

Tommi Grönholm

**Katsaus tietokonekuvantamisen, -mallintamisen ja
-simulaation hyödyntämiseen arkeologiassa**

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

30. huhtikuuta 2022

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Tekijä: Tommi Grönholm

Yhteystiedot: grontova@student.jyu.fi

Ohjaaja: Tuomo Rossi

Työn nimi: Katsaus tietokonekuvantamisen, -mallintamisen ja -simulaation hyödyntämiseen arkeologiassa

Title in English: Tietokonekuvantamisen ja -simulaation hyödyntäminen arkeologiassa

Työ: Kandidaatintutkielma

Opintosuunta: Tietotekniikka

Sivumäärä: 21+0

Tiivistelmä: Tämä kirjallisuuskatsaus analysoi tutkimuksia, joissa hyödynnetään tietokonekuvantamista ja -simulaatiota arkeologisten esineiden, rakennusten ja ilmiöiden tutkimuksessa. Lopputuloksena on yhteenveto hyödynnettyjen työkalujen ja menetelmien tehokkuudesta.

Avainsanat: tietokonemallintaminen, tietokonesimulaatio, arkeologia, sovellettu stereofotogrammetria

Abstract: This literature review analyzes multiple studies which utilize computer modeling and simulation for the purpose of researching the properties of different archeological artifacts, buildings and events. The end result is a summary of the tools and methods utilized, and of the efficiency of said tools and methods.

Keywords: computer modeling, computer simulation, archaeology, applied stereophotogrammetry

Termiluettelo

| | |
|-------------------------|--|
| Stereofotogrammetria | Esineiden kuvaaminen erilaisilla työkaluilla eri kuvakulmista, ja datan pohjalta kolmiulotteisen mallin muodostaminen. |
| Pistejoukko, pistepilvi | Mittauksista saadun datan yksittäisistä koordinaattien merkkäamista pisteistä muodostuva joukko eri koordinaateissa sijaitsevia mittauspisteitä. |
| Pullonkaulaantuminen | Ohjelman tai järjestelmän suorituksen heikkeneminen johtuen järjestelmän resurssipuutteista suhteessa ohjelmiston tarpeisiin |
| Splini | Polynomijoukko, joka kertoo annettujen pisteiden välille muodostuvat kurvit, pisteväli kerrallaan. |

Kuviot

Kuvio 1. Kuva ympäristön muodon fotogrammetrisesta mittauksesta pistejoukkona..... 2

Sisällys

| | | |
|---|---|----|
| 1 | JOHDANTO | 1 |
| 2 | TEORIA..... | 2 |
| | 2.1 Fotogrammetria..... | 2 |
| | 2.2 3D-mallinnus | 3 |
| | 2.2.1 Mallinnusta avustavat algoritmit | 3 |
| | 2.3 Tietokonesimulointi | 3 |
| | 2.4 Virtuaalinen todellisuus | 4 |
| 3 | TUTKIMUKSET JA HYÖDYNNETYT METODIT | 5 |
| | 3.1 Artefaktien mallinnus ja rekonstruointi | 5 |
| | 3.2 Mallien analyysi | 6 |
| | 3.3 Muut hyödyntämiskeinot | 7 |
| 4 | METODIEN ANALYYSI | 9 |
| | 4.1 Hyödyt | 9 |
| | 4.2 Haitat..... | 10 |
| 5 | JOHTOPÄÄTÖKSET..... | 13 |
| | LÄHTEET | 15 |

1 Johdanto

Arkeologiassa keskeinen ongelma on luonnollisesta ajan myötä aiheutuvasta kulumisesta syntyvät erilaiset vauriot tutkittaville esineille, rakennuksille, ja ympäristöille. Hauraita löydöksiä ei voida tutkia niin syvällisesti kuin tahdottaisiin, koska ne voivat vaurioitua entisestään. Rakennelmat voivat olla sortuneet ajan painosta, taikka kärsineet sodissa tai muissa mullistuksissa. Teknologian kehityksen myötä tietokoneiden avulla voidaan työkalujen avulla kuvata esineitä, ja muodostaa niistä virtuaalisia malleja, joille voidaan simulaatioiden kautta suorittaa samanlaisia kokeita, kuin oikeille esineille.

Fotogrammetriset teknologiat tarjoavat vaihtoehtoisia keinoja tutkia arkeologisia löydöksiä, kajoamatta varsinaisten esineiden tai rakennelmien mahdollisesti hauraisiin fyysisiin muotoihin. Tässä tutkielmassa käsitellään muun muassa esineiden uudelleenrakentamista malleina mittausdatan pohjalta, niiden käyttötapoja ja testausmahdollisuuksia virtuaalisessa ympäristössä, ja koneoppimisalgoritmien kouluttamista niiden avulla.

