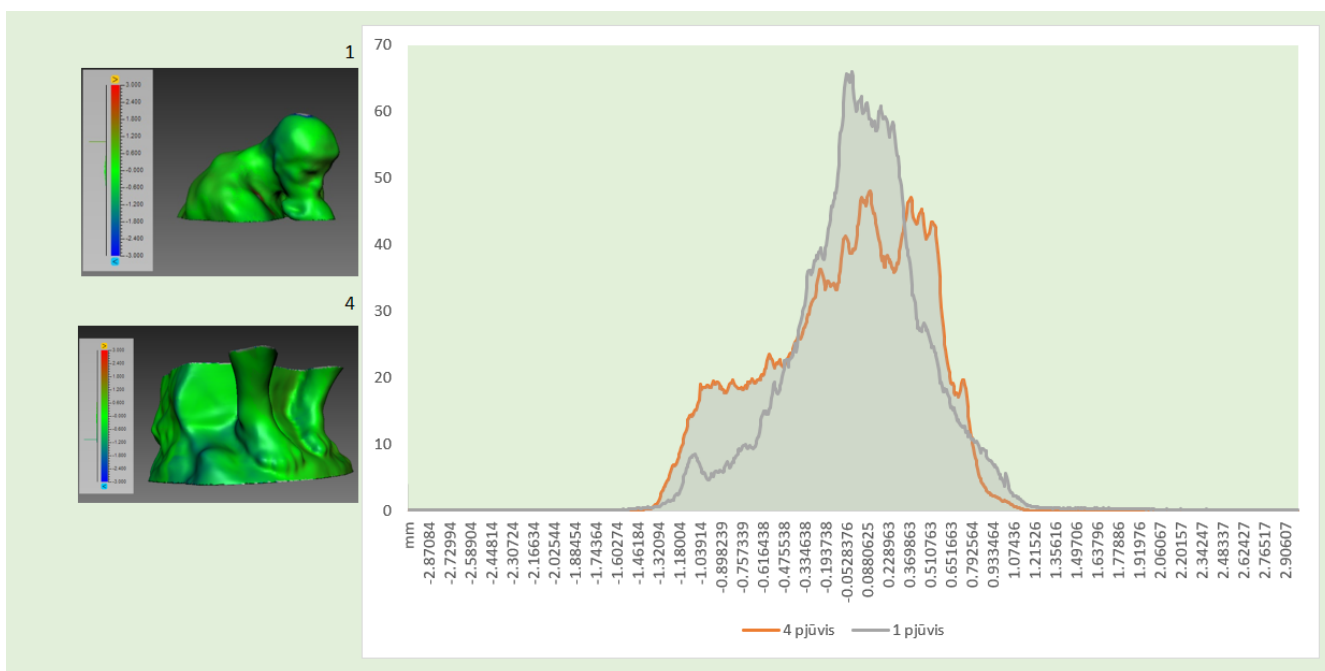
$$B = \frac{6984,55351}{7106,27399} * 100 \% = 98 \% \quad (5)$$

Praktikoje yra taikoma taisyklė, jog pagamintas gaminys, lyginant su brėžiniais ar 3D modeliu, yra tikslus, jei į intervalą  $[-1,5;1,5]$  patenka 90 % visų nuokrypių.

### 1. Hipotezė

Mažesnės skulptūros sudedamosios tūrio dalys yra tikslesnės nei didesnės. Iškelta hipotezė patvirtinta atlikus dviejų skirtingų tūrio objektų nuokrypių pasikartojančių dažnių analizę. Šiuo atveju buvo išskirtos apatinės ir viršutinės dalys, kurių aukštis siekė po 150 mm (16 pav.).

- viršutinės dalies tūris –  $113,953968 \text{ cm}^3$ .
- apatinės dalies tūris –  $229,763611 \text{ cm}^3$ .