Uusien teknologioiden hyödyntäminen tieteessä vaatii paitsi kokeilua, mutta myös saatujen tulosten analyysia muiden toimesta, jotta ne voidaan todistaa toimiviksi. Samalla tietokyseisten teknologioiden olemassaolosta saavuttaa enenevässä määrin mahdollisia käyttäjiä. Historiallisten esineiden täydellisempi rekonstruktio puolestaan parantaa käsityksiä aikalaiskulttuureista, sekä selittämään historian tapahtumia, esimerkiksi vertaamalla sotivien kansojen panssareita keskenään, ja täten selittäen näiden menestyksiä.

Tämän tutkielman tarkoituksena on analysoida moderneja sovelluksia kyseisille fotogrammetrisille teknologioille, ja niiden tarjoamia sekä hyötyjä että haittoja. Lopputuloksena on yhteenveto nykyisistä menetelmistä, ja niiden tehokkuudesta.

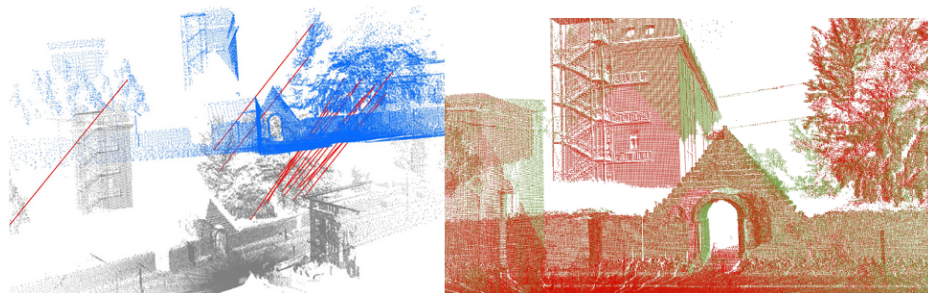
2 Teoria

Kaikissa tutkielmassa käsiteltävässä kirjallisuudessa keskeisiä analyysin käsitteitä ovat fotogrammetria, 3D-mallinnus ja tietokonesimulointi. Ennen varsinaista tutkimusta, käydään nämä käsitteet lävitse allaolevassa luvussa.

2.1 Fotogrammetria

Fotogrammetria käsittää erinäisten esineiden, tai ilmiöiden kuvaamista erilaisilla datankeräystyökaluilla, kuten normaaleilla videokameroilla, taikka ultraääniskannereilla. Kyseisillä työkaluilla kerätystä datasta muodostetaan edelleen malleja kuvannetuista esineistä tai ilmiöistä.

Stereofotogrammetria on fotogrammetrian alalaji, jossa esinettä kuvataan useista eri pisteistä, ja kuvista muodostetaan täysi kolmiulotteinen malli kuvatusta esineestä, asettelemalla eri kulmista otetut kuvat yhteen. Asetteluprosessi voidaan suorittaa käsin etukäteisellä tiedolla kuvien sijainnista suhteessa toisiinsa, tai erillisten algoritmien avulla, jotka kykenevät arvioimaan kuvien pisteiden sijainnit suhteessa toisiinsa, ja asetella kuvat yhteen arvion pohjalta. Käsitellyissä tutkimuksissa käytetyt kuvannusmenetelmät ovat luonteeltaan stereofotogrammetrisia, sillä ne käsittelevät reaali maailman esineiden siirtoa virtuaaliseen tilaan, ja esineiden analyysia kyseisessä tilassa.



Kuvio 1. Havainnollistava kuvapari fotogrammetrisesta prosessista, jossa rakennus on kuvattu eri kulmista, ja sitten saadut pisteet eri mittauksista on sovitettu yhteen luomaan täysi kuva, lähde (Martin Holzkothen)

2.2 3D-mallinnus

3D-mallinnus, eli kolmiulotteinen mallinnus, käsittää virtuaaliseen kolmiulotteiseen ympäristöön kartoitettujen pisteiden avulla muodostettujen virtuaalisten esineiden luomisen. Kartoitettujen pisteiden välille luoduilla kärjillä, reunoilla ja pinnoilla esineelle annetaan muoto, jota voidaan edelleen käyttää simulaatioissa.

3D-mallinnusta voidaan suorittaa puhtaasti tyhjästä aloittaen, tai etukäteen mitattua dataa käyttäen, joka määrittää muodostettavan mallin parametreja. Esimerkiksi stereofotogrammetrialla hankitun datan avulla voidaan esine mallintaa automaattisesti, kartoittamalla datasta hankitut pisteet virtuaaliseen ympäristöön, ja rakentamalla esineen muoto uudelleen pisteiden perusteella. Toinen vaihtoehto on muodostaa malli käsin käyttäen erilaisia mallin-
nusohjelmia, hyödyntäen dataa mallina josta kopioida muoto.

2.2.1 Mallinnusta avustavat algoritmit

Kun 3d-mallinnusta suoritetaan etukäteen mitatun datan avulla, voidaan dataa yhteensovittaa ja virheitä arvioida erilaisten dataa käsittelevien algoritmien avulla. Esimerkiksi, eräs käsitellyissä tutkimuksissa (Sun ym. 2020) hyödynnetty algoritmi on iteratiivinen lähimmän pisteen algoritmi (Iterative Closest Point, ICP), jossa mitatut pistejoukot asetellaan leikkaavista kohdista päällekkäin, jonka jälkeen joukoista lasketaan pistekohtaiset neliölliset keskiarvot yhdenmukaistamaan sijainnit, ja asettelemaan loput kahden joukon pisteet mahdollisimman yhteensopiviksi.

2.3 Tietokonesimulointi

Tietokonesimulointi käsittää muodostettujen mallien fyysisten ominaisuuksien testaamisen erilaisia ilmiöitä mallintavia algoritmeja hyödyntäen. Simulaatioiden tyypit vaihtelevat yksinkertaisista simulaatioista laskentaohjelmistoissa monipuolisiin virtuaalisiin fysiikkaympäristöihin.

Esimerkiksi soittimen sävelaluetta voidaan tutkia simuloimalla ilman virtaamaa soittimesta muodostetun mallin lävitse, hyödyntäen fysiikasta tunnettuja virtaama- ja resonanssiyhtälöi-

tä. Kyseisiä yhtälöjä hyödynnetään laskentaohjelmissa muodostamaan tulokset.

Simuloinnissa voidaan hyödyntää pelkkien laskennallisten mallien lisäksi myös fysiikkamoottoreja, jotka simuloivat fyysisiä ilmiöitä virtuaalisessa tilassa. Valmiille malleille voidaan antaa moottorin virtuaaliympäristössä erilaisia ominaisuuksia, kuten paino tai kimmoisuus, tutkimuksen tarpeiden mukaan. Oikein mallinnetuilla esineillä, joiden ominaisuudet on asetettu tarkasti, voidaan testata esineitä hyvin todenläheisesti.

2.4 Virtuaalinen todellisuus

Virtuaalinen todellisuus (VR, Virtual Reality) käsittää toiminnan tietokonesimuloidussa ympäristössä, yleensä oheislaitteita avustuksella. Oheislaitteet antavat käyttäjän vuorovaikuttaa ympäristön kanssa käyttäen omaa kehoaan, ja kokea ympäristöä käyttäen aistejaan kuten näköä. Yleisiä VR-laitteita ovat silmille asetettavat lasit, joiden avulla käyttäjä voi hahmottaa ympäristöä kopioimalla pään liikkeitä virtuaaliseen ympäristöön, ja VR-ohjaimet jotka puolestaan siirtävät käden liikkeitä kyseiseen ympäristöön. VR-laitteet voivat toimia itse ympäristöjen ajamislaitteina, tai olla oheislaitteita järjestelmälle, jossa ympäristöä ajetaan.

3 Tutkimukset ja hyödynnetyt metodit

Tässä katsauksessa käsitellään tutkimuksia rengaspanssarin kuvantamisesta, rekonstruktios- ta ja simuloinnista (Wijnhoven ja Moskvin 2020), (Wijnhoven, Moskvin ja Moskvina 2021), tutkimusta roomalaisen soittimen rekonstruktioista (Sun ym. 2020), kivikautisen asutuksen mallinnusta virtuaalista kokemusta varten (Puig ym. 2020), ja tutkimusta metodeille muodos- taa virtuaalisia kirjastoja parametrisoiduista esineistä ja niiden kappaleista. (Renno, Lanzotti ja Papa 2019).

3.1 Artefaktien mallinnus ja rekonstruointi

Rengaspanssarin uudelleenrakennuksessa (Wijnhoven ja Moskvin 2020) kaivauksista löy- detty esine, lievästi hajonnut ja venynyt rengaspanssari, kuvannettiin mittaamalla sen muo- dostavien renkaiden ja liitoksien ulottuvuudet, ja erikseen jakamalla saatu data erillisiin pa- rametreihin, kuten renkaiden ulko- ja sisähalkaisijaan, paksuuteen ja leveyteen. Parametri- soidut osat mallinnettiin datan avulla Autodesk Inventor-mallinnustyökalua käyttäen. Tämän jälkeen varsinaisesta esineestä luotiin virtuaalinen kopio asettelemalla virtuaaliset renkaat ja liitokset samalla lailla kuin alkuperäisessä esineessä. Lopputuloksena saatiin uudelleenra- kennettua eheä virtuaalinen kopio esineestä, jota voitiin edelleen testata.

Jatkotutkimus joka vertaili lukuisia eri paikkojen ja aikakausien rengaspanssareita (Wijn- hoven, Moskvin ja Moskvina 2021) puolestaan hyödynsi samaa metodologiaa panssarien virtua- lisointiin, mutta monen panssarin osalta hyödynsi paljon pienempiä paloja kuin aiemman tutkimuksen lähes kokonaisuina säilynyttä panssaria. Osat parametrisoitiin samalla tavalla kuin aiemmassa tutkimuksessa, mallinnettiin Blender-mallinnusohjelmalla ja koottiin koko- naisiksi esineiksi Unreal Engine 4 - fysiikkaympäristössä.