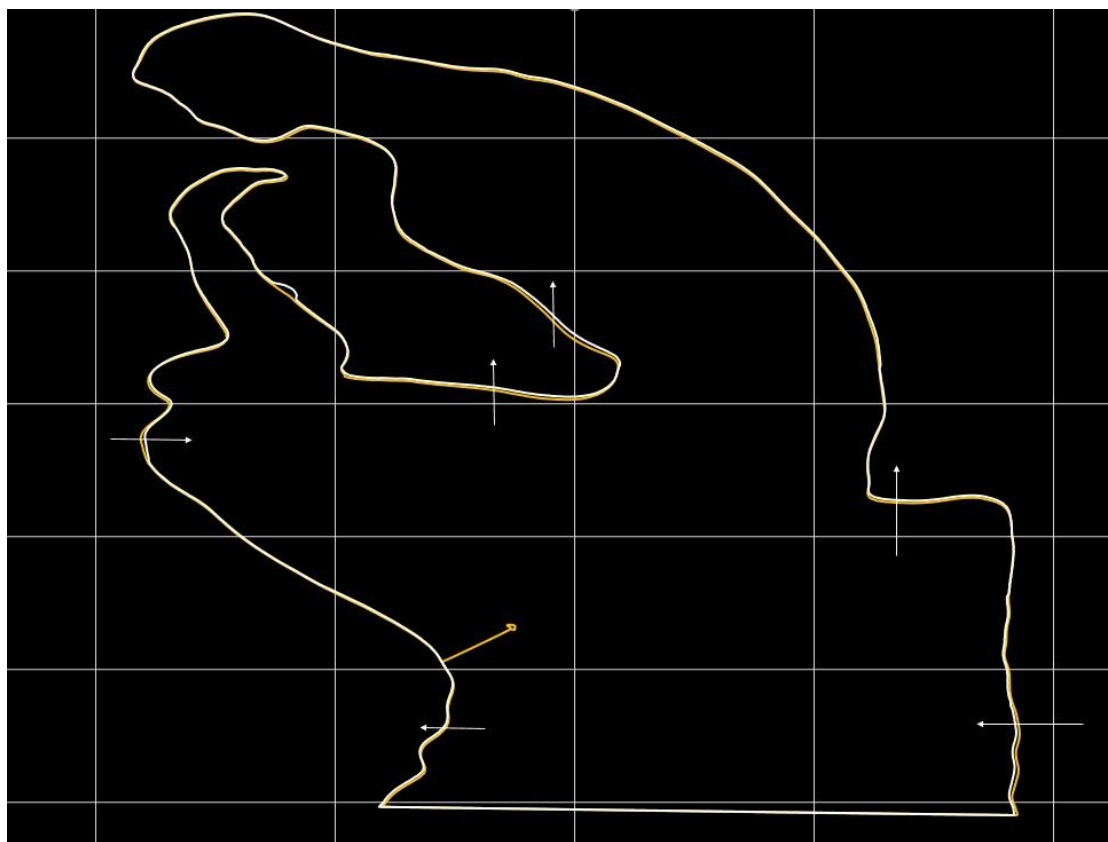


16 pav. Dviejų skirtingų tūrio dalių palyginimas nuokrypių pasiskirstymo dažniu

Iš grafiko matyti, kad mažesnės tūrio dalies pasiskirstymas yra siauresnis, arčiau 0, bei jų pasikartojantis dažnis yra aukštesnis nei didesnio tūrio dalies.

## 2. Hipotezė

Vidutinės absoliučių nuokrypių reikšmės nedidėja (mažėja) didėjant sluoksnių skaičiui. Hipotezė nepasitvirtino sulyginus gautas projekcijas išilgai Z ašį (17 pav.). Įvertintos prielaidos, jog atspausdintos dalys yra susitraukusios dėl vėsinimosi veiksnių, žinant reglamentuotą terminį tikslumą  $\pm 0,2\%$ . Paveiksle rodyklės vaizduoja kopijos poslinkio kryptį nuo originalo ir matyti, kad didėjant sluoksnių skaičiui, skulptūros dalys susilygina.