Instrumentin uudelleenrakentamisessa (Sun ym. 2020) puolestaan 8 osaan hajonnutta esinet- tä kuvattiin osa kerrallaan, heijastamalla siihen erivärisiä valokuvioita, pyörittämällä esinettä täydessä 360 asteessa, 20 asteen välein. Tämän jälkeen, eri kuvien pisteet kolmiulotteises- sa koordinaatistossa yhdistettiin yhtenäiseksi malliksi ICP-algoritmia hyödyntäen. Malleja editoitiin myös käsin, poistamaan mahdolliset virhekohdat, ja tasapainottamaan mallin laa-

tu, ottaen huomioon datan suuri määrä. Tämän jälkeen osien malleista selvitetiin laskennallisesti niiden keskipisteet, joiden avulla voitiin määrittää koko instrumentin keskilinja, jolle osat asettuivat. Osista myös karsittiin mahdolliset skannausvirheet, ja palaset sovitettiin keskenään elliptisten akseliensa pohjalta. Viimeiseksi, osien mallit yhdistettiin toisiinsa Meshmixer-työkalua käyttäen.

Parametrisoidun kirjaston luomisessa (Renno, Lanzotti ja Papa 2019) artefaktien palasien kaksiulotteisia profileja kuvattiin skannerilla. Muodostunut kuva vietiin kuvankäsittelyohjelmaan, jotta skannauksessa syntyneet mahdolliset graafiset virheet saatiin poistettua. Tämän operaation jälkeen kuva profilista vektorisoitiin, ja mahdollisista kurveista muodostettiin splinit myöhempää arviointia varten.

3.2 Mallien analyysi

Rengaspanssarin uudelleenrakennuksessa (Wijnhoven ja Moskvin 2020), luotua panssaria simuloitiin kahdella eri ohjelmalla eri fysiikkamalleja hyödyntäen - toinen kangassimulaatiolla käyttäen 3DS Max - ohjelmistoa, toinen jäykkien esineiden summana käyttäen Unreal Engine 4 - fysiikkaympäristöä. Tämän jälkeen mallien mahdollista virhettä verrattiin varsinaiseen panssariin, vertaamalla panssarien asettumista mannekiinin päällä. Keskeiset kurvit, kuten hihojen asettuminen mitattiin kaikilta kolmelta esineeltä. Kurvien pohjalta muodostettiin splinit ja niiden välisiä eroja sijainnissa ja kaareutumisessa vertailtiin. Lopputuloksena kahden virtuaalisen panssarin välillä oli selkeitä eroja, johtuen eroista kangas- ja jäykkäsimulaatioiden välillä. Verrattuna varsinaiseen panssariin, jäykkä simulaatio tuotti todenläheisemmän tuloksen.

Rengaspanssarin tutkimuksesta rakentavassa monien samantyyppisten panssarien vertailussa (Wijnhoven, Moskvin ja Moskvina 2021) uudelleenrakennettujen panssareiden mallit syötettiin Unreal Engine 4 - fysiikkamoottoriin, jossa niiden fyysisiä ominaisuuksia testattiin sekä laskemalla suureita kuten pinta-ala, paksuus, renkaiden tiheys ja massa, että simuloimalla panssaria jäykkänä kappaleena, jotta suureita kuten venyvyyttä, tai vääntökulmaa voitiin mitata. Saatujen tuloksien todettiin olevan todenmukaisia, ja hyväksyttävien virherajojen sisällä.

Instrumentin uudelleenrakennuksessa Sun ym. 2020 täydennetyn mallin toimintaa tutkittiin simuloimalla ilmavirtaus soitinmallin lävitse, ja tutkimalla syntyvää sävelaluetta. Valmistuneen muodon perusteella soittimen arvioitiin olevan vaskisoittimen tapainen, joten simulaatiota varten valittiin vaskisoittimelle sopiva funktio. Simulaatio toteutettiin funktiolla, jonka parametreina toimivat mallin ja sen torviosuuden pituus pituus, mallin torviosuuden muodosta arvioitu vakio, ja seisovan aallon kertaluku. Analyysin lopputuloksena 12 taajuuden sävelalue saatiin muodostettua.

Parametrisoidun kirjaston luomisessa (Renno, Lanzotti ja Papa 2019) muodostettuja malleja hyödynnettiin ottamalla valmiista mallista erikokoisia palasia, ja käyttämällä niitä kouluttamaan analyysi- ja tunnistusalgoritmeja. Jotta analyysin ja tunnistuksen tarkkuutta voitiin mitata, oli esineille myös muodostettava virhearvio. Virhearvioiden ongelmaksi ilmeni arkeologisten esineiden käsityönä tehty luonne - Samalla tavalla tehdyt esineet voivat erota lievästi toisistaan, johtuen pienistäkin muutoksista käsien asennossa tai työkalujen käytössä. Tätä varten virhemalleihin sisällytettiin toleranssi esineille todennäköisimmille virheille. Tutkimuksen ruukkujen tapauksessa tämä käsitti toleranssin ruukkujen leveyden vaihtelulle, koska kyseiset ruukut oltiin valmistettu sorvia hyödyntäen. Lisätyllä virheellä, ja hyödyntäen aiemmassa vaiheessa profiileista hankittuja splineja, muodostettiin lievästi vaihtelevan muotoisia palasia eri osista skannattuja ruukkuja. Kyseisiä muodostettuja palasia voitiin edelleen hyödyntää samanlaisessa profiilianalyysissä kuin luvussa 3.1, edelleen kouluttamaan tunnistusalgoritmeja.