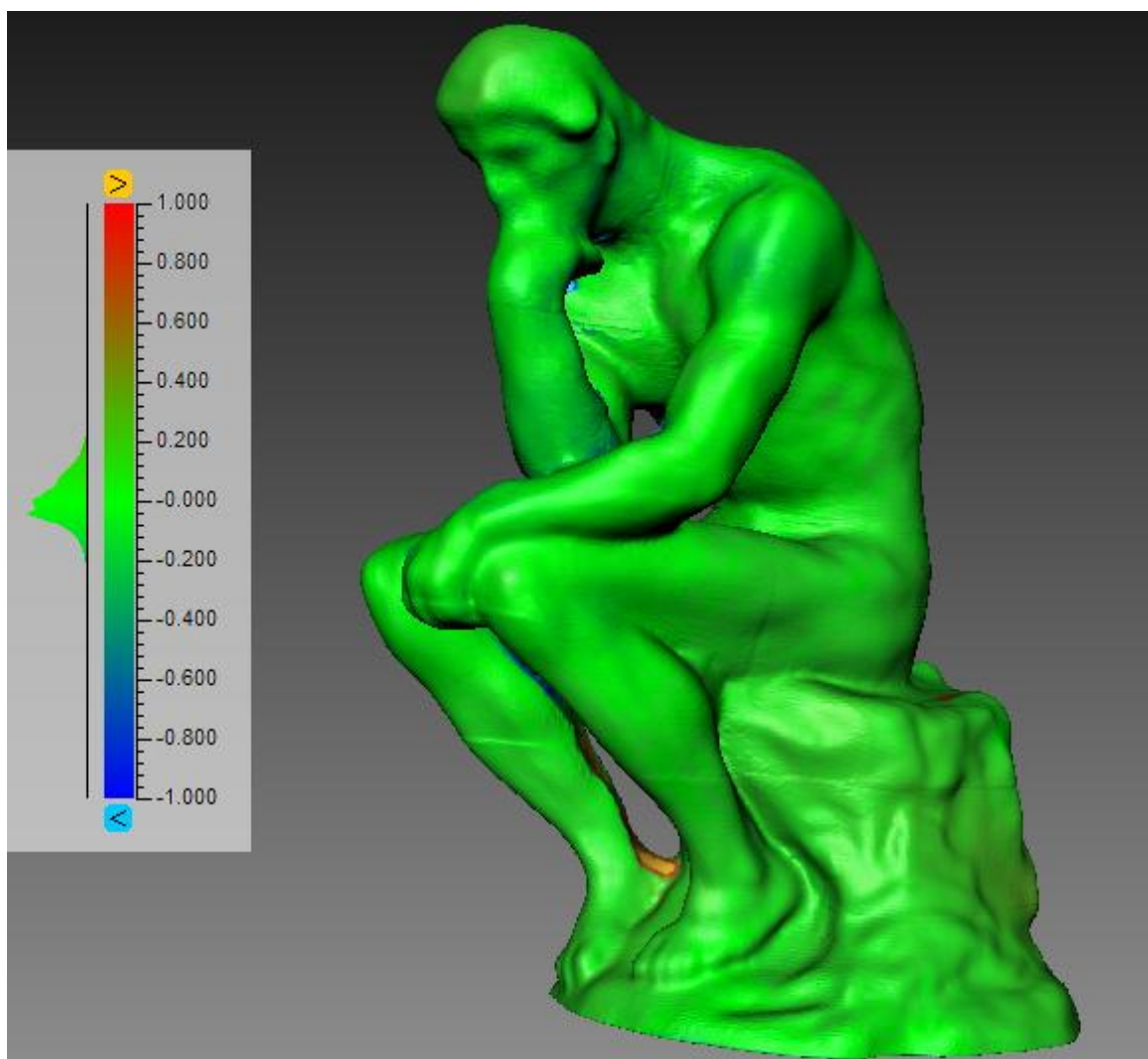


17 pav. Dviejų projekcijų sulyginimas

Dalių sulyginimas gali būti atsiradęs nuo klajavimo veiksnių, kur procesas nebuvo automatizuotas ir atliktas pagal žmogaus galimybes.

### 3. Hipotezė

Stabilumo patvirtinimas – vieno objekto dvigubas skenavimas. Ta pati kopija, sukurta 3D spausdinimo technologijos procesais, yra pakartotinai nuskenuota ir sukurtas antros kopijos išbaigtas kompiuterinis „stl“ formato 3D modelis. Šios dvi kopijos yra sulyginamos tarpusavyje tokiais pat principais, kaip ir buvo sulyginamas originalo 3D modelis su kopijos 3D modeliu, siekiant įvertinti 3D skenavimo ir programinių įrenginių sukurtą informaciją pastovumą tikslumo prasme. 15 paveiksle iš spalvinės diagramos matyti, jog antroji kopija yra tiksliai atkurta, o absoliutinė paklaida siekia tik 0,064774 mm.



18 pav. Dviejų skirtingų kopijų palyginimas spalvine nuokrypių matrica

## IŠVADOS

Meninės skulptūros kopija yra pagaminta pasitelkus stalinio tipo pridėtinės gamybos technologijos įrenginius. Skulptūrą sudaro 24 atskiros dalys ir yra suklijuotos tarpusavyje bei apdirbtos klįjavimo siūlės. Sukurta kopijos suliginimas su originalu parodė itin žemas paklaidas, kadangi intervale  $[-1,5;1,5]$  paklaidų pasiskirstymas siekė 98 % visų paklaidų.

Tyrimo metu gauti rezultatai parodė, jog mažesnio tūrio, kurių tūriai yra 113,953968 ir 229,763611 cm<sup>3</sup>, tikslesnės nei didesnio tūrio dalys. Rezultatas gautas palyginus dviejų atskirų dalių pasiskirstymo dažnius.