3.3 Muut hyödyntämiskeinot

Tutkimuksessa kivikautisen kylän mallintamisesta VR-ympäristössä (Puig ym. 2020) olemassaolevia löydettyjä artefakteja hyödynnettiin rakentamaan virtuaalinen ympäristö, jossa kävijät pystyivät havainnoimaan ympäristöä suoraan rekonstruoidussa ympäristössä. Mallit rakennettiin ammattilaismallintajan toimesta käsin Blender-työkalua käyttäen alkuperäisten artefaktien pohjalta, mutta kuitenkin myös artefaktien asiantuntijoiden kanssa yhteistyössä. Kokemusta myös täydennettiin muiden samalle aikakaudelle sijoittuneiden kaivausten dataa hyväksikäyttäen, muun muassa mallintamalla ympäristöön sopivia asukkaita, eläimiä ja kasveja. Mallien rakentamisen periaatteena oli luoda realistinen, muttei fotorealistinen ko-

kemus, eli mallit luotiin silmäperäisesti tarpeeksi hyväksi, muttei täydellisiksi kopioiksi esineistä. Tämän jälkeen malleja hyödynnettiin sijoittamalla se Unity-pelimoottoriin, jossa virtuaalinen tila voitiin rakentaa, ja tehdä se VR-tekniologialla koettavaksi. Tilaan luotiin myös interaktiivisia toimintoja, kuten minipelejä edistämään oppimista aikakaudesta, kuten pelilistämällä kivikautisten esineiden tunnistaminen taikka piityökalujen kaivertaminen.

4 Metodien analyysi

Tutkimuksissa käytetyt metodit antoivat tuloksia, mutta käytetyistä metodeista on tunnistettavissa erilaisia sekä hyötyjä että haittoja joko keskenään tai jo arkeologiassa käytettyihin menetelmiin. Näitä vertaillaan allaolevassa kappaleessa.

4.1 Hyödyt

Kaikissa tutkimuksissa on selkeästi nähtävissä tietokonemallinnuksen ja -simulaation tarjoama hyöty perinteiseen esineiden tutkimukseen: Rakennetun mallin analysointi ei vaaranna artefaktia läheskään yhtä paljon kuin itse artefaktin käsittely, ja antaa suorittaa vapaasti vaarallisempiakin kokeita hauraille esineille. Eheille esineille voidaan myös suorittaa kokeita, joista ei pystyttäisi saada luotettavia tuloksia pelkillä yksittäisillä esineiden osilla tai kokoelmilla.

Rengaspanssarien uudelleenrakennuksessa ja tutkimuksessa (Wijnhoven ja Moskvin 2020), (Wijnhoven, Moskvin ja Moskvina 2021) hyöty varsinaisen esineen tutkimukseen on mahdollisuus rakentaa tutkittavat esineet uudestaan kokonaisiksi, eheiksi malleiksi pelkistä hajanaisista osasista. Toinen hyöty on mahdollisuus suorittaa virtuaalisilla kopioilla varsinaista haurasta esinettä mahdollisesti vaurioittavia testejä, kuten venyvyyden mittausta. Kolmas hyöty on mahdollisuus testata ominaisuuksia, joita ei välttämättä voida mitata luotettavasti pelkillä osilla vailla kokonaista rekonstruoitua artefaktia, kuten pinta-alamittauksia, massaa tai peittävyyttä.

Roomalaisen torvisoittimen uudelleenrakennuksessa (Sun ym. 2020) hyöty varsinaisen, hajonneen esineen tutkimukseen on mahdollisuus saada muodostamalla ehjä malli soittimesta, approksimoimalla ja yhdistämällä palojen sijainnit, ja täydentämällä aukot. Tämä puolestaan mahdollistaa soittimen äänialan simulaation, jota ei luonnollisesti voida suorittaa sirpaloituneella esineellä. Varsinaisen rekonstruktioprosessin yrittäminen ja dokumentointi myös antaa keskeistä esitietoa mahdollisille seuraaville tutkimuksille, jotka voivat kehittää hyödynnettyjä metodeja entisestään.

Kivikautisen kylän virtuaalisen kokemuksen luonnissa (Puig ym. 2020) hyötyjä ovat mahdollisuus päästä vuorovaikuttamaan esitetyssä ympäristössä pelkkien esineiden havainnoinnin ja tilanteen kuvittelun sijaan, sekä mahdollisuus kokea täysi uudelleenluotu ympäristö pelkkien yksittäisten kuvien ja esineiden sijaan. Tilaan luodut eläinten ja ihmisasukkien mallit myös tekivät kokemuksesta yleisökyselyn perusteella todentuntuisemman, opettavaisemman ja kokonaisemman. Myös tilan virtualisointi mahdollistaa paremman säilyvyyden ja siirrettävyyden muille instituutioille tai ylipäättänsä aiheesta kiinnostuneille. Verrattuna fyysisiin malleihin, virtuaalinen ympäristö voidaan kopioida helposti, eikä kulu tai hajoa ajan myötä, poikkeuksena tietenkin säilytyslaitteen tai -ympäristön kunto. Ottaen huomioon projektin toteutuksen vapaasti saatavilla olevalla Unity-työkalulla, ympäristö voidaan tehdä jälkikäteen myös vapaasti käytettäväksi yksityishenkilöille tai muille toimijoille, ja voi edistää näin myös tiedon vapautta.

Parametrisoidun kirjaston luomisessa (Renno, Lanzotti ja Papa 2019) verrattuna perinteiseen esineiden tutkimiseen ja luokitteluun, tutkimuksessa kehitetyt menetelmät luovat pohjan analyysikirjastojen rakentamiselle, joiden avulla esimerkiksi koneoppimisalgoritmeja voidaan kouluttaa arvioimaan esineiden muotoja, ja sekä tunnistamaan että kategorisoimaan esineitä arvioiden pohjalta. Mahdolliset metodeja hyödyntävät ohjelmat voivat helpottaa työmäärää arkeologisten esineiden tunnistamisessa, ja tarjota samalla helposti kansainvälisellä tasolla jaettavan keinon toteuttaa sekä analyysia että tunnistamista verrattuna asiantuntijoiden hankkimiseen.

4.2 Haitat

Yleisesti, tietokonesimulaatio on työkalu joka luo kuvan sillä tarkkuudella, minkä käytetty algoritmi, iteraatiokerrat ja hyödynnetty data sallivat. Algoritmi on itsessäänkin matemaattinen malli, joka lähestyy totuutta ja jonka tarkkuus riippuu siitä, kuinka tarkaksi tekijät sen halusivat muodostaa itse omaamallaan tiedolla. Paremmat tulokset vaativat siis parempaa ymmärrystä käytetyistä algoritmeista, ja kykyä valita sopiva algoritmi siihen, mitä halutaan tutkia. Iteraatioita hyödyntävissä algoritmeissa täytyy myös pitää mielessä parantavatko ylimääräiset iteraatiot tuloksia, ja missä määrin. Iteraatioiden määrä luonnollisesti kasvattaa myös simulaatioihin kuluvaa aikaa, joten kompleksisuus ja käytetyn laitteiston tehokkuus

ovat tärkeitä muuttujia simulaation suorituksessa. Datan tarkkuus on myös luonnollisesti keskeinen lopputulosten tarkkuudessa, sillä algoritmit vain käsittelevät dataa - Jos datassa on selkeitä epätarkkuuksia, ne heijastuvat myös lopputuloksessa.

Rengaspanssarin parametrisoidussa rekonstruktiossa (Wijnhoven ja Moskvina 2020) ja seuraavassa lukuisten panssarien analyysissä (Wijnhoven, Moskvina ja Moskvina 2021) haitta varsinaisen esineen tutkimukseen on mahdollisten yksityiskohtien puuttuminen lopullisesta mallista - Parametrisoiduilla osilla suoritettu uudelleenrakennus toimii vain ja ainoastaan niin hyvin, kuinka paljon alkuperäisen artefaktin erilaisia osasia on saatu parametrisoitua, ja kuinka todenläheisesti kyseisiä osasia on saatu aseteltua. Jos tieto varsinaisesta artefaktista ja kaikista siihen kuuluvista osasista, kuten vaikkapa panssariin kuuluvan vyön puute, on vajavaista, mallissa samaiset puutteet tulevat näkymään. Tämän johdosta malleja hyödyntävistä tutkimuksista saatu tieto voi olla virheellistä. Toinen liittyvä haitta on myös, että jos ainoa esineestä oleva pala, jonka pohjalta uudelleenrakennus on tehty, on itsessään virheellinen, epämuodostunut tai kulunut, sen pohjalta saatu tieto ei myöskään ole välttämättä luotettavaa.