Taip pat tyrimo metu gauti rezultatai paneigė iškeltą antrą hipotezę, kuri apibrėžta, jog vidutinės absoliučių nuokrypių reikšmės didėja didėjant sluoksnių skaičiui. Originalo ir kopijos projekcijų išilgai per Z ašį suliginimas parodė, jog didėjant sluoksnių skaičiui poslinkiai susilygina. Įvertinta, jog susilyginimas įvyko dėl žmogiškųjų faktorių atliekant klįjavimo procesus.

Tyrimo patikimumas 3D skenerio atžvilgiu įvertintas kopiją nuskenavus pakartotinai su tuo pačiu įrenginiu ir atlikus lyginamąją analizę su pirmąja kopija, kurios metu parodė, jog absoliutinė paklaida siekė tik 0,064774 mm, kuomet originalo ir pirmos kopijos palyginimo metu gauta absoliutinė paklaida siekė 0,444016 mm.

### Pasiūlymai

Nepaisant to, kad tyrimo metu gauti rezultatai pateisino lūkesčius, skulptūros kopijas galima sukurti dar tikslesnius naudojantis 3D skenavimo ir lyginamosios analizės įrankiais vertinant didesnių nuokrypių vietas, kurias galima būtų ištaisyti apdirbimo procesais. Poslinkių tendencijas prieš 3D spausdinimą įvertinti nėra galimybės dėl žmogiškųjų faktorių klįjuojant.

Pagal faktą, jog pridėtinė gamyba yra puiki priemonė kurti kopijas, pačias skulptūras galima atitinkamai apdirbti baigiamaisiais dažymo ir patinavimo procesais sukuriant autentiškumą ir identiškumą į bronzinių, marmurinių, akmeninių ar kitų medžiagų paviršius. Lygiai tas pats pasakytina ir apie autentiškas istorines relikvijas, kurias galima pakeisti į replikas siekiant išsaugoti nuo susidevėjimo originalias relikvijas.

Darbe pastebėti dėsningumai gali būti naudotini ir kitose veiklos srityse (medicinoje – traumatologijoje ir protezavime; sudėtingų techninių statinių modeliavime panašumo teorijos pagalba ir pan.).

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

3D Printing and the Future of the US Economy [interaktyvus]. 2017. A. T. Kearney, Inc [žiūrėta 2017 gegužės 10 d.]. Prieiga per internetą:

<https://www.atkearney.com/documents/20152/888957/3D+Printing+and+the+Future+of+the+US+Economy.pdf/7719fc50-50b9-6194-4c4c-c3de38e9a88c>

3D scanning basics: How structured light scanning works [interaktyvus]. 2014. Q-Plus labs [žiūrėta 2018 vasario 15 d.]. Prieiga per internetą:

<http://info.qpluslabs.com/blog/3d-scanning-basics-how-structured-light-scanning-works>

Accuracy and precision [interaktyvus]. 2018. [žiūrėta 2018 gegužės 10 d.]. Prieiga per internetą:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Accuracy\\_and\\_precision](https://en.wikipedia.org/wiki/Accuracy_and_precision)

„Artec Eva“ 3D scanner. [interaktyvus] 2018. JSC Artec 3D [žiūrėta 2018 vasario 14 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-eva>

Balletti C., *et al.* 2017. 3D printing: State of the art and future perspectives. *Journal of Cultural Heritage*. 26: 172–182.

Corso J., *et al.* 2017. High resolution model mesh and 3D printing of the Gaudí's Porta del Drac. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 245: 53–61.

Patel, N., *et al.* 2017. Stereolithography: the future of dental fabrication [interaktyvus]. [žiūrėta gegužės 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://decisionsindentistry.com/article/stereolithography-future-dental-fabrication/>

Pizzirani, A. 2015. After the Hype: The Way Forward for 3D Printing, *UChicago Undergraduate Business Journal* 1: 1–11.

Polygon [interaktyvus]. 2018. [žiūrėta 2018 balandžio 15 d.]. Prieiga per internetą:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Polygon>

Ramesh R., *et al.* 2000. Error compensation in machine tools – a review: Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40(9): 1253–1256.

Sculpture [interaktyvus]. 2018. [žiūrėta 2018 gegužės 11 d.]. Prieiga per internetą:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Sculpture>

Tucci G., *et al.* 2017. High-quality 3d models and their use in a cultural heritage conservation project. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-2/W5: 687–693.

What is reverse engineering [interaktyvus]. 2016. Physical Digital Ltd. [žiūrėta 2018 gegužės 2 d.].

Prieiga per internetą: <http://www.physicaldigital.com/knowledge-base/what-is-reverse-engineering/>

Zortrax M200 [interaktyvus]. 2018. Zortrax SA [žiūrėta 2018 vasario 14 d.]. Prieiga per internetą:

<https://zortrax.com/printers/zortrax-m200/>