Roomalaisen instrumentin mallinnuksessa (Sun ym. 2020) ja rakennuksessa haitta varsinaisen esineen tutkimukseen on esineen pirstaloitumisesta johtuva tarvittu reikien täydennys, ja käytetyt fysiikan ilmiön mallinnusfunktiot. Koska esine ei ollut täysi, jouduttiin sen ylipäättäinen muoto arvioida sen osien skannausdatan perusteella muodostetusta keskiarvoisesta käyräsovituksesta, joka on vain datan ja algoritmin luotettavuuteen nojaava arvio. Verrannaisesti (Wijnhoven ja Moskvina 2020) saivat rakennettua esineensä palasista jotka heillä jo oli, eikä heidän täytynyt erikseen luottaa täydentämiseen. Arvioiden käyttäminen vastaisuudessa vaikutti sävelalueen arvioinnissa käytettyjen yhtälöiden parametreihin, joihin käytetyt mm. torviosan muoto ja soittimen pituus nojasivat juurikin muodostetun mallin tarkkuuteen. Simuloitu sävelalue on myös tästä johtuen arvio, jonka virheellisyys kasvaa käytettyjen arvojen virheellisyyden myötä moninkertaisesti.

Kivikautisen kylän virtuaalisen kokemuksen (Puig ym. 2020) haittoja ovat teknologisten rajoitteiden aiheuttama painotus realistisuuteen eikä fotorealistisuuteen, sekä lukuisista kaivauksista hankitun datan käyttö. Luonnollisesti osana museonäyttelyä, virtuaalinen kokemus ei saanut olla liian pitkä, ja käytettyjen mallien tarkkuus on luonnollisesti sidoksis-

sa virtuaalista ympäristöä suorittavan tietokoneen suoritustehoon. Arkeologisten kaivausten ongelmana on myös, että yhdestä kaivauksesta voidaan saada vain niin paljon tutkimusdataa, kuin kaivaukselta esineitä löydetään (Puig ym. 2020). Täten pakostikin käytettyä tietoa on täydennettävä kaikista samalla aikakaudella löydettyistä kaivauksista, sillä ehdolla että ymmärretään näiden olevan malleja, joista saatu tieto on juurikin edellämainittujen syiden vuoksi rajoittunutta. VR-tekniikan käyttäminen voi myös sulkea ulos käyttäjäkuntaa kuitenkin liikuntarajoitteisia jotka eivät voi käyttää ohjaimia, tai VR-ympäristössä liikesairaudelle herkkiä käyttäjiä.

Parametrisoidun kirjaston muodostamisessa (Renno, Lanzotti ja Papa 2019) ilmeneviä haittoja ovat tekniikan sovellusten puute, ja etenkin koneoppimisen sovelluksissa vaaditut resurssit ja luotettavuus. Tutkimus kartoitti ja muodosti metodologian oppimiskirjastojen muodostamiseen, muttei kehittänyt varsinaisia sovelluksia taikka ottanut kantaa niiden tekemiseen. Kurvien ja sirpaleiden asettelun pohjalta tehtävä arviointi kärsii myös samoista ongelmista kuin (Sun ym. 2020), jossa suoraan huomattiin, että esineen arviointi vaikutti huomattavasti simulaatioon. Mahdollisissa koneoppimista ja muodostettuja oppimiskirjastoja hyödyntävissä sovelluksissa ongelmana on koneoppimisen tarve oppia. Vaikka kirjasto tarjoaa dataa josta oppia, koneoppimisen tehokkuus riippuu saatavilla olevien järjestelmäresurssien ja tehtyjen sovellusten tehokkuuksista. Mitä vähemmän sovelluksella on laskentatehoa, sitä hitaammin se voi oppia, ja jos sovellus itse ei ole tehokkaaksi luotu, voi sen toiminta pullonkaulantua. Koneoppimisen pohjalta luodut mallit tarvitsevat myös kuitenkin asiantuntijoita sekä todentamaan luotujen mallien tarkkuuden, että ohjaamaan sovelluksen oppimisen kehitystä.

5 Johtopäätökset

Rengaspanssarin rekonstruktiossa (Wijnhoven ja Moskvin 2020) mainitaan, että rakenteiden parametrisoinnilla saadaan rakennettua tarkempi malli esineestä. Verrattuna tosin rekonstruoituihin esineisiin, kuten (Renno, Lanzotti ja Papa 2019), on nähtävissä että yksittäiset esineet voidaan rekonstruoida yleisellä tasolla, mutta spesifit koristeet, kuten kaiverrukset saattavat jäädä mallintamatta, jos sopivia osia ei saada, tai jos oletus valmiin esineen rakenteesta ei ole tarkka. Ottaen tosin huomioon samalla tavalla rekonstruoituja panssareja vertailevan jatkotutkimuksen (Wijnhoven, Moskvin ja Moskvina 2021), rekonstruktio mahdollistaa eheitten esineiden välisen vertailun, joka olisi paljon virhealttiimpaa ja vaikeampaa erikokoisilla, hajonneilla esineillä.

Roomalaisen soittimen rekonstruktio (Sun ym. 2020) puolestaan osoitti, että vaikka esine voidaankin täydentää ja saada soimaan sovituksia, algoritmeja ja kaavoja käyttäen, nämä kaikki ovat parhaimmillaan empiirisen tiedon perusteella luotettavia arvauksia - Keskiarvoja, ja laskennallisia malleja. Lukuisten lopputuloksen osien tarkkuus nojaa aiemmin tehdyn työn ja hankitun datan tarkkuuteen. Mutta, työ antaa kuitenkin viitteitä totuuteen, ja täydentää kuvaa, vaikkei täydennäkään sitä kokonaisvaltaisesti.

Kivikautisen kylän virtualisointi (Puig ym. 2020) puolestaan osoitti, kuinka yksittäisten esineiden tuominen virtuaaliseen, kokonaisvaltaisempaan kokemukseen täydentää havainnoitsijan käsitystä tilanteesta, etenkin rinnastettuna varsinaisten esineiden näyttämisestä. Vaikka tila olikin realistisuuden pyrkivä, se, että sitä ei väitetty muuksikaan kuin realistisuuden pyrkiväksi täten myös kommunikoi havainnoitsijalle että tilan on tarkoitus täydentää kokemusta, ja täten täydentää kuvaa historiallisesta tilasta.

Parametrisoitu kirjasto (Renno, Lanzotti ja Papa 2019) loi pohjan ja metodologian muodostamaan kirjastoja avustamaan ja mahdollisesti automatisoimaan samankaltaisten esineiden tunnistamista. Muodostettua metodologiaa voidaan puolestaan hyödyntää uudelleenrakentamaan yksinkertaisia arvioita kokonaisten esineiden profiileista, joiden pohjalta voidaan luoda karkea arvio kokonaisen esineen muodosta profiilin pyörähdyskappaleena.

Yhteenvedon, arkeologisten esineiden tutkimuksessa tietokoneavusteisuus on uusia lähes-

tymistapoja mahdollistava ulottuvuus, jonka tutkiminen ja kehittäminen entisestään on perusteltua. Analysoidut tutkimukset ovat osoittaneet selkeitä hyötyjä verrattuna perinteisiin keinoihin tutkia arkeologisia löydöksiä, olivat ne sitten uudelleenrakennuksen, analyysin, opettamisen tai kategorisoinnin saralla. On tosin tärkeää ottaa huomioon, että tietokone on työkalu joka tarjoaa erilaisia lähestymistapoja, eikä yleismaailmallinen ratkaisu. Kuin työkalua, sitä tulee käyttää kun sopiva mahdollisuus ilmenee. Mutta ennen kaikkea tulee myös tietää mihin sen käyttö soveltuu parhaiten. Kaikissa käsitellyissä tutkimuksissa ilmeni tietokoneen luotettavuuden riippuvuus käytetyistä resursseista ja työkaluista. Ilman tarpeellista tietoa toimiviksi todistetuista käyttökeinoista taikka taitoa hyödyntää niitä, tulokset ovat vaarassa jäädä virheellisiksi, tai täysin epäluotettaviksi. Vain ymmärtämällä eri lähestymistavat ja niiden hyödyt ja heikkoudet, kuin myös kehittämällä prosesseja eteenpäin ja etsimällä uusia, voidaan tietokoneen hyöty arkeologian työkaluna realisoida.

Lähteet

Martin Holzkothen, Michael Korn. *Point set registration images*. "http://docs.pointclouds.org/trunk/group__registration.html". Alternative sources https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Registration_outdoor.png and https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Registration_closeup.png.

Puig, Anna, Inmaculada Rodríguez, Josep Ll Arcos, Juan A Rodríguez-Aguilar, Sergi Cebrián, Anton Bogdanovych, Núria Morera, Antoni Palomo ja Raquel Piqué. 2020. "Lessons learned from supplementing archaeological museum exhibitions with virtual reality". *Virtual Reality* 24 (2): 343–358.

Renno, Fabrizio, Antonio Lanzotti ja Stefano Papa. 2019. "A statistical approach to simulate instances of archeological findings fragments". *Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems* 13 (1): 46–64.

Sun, Zezhou, Antonio Rodà, Emily Whiting, Emanuela Faresin ja Giuseppe Salemi. 2020. "3D virtual reconstruction and sound simulation of an ancient roman brass musical instrument". Teoksessa *International Conference on Human-Computer Interaction*, 267–280. Springer.

Wijnhoven, Martijn A, ja Aleksei Moskvín. 2020. "Digital replication and reconstruction of mail armour". *Journal of Cultural Heritage* 45:221–233.

Wijnhoven, Martijn A, Aleksei Moskvín ja Mariia Moskvina. 2021. "Testing archaeological mail armour in a virtual environment: 3rd century BC to 10th century AD". *Journal of Cultural Heritage* 48:106–118.

(Wijnhoven ja Moskvín 2020, ss. 221–233) <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.04.010>

(Wijnhoven, Moskvín ja Moskvina 2021, ss. 106–118) <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.12.002>

(Sun ym. 2020, ss. 267–280) <https://rdcu.be/cFL8E>

(Renno, Lanzotti ja Papa 2019, ss. 46–64) https://doi.org/10.14313/JAMRIS_1-2019/6

(Puig ym. 2020, ss. 343–358) <https://rdcu.be/cFL7y>

(Martin Holzkothen) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Registration_outdoor.png https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Registration_closeup.